MÜHENDİSLİK

ALANINDA ULUSLARARASI ARAŞTIRMA VE DEĞERLENDİRMELER

CİLT 1

EDİTÖRLER

DOÇ. DR. NURETTİN AKÇAKALE

DOÇ. DR. SELAHATTİN BARDAK

ARALIK 2023

SERÜVEN YAYINEVİ

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2023

ISBN • 978-625-6644-01-4

© copyright
Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.
The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing
Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak
Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA
Telefon / Phone: 05437675765
web: www.seruvenyayinevi.com
e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume
Sertifika / Certificate No: 47083

MÜHENDİSLİK

Alanında Uluslararası Araştırma ve Değerlendirmeler

Cilt 1

Aralık 2023

Editörler

DOÇ. DR. NURETTİN AKÇAKALE
DOÇ. DR. SELAHATTİN BARDAK

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

KERAS FUNCTIONAL API VE İLERİ DERİN ÖĞRENME DİNAMİKLERİ: UYGULAMALI BİR KILAVUZ

Erhan KAVUNCUOĞLU..... 1

Bölüm 2

YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARININ AVRUPA'DAKİ PERFORMANSININ İSPANYA ÜZERİNDEN İNCELENMESİ

Mehmet Çağrı KIZILTAŞ 27

Bölüm 3

CNC FREZELEMEDE HİBRİD YAPAY ZEKA SİSTEMİ KULLANARAK ADAPTİF KONTROLLÜ OPTİMİZASYON SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Yusuf FEDAİ, Ali ÜNÜVAR..... 47

Bölüm 4

İŞARET DİLİ ALGILAMADA YAPAY ZEKANIN YERİ

Funda AKAR, Veli ŞİMŞEK 73

Bölüm 5

BİR YUMURTA VERİ SETİNİN K-NN MAKİNE ÖĞRENME ALGORİTMASIYLA SINIFLANDIRILMASI

Ahmet ÇELİK, Emre TEKİN.....103

Bölüm 6

ŞARZ EDİLEBİLİR PİLLERİN BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİNDE DURUM TAHMİNİ İÇİN YİNELEMELİ SİNİR AĞLARININ KULLANIMI

Mehmet KURUCAN, Mete ÖZBALTAN 119

Bölüm 7

KURAL TABANLI BULANIK MANTIK DESTEKLİ RİSK DEĞERLENDİRME VE SINIFLANDIRMA UYGULAMASI

Aslı ACERCE, Tülay KORKUSUZ POLAT 135

Bölüm 8

KARACİĞER BOZUKLUĞU HASTALIĞININ SINIFLANDIRILSMASINDA JAYA OPTİMİZASYON ALGORİTMASI

Nagihan YAĞMUR 151

Bölüm 9

TÜRKİYE'DEKİ UYGUN MALİYETLİ BEYİN-BİLGİSAYAR ARAYÜZ (BBA) SİSTEMLERİNİN DEĞERLENDİRMESİ

Sefa AYDIN, Mesut MELEK, Levent GÖKREM 173

Bölüm 10

E-TİCARET SİTELERİNDE MOBİLYA ÜRÜNLERİNİN BEĞENİ DERECESİNE GÖRE YORUMLARDA KULLANILAN KELİMELERİN ANALİZİ

Timuçin BARDAK, Selahattin BARDAK 191

Bölüm 11

OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE GÖVDE TASARIM PROSESİ

Mehmet ÇALIŞKAN 203

Bölüm 12

ELEKTRİKLİ VE HİBRİT ARAÇLARDA KULLANILAN LİTYUM İYON BATARYALAR VE ÖZELLİKLERİ

Haluk Güneş, M. Akif Kunt 223

Bölüm 13

ZEMİN SIVILAŞMASI: TEHLİKELERİ, OLUŞUM MEKANİZMALARI VE MÜHENDİSLİK ÇÖZÜMLERİ

Aykut Özpolat, H.Suha Aksoy.....237

Bölüm 14

NİKEL-KOBALT KOMPOZİT ATIĞININ DUVAR KAROSU SIR REÇETELERİNDE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Yiğit BALBAĞ, Hale YILDIZAY, Eda TAŞÇI 261

Bölüm 15

KAOLİN VE METAKAOLİN ESASLI GEOPOLİMERLERİN MORFOLOJİK VE MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU

Ceyda BİLGİÇ , Şafak BİLGİÇ.....275

Bölüm 16

DURSUNBEY (BALIKESİR) BÖLGESİNDEKİ SİLİSLİ SÜSTAŞLARINDA GÖZLENEN FARKLI DOKUSAL ÖZELLİKLER

Meltem GÜRBÜZ 289

Bölüm 17

ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİNDE KATMAN KALINLIKLARININ GÜÇ DÖNÜŞÜM VERİMLİLİĞİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mehmet Fatih GÖZÜKIZIL 311

Bölüm 18

YÜKSEK MANEVRA KABİLİYETİNE SAHİP İNSANSIZ HAVA ARACI ÜRETİMİNDE ÖNEMLİ PARAMETRELER

Ahmet Aziz Bilgin, Ömer Melih Sevici, Halit Arat.....325

Bölüm 19

EKLEMELİ İMALAT İLE İMAL EDİLMİŞ METAL ALAŞIMLARDA LAZER PARLATMA İŞLEMİ VE PRENSİPLERİ

Tolgahan ERMERGEN..... 343

Bölüm 20

GELECEĞİN ENERJİ KAYNAĞI: GÜNEŞ ENERJİSİ, GÜNEŞ ENERJİSİ UYGULAMALARI, FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİ VE ARICILIKTA KULLANIMI

Sinem KILIÇKAP IŞIK *369*

Bölüm 21

TEMEL UÇUŞ PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASINDA KULLANILAN SENSÖRLER ÜZERİNE

Harun ÇELİK *387*

Bölüm 22

HİDROLİK ÇATLATMA: TARİHSEL GELİŞİMİ VE TÜRKİYE'DEKİ UYGULAMALARI

İnci TÜRK TOĞRUL *409*

Bölüm 23

DOĞAL GAZ KULLANIMIYLA HAVA EMİSYONLARININ DEĞİŞİMİ: MARDİN İLİ

Abdulkadir AYANOĞLU, Gizem AYAS *429*

Bölüm 24

HİDROJEN DEPOLAMA VE TAŞIMA

Yelda ALTINSOY *441*

Bölüm 25

ATIK ISI GERİ KAZANIMI VE PROSES UYGULAMA ANALİZİ

Samet Giray TUNCA, Abdullah AKBULUT *459*

Bölüm 26

AKILLI ŞEHİRLER VE ÇOK YÖNLÜ KARAR VERME TEKNİKLERİ

Muhammet ANNAGURDOV, Serpil AYDIN *479*

Bölüm 27

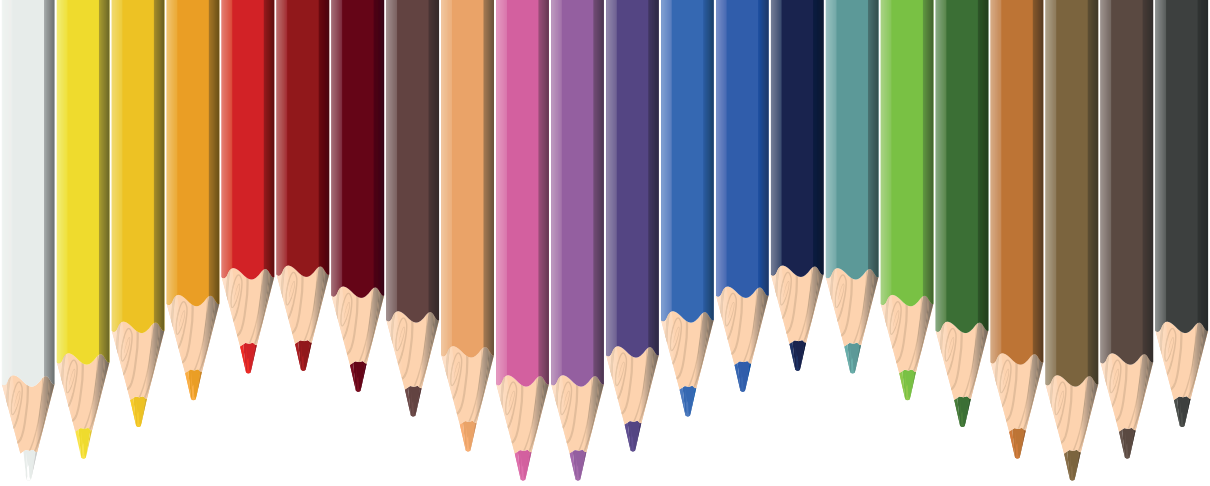
HER YÖNÜYLE ALÜMİNYUM

Gülşah ÖNER *497*

Bölüm 28

ZAMAN ETÜDÜ TEKNİĞİ İLE İŞ ÖLÇÜMÜ: SEKTÖREL BİR UYGULAMA

Özlem ÇOMAKLI SÖKMEN *511*



Bölüm 1

KERAS FUNCTIONAL API VE İLERİ DERİN ÖĞRENME DİNAMİKLERİ: UYGULAMALI BİR KILAVUZ

Erhan KAVUNCUOĞLU[1]

1 Dr. Öğretim Üyesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Gemerek Meslek Yüksekokulu, 58840, Sivas Türkiye, ORCID: 0000-0001-6862-2891

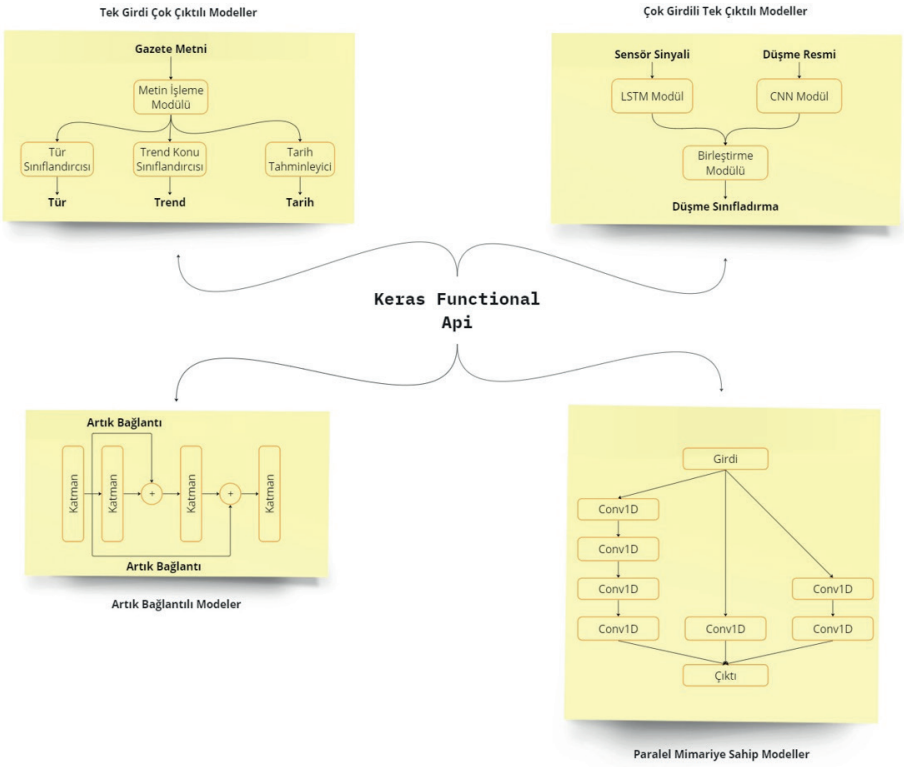
Giriş

Yapay sinir ağları, derin öğrenme alanında büyük bir başarı elde etmiş ve pek çok uygulama alanında kullanılmaktadır. Keras, popüler bir derin öğrenme kütüphanesidir ve kullanımı kolay arayüzü sayesinde araştırmacılar ve mühendisler tarafından tercih edilmektedir. Keras'ın işlevsel API'si, model oluşturma sürecini daha esnek hale getiren bir araçtır. Bu bölümde, Keras Functional API'nin temel kavramlarını ve kullanımını öğreneceksiniz.

1. Keras Functional API

Keras, derin öğrenme modelleri oluşturmak için kullanılan popüler bir açık kaynaklı kütüphanedir. Keras'ın iki ana API'si vardır: Sequential API ve Functional API. Sequential API, modelleri sıralı bir şekilde birbirine bağlı katmanlardan oluşturmak için kullanılırken, Functional API daha esnek bir yaklaşım sunar.

Functional API, kullanıcılara katmanları istedikleri gibi birleştirme ve özelleştirme özgürlüğü verir [1]. Bu, kullanıcıların girdi verilerinin farklı katmanlardan geçerek işlendiği ve sonuç çıktısının bu işlemlerin kombinasyonuyla elde edildiği özelleştirilmiş yapılar oluşturmasına olanak tanır. Functional API'nin bir diğer önemli özelliği, katmanları dikkatlice bağlama esnekliğidir [2]. Kullanıcılar, ara katmanları farklı giriş veya çıkışlara bağlayabilir ve böylece bu katmanlar arasında etkileşim sağlayabilir [2]. Örneğin, bir katmanın çıktısı doğrudan modelin başka bir yerindeki bir katmana giriş olarak kullanılabilir. Bu, modelin daha karmaşık ve özgün yapılar oluşturmasına olanak tanır [2]. Functional API'nin sağladığı esneklik ve özelleştirme imkanları, kullanıcıları geleneksel yapıların dışında düşünmeye teşvik eder [3]. Yaratıcı araştırmacılar ve yazılım geliştiriciler, bu API sayesinde kendi ihtiyaçlarına uygun özgün ve karmaşık derin öğrenme modelleri oluşturabilirler [3]. Bu özellikler, yapay zekanın daha karmaşık ve özgün alanlarda uygulanmasını sağlar [4]. Araştırmacılar, Functional API'nin sunduğu geniş yelpaze sayesinde farklı veri tiplerini işleyebilir (Şekil 1), özelleştirilmiş katman yapıları oluşturabilir ve daha karmaşık derin öğrenme model deneyleri gerçekleştirebilirler [5]. Bu da bilimsel ve teknolojik ilerlemeyi hızlandırır ve yeni keşiflere yol açar [6].



Şekil 1. *Keras Functiona Api ile uygulanabilir mimariler*

Ayrıca, Keras Functional API'nin derin öğrenme ve sinir ağı modellemesi alanında temel bir rol oynadığı ve çeşitli araştırmalarda geniş çapta kullanıldığı görülmektedir. Araştırmalar incelendiğinde, Demkiv [7], yönlendirilmiş döngüsel grafiklerle modellerin uygulanması için Keras işlevsel API'nin yapılandırılmasındaki rolünü vurgular. Chicho & Sallow [3], Keras'ın TensorFlow tabanlı bir API olmasıyla sinir ağlarının tanıtımı, eğitimi ve analizini kolaylaştırdığını belirtir. Gelişmiş TensorFlow gibi altyapılarıyla Keras'ın kararlı performans ve basitlik sağladığına dikkat çekerler, bu da Alam ve arkadaşları tarafından desteklenir. Gerçek dünya uygulamalarında, Lee & Song [8] Keras'ın Python tabanlı sinir ağı API'ları arasındaki popülerliğine ve Derin Sinir Ağı parametre tahmin süreçlerindeki etkinliğine vurgu yapar. Ayrıca, Meiziniu ve arkadaşları [2] ile Kunstmann ve arkadaşları [9], derin öğrenme kütüphanelerinde model oluşturmada ve hiperparametre ayarlama süreçlerinde Keras API'lerinin oynadığı önemli role dikkat çeker. Bu durum, Keras'ın derin öğrenme modellerinin geliştirilmesi ve optimize edilmesindeki kritik önemini vurgular. Özetlemek gerekirse, Keras işlevsel API'si, derin öğrenme ve pratik uygulamalar bağlamında sinir ağı modellerinin şekillendirilmesi, uygulanması ve iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılmasıyla önemini kanıtlar.

Bu bölümün geri kalanında, Keras işlevsel API'si kullanılarak derin öğ-

renme modellerinin nasıl oluşturulacağını örnek kodlar ile göreceğiz. Son olarak, uçtan uca uygulamalı örneklerle bölümü tamamlayacağız.

2. Derin Öğrenme Mimarisinde Kullanılan Katmanlar ve Özellikleri

2.1. Giriş Katmanları

Giriş katmanları, Keras Functional API içerisinde, modele dış dünyadan veri girişi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu katmanlar, genellikle shape parametresi kullanılarak belirlenen veri boyutunu tanımlamak için özelleştirilebilir. Veri boyutunun belirtilmesi, modelin başlangıcında hangi tür giriş verilerini işleyeceğini ve model mimarisini bu verilere göre şekillendireceğini belirlemek açısından kritiktir [10].

Giriş katmanları, kullanıcının belirttiği veri boyutlarına uygun olarak özelleştirilebilmekte ve bu, modelin farklı tipteki veri girişleriyle etkileşimde bulunma yeteneğini artırmaktadır. Shape parametresi, özellikle veri setinin yapısına uygun bir giriş katmanı oluşturmak isteyen kullanıcılar için önemli bir araçtır.

Bu esneklik, modelin çeşitli veri kaynaklarından bilgi alabilme yeteneğini artırarak geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Örneğin, bir görüntü işleme modelinde giriş katmanı, görüntülerin boyutlarına ve kanal sayısına uygun olarak şekillendirilebilir. Bu sayede, model, spesifik veri türlerini ele almak ve çeşitli veri girişlerine adapte olmak konusunda daha etkili bir performans sergileyebilir.

```
# Kütüphanalerin yüklenmesi
from keras.layers import Input
# Giriş katmanını oluşturma
input_layer = Input(shape=(input_dim,))
```

Blok 1. *Giriş katmanı.*

Yukarıdaki örnek, Keras kütüphanesinden Input modülünü içeriyor. Kod, bir giriş katmanını oluşturmak için kullanılıyor (Blok 1).

Burada, Input modülü shape parametresiyle birlikte kullanılıyor. shape parametresi, giriş verisinin boyutunu belirtmek için kullanılır.

- **input_layer:** Oluşturulan giriş katmanını temsil eder. Bu katman, ağa veri girişi sağlamak için kullanılır.
- **Input(shape=(input_dim,)):** Keras'ta giriş katmanı oluşturur. shape parametresi, giriş verisinin boyutunu belirtir. input_dim genellikle giriş verisinin özellik sayısını temsil eder. Bu değer, kod içinde belirtilmelidir.

2.2. Gizli Katmanlar

Gizli katmanlar, Keras Functional API içinde modelin hesaplama katmanlarını ifade eder. Bu katmanlar, genellikle önceki katmanın çıktısını alarak matematiksel işlemler uygular ve ardından yeni bir çıktı üretir. Bu süreç, derin öğrenme modellerinin temelini oluşturur ve her bir gizli katman, gelen veriyi işleyerek ardışık adımlar halinde bilgiyi daha yüksek seviyelerde temsil etmeye çalışır [11].

Her gizli katman, içinde bulunduğu problem alanına uygun olarak özelleştirilebilir. Bu katmanlar, öğrenme sürecinde modelin karmaşıklığını artıran ve veri setindeki desenleri daha iyi öğrenmesine olanak sağlayan yapı taşlarıdır. Örneğin, bir sinir ağı modelinde, gizli katmanlar farklı aktivasyon fonksiyonları ve farklı nöron sayılarıyla yapılandırılabilir. Bu da modelin, farklı veri yapılarına uyum sağlayabilmesini ve genelleme yeteneğini artırabilir. Bu gizli katmanlar, veri işleme aşamasında çeşitli dönüşümler uygulayarak, modelin giriş verilerinden daha soyut özellikler çıkarmasına olanak tanır.

```
# Kütüphanalerin yüklenmesi
from keras.layers import Dense
# Gizli katmanı oluşturma
hidden_layer = Dense(units=64, activation='relu')(input_layer)
```

Blok 2. *Dense modülü ile gizli katman oluşturma.*

Yukarıdaki örnek ile Keras kütüphanesin de bulunan Dense modülünü kullanarak bir gizli katman oluşturuluyor (Blok 2). Burada,

- **hidden_layer**: Oluşturulan gizli katmanı temsil eder. Bu katman, ağın öğrenme sürecinde veriye dair karmaşıklığı öğrenmek için kullanılır.
- **Dense(units=64, activation='relu')**: Keras'ta gizli katman oluşturur. units parametresi, katmandaki nöron sayısını belirtir. activation parametresi, katmanın aktivasyon fonksiyonunu tanımlar. 'relu', gizli katman için Rectified Linear Unit (ReLU) aktivasyon fonksiyonunu temsil eder.

2.3. Çıkış Katmanları

Çıkış katmanları, bir modelin en nihai sonucunu ifade eden katmanlardır. Genellikle derin öğrenme problemlerinde, çıkış katmanları problemin doğasına göre farklı aktivasyon fonksiyonlarıyla yapılandırılabilir. Sınıflandırma problemlerinde sıkça kullanılan bir yöntem, çıkış katmanında softmax aktivasyon fonksiyonunu tercih etmektir [12].

Softmax fonksiyonu, özellikle sınıflandırma problemlerinde kullanılan bir aktivasyon fonksiyonu olarak yaygın bir şekilde benimsenmiştir. Bu fonksiyon, bir veri kümesinin farklı sınıflar arasında olasılıklarını hesaplamak için kullanılır. Örneğin, çoklu sınıf problemlerinde çıkış katmanı, verilen özelliklerin hangi sınıfa ait olduğunu belirlemek için softmax aktivasyon fonksiyonunu kullanabilir.

Çıkış katmanları, modelin veri setine özgü olarak yapılandırılabilir. Örneğin, regresyon problemlerinde ise çıkış katmanı farklı bir aktivasyon fonksiyonuyla yapılandırılabilir; lineer aktivasyon fonksiyonu bu tür problemlerde kullanılabilir ve çıkış değerini doğrudan veri setiyle uyumlu bir şekilde çıkarabilir. Bu esneklik, farklı problemlere ve veri setlerine uygun çıkış katmanlarının tasarlanabilmesine olanak sağlar.

```
# Kütüphanalerin yüklenmesi
from keras.layers import Dense
# Çıkış katmanını oluşturma
output_layer = Dense(units=output_dim, activation='softmax')(hidden_
layer)
```

Blok 3. *Dense modülü ile çıkış katmanı oluşturma.*

Yukarıdaki örnekte, Keras kütüphanesinden Dense modülünü kullanarak bir çıkış katmanı oluşturuluyor (Blok 3). Burada,

- **output_layer:** Oluşturulan çıkış katmanını temsil eder. Bu katman, ağın sonucunu üretmek ve istenen çıkış formatına dönüştürmek için kullanılır.
- **Dense(units=output_dim, activation='softmax'):** Keras'ta çıkış katmanı oluşturur. units parametresi, katmandaki nöron sayısını belirtir. activation parametresi, katmanın aktivasyon fonksiyonunu tanımlar. 'softmax', çıkış katmanı için softmax aktivasyon fonksiyonunu ifade eder.

3. Model Oluşturma

Model oluşturmak için Functional API, giriş ve çıkış katmanlarını birleştirerek Model sınıfını kullanır. Bu sınıf, giriş verilerini alan ve belirlenen katmanlar aracılığıyla çıkış üreten bir yapı oluşturmak için kullanılır. Giriş katmanı, modele dış dünyadan veri sağlar ve modelin işleyeceği temel veri girişini temsil ederken, çıkış katmanı ise modele özgü sonuçları elde etmek için kullanılır.

Model sınıfı, belirli bir problem veya uygulama için özelleştirilmiş bir yapı oluşturulması için temel bir araçtır. Örneğin, derin öğrenme modellerinin çeşitli katmanlarının birleştirilmesiyle oluşturulan bu yapı, karmaşık

problemleri çözmek üzere tasarlanabilir. Giriş ve çıkış katmanları arasındaki bu yapılandırma, veri işleme ve sonuç üretme sürecini yönetir ve modelin genel mimarisini belirler.

Model sınıfının kullanımı, belirli bir veri seti veya probleme göre uygun katmanların seçilmesini ve bu katmanların bir araya getirilerek modelin oluşturulmasını sağlar. Bu sayede, çeşitli derin öğrenme problemleri için özelleştirilmiş, işlevsel ve etkili modeller geliştirilebilir.

```
# Kütüphanalerin yüklenmesi
from keras.models import Model
# Modeli oluşturma
model = Model(inputs=input_layer, outputs=output_layer)
```

Blok 4. *Model oluşturma.*

Yukarıdaki örnekte, Keras kütüphanesinin Model modülü kullanılarak bir model oluşturuluyor (Blok 4). Buradan,

- **model**: Oluşturulan modeli temsil eder. Bu model, giriş ve çıkış katmanları arasındaki ilişkiyi tanımlar ve ağı bir araya getirir.
- **Model(inputs=input_layer, outputs=output_layer)**: Keras'ta bir model oluşturur. inputs parametresi, modelin giriş katmanını belirtir. outputs parametresi ise modelin çıkış katmanını belirtir.

4. Özelleştirilmiş Modeller

Functional API, model oluşturma sürecinde esneklik sunarak karmaşık yapılar oluşturmanızı sağlar. Bu yapı, birden fazla giriş veya çıkışa sahip olan modellerin tasarlanmasına olanak tanır. Özellikle, geleneksel model oluşturma tekniklerinden farklı olarak, Functional API kullanıcıya farklı bileşenleri birleştirme ve özelleştirme imkanı sunar.

Bu esneklik, kullanıcıların özgün ve spesifik ihtiyaçlarına uygun modeller inşa etmesine olanak tanır. Örneğin, birden fazla veri kaynağından gelen bilgilerin işlenmesi gereken durumlarda bu API, bu verileri ayrı ayrı işleyip birleştirecek yapıları oluşturabilir. Ayrıca, çıkışları birleştirerek farklı sonuçları bir araya getirebilecek yapıları da tasarlamak mümkündür.

Bu özellikler, özellikle karmaşık problemleri çözmek için geniş bir uygulama alanı sunar. Örneğin, çoklu veri kaynaklarından gelen bilgileri bir araya getiren veya birden fazla sonuç üreten yapay zeka modelleri geliştirmek isteyen kullanıcılar için önemli bir avantaj sağlar. Bu API, model oluşturma sürecinde kullanıcılara geniş bir esneklik sunarak farklı ve özelleştirilmiş modellerin oluşturulmasını mümkün kılar.

```
# Kütüphanalerin yüklenmesi
from keras.layers import Input, Dense, concatenate
# İki giriş katmanını oluşturma
input1 = Input(shape=(input_dim1,))
input2 = Input(shape=(input_dim2,))
# İlk gizli katmanı oluşturma
hidden1 = Dense(units=64, activation='relu')(input1)
# İkinci gizli katmanı oluşturma
hidden2 = Dense(units=128, activation='relu')(input2)
# Katmanları birleştirme
merged = concatenate([hidden1, hidden2])
# Çıkış katmanını oluşturma
output = Dense(units=output_dim, activation='softmax')(merged)
# Modeli oluşturma
model = Model(inputs=[input1, input2], outputs=output)
```

Blok 5. *Keras kütühanesinde bulunan modül nesnesi kullanılarak çok katmanlı model oluşturma.*

Yukarıdaki örnekte, Keras kütüphanesinden çeşitli modüller kullanılarak bir model oluşturuluyor (Blok 5). Buradan,

- **input1**: İlk giriş katmanını temsil eder. Bu katman, birinci set giriş verisini alır ve modele iletilir.
- **input2**: İkinci giriş katmanını temsil eder. Bu katman, ikinci set giriş verisini alır ve modele iletilir.
- **hidden1**: İlk gizli katmanı temsil eder. Bu katman, ilk giriş verisiyle ilişkilendirilmiştir ve veri üzerinde belirli dönüşümleri gerçekleştirir.
- **hidden2**: İkinci gizli katmanı temsil eder. Bu katman, ikinci giriş verisiyle ilişkilendirilmiştir ve veri üzerinde belirli dönüşümleri gerçekleştirir.
- **merged**: Birleştirilmiş katmanı temsil eder. İki gizli katmanın çıktılarını birleştirir.
- **output**: Çıkış katmanını temsil eder. Birleştirilmiş katmanın çıktısını alır ve sonuç üretir.
- **Model(inputs=[input1, input2], outputs=output)**: Keras'ta bir model oluşturur. inputs parametresi, modelin giriş katmanlarını belirtir. outputs parametresi ise modelin çıkış katmanını belirtir.

5. Paylaşılan Katmanlar

Functional API, katmanların paylaşılmasını kolaylaştırarak farklı yollar arasında bilgi paylaşımına imkan verir. Paylaşılan katmanlar, ağırlıkları ve önyargıları aynı olan fakat farklı yollar arasında bilgi alışverişine izin veren yapı taşlarıdır.

Bu özellik, model içindeki farklı bileşenler arasında bilgi akışını kolaylaştırır. Örneğin, aynı veri seti veya özellikler farklı noktalarda model tarafından kullanılabilir ve bu katmanlar arası bilgi paylaşımı, modelin daha tutarlı ve etkili bir şekilde öğrenmesine olanak sağlar.

Paylaşılan katmanlar, özellikle özelleştirilmiş yapılar oluşturmak ve veri işleme sürecinde farklı dallarda bilgi paylaşımını desteklemek için kullanılabilir. Bu, modelin farklı veri kaynaklarından gelen bilgiyi entegre etmesini, farklı yollar arasında bilgi alışverişini sağlamasını ve bu sayede daha kapsamlı sonuçlar üretmesini mümkün kılar. Bu esneklik, özellikle karmaşık problemleri çözmek için modeller geliştiren kullanıcılar için önemli bir avantaj sunar.

```
# Kütüphanalerin yüklenmesi
from keras.layers import Input, Dense
from keras.models import Model
# Paylaşılan bir gizli katman oluşturma
shared_layer = Dense(units=64, activation='relu')
# İki farklı giriş katmanını oluşturma
input1 = Input(shape=(input_dim1,))
input2 = Input(shape=(input_dim2,))
# İlk yolu uygulama
path1 = shared_layer(input1)
# İkinci yolu uygulama
path2 = shared_layer(input2)
# Yolları birleştirme
merged = concatenate([path1, path2])
# Çıkış katmanını oluşturma
output = Dense(units=output_dim, activation='softmax')(merged)
# Modeli oluşturma
model = Model(inputs=[input1, input2], outputs=output)
```

Blok 6. *Farklı katmanların paylaşımlı birleşimi ile model oluşturma.*

Yukarıdaki örnekle, Keras kütüphanesinden çeşitli modüller kullanılarak bir model oluşturuluyor. Mimari, paylaşılan bir gizli katman, iki farklı giriş katmanı ve bu katmanları birleştiren bir çıkış katmanını içeriyor (Blok 6).

- **shared_layer**: Paylaşılan bir gizli katmanı temsil eder. Bu katman, iki farklı giriş yolunda kullanılacak ve aynı ağırlıkları paylaşacaktır.

- **input1**: İlk giriş katmanını temsil eder. Bu katman, birinci set giriş verisini alır ve modele iletilir.

- **input2**: İkinci giriş katmanını temsil eder. Bu katman, ikinci set giriş verisini alır ve modele iletilir.

- **path1**: İlk yol olarak adlandırılan giriş katmanı üzerindeki işlemleri temsil eder. shared_layer ile input1 girişi arasında gerçekleştirilir.

- **path2**: İkinci yol olarak adlandırılan giriş katmanı üzerindeki işlemleri temsil eder. shared_layer ile input2 girişi arasında gerçekleştirilir.

- **merged**: Birleştirilmiş katmanı temsil eder. path1 ve path2 çıkışlarını birleştirir.

- **output**: Çıkış katmanını temsil eder. Birleştirilmiş katmanın çıktısını alır ve sonuç üretir.

- **Model(inputs=[input1, input2], outputs=output)**: Keras ile bir model oluşturulur. inputs parametresi, modelin giriş katmanlarını belirtir. outputs parametresi ise modelin çıkış katmanını belirtir.

6. İleriye ve Geriye Akış

Keras Functional API, veri işleme sürecini hem ileri yönde hem de geriye doğru yönde yönetebilme özelliğine sahiptir. İleri yönlü veri akışı, modelin girişten çıkışa doğru hesaplamalarını yaparak verilerin işlenmesini sağlar. Bu aşama, modelin temel olarak girdi verilerini alıp işleyerek sonuç ürettiği adımdır.

Geriye doğru yayılım ya da geri akış ise, modelin eğitim sürecindeki önemli bir aşamadır. Bu aşama, modelin öğrenme yeteneğini sağlayan temel bir mekanizmadır. Modelin kayıp (loss) fonksiyonuna göre gradyanların hesaplanması ve bu gradyanların ağırlıkların güncellenmesinde kullanılması sürecini ifade eder. Yani, model eğitilirken, geri akış mekanizması, elde edilen sonuçların gerçek değerlerden ne kadar uzak olduğunu ölçerek bu hataları azaltmaya çalışır ve bu doğrultuda ağırlıkları günceller.

Bu ileri ve geri yönlü akışlar, derin öğrenme modelinin eğitim aşamasında büyük önem taşır. İleri akış, verilerin modele aktarılmasını, işlenmesini ve sonuç üretilmesini sağlarken, geri akış ise modelin kendisini eğiterek sonuçları iyileştirmesini amaçlar. Bu süreçler, modelin başarımını artırmak için temel adımlardır ve yapay zeka alanındaki model eğitiminin temelini oluşturur.

```
# İleri akış
outputs = model(inputs)
# Geri akış
model.fit(inputs, targets)
```

Blok 7. Eğitim (fit) nesnesi ile girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki ilişkinin keşfi için ileri geri yayılımın yapılması.

Örnek kod, bir makine öğrenimi modelinin eğitilmesini ve ileri geri yayılımını gerçekleştirmek için kullanılmaktadır (Blok 7).

- **inputs:** Modelin eğitiminde kullanılan giriş verilerini temsil eder.
- **outputs:** Modelin eğitim sonrası tahminlerini içeren çıktıları ifade eder.
- **targets:** Eğitim sürecinde modelin öğrenmeye çalıştığı hedef çıktıları temsil eder.
- **model(inputs):** İleri akışı temsil eder. Model, verilen girişleri kullanarak tahminlerde bulunur.
- **model.fit(inputs, targets):** Geri akışı ifade eder. Model, verilen giriş ve hedef çıktıları kullanarak öğrenme sürecini gerçekleştirir.

7. Fonksiyonel API ile Model Eğitimi

Keras Functional API, model eğitimini gerçekleştirmek için compile() ve fit() gibi işlevleri barındırır. Bu işlevler, modelin derlenmesini sağlar, yani modelin optimize edilme şeklini belirler ve eğitim sürecinin yapılandırılmasına yardımcı olur. Derleme aşamasında, kullanıcılar hangi optimizasyon algoritması kullanılacağını, hangi kayıp fonksiyonunun kullanılacağını ve hangi metriklerin takip edileceğini belirleyebilirler.

fit() işlevi ise, modelin eğitim veri seti üzerinde eğitilmesini sağlar. Bu aşamada, modelin belirlenen iterasyon sayısı ve belirlenen eğitim veri seti ile nasıl öğrenmesi gerektiği tanımlanır. Model, bu işlev aracılığıyla eğitim veri seti üzerinde dolaşarak, öğrenme sürecini gerçekleştirir. Bu süreçte, model girdi verilerini kullanarak tahminler yapar, bu tahminlerin gerçek değerlerden ne kadar uzak olduğunu ölçer ve bu farkı minimize etmeye çalışır.

Sonuç olarak bu işlevler, model eğitiminin temel adımlarını oluşturur. Derleme aşamasında modelin nasıl optimize edileceği ve hangi metriklerin izleneceği belirlenirken, fit() işlevi modelin eğitim veri seti üzerinde nasıl öğreneceğini yönetir. Bu aşamalar, yapay zekada model eğitimi sürecinin yönetilmesinde önemli rol oynar.

```
# Modeli derleme
model.compile(optimizer='adam', loss='categorical_crossentropy', metrics=['accuracy'])
# Modeli eğitme
model.fit(x_train, y_train, epochs=10, batch_size=32)
```

Blok 8. Derleme (compile) ve eğitim (fit) nesnesi ile modelin derlenme ve eğitim süreçlerinin gerçekleştirilmesi.

Örnek kod ile bir sinir ağı modeli derlenir ve eğitilir (Blok 8).

- **model**: Oluşturulan sinir ağı modelini ifade eder.
- **optimizer**: Modelin eğitimi sırasında kullanılan optimize ediciyi temsil eder. 'adam', adaptif momentum algoritmasını kullanır.
- **loss**: Kayıp fonksiyonunu ifade eder. 'categorical_crossentropy', çok sınıflı problemlerde kullanılan bir kayıp fonksiyonudur.
- **metrics**: Modelin performansını değerlendirmek için kullanılan metrikleri belirtir. 'accuracy', doğruluk metriğini kullanır.
- **x_train**: Eğitim verilerini temsil eder.
- **y_train**: Eğitim etiketlerini temsil eder.
- **epochs**: Eğitimde kullanılacak dönem sayısını belirtir.
- **batch_size**: Mini grup boyutunu ifade eder.

8. Modeli Kaydetme ve Yükleme

Keras Functional API ile oluşturulan modeller, ağırlıkları ve yapıları üzerinde işlemler yapabilmek için kullanılabilir. Bu modeller, eğitildikten sonra ağırlıklarının ve yapılarının kaydedilmesi veya daha sonra kullanılmak üzere yüklenmesi gibi işlemler için kullanılabilir.

Bu özellik, bir modelin eğitilmesi gereken sürecin ardından elde edilen sonuçların saklanmasını ve gerektiğinde geri getirilmesini sağlar. Örneğin, bir modelin eğitim süreci oldukça zaman alabilir, bu nedenle eğitim tamamlandıktan sonra elde edilen modelin ağırlıkları ve yapısı kaydedilerek ileride yeniden kullanılabilir.

Ayrıca, bu özellik, bir modelin farklı ortamlarda veya farklı cihazlarda kullanılmasını sağlar. Örneğin, bir modelin eğitimi daha güçlü bir bilgisayarda gerçekleştirilip, elde edilen model daha hafif bir cihazda veya farklı bir uygulamada kullanılmak üzere kaydedilebilir ve yüklenebilir.

Kısacası, Keras Functional API ile oluşturulan modeller, eğitim sonrası

ağırlıklarının ve yapılarının saklanmasını, paylaşılmasını ve yeniden kullanılmasını sağlayarak modelin esnek ve verimli bir şekilde işlenmesine imkan tanır.

```
# Modeli kaydetme
model.save('proje_model.h5')
# Modeli yükleme
model = load_model('proje_model.h5')
```

Blok 9. Modelin kaydedilme ve yüklenme işlemleri.

Bu örnek kod, bir Keras modelinin kaydedilmesini ve yüklenmesini sağlar (Blok 9).

- **model.save('my_model.h5')**: Oluşturulan modeli 'my_model.h5' adında bir dosyaya kaydeder. Bu, modelin mimarisini, ağırlıklarını ve eğitim durumunu kaydeder.
- **load_model('my_model.h5')**: 'my_model.h5' dosyasından bir model yükler. Bu, önceden kaydedilmiş bir modeli yeniden oluşturur ve kullanılabilir hale getirir.

9. Uygulama Örnekleri

9.1. Evrişimli Sinir Ağları (CNN)

Keras Functional API, evrişimli sinir ağlarının (CNN) tasarlanmasında da kullanılabilmektedir. Evrişimli sinir ağları, özellikle görüntü ve sinyal işleme gibi görsel verilerin analizinde kullanılan derin öğrenme modelleri arasında yer alır [13], [14].

Evrişimli sinir ağları, özellikle görsel veri analizinde etkili olan ve örüntü tanıma, nesne algılama, yüz tanıma gibi görevlerde kullanılan modellerdir. Bu ağlar, özellikle verinin yerel özelliklerini tanımlamak ve bu özellikler arasındaki ilişkileri anlamak için geliştirilmiştir.

Keras Functional API'nin evrişimli sinir ağlarının oluşturulmasında kullanılabilir olması, kullanıcıların özelleştirilmiş ve karmaşık yapılar tasarlamasına olanak tanır. Bu yapılar, özellikle görsel veri analizi ve işleme gibi alanlarda çeşitli uygulamalara yönelik olarak geliştirilebilir. Evrişimli sinir ağları, özellikle son yıllarda görsel veri analizinde büyük ilerlemelere yol açmış ve pek çok alanda etkili bir şekilde kullanılmıştır.

```
# Kütüphanalerin yüklenmesi
import tensorflow as tf
import matplotlib.pyplot as plt
# Giriş katmanını oluşturma
input_shape = (28, 28, 1)
input_layer = tf.keras.layers.Input(shape=input_shape)
# Evrişimli katmanları oluşturma
conv1 = tf.keras.layers.Conv2D(filters=32, kernel_size=(3, 3), activation='relu')(input_
layer)
pool1 = tf.keras.layers.MaxPooling2D(pool_size=(2, 2))(conv1)
conv2 = tf.keras.layers.Conv2D(filters=64, kernel_size=(3, 3), activation='relu')(pool1)
pool2 = tf.keras.layers.MaxPooling2D(pool_size=(2, 2))(conv2)
# Düzleştirme katmanı
flatten = tf.keras.layers.Flatten()(pool2)
# Tam bağlantılı (dense) katmanlar
fc1 = tf.keras.layers.Dense(units=128, activation='relu')(flatten)
output_layer = tf.keras.layers.Dense(units=10, activation='softmax')(fc1)
# Modeli oluşturma
model = tf.keras.Model(inputs=input_layer, outputs=output_layer)
# Modeli derleme
model.compile(loss='categorical_crossentropy', optimizer='adam', metrics=['accuracy'])
# Verileri yükleme
(x_train, y_train), (x_test, y_test) = tf.keras.datasets.mnist.load_data()
# Verileri ön işleme
x_train = x_train.reshape(x_train.shape[0], input_shape[0], input_shape[1], input_shape[2])
x_test = x_test.reshape(x_test.shape[0], input_shape[0], input_shape[1], input_shape[2])
x_train = x_train.astype('float32')
x_test = x_test.astype('float32')
x_train /= 255
x_test /= 255
y_train = tf.keras.utils.to_categorical(y_train, 10)
y_test = tf.keras.utils.to_categorical(y_test, 10)
# Modeli eğitme
history=model.fit(x_train, y_train, epochs=20)
# Modeli değerlendirme
loss, accuracy = model.evaluate(x_test, y_test)
# Çıktıyı yazdırma
print(f'Test loss: {loss:.4f}, Test accuracy: {accuracy:.4f}')
# Eğitim süreci grafiğini çizme
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(history.epoch, history.history['loss'], label='Loss')
plt.plot(history.epoch, history.history['accuracy'], label='Accuracy')
plt.xlabel('Epoch')
plt.ylabel('Loss/Accuracy')
plt.legend()
plt.title('Eğitim Süreç Grafiği')
```

Blok 10. *CNN katmanları ile MNIST veri setindeki el yazılarının sınıflandırılması.*

Bu kod, el yazısı rakamların tanınması için bir evrişimli sinir ağı (Convolutional Neural Network - CNN) modeli oluşturur ve eğitir. MNIST veri seti kullanılarak, el yazısı rakamlarının görüntülerini içeren bir veri seti yüklenir. Bu veri seti, eğitim ve test verilerine ayrılır (Blok 10).

Model, evrişim (convolution) ve havuzlama (pooling) katmanlarından oluşur. Evrişimli katmanlar, girdi olarak aldıkları görüntülerde belirli özellikleri (örneğin, kenarlar, köşeler gibi) öğrenirken havuzlama katmanları ise bu özellikleri özetler. Ardından, düzleştirme katmanı ile elde edilen özellikler düzleştirilir ve tam bağlantılı (dense) katmanlara iletilir. Tam bağlantılı katmanlar, öğrenilen özellikleri kullanarak sınıflandırma yapar.

Model, MNIST veri setindeki el yazısı rakamlarını tanımlamak için eğitilir. Eğitim sonunda, test veri seti üzerinde modelin performansı değerlendirilir ve kayıp (loss) ile doğruluk (accuracy) metrikleri hesaplanarak yazdırılır. Elde edilen sonuçlar, modelin test veri setinde ne kadar iyi performans gösterdiğini gösterir.

- **input_layer**: Giriş katmanını temsil eder. Görüntü verilerini alır ve modelin başlangıç noktasını oluşturur.
- **conv1, conv2**: Evrişimli katmanları temsil eder. Görüntü verileri üzerinde evrişim işlemlerini gerçekleştirir.
- **pool1, pool2**: Havuzlama (Pooling) katmanlarını temsil eder. Evrişimli katmanların çıkışlarını özetler.
- **flatten**: Düzleştirme katmanını temsil eder. Verileri düzleştirerek yoğun bağlantılı katmana hazırlar.
- **fc1**: Yoğun bağlantılı katmanı temsil eder. Düzleştirilmiş veriler üzerinde yoğun bağlantılı işlemleri gerçekleştirir.
- **output_layer**: Çıkış katmanını temsil eder. Modelin tahminlerini üretir.
- **model**: Oluşturulan genel modeli temsil eder. Girişten çıkışa kadar olan akışı belirtir.
- **model.compile**: Modeli derler ve belirtilen kayıp fonksiyonunu, optimize ediciyi ve metrikleri kullanarak hazır hale getirir.
- **model.fit**: Modeli eğitir. Veri ile etiketleri kullanarak modelin öğrenmesini sağlar.
- **model.evaluate**: Modelin performansını değerlendirir. Veri ve etiketleri kullanarak doğruluk ve kayıp değerlerini hesaplar.
- **plt.figure()**: Grafik çizimi için bir figür oluşturur.
- **plt.plot()**: Eğitim sürecinde kayıp ve doğruluk değerlerini çizmek

için kullanılır. 'epoch' sayısına karşılık gelen kayıp ve doğruluk değerlerini gösterir.

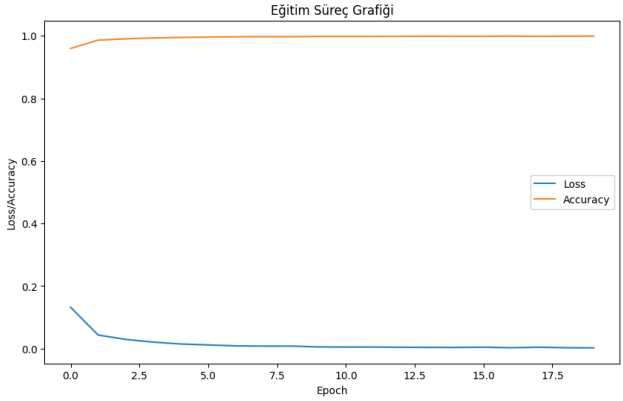
- **plt.xlabel, plt.ylabel**: Grafik eksenlerinin etiketlerini belirler.
- **plt.legend()**: Grafikteki çizgileri açıklamak için etiketleri gösterir.
- **plt.title()**: Grafik başlığını belirler.

Elde edilen sonuçlar, CNN mimarisinin MNIST veriseti üzerinde oldukça başarılı olduğunu gösteriyor. Test loss'un 0.0474 olması, modelin test verilerini çok az hata ile sınıflandırdığını gösteriyor. Test accuracy'nin ise 0.9916 olması, modelin test verilerinin %99.16'sını doğru sınıflandırdığını gösteriyor (Blok 11). Bu değerler, MNIST veriseti için oldukça iyi kabul edilebilir.

```
Test loss: 0.0474, Test accuracy: 0.9916
```

Blok 11. *Örnek kod çıktısı*

Eğitim sürecini gösteren grafiğe göre, modelin ilk birkaç epoch'da hızlı bir şekilde öğreniyor ve loss'u düşürüyor. Daha sonra loss'u sabit tutmaya çalışıyor ve accuracy'yi yükseltmeye odaklanıyor. Bu, modelin iyi bir şekilde öğrendiğini gösteriyor (Şekil 2).



Şekil 2. *CNN modeli eğitim sürenin gösterimi.*

9.2. Recurrent Sinir Ağları (RNN)

Recurrent Sinir Ağları (RNN'ler), zaman serileri, metin verileri ve diğer sıralı veri türlerinin analizi için kullanılan derin öğrenme modelleri arasında yer alır [15]. Bu tip veriler, zaman veya sıralı bir yapı içerisinde bilgi taşıdığı için özellikle RNN'lerin kullanım alanına uygundur. Örneğin, zaman serilerindeki bir olayın önceki durumlarıyla ilişkili olması veya bir cümlenin anlamının önceki kelimelere bağlı olması gibi durumlarda RNN'ler etkili olabilir.

Keras Functional API, RNN'lerin tasarımında ve uygulanmasında kullanılabilmektedir. Bu API, kullanıcıların özelleştirilmiş RNN yapıları oluştur-

masına olanak sağlar. Bu sayede, zaman bağımlı verilerin analizi için farklı yapılar ve mimariler geliştirilebilir. RNN'lerin kullanılabilirliği, özellikle dil modellemesi, metin tahmini, zaman serisi analizi ve benzeri alanlarda veri içindeki zaman veya sıralı bağımlılıkları yakalamak ve anlamak için kullanılmaktadır.

```
# Kütüphanalerin yüklenmesi
import numpy as np
import tensorflow as tf
from keras.datasets import imdb
from keras.layers import Input, LSTM, Dense,Embedding
from keras.models import Model
from keras.utils import to_categorical
pad_sequences=tf.keras.preprocessing.sequence.pad_sequences
from keras.layers import Reshape

import matplotlib.pyplot as plt
# Verileri yükleme
(X_train, y_train), (X_test, y_test) = imdb.load_data(num_words=10000)
# Verileri hazırlama
max_len = 500 # Örnek uzunluğunu belirleme
max_features=10000 #Kelime Sayısı
X_train=pad_sequences(X_train,maxlen=max_len)
X_test=pad_sequences(X_test,maxlen=max_len)
# Giriş verisini üç boyutlu hale getirme
X_train_reshaped = X_train.reshape((X_train.shape[0], X_train.shape[1], 1))
X_test_reshaped = X_test.reshape((X_test.shape[0], X_test.shape[1], 1))
# Giriş katmanını oluşturma
input_layer = Input(shape=(max_len, 1))
reshaped_input_layer = Reshape((max_len,))(input_layer)
# Embedding katmanı
embedding_layer=Embedding(max_features,32)(reshaped_input_layer)
# Birinci LSTM katmanı
lstm1=LSTM(units=64, return_sequences=True)(embedding_layer)
# İkinci LSTM katmanı
lstm2 = LSTM(units=128)(lstm1)
# Tam bağlantılı (dense) katman
output_layer = Dense(units=1, activation='sigmoid')(lstm2)
# Modeli oluşturma
model = Model(inputs=input_layer, outputs=output_layer)
# Modeli derleme
model.compile(optimizer='rmsprop', loss='binary_crossentropy', metrics=['accuracy'])
# Modeli eğitme
history=model.fit(X_train_reshaped, y_train, epochs=20, batch_size=32)
# Modeli değerlendirme
loss, accuracy = model.evaluate(X_test_reshaped, y_test)
# Çıktıyı yazdırma
print(f'Test loss: {loss:.4f}, Test accuracy: {accuracy:.4f}')

# Eğitim süreci grafiğini çizme

plt.figure(figsize=(10, 6))

plt.plot(history.epoch, history.history['loss'], label='Loss')

plt.plot(history.epoch, history.history['accuracy'], label='Accuracy')

plt.xlabel('Epoch')

plt.ylabel('Loss/Accuracy')

plt.legend()

plt.title('Eğitim Süreç Grafiği')
```

Blok 12. *LSTM katmanları ile IMDB veri setini kullanarak duyarlılık analizinin yapılması (film beğenildi, beğenilmedi).*

Bu kod IMDb film incelemeleri veri setini kullanarak duyarlılık analizi yapmak için bir sinir ağı modeli oluşturuyor. İlk olarak, IMDb veri seti yükleniyor ve belirli bir kelime sınırıyla (burada 10.000) sınırlanıyor. Veriler daha sonra önceden belirlenmiş bir uzunluğa (500'e) kadar dolduruluyor ve ardından üç boyutlu bir diziye yeniden şekillendiriliyor (Blok 12).

Modelin mimarisi, katman katman ağ oluşturmayı içeriyor. Önceki veri, LSTM (Uzun Kısa Süreli Bellek – RNN'in özel bir türü [16]) katmanlarına verilmeden önce bir dizi dönüşüm geçiriyor. Bu dönüşüm, veriyi uygun bir şekilde şekillendiriyor ve gömme (embedding) katmanına iletiyor. Embedding katmanı, kelime dağarcığını daha yoğun bir vektör uzayına dönüştürmek için kullanılıyor. Ardından, iki LSTM katmanı ekleniyor. İlk LSTM katmanı, verinin zaman serisi özelliklerini koruyarak çıkışları sıralı olarak döndürüyor. İkinci LSTM katmanı ise bu çıktıları alarak daha derin bir öğrenme yapısı oluşturuyor.

Son olarak, tam bağlantılı (dense) bir çıkış katmanı ekleniyor. Bu katman, sonucu belirlemek için önceki katmanlardan gelen öznitelikleri kullanır. Model, belirlenen optimizasyon algoritması ve kayıp fonksiyonuyla derlenir ve eğitilir. Eğitim süreci, belirli bir epoch (burada 20) sayısı için gerçekleşir. Ardından, test veri seti üzerinde modelin performansı ölçülür ve kayıp (loss) ile doğruluk (accuracy) değerleri yazdırılır.

- **X_train, y_train, X_test, y_test**: Eğitim ve test veri setlerini temsil eder. imdb.load_data() ile IMDB film incelemeleri veri seti yüklenir.
- **max_len**: Örnek uzunluğunu belirten bir değişken. Metin örneklerinin maksimum uzunluğunu belirler.
- **max_features**: İncelenen en sık kullanılan kelime sayısını belirtir.
- **pad_sequences**: Veri örneklerinin aynı uzunluğa sahip olmasını sağlamak için kullanılır.
- **input_layer**: Giriş katmanını temsil eder. Modelin giriş verilerini alır.
- **embedding_layer**: Gömme (embedding) katmanı. Kelimeleri yoğun vektörlerle temsil etmek için kullanılır.
- **lstm1, lstm2**: LSTM (Uzun-Kısa Süreli Bellek) katmanlarını temsil eder. Seri veri işleme için kullanılır.
- **output_layer**: Çıkış katmanını temsil eder. Sonuçları tahmin etmek için kullanılır.
- **model**: Oluşturulan genel modeli temsil eder.
- **model.compile**: Modeli derler ve belirtilen optimize edici, kayıp fonksiyonu ve metrikleri kullanarak hazır hale getirir.

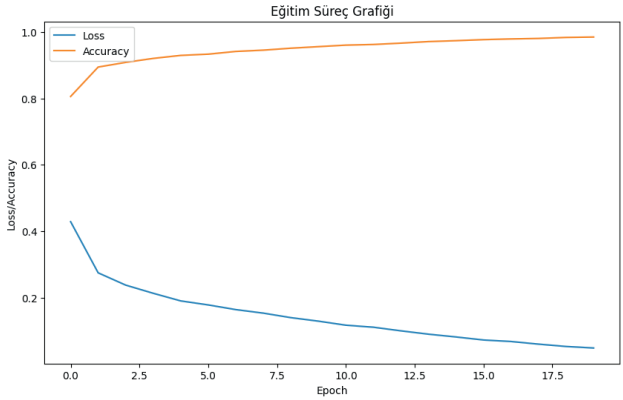
- **model.fit**: Modeli eğitir. Veri ile etiketleri kullanarak modelin öğrenmesini sağlar.
- **model.evaluate**: Modelin performansını değerlendirir. Veri ve etiketleri kullanarak doğruluk ve kayıp değerlerini hesaplar.
- **print(f'Test loss: {loss:.4f}, Test accuracy: {accuracy:.4f}')**: Modelin test verisi üzerindeki kayıp ve doğruluk sonuçlarını yazdırır.
- **plt.figure()**: Grafik çizimi için bir figür oluşturur.
- **plt.plot()**: Eğitim sürecinde kayıp ve doğruluk değerlerini çizmek için kullanılır. 'epoch' sayısına karşılık gelen kayıp ve doğruluk değerlerini gösterir.
- **plt.xlabel, plt.ylabel**: Grafik eksenlerinin etiketlerini belirler.
- **plt.legend()**: Grafikteki çizgileri açıklamak için etiketleri gösterir.
- **plt.title()**: Grafik başlığını belirler.

Geliştirilen LSTM mimarisiyle imdb verisetinde başarılı sonuçlar elde edildi. Test loss 0.4707, test accuracy ise 0.8647. Bu değerler, modelin verisetini oldukça iyi öğrendiğini gösteriyor (Blok 13).

```
Test loss: 0.4707, Test accuracy: 0.8647
```

Blok 13. *Örnek kod çıktısı*

Eğitim sürecinde elde edilen grafiğe göre, loss değeri her epoch ile birlikte azalıyor ve accuracy değeri ise her epoch ile birlikte artıyor. Bu da modelin öğrenme sürecinin doğru bir şekilde ilerlediğini gösteriyor (Şekil 3).



Şekil 3. *LSTM modeli eğitim sürenin gösterimi.*

9.3. LSTM ve CNN Mimarilerinin Kombinasyonu

Bu bölümde, farklı türde verileri (zaman serisi ve resim) bir araya getirerek analiz etmek için bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntem, zaman seri-

si verilerinin yanı sıra, ikinci bir girdinin (örneğin, bir resim) nasıl entegre edileceğini de açıklamaktadır. Yöntem, görüntü işleme için evrişimli sinir ağları (CNN) ve zaman serisi verileri için uzun kısa süreli bellek (LSTM) katmanının birleşimini kullanır. Bu şekilde, yöntem hem görüntü verilerindeki karmaşık özellikleri hem de zaman serisi sinyallerdeki zaman bağımlılıklarını öğrenme yeteneğine sahiptir. Yöntemin nasıl uygulanacağı, adım adım açıklanmaktadır. Bu adımlar, veri setinin nasıl hazırlanacağı, modelin nasıl eğitileceği ve test veri seti üzerinde nasıl değerlendirileceği gibi konuları kapsamaktadır. Yöntem, örnek kod parçacıkları ile desteklenmektedir. Bu kod parçacıkları, okuyucuların kendi zaman serisi verileri için modeller oluşturmasına yardımcı olmaktadır.

```
# Kütüphaneleri Yükleme
from tensorflow import keras
from tensorflow.keras import layers
import numpy as np
from sklearn.model_selection import train_test_split
import matplotlib.pyplot as plt
# Model tanımlama
inputs1 = keras.Input(shape=(64,64,3)) # Resim girişi
inputs2 = keras.Input(shape=(None, 1)) # Timeseries sinyal girişi
# CNN Katmanı
x = layers.Conv2D(filters=32, kernel_size=(3, 3))(inputs1)
x = layers.Flatten()(x)
# LSTM Katmanı
y = layers.LSTM(units=32)(inputs2)
# Resim ve zaman serisi sinyallerini birleştirilme işlemi
combined = layers.Concatenate()([x, y])
# Birleşik temsilden 1 boyutlu çıktı üretimi
outputs = layers.Dense(1)(combined)
# Modeli oluşturma
model = keras.Model([inputs1, inputs2], outputs)
# Modeli derleme
model.compile(optimizer='adam', loss='mse', metrics=['mae'])
# Simüle edilmiş veri setleri
img_data = np.random.random((1000,64,64,3))
signal_data = np.random.random((1000,10,1))
targets = np.random.random((1000,1))
# Veri setini train ve test kümelerine bölelim
img_train, img_test, signal_train, signal_test, targets_train, targets_test = train_test_
split(img_data, signal_data, targets, test_size=0.2, random_state=42)
# Modeli eğitme
history=model.fit([img_train, signal_train], targets_train, epochs=20, batch_size=16)
# Modeli test veri seti üzerinde değerlendirme
mse, mae = model.evaluate([img_test, signal_test], targets_test)
print("Mean Squared Error (MSE):", mse)
# Eğitim süreci grafiğini çizme
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(history.epoch, history.history['mae'], label='MAE')
plt.xlabel('Epoch')
plt.ylabel('MAE')
plt.legend()
plt.title('Eğitim Süreç Grafiği')
```

Blok 14. *CNN ve LSTM katmanları ile farklı tür verisetlerinin bir arada işlenmesi süreci.*

Örnek kod, resim ve zaman serisi sinyal verilerini birleştiren bir model oluşturur. Oluşturulan model, bu birleşik girişlerden çıktı üretir ve 'mean squared error' (MSE) kaybını kullanarak eğitilir. Son olarak, modelin performansı test veri seti üzerinde değerlendirilir ve MSE değeri yazdırılır (Blok 14).

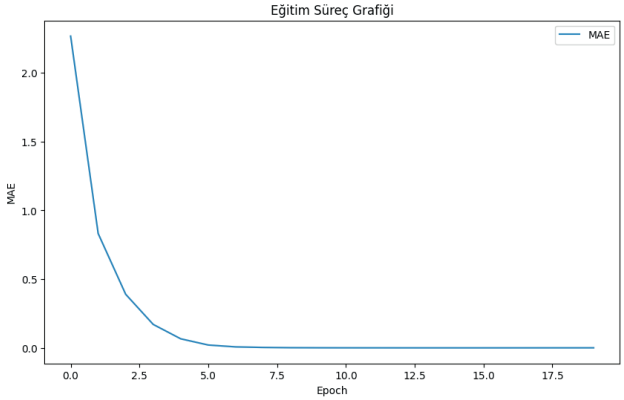
- **inputs1, inputs2**: Modelde kullanılacak giriş katmanlarını temsil eder. shape=(64,64,3) olan bir resim girişi ve shape=(None, 1) olan bir zaman serisi sinyal girişi tanımlanır.
- **x**: CNN katmanını temsil eder. Resim girişinden sonra bir evrişim katmanı ve ardından düzleştirme işlemi gerçekleştirilir.
- **y**: LSTM katmanını temsil eder. Zaman serisi sinyal girişi için bir LSTM katmanı tanımlanır.
- **combined**: CNN ve LSTM katmanlarının çıktılarını birleştirmek için kullanılır. Bu, farklı türdeki girişlerin birleştirilerek birleşik bir temsil oluşturulması işlemidir.
- **outputs**: Modelin çıkış katmanını temsil eder. Birleşik temsilden tek bir boyutlu bir çıktı üretmek için bir yoğun (dense) katman tanımlanır.
- **model**: Oluşturulan genel modeli temsil eder. Girişlerden çıkışa olan akışı belirtir.
- **model.compile**: Modeli derler ve belirtilen optimize edici, kayıp fonksiyonu ve metrikleri kullanarak hazır hale getirir.
- **model.fit**: Modeli eğitir. Veri ile etiketleri kullanarak modelin öğrenmesini sağlar.
- **model.evaluate**: Modelin performansını değerlendirir. Veri ve etiketleri kullanarak kayıp ve hata ölçümlerini hesaplar.
- **img_data, signal_data, targets**: Simüle edilen veri setlerini temsil eder. Rastgele resim, zaman serisi sinyal ve hedef çıktıları içeren veri setleri oluşturulur.
- **img_train, img_test, signal_train, signal_test, targets_train, targets_test:** Eğitim ve test veri setlerini temsil eder. Oluşturulan veri setleri, eğitim ve test kümelerine bölünür.
- **epochs, batch_size**: Eğitim için dönem sayısı ve mini grup boyutunu belirtir.
- **plt.figure()**: Grafik çizimi için bir figür oluşturur.
- **plt.plot()**: Eğitim sürecinde kayıp ve doğruluk değerlerini çizmek için kullanılır. 'epoch' sayısına karşılık gelen kayıp ve doğruluk değerlerini gösterir.
- **plt.xlabel, plt.ylabel**: Grafik eksenlerinin etiketlerini belirler.
- **plt.legend()**: Grafikteki çizgileri açıklamak için etiketleri gösterir.

CNN ve LSTM mimarilerinin kombine edilmesiyle elde edilen Mean Absolute Error (MAE) değeri 0.279 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, modelin verisetini oldukça iyi öğrendiğini göstermektedir (Blok 15).

```
Mean Absolute Error (MAE): 0.279
```

Blok 15. *Örnek kod çıktısı*

Eğitim sürecini çizdirdiğiniz grafiğe göre, MAE değeri her epoch ile birlikte azalmaktadır. Bu da modelinizin öğrenme sürecinin doğru bir şekilde ilerlediğini göstermektedir (Şekil 4).



Şekil 4. *CNN ve LSTM hibrit modeli eğitim sürenin gösterimi.*

10. Sonuç

Keras işlevsel API'si, derin öğrenme modelleri oluşturmak için güçlü ve esnek bir araçtır. Bu API, kullanıcılara katmanları istedikleri gibi birleştirme ve özelleştirme özgürlüğü verir. Bu, kullanıcıların girdi verilerinin farklı katmanlardan geçerek işlendiği ve sonuç çıktısının bu işlemlerin kombinasyonuyla elde edildiği özelleştirilmiş yapılar oluşturmasına olanak tanır.

Functional API'nin sağladığı esneklik ve özelleştirme imkanları, yapay zekanın daha karmaşık ve özgün alanlarda uygulanmasını sağlar. Araştırmacılar, farklı veri tiplerini işleyebilir, özelleştirilmiş katman yapıları oluşturabilir ve daha karmaşık derin öğrenme model deneyleri gerçekleştirebilirler. Bu da bilimsel ve teknolojik ilerlemeyi hızlandırır ve yeni keşiflere yol açar.

Bu bölümde, Keras işlevsel API'si kullanılarak derin öğrenme modellerinin nasıl oluşturulacağını örneklerle gördük. Son olarak, uçtan uca uygulamalı örneklerle bölümü tamamladık.

KAYNAKÇA

[1] M. Pumperla and D. Cahall, 'Elephas: Distributed Deep Learning with Keras & Spark', *J. Open Source Softw.*, vol. 7, no. 80, p. 4073, Dec. 2022, doi: 10.21105/joss.04073.

[2] M. Li, J. Cao, Y. Tian, T. O. Li, M. Wen, and S.-C. Cheung, 'COMET: Coverage-guided Model Generation For Deep Learning Library Testing'. arXiv, Jan. 30, 2023. doi: 10.48550/arXiv.2208.01508.

[3] B. T. Chicho and A. B. Sallow, 'A Comprehensive Survey of Deep Learning Models Based on Keras Framework', *J. Soft Comput. Data Min.*, vol. 2, no. 2, Art. no. 2, Oct. 2021, Accessed: Dec. 04, 2023. [Online]. Available: https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/jscdm/article/view/8732

[4] J. C. Hateley, J. Roberts, K. Mylonakis, and X. Yang, 'Deep learning seismic substructure detection using the Frozen Gaussian approximation', *J. Comput. Phys.*, vol. 409, p. 109313, May 2020, doi: 10.1016/j.jcp.2020.109313.

[5] E. Haghighat and R. Juanes, 'SciANN: A Keras/TensorFlow wrapper for scientific computations and physics-informed deep learning using artificial neural networks', *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 373, p. 113552, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.cma.2020.113552.

[6] R. Elshawi, A. Wahab, A. Barnawi, and S. Sakr, 'DLBench: a comprehensive experimental evaluation of deep learning frameworks', *Clust. Comput.*, vol. 24, no. 3, pp. 2017–2038, Sep. 2021, doi: 10.1007/s10586-021-03240-4.

[7] L. Demkiv, 'ШВИДКІСТЬ НАВЧАННЯ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ НА GPU ТА CPU ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ СИНТЕЗОВАНОЇ МОВИ ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕКТРОГРАМ', *Електроніка Та Інформаційні Технології Electron. Inf. Technol.*, no. 16, Art. no. 16, Dec. 2021, doi: 10.30970/eli.16.1.

[8] H. Lee and J. Song, 'Introduction to convolutional neural network using Keras; an understanding from a statistician', *Commun. Stat. Appl. Methods*, vol. 26, no. 6, pp. 591–610, Nov. 2019, doi: 10.29220/CSAM.2019.26.6.591.

[9] L. Kunstmann *et al.*, 'Online Deep Learning Hyperparameter Tuning based on Provenance Analysis', *J. Inf. Data Manag.*, vol. 12, no. 5, Art. no. 5, Nov. 2021, doi: 10.5753/jidm.2021.1924.

[10] C. A. Saleel, 'Forecasting the energy output from a combined cycle thermal power plant using deep learning models', *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 28, p. 101693, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101693.

[11] Y. Paladugu and D. R. Sekaran, 'End-To-End Gender Determination By Images Of An Human Eye', *J. Surv. Fish. Sci.*, vol. 10, no. 2S, Art. no. 2S, Mar. 2023, doi: 10.17762/sfs.v10i2S.324.

[12] E. F. Ayetiran, 'Attention-based aspect sentiment classification using enhanced learning through cnn-Bilstm networks', *Knowl.-Based Syst.*, vol. 252, p. 109409,

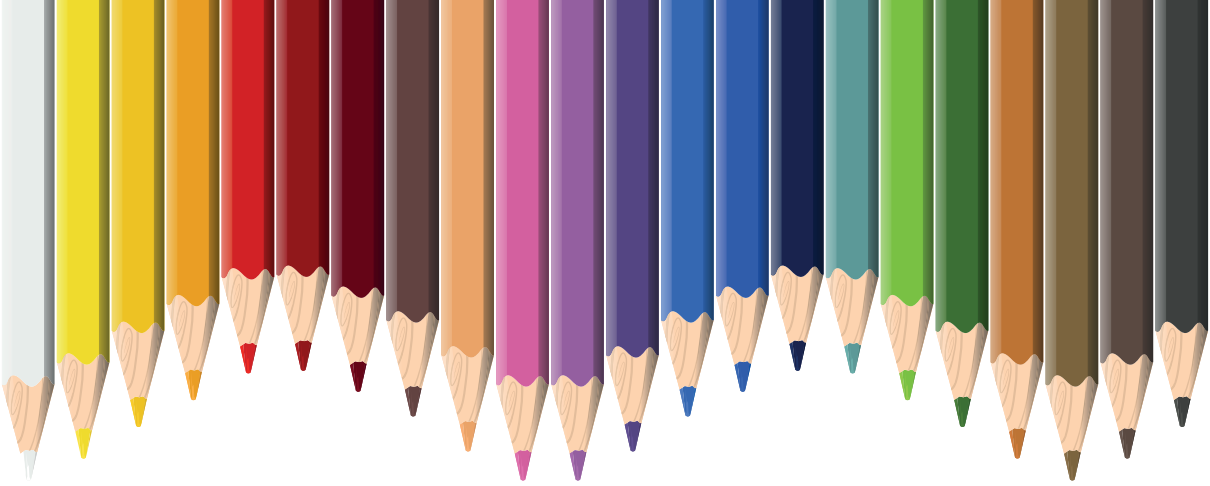
Sep. 2022, doi: 10.1016/j.knosys.2022.109409.

[13] F. Doğan and İ. Türkoğlu, 'Derin Öğrenme Modelleri ve Uygulama Alanlarına İlişkin Bir Derleme', *Dicle Üniversitesi Mühendis. Fakültesi Mühendis. Derg.*, vol. 10, no. 2, Art. no. 2, Jun. 2019, doi: 10.24012/dumf.411130.

[14] L. Wan, Y. Chen, H. Li, and C. Li, 'Rolling-Element Bearing Fault Diagnosis Using Improved LeNet-5 Network', *Sensors*, vol. 20, no. 6, 2020, doi: 10.3390/s20061693.

[15] X.-Y. Zhang, F. Yin, Y.-M. Zhang, C.-L. Liu, and Y. Bengio, 'Drawing and Recognizing Chinese Characters with Recurrent Neural Network', *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 40, no. 4, pp. 849–862, Apr. 2018, doi: 10.1109/TPAMI.2017.2695539.

[16] Z. Karevan and J. A. K. Suykens, 'Spatio-temporal Stacked LSTM for Temperature Prediction in Weather Forecasting'. arXiv, Nov. 15, 2018. doi: 10.48550/arXiv.1811.06341.



Bölüm 2

YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARININ AVRUPA'DAKİ PERFORMANSININ İSPANYA ÜZERİNDEN İNCELENMESİ

Mehmet Çağrı KIZILTAŞ[1]

1 İstanbul Ticaret Üniversitesi
mckiziltas@ticaret.edu.tr

Giriş

Bu tarz çalışmalar kapsamında, iki katlı bir yaklaşımı takip eden yüksek hızlı demiryolu (YHD) projeleri için bir değerlendirme metodolojisi tanımlanmaktadır. Bu prosedür, coğrafi bilgi sistemlerince (CBS) desteklenen erişilebilirlik göstergelerinin hesaplanmasına dayanmakta ve yersel etki analizi tekniklerini kullanmaktadır. Verimlilik etkileri; büyük kentsel alanlara odaklanmak yolu ile yüksek hızlı demiryolu (YHD) projelerinden elde edilen erişilebilirlik sonuçlarındaki gelişimlere göre değerlendirilmekte ve yersel denklik göstergeleri, bu kentsel kümelenmeler arasında erişilebilirlik değerlerinin dağılımındaki değişimlerden türetilmektedir (1).

Yukarıda ifade edilenler temelde yüksek hızlı demiryolu (YHD) uzantılarının etki büyüklüklerine işaret etmektedir. Bu gelişimler sıklıkla verimlilik etkilerini ima etmektedir ve temelde erişilebilirlik faydaları ile ilgilidir. Bir diğer tamamlayıcı ve birçok zaman çelişkili yaklaşım ise denklik değerlendirmeleri gibi etkilerin yersel dağılımına işaret etmektedir. Genel olarak değerlendirme metodolojileri, denklik ve verimlilik amaçları arasındaki çelişkiye vurgu yapmaktadır. İzolasyonda etkinlik amaçları; ana ekonomik etkinlik merkezleri arasında verimli bir bağlantının teminini hedefleyen bir yüksek hızlı demiryolu ağına yönelmektedir (2). Bununla beraber bu strateji, yersel kalkınmada daha kutuplaşmış unsurlara öncülük ettiğinden dolayı denklik üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir: dezavantajlı kentler nispeten daha kötü bir durum ile sonuçlanmakta iken daha zengin kentler daha çok kazanacak gibi görünmektedir (3).

Bu bağlamda, bu tarz çalışmalar yüksek hızlı demiryolu (YHD) projelerinin hem denklik ve hem de verimlilik göstergelerinin değerlendirilmesinde bir metodoloji önerilmesi yolu ile mevcut literatüre katkı sunmaktadır. Bu tarz çalışmaların yapısı; verimlilik ve denklik kavramlarının çeşitli genel tanımlarının yapılması, erişilebilirlik analizleri vasıtası ile denklik etkilerinin ölçülmesi ile ilgili mevcut girişimlerin şablonunun belirlenmesi, önerilen ve bilahare uygulanan metodolojinin tanımlanması yolu ile İspanya'da yüksek hızlı demiryolu (YHD) gelişiminin mevcut durumunun değerlendirilmesi ve gelecek araştırmaları dâhilinde değerlendirme ile önerilerin ortaya konmasından oluşmaktadır (4).

Bir ulaştırma sistemi açısından bir yüksek hızlı demiryolu (YHD) kesiminin açılması, örneğin küresel ağdaki verimliliğin gelişimi gibi, açık bir şekilde erişilebilirlikte gelişime neden olmaktadır. Ayrıca stratejik düzeyde, yeni bir yüksek hızlı demiryolu (YHD) hattının açılması, rekabetçi ve tamamlayıcı hatlar ve ulaştırma türlerinde talebi önemli ölçüde etkileyebilmekte, dolayısı ile ara bağlantıların değişimi ile ağ unsurlarının kullanım ve performans sonuçları için de aynı şey geçerlidir (5).

Bir bütün olarak ulaştırma ağının performansındaki bu etkiler; ağ etkileri

olarak adlandırılmaktadır ve dolayısı ile ağ verimliliği gibi konular ile ilintilendirilmektedir. Bu tarz çalışmalar kapsamında 'verimlilik' terimi, yeni bir ulaştırma altyapısı tarafından sunulan erişilebilirlik faydalarının tanımlanmasında kullanılmaktadır. Bu, erişilebilirlik ile ilgili çalışmalarda genel kabul görmüş bir yaklaşım olup 1979'lardan itibaren kullanılmaya başlanmıştır (6).

Daha geniş bir perspektiften, yüksek hızlı demiryolları (YHD) tarafından ortaya konan erişilebilirlik faydası göstergeleri, kapsamlı bir şekilde ulaştırma planlaması literatürünü işaret etmektedir. Yüksek hızlı demiryolu (YHD) bir kentsel alana ilk ulaştığında, çekirdek kent ve çevresindeki ekonomik etkinlik unsurları ve arazi kullanımını dönüştüren dinamik bir prosesi tetiklemektedir. Bununla beraber yakın dönem çalışmalarının sonuçları; yüksek hızlı demiryolu (YHD) altyapısında yatırım desteğinin sadece ekonomik kalkınmaya yönelik faydalar ile ilgili beklentilere dayalı olamayacağını göstermektedir. Eğer yüksek hızlı demiryolu (YHD) etkileri sadece bölgesel kalkınma bakış açısı ile değerlendirilir ise diğer varsayımlar da uygulamaya alınır (7).

Bu konu tartışmaya açık olmasına karşın, bu gelişmiş bağlantısallığın yüksek hızlı demiryolu (YHD) ağına bağlanan çekirdek kentlerde, yer alan şirketler için rekabetçiliği artan bir şekle dönüştürebilme ihtimali değerlendirilmeye devam etmektedir. Bu kentler, bölgesel ekonomi kalkınma ve gelişimin ivmelenmesinin teşviki, pazar alanlarının büyütülmesi ve ekonomik etkinliğin çekilmesinde kümelenme etkilerinden faydalanmaktadır. Bu etkilerin ilk olarak, geliştirilmiş erişilebilirlik tarafından önerilen yeni fırsatlara etkiyen kentsel aktörlerin tutumuna bağlı olduğu ortaya konmaktadır. Bu ayrıca yaşam çevresi kalitesi üzerindeki etkileri hesaba katan kente yüksek hızlı demiryolunun (YHD) entegre edilmesi için bir strateji tasarımı gereksinimi anlamına gelmektedir (8).

Yukarıda belirtilenler temel olarak yüksek hızlı demiryolu (YHD) ağına bağlanan büyük çekirdek kentler için uygulanmaktadır. Resim, yüksek hızlı demiryolu (YHD) istasyonu olmayan fakat coğrafik olarak bir yüksek hızlı demiryolu (YHD) koridoruna yakın konumlanan düşük yoğunluklu bölgeler ve orta ölçekli kentler için farklıdır. Tartışma kentsel yapıda yüksek hızlı demiryolu (YHD) etkileri üzerine devam etmektedir ve seyrek nüfuslu bölgeler ile orta ölçekli kentler için de bu durum halen araştırma gündemindedir. Yüksek hızlı demiryoluna (YHD) bağlanmayan kentler, rekabetçilik dezavantajından etkilenme riski altındadır (9).

Değerlendirme Parametreleri

Denklik kavramı, verili bir etki dağılımı ile ilgilidir. Ayrıca buna karşılık olarak ulaştırma literatüründe sıklıkla adalet, açıklık ve tutarlılık gibi değişen terimler de kullanılmaktadır. Denklik değerlendirmesi sıklıkla yersel etki modelleri kullanılarak yürütülmektedir ve bilahare fayda maliyet analizleri (CBA) ve çok kriterli analiz (MCA) gibi diğer değerlendirme yöntemlerini tamam-

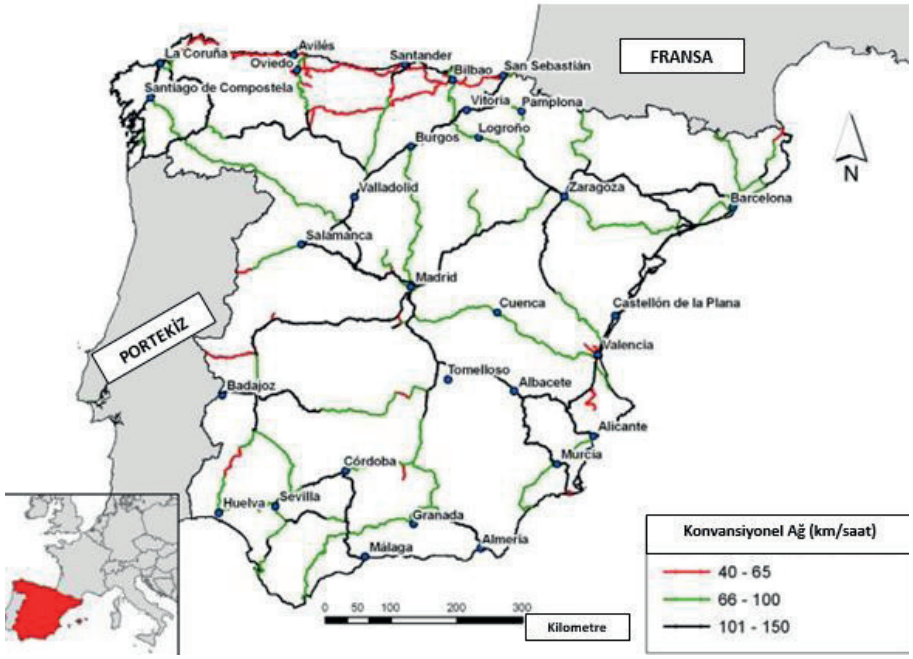
layan analizleri içermektedir. Bu söz konusu daha karmaşık türden analizler, hâlihazırda yüksek kaliteli ulaştırma ağına sahip olan alanlarda önemli ölçüde artışlar göstermektedir (10).

Yüksek hızlı demiryolu (YHD) projelerinin yersel denklik etkileri, mevcut durumda çeşitli nedenlerden dolayı tartışma konusudur. İlk olarak uluslararası, ulusal, bölgesel ya da yerel düzey tercihi, yüksek hızlı demiryolu (YHD) etkileri ile bağlantılı olarak önemli ve aşikâr sonuçları ihtiva etmektedir. İkinci olarak ise, çeşitli çalışmalar yeni bir yüksek hızlı demiryolu (YHD) hattının, yüksek hızlı demiryolu (YHD) koridorunun dışındaki diğer yerleşimlerde ağın ana düğüm noktalarındaki kent yerleşimlerinin ayrıcalıklı konumunu tahkim etmekte gibi görünmektedir (11). Bir yüksek hızlı demiryolu (YHD) istasyonu ile çekirdek kentlerde en büyük kazanımlar oluşur iken diğer kentler bu ana erişim noktalarına ekonomik etkinliklerin yeniden tesisi yolu ile olumsuz etkilenebilmektedir. Yüksek hızlı demiryolu (YHD) ağı ile bağlantısını sağlayamayan kentler ayrıca ikincil etki olarak addedilen 'bölgelerinden, daha iyi erişilebilirliğin olduğu diğer bölgelere hareket eden şirketler' gerçeği ile karşılaşmaktadır.

Büyümenin bu düzensiz dağılımı, daha önce belirtilen kutuplaşma unsurunu tahkim etmekte ve dahası denklik üzerinde ilave olumsuz etkilere de neden olmaktadır. Ayrıca yeni yüksek hızlı demiryolu (YHD) hattının işletimi, konvansiyonel demiryolu hizmetlerinin kapanması ile rekabete son vermekle sonuçlanabilir, dolayısı ile de uyumsuzlukları arttırmaktadır. Diğer bir deyişle yüksek hızlı demiryolunun (YHD) hâlihazırda gelişmiş kentlerdeki ekonomik etkinliklerin çoğunun yoğunluk artışına desteği noktasında riskler bulunmaktadır (12).

Ulaştırma altyapı yatırımlarının denklik etkileri, erişilebilirlik dağılımında ikame değişimlere göre değerlendirilebilmektedir. Erişilebilirlik analizleri, bazı araştırmacılarca henüz bütünü ile kullanılmıyor olmasına karşın kullanışlı bir planlama aracı durumundadır. Şekil 1'de İspanya'da 1990 yılındaki durum ortaya konmaktadır (13).

1970'lerin sonlarından itibaren, yersel yoğunlaşmaya erişilebilirlikte artış ile ilgili çalışmalarda olduğu gibi denklik etkilerinin değerlendirilmesi için erişilebilirlik kullanımının erken dönem etkileri ortaya konmaya başlamıştır. Araştırmada yakın dönem yaklaşımları, bölgeler ya da nüfus grupları arasında erişilebilirlik dağılımındaki değişimler vasıtası ile denklik etkilerini analiz etmektedir. Bu tarz çalışmalar kapsamında önerilen metodoloji, hem verimlilik ve hem de denklik konularına işaret etmek için erişilebilirlik ölçütlerinin yeterliliğinden faydalanılmaktadır (14).



Şekil 1. *Yüksek Hızlı Demiryolu Ağı Olmayan Durum*

Bütün bir prosedür coğrafi bilgi sistemlerince (CBS) desteklenmektedir. Birinci adım, jeolojik veri tabanlı giriş verilerinin uygulanmasını ve erişilebilirlik hesaplamalarını içermektedir. İkinci adım, erişilebilirlik gelişimi değerlendirmelerine dayalı olarak verimlilik analizlerini kapsamakta olup üçüncü adım ise senaryolar arasındaki erişilebilirliğin yersel dağılımındaki değişim çalışmalarına dayalı denklik analizleridir. Bu metodoloji, koridor ölçekli, bölgesel ve ulusal olmak üzere bütün analiz düzeyleri için geçerlidir (15).

Adım 1: Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Veri Tabanı ve Erişilebilirlik Hesaplarının Uygulanması

Adım 1; arazi kullanımı ve ulaştırma ağı jeolojik veri tabanının uygulanmasını kapsamaktadır. Değerlendirme iki farklı senaryonun karşılaştırması yolu ile yapılmaktadır: hiçbir şey yapılmayan (yüksek hızlı demiryolunun olmadığı) senaryo (0) ve proje senaryosu (s). Belirli ulaştırma yatırımlarının uygulanması, ulaştırma ağı karakteristiklerini (T), yüksek hızlı demiryolu olmayan ağdan (T_0) proje ağına (T_s) iyileştirmektedir. Arazi kullanımı karakteristikleri; arazi kullanım sistemindeki değişimlerden kaynaklanan etkilerden ulaştırma yatırım etkilerinin ayrıştırılması için her iki senaryo için de aynı olmaktadır. Erişilebilirlikteki (A) değişiminler A_0 ve A_s olarak ifade edilmektedir(16).

1990'ların sonu ve 2000'lerin başında yapılan çalışmalarda daha ileri düzeyde incelemeler ve mevcut erişilebilirlik göstergeleri (ölçütleri) bulunabilmektedir. Bu çalışmalarda potansiyel gösterge seçilmiştir. Potansiyel gösterge, çekim göstergeleri kategorisinde yer almaktadır. Uygun olan birçok formülasyondan hareketle, potansiyel gösterge (1) eşitliğinde, ispatlanan geçerliliğinin yanı sıra karmaşıklık ve yorumlanabilirlik arasında uygun bir dengeyi önermektedir. Formülasyon aşağıdaki gibidir:

$$A_i = \Sigma_j P_j / I_{ij} \quad (1)$$

Her bir i kalkış noktasının j varış noktasına erişilebilirliği (A_i) hesaplanmaktadır. P_j genellikle nüfus ya da Gayri Safi Yurtiçi Hâsıla (GSYİH) olmak üzere, her bir varış noktasının boyutunu ifade eden bir değişken olup I_{ij} ise ağın kullanılması ile üretilen seyahat süresini göstermektedir. Seyahat süresi formülasyonu aşağıdaki gibidir:

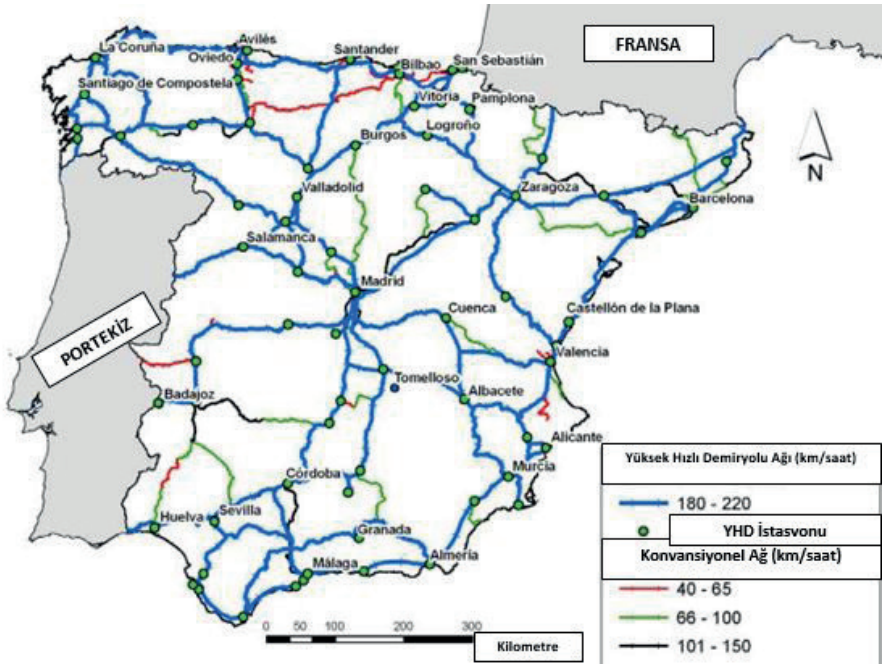
$$I_{ij} = TT_R(i, E_i) + TT_F(E_i, E_j) + TT_R(E_j, j) + \Theta_F \quad (2)$$

Eşitlik seyahat süresini; kalkış noktasından en yakın istasyona karayolu ile seyahat süresi ($TT_C(i, E_i)$), demiryolu ile seyahat süresi ($TT_F(i, j)$), en yakın varış istasyonundan nihai varışa karayolu ile seyahat süresi ($TT_F(E_j, j)$) ve aşağıdaki şartları (Θ_F) hesaba katmaktadır: karayolundan demiryoluna türel geçiş, hizmet sıklığı, hat değişimleri ve 2010 yılında yapılan bu tarz çalışmalar kapsamında kullanılan gabari değişimleri için gecikmeler. Ayrıca sayısal sonuçlara ilave olarak bütün bir prosedür, coğrafi bilgi sistemlerinin (CBS) potansiyelinin kullanan haritaların grafik bilgileri yolu ile desteklenmektedir (17).

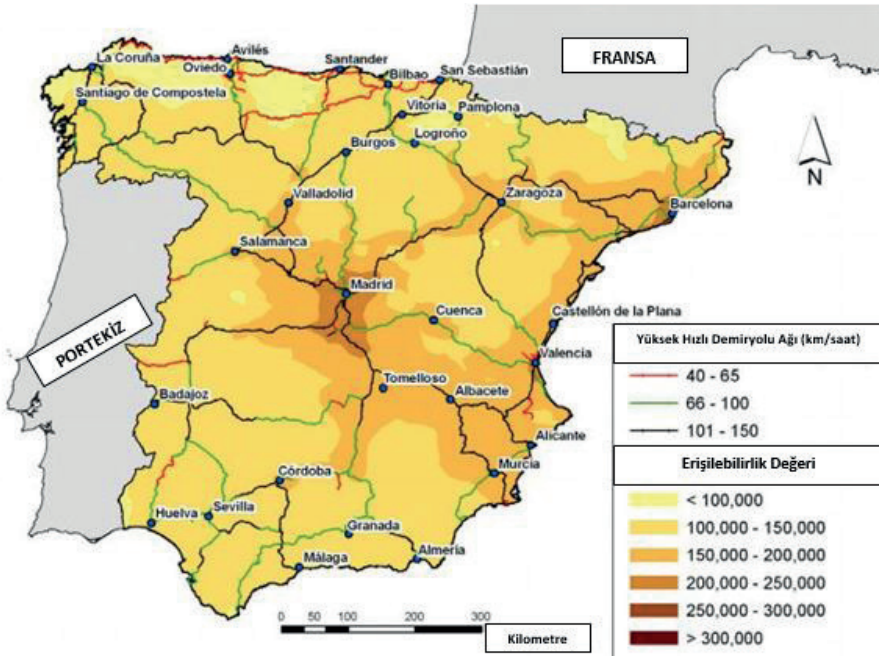
Haritalar senaryolar arasındaki erişilebilirlik değişimlerinin yersel dağılımında verimli bir şekilde sezgisel bilgi temin etmektedir. Ayrıca haritalar sayısal sonuçların yorumlarını geliştirmek sureti ile planlama prosesinde genel olarak yer alan potansiyel paydaşlar, politika yapıcılar ve planlamacılar arasında bilgilendirici değerlendirmelere fırsat oluşmaktadır.

Adım 2: Verimlilik Analizi

Adım 1'de elde edilen erişilebilirlik değerleri ve haritalar, ulaştırma altyapı etkilerinin verimliliğe göre analiz edilmesine imkân vermektedir. Verimlilik etkileri; proje senaryosu ve yüksek hızlı demiryolu (YHD) olmayan senaryoda, gösterge verilerinden ve iki senaryo arasındaki yüzde cinsinden erişilebilirlik farkı üzerinden temin edilmektedir (18).



Şekil 2. *Yüksek Hızlı Demiryolu Ağı Senaryosu*



Şekil 3. *Yüksek Hızlı Demiryolu Olmaksızın Erişilebilirlik Haritası*

Şekil 2'de yüksek hızlı demiryolu ağının bulunduğu senaryo gösterilmektedir. Şekil 3'te ise yüksek hızlı demiryolu ağının olmadığı senaryo için erişilebilirlik haritası verilmektedir (19).

İki farklı senaryodaki gösterge değerlerinin karşılaştırılması, değerlendirilen verili ulaştırma projesi etkilerine imkân vermektedir. Bu farklar mutlak ve nispi terimler ile gösterilebilir ve her ikisinde de tamamlayıcı sonuçlar ortaya konabilmektedir. Erişilebilirlik göstergesindeki nispi değişim şu şekilde açıklanmaktadır:

$$AC_i = (A_{i0} - A_{is}) / A_{i0} \cdot 100 \quad (3)$$

Her bir i kalkış noktası için yüzdesel erişilebilirlik değişimi (AC_i) hesaplanmaktadır.A_{i0}yüksek hızlı demiryollarının (YHD) olmadığı senaryodaki gösterge değeri olupA_{is} ise proje senaryosundaki göstergedir.

Adım 3: Denklik Analizi

Denklik etkileri sıklıkla erişilebilirlik değerlerinin yersel dağılımının istatistiki bir indeks dizisine göre ölçülmektedir. Bu denklik indekslerinin seçimi süreci, daha önceki çalışmalarda ispatlanmış verimliliğe dayalı olmaktadır. 2000'li yıllarda yapılan bu tarz çalışmalar ideal bir denklik indeksinin olmadığı noktasında hemfikirdirler, dahası tamamlayıcı bir tarzla sonuçların analizi için bir indeksler dizisinin hesaplanmasını önermektedirler (20). Bunların bulgularına dayalı olarak denklik etkilerinin değerlendirilmesinde iki farklı yöntem seçilmiştir. İlk analizde değişim katsayısı (CV) hesaplanmış olup nüfus ağırlık değişkeni olarak kullanılmıştır. Değişim katsayısı için formülasyon şu şekildedir:

$$CV^* = [\sigma^{P^*}] / [(\Sigma A_i^* \cdot P_i)/(\Sigma P_i)] \quad (4)$$

CV^*, * senaryosundaki değişim katsayısı ve σ^{P^*} ise A_i^* erişilebilirlik değerinin standart sapması olup P_i nüfusu ile ağırlıklandırılmıştır.

Bu indeks öncelikli olarak benzer çalışmalarda söz konusu amaç için kullanılmaktadır. Arttırılmış bir CV değeri, örneğin olumsuz bir denklik etkisi gibi, denklikte bir azalma anlamına gelmekte olup düşürülmüş bir CV değeri ise örneğin daha dengeli bir yersel erişilebilirlik dağılımı gibi olumlu bir denklik etkisi anlamına gelmektedir.

İkinci olarak her bir kentteki duruma odaklanarak, erişilebilirlikteki nispi ve mutlak bir gelişimin normalize bir değeri her bir kent için hesaplanmaktadır. Bu iki değer, bir kentin yüksek mutlak gelişim oranına sahip olması ihtimaline bağlı olarak bütünleyicidir fakat eğer başlangıç erişilebilirlik değeri düşük ise nispeten düşük bir gelişim oranı ortaya çıkmaktadır. 1 değeri ortalama değer olarak atanmaktadır. Eğer erişilebilirlik gelişimi ortalamanın altında kalır ise 1'den daha küçük bir ikame değere eşit olmakta, eğer ortalamanın üstünde ise de 1'den büyük olmaktadır (21).

Bu normalize değer erişilebilirlik değerlerinin kentler arasında nasıl dağıldığının analizini mümkün kılmaktadır. Hangi kentlerin diğerlerinden daha fazla fayda temin ettiğini ve gelişimlerin üniform (düzenli) bir şekilde dağılıp dağılmadığını (yaklaşık ortalama değerler bazında) ya da aralarındaki farklılıkların artıp artmadığını bu değer ortaya koymaktadır. Sonuçların artan yorumlanabilirliği, iyi bölgesel politikaların tasarlanması için değerlenebilir bir denklik haritalandırmasının meydana getirilmesi yolu ile türetilebilir. Metodolojinin geçerliliği için yeni yüksek hızlı demiryolu (YHD) hattı, 2005-2020 İspanya Stratejik Ulaştırma ve Altyapı Planı'nda (PEIT) önerilmiş olup mevcut durum çalışması olarak da belirlenmiştir. PEIT, yüksek hızlı demiryolu (YHD) vasıtası ile İspanya'nın bütün büyük kentlerini birbirine bağlamak için tasarlanmış olup 83,450milyon Euro'luk bir yatırımı ihtiva etmektedir. Bütün İspanya kentleri için erişilebilirlik değerleri hesaplanır iken verimlilik ve denklik etki analizleri bölgesel ekonomik merkezleri içeren 30 kente yoğunlaşmaktadır (22).

Mevcut durumdaki adımlar ise aşağıdaki gibidir.

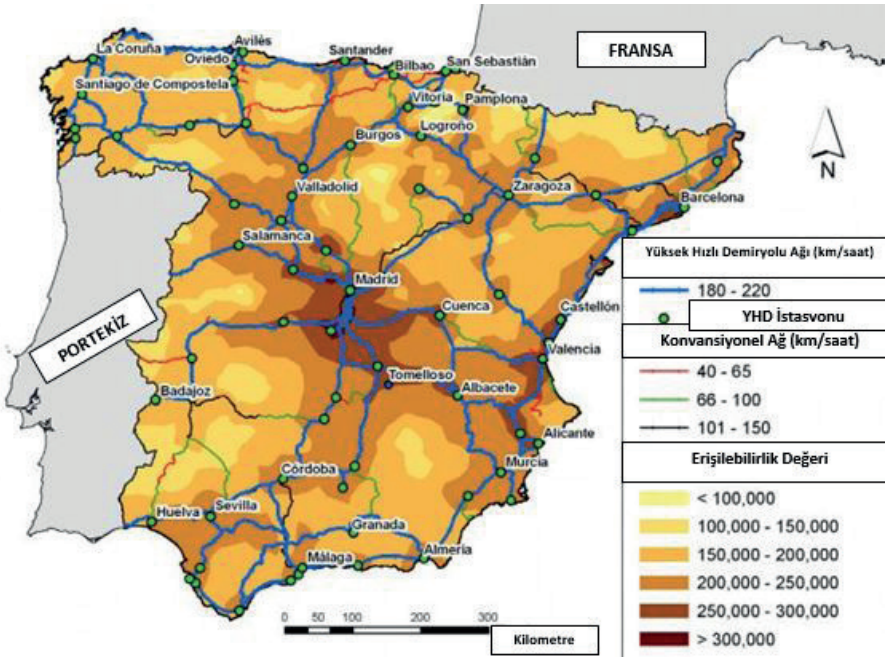
Adım 1: Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Veri Tabanı ve Erişilebilirlik Hesaplaması Uygulaması

Göz önüne alınan altyapı ağı, 180 ila 220 km/saat'lik ticari hızlarla İspanya'da 2020 yılına kadar planlanan 9600 km'lik bir yüksek hızlı demiryolu (YHD) hattını kapsamaktadır. Şekil 2, yüksek hızlı demiryolu (YHD) senaryosu olarak adlandırılan proje senaryosunu göstermekte olup yüksek hızlı demiryolu (YHD) istasyonlarının yerleşimini de içermektedir. Söz konusu harita hem mevcut yüksek hızlı demiryolu (YHD) hatlarını ve hem de PEIT dâhilindeki yüksek hızlı demiryolu (YHD) hatlarını kapsamaktadır. Şekil 1'deki yüksek hızlı demiryolu (YHD) olmayan senaryo 1990 yılındaki duruma (İspanya'da hiç yüksek hızlı demiryolu hattının olmadığı) karşılık gelmektedir. Her iki ağ durumundaki arazi kullanım karakteristikleri aynıdır ve örneğin PEIT'ın planlama vizyonunda olduğu gibi 2020 yılındaki durum öngörülerine karşılık gelmektedir (23).

Çalışma alanı ve analiz zonlama düzeyi temel olarak toplamda 8100 kent dâhilinde belediye düzeylerinde İspanya ana karasını ihtiva etmektedir. Karayolu ve demiryolu ağlarının yaklaşık 100.000 yay ile bir grafik olarak modellendiği vektörel bir coğrafi bilgi sistemi (CBS) kullanılmıştır. Çalışma alanında tanımlı her bir i kalkış ve j varış noktası, ulaştırma ve sosyo ekonomik verilere göre karakterize edilmektedir. Karayolu ağının, demiryolu istasyonlarında erişilebilirlik değerlerinden türetilebilen sonuçların daha yoğun bir dağılımının temini için demiryolu ağını tamamlayıcı olması gerekmektedir. Demiryolu ve karayolu ağındaki her bir hız ve uzunluk değeri seyahat süresinin hesaplanmasına imkân vermekte olup erişilebilirlik göstergesini içeren bir değişkeni ifade etmektedir (24).

Demiryolu durumunda her bir yay hem altyapı ve hem de hizmet kalitesinin özelliklerine göre verili bir ticari hızı ifade etmektedir. Demiryolu ağı modellemesinde bulunan gereklilikler, karayolu ulaştırma türü için olandan çok daha karmaşıktır. Bunun nedenleri; ray gabarisi (UIC/İber) ile ilgili verilerin bulunması gerekliliği, istasyonların yerleşimi ve seyahat sürelerinin hesaplanması için hizmet sıklıklarıdır (25).

Bu uygulamada her bir varış noktasının boyutunun karakterize edilmesi için jeolojik veritabanından seçili değişken, önceki çalışmalarda olduğu gibi nüfustur. Girdi veritabanı coğrafi bilgi sistemlerine (CBS) depolandıktan sonra, bir sonraki adım her bir i ve j çifti arasındaki seyahat sürelerinin hesaplanmasıdır. Bu seyahat süreleri varış noktası nüfus verileri ile her bir kalkış noktasının erişilebilirlik değerlerinin temini için bilahare ortaya konmuştur. Dolayısı ile erişilebilirlik değerleri İspanya'nın 8100 kenti için temin edilmekte ve her bir kentin ağırlık merkezi için hesaplanmaktadır (26). Erişilebilirlik hesaplamaları, tanımlı metodolojiyi takip eden Accesstool (erişilebilirlik aracı) olarak adlandırılan, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) tabanlı bir ağ erişilebilirliği analiz takımını kullanmaktadır. Bütün bir bölge için erişilebilirlik haritaları, kentlerin değerlerine göre enterpolasyon tekniklerini kullanarak çizilmektedir (27).



Şekil 4. *Yüksek Hızlı Demiryolu Senaryosu Erişilebilirlik Haritası*

Adım 2: Verimlilik Analizi

Ağ verimliliğine göre yüksek hızlı demiryolu ağı olmayan ve olan senaryoların etraflıca incelenmesinin temini için ikame erişilebilirlik değerleri sırası ile Şekil 3 ve Şekil 4'te haritalandırılmıştır. Tablo 1, bölgesel ekonomik merkez olan seçili 30 kentin erişilebilirlik değerlerini göstermektedir. Erişilebilirlik değeri hem mutlak ve hem de nispi terimler ile (yüksek hızlı demiryolunun olmadığı senaryoya kıyasla) gösterilmektedir. Her iki değerin ilavesi her bir senaryoda elde edilen sonuçların ve farklı erişilebilirlik göstergeleri arasında yüzdelik değişim değerlerinin daha kolay karşılaştırılmasına imkân vermektedir (28).

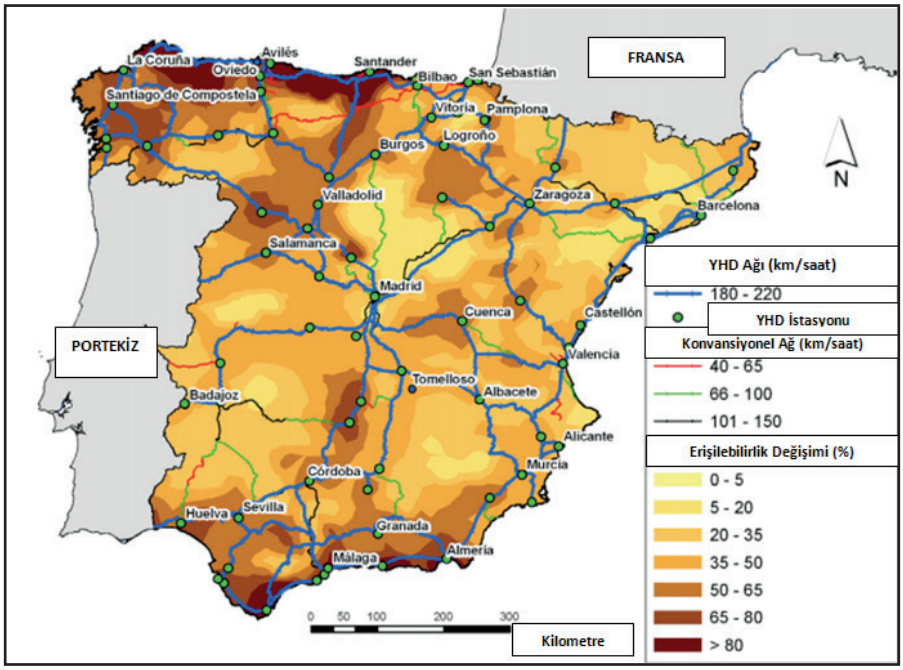
Şekil 3 yüksek hızlı demiryollarının (YHD) olmadığı senaryoda, daha yüksek düzeyli erişilebilirliklere sahip kentler iyi kaliteli konvansiyonel demiryolu hatları ile bağlanan alanlarda konumlanmaktadır. Zaragoza, Albacete, Valladolid ile Madrid arasındaki orta büyüklüklü kentlerde olduğu gibi, Madrid merkezli dairesel olarak değişen koridorlardaki kentler ele alınmaktadır. Aynı zamanda Barselona, Valencia ve Alicante gibi büyük nüfuslu kentleri birbirine bağlayan, kıyıya paralel olarak işletilen Akdeniz koridoru da değerlendirilmektedir. Bütün bu kentler yukarıda Tablo 1'de belirtilen ulusal ortalama değerin üzerinde olan yüksek hızlı demiryollarının (YHD) olmadığı senaryoda erişilebilirlik değerlerine sahiptir. En düşük erişilebilirlik düzeyindeki kentler kuzeyde yer almaktadır. Bu kentler oldukça zayıf bir demiryolu altyapısına sahiptirler ve Tablo 1'de görüldüğü üzere ülkenin ana ekonomik merkezlerinden oldukça uzaktadırlar (29).

Bu durum Şekil 4'te görüldüğü üzere yüksek hızlı demiryolu (YHD) olan senaryoda yüksek hızlı demiryolu (YHD) ağının gelişimini önemli ölçüde arttırmaktadır. Yüksek hızlı demiryolu (YHD) ağı olan senaryoda erişilebilirlik düzeyi bölge sathında artmaktadır. Genelde daha yüksek erişilebilirlik değerleri, yüksek hızlı demiryolu (YHD) hattı kısa bir seyahat süresi dâhilinde diğer büyük kentleri ulaşılabilir hale getirdiğinden dolayı Madrid gibi oldukça büyük kent kümelenmeleri haricinde yüksek hızlı demiryolu (YHD) istasyonlarının çevresindeki alanlarda yoğunlaşmaktadır. İyileştirilmiş erişilebilirlik düzeyleri dâhilindeki adaların mevcudiyeti genelde bu istasyonların mücavir alanında olup en önemli ya da Cuenca ve Cordoba gibi yakın kentlere adeta doğrudan erişilebilirlik önermektedir. Badajoz, Cordoba ve Sevilya gibi kentler ile bağlanan kentler gibi düşük bir nüfus yoğunluğu olan alanlarda bulunan küçük kentler, düşük erişilebilirlik değerlerine sahip olmaktadırlar (30).

Tablo 1. *Yüksek Hızlı Demiryolu Olan ve Olmayan Senaryolarda Erişilebilirlik Değerleri ve Gelişimleri (31).*

Kent	YHD İstasyonu	Nüfus* (X1000)	Erişilebilirlik Değerleri			
			YHD Olmayan Senaryo*	YHD Olan Senaryo*	Erişilebilirlik Değişimleri	
					Mutlak (A_s-Aσ*)	Nispi (%)
Albacete	Yes	185,4	201,4	274,2	72,8	36,1
Alicante	Yes	402,1	203,1	249,4	46,3	22,8
Almería	Yes	200,6	129,7	239,1	109,4	84,8
Avilés	No	80,7	96,4	159,9	63,5	65,8
Badajoz	Yes	167,5	140,6	192,4	51,8	37,1
Barselona	Yes	1754,5	291,3	361,3	70,0	24,0
Bilbao	Yes	340,0	157,0	252,7	95,7	61,0
Burgos	Yes	189,5	168,2	263,3	95,1	56,5
Castellón de la Plana	Yes	226,5	212,3	290,2	77,9	36,7
Cordoba	Yes	346,2	173,9	288,6	114,7	65,0
Cuenca	Yes	58,5	173,6	293,0	119,4	68,8
Granada	Yes	222,6	142,0	240,2	98,2	69,1
Huelva	Yes	153,8	128,1	214,7	86,6	67,6
La Coruña	Yes	242,2	116,5	193,8	77,3	66,3
Logroño	Yes	183,2	157,8	252,9	95,1	60,3
Madrid	Yes	3691,2	388,2	485,2	97,0	24,0
Malaga	Yes	577,1	148,0	272,2	124,2	83,9
Murcia	Yes	522,9	199,8	288,6	88,8	44,5
Oviedo	Yes	232,1	123,4	224,5	101,1	82,0
Pamplona	Yes	244,4	157,9	247,7	89,8	56,9
Salamanca	Yes	160,4	168,2	257,1	88,9	52,8
San Sebastián	Yes	194,0	139,2	241,9	102,7	73,8
Santander	Yes	182,8	118,4	235,5	117,1	98,9
Santiago de Compostela	Yes	90,2	119,3	200,9	81,6	68,4
Seville	Yes	719,4	172,4	265,4	93,0	54,0
Tomelloso	No	39,3	180,5	244,8	64,3	33,6
Valencia	Yes	890,8	246,0	334,8	88,8	36,1
Valladolid	Yes	323,4	182,3	301,1	118,8	65,1
Vitoria	Yes	246,1	164,6	257,5	92,9	56,4
Zaragoza	Yes	722,1	203,2	314,3	111,1	54,6
Seçili Kentlerde Ortalama Erişilebilirlik			166,1	258,9	92,8	53,5
Ulusal Ortalama Erişilebilirlik			136,3	214,4	78,1	42,4

Şekil 5 yüksek hızlı demiryolu (YHD) olan ve olmayan senaryolar arasındaki erişilebilirlik düzeylerindeki değişim yüzdelerini göstermektedir. Tablo 1'de ifade edildiği üzere ortalama gelişim değeri %42,4'tür (32). Bu durum, yüksek hızlı demiryollarının (YHD) olmadığı senaryoda erişilebilirlik değerleri çok düşük olduğundan dolayı, kuzeybatı ve güneydoğu çeyrek dairelerinde ortaya çıkabilen dönüşümleri açık bir şekilde vurgulamaktadır (33).



Şekil 5. *Yüksek Hızlı Demiryolu Olan ve Olmayan Senaryolar Arasında Erişilebilirlik Değişimleri*

Sonuçlar

Yüksek hızlı demiryolu (YHD) istasyonuna sahip olan kentler büyük gelişimler kaydetmektedir fakat söz konusu değer başlangıç erişilebilirlik değerlerine bağlıdır ve değerleri, yüksek hızlı demiryolunun (YHD) olmadığı senaryodaki değerler yükseldikçe, düşmektedir (34). Yüksek hızlı demiryolu (YHD) istasyonu olmayan kentlerdeki gelişim, söz konusu kentlerin (Tablo 1'de görüldüğü üzere Tomelloso ve Avilés gibi kentler) yüksek hızlı demiryolu (YHD) istasyonuna olan ulaştırma ağının kalitesine bağlı olmaktadır (35).

Tablo 1 en büyük gelişimlerin İspanya'nın güneyindeki (Malaga, Almería, Granada ve Huelva) ve kuzeyindeki (Santander, Oviedo ve San Sebastián) kentlerde kaydedildiğini göstermektedir (36). Bu kentler, birbirleri arasında yüksek hızlı demiryolu (YHD) hatları vasıtası ile oluşturulan hatların geliştirilmesine bağlı olarak hem mutlak ve hem de nispi değerler almaktadır (37). Bu da İspanya'nın diğer kentlerinden çok yüksek bir çekim ağırlıklandırmasına sahip olan Madrid, Barselona ve Valencia gibi İspanya'nın en yüksek nüfuslu kentlerini içeren ana sosyo ekonomik potansiyele sahip varış noktalarına yüksek kaliteli ve hızlı erişimi temin etmektedir (38).

En düşük gelişim yüzdeleri (diğer geri kalan kentlerden daha düşük olmasına karşın halen %20'nin üzerindeki oranlardan bahsedildiği not edilmeli-

dir) yüksek hızlı demiryollarının (YHD) olmadığı senaryoda Madrid (%24,0) ile Akdeniz koridorundaki Barselona (%24,0), Valencia (%36,1) ve Alicante (%22,8) gibi yüksek erişilebilirlik düzeylerine sahip olan büyük kentlerde ortaya çıkmaktadır (39). Bu kentler iyi kaliteli demiryolu hatları vasıtası ile birbirlerine bağlanmaktadır. Dahası bölgede daha yüksek bir ağırlıklandırmaya ve de diğer kentler daha az çekime sahip olduğundan dolayı da geri kalanından daha az bir faydaya sahip olmaktadırlar (40).

Ayrıca Madrid ve Barselona metropoliten alanında yer alıp tabloda yer almayan yüksek nüfuslu bir dizi kent de bulunmaktadır (41). Bu kentler; yüksek hızlı demiryolu (YHD) hatlarından etkilenmemenin bir sonucu olarak Madrid ve Barselona ile yoğun ilişkilerine bağlı olarak %20'nin altında gelişimler kaydetmektedirler (42). Bu kentlerin aynı zamanda yeraltı raylı sistemler gibi toplu ulaştırma hizmetlerine sahip olduğu, bunun da adeta büyük kentlere komşu olmanın bir parçası olduğu da vurgulanmaya değer bir başka noktadır.

Ardından yeni yüksek hızlı demiryolu (YHD) hattının etkilerinin çalışılması için 3 temsili kentin durumu daha detaylı olarak sınanmıştır. Seçili kentler Alicante, Santander ve Burgos'tur. Alicante kendisini ana kentlere bağlayan önemli bir koridor üzerinde bulunduğundan dolayı, yüksek hızlı demiryolları (YHD) olmayan senaryoda iyi bir demiryolu bağlantısına sahiptir. Santander ise yeni yüksek hızlı demiryolu (YHD) hattı kendisini en yakın ana kentlere ve İspanya'nın geri kalanına bağlamasına karşın oldukça yetersiz bir demiryolu altyapısına sahiptir. Son olarak Burgos ise mücavir alanındaki kentler ile iyi bağlanmış durumdadır fakat yüksek hızlı demiryolları (YHD) olmayan senaryoda düşük kaliteli bir altyapıya sahiptir (43).

Alicante yüksek hızlı demiryolları (YHD) olmayan senaryoda iyi düzeyde bir demiryolu bağlantısına sahiptir. Akdeniz koridorunun bir parçasıdır ve konvansiyonel bir demiryolu ile hizmetlendirilmesine karşın 120 km/saat'lik bir ticari hıza sahip olmakta ve Barselona, Valencia ve Murcia (Mürsiye) kentlerini birbirine bağlamaktadır (44). Bu iki özellik hattı ortalama erişim düzeylerinin üzerine taşımaktadır. Yüksek hızlı demiryolu (YHD) hatları Alicante'yi ülkenin geri kalanı ile bağlamasına karşın sadece seyahat sürelerinin düşürülmesi sayesinde daha iyi bir erişilebilirlik sağlamakta olup ana varış noktalarına erişilebilirlik düzeyi zaten yüksektir.

Yüksek hızlı demiryollarının (YHD) olmadığı senaryoda Santander'in İspanya'nın diğer bölgeleri ile demiryolu bağlantısı oldukça zayıf kalmaktadır. Yeni hat bu durumu değiştirmektedir. Yüksek hızlı demiryolu (YHD) Santander'i en yakındaki büyük kentler (Bilbao, Oviedo ve La Coruña) VE İspanya'nın geri kalanındaki büyük kentlerle (Madrid, Valladolid) bağlamaktadır. Bu durum mutlak değerler itibari ile oldukça önemli gelişimler üretmektedir. Erişilebilirlik gelişimi %98,9'dur (45).

Burgos yüksek hızlı demiryolu (YHD) olmayan senaryoda ülkenin kuzeyi ve merkezi ile iyi bir şekilde bağlanmaktadır (46). Alicante'de olduğu gibi yüksek hızlı demiryolu (YHD) hatları, demiryolu başlangıç bağlantıları zaten iyi olduğundan dolayı sadece seyahat sürelerindeki azalmalara bağlı olarak daha iyi bir erişilebilirlik temin etmektedir (47). Burgos'un en kendine has özelliği ise diğer kentlere kıyasla mevcut durumunu büyük ölçüde korumasıdır. Erişilebilirlik düzeyi açık bir şekilde büyük bir artış göstermekte (%56,5) fakat bu gelişimler ortalama değerlere tekabül etmekte ve diğer kentlere nazaran mevcut durumunu da devam ettirmektedir.

KAYNAKÇA

1. Adler, N., Pels, E., & Nash, C. (2010). High-speed rail & air transport competition: Game engineering as tool for cost-benefit analysis. Transportation Research Part B, 44(7), 812–833.
2. Banister, D., & Berechman, Y. (2003). The economic development effects of transport investments. In A. Pearman, P. Mackie, & J. Nellthorp (Eds.), Transport projects programmes, and policies: Evaluation needs and capabilities. Aldershot: Ashgate.
3. Baradaran, S., & Ramjerdi, F. (2001). Performance of accessibility measures in Europe. Journal of Transportation and Statistics, 4(2/3), 31–48. Special issue on Methodological issue in accessibility.
4. Blum, U., Haynes, K. E., & Karlsson, C. (1997). Introduction to the special issue: The regional and urban effects of high-speed trains. The annals of regional science, 31(1), 1–20.
5. Bröcker, J., Capello, R., Lundqvist, L., Meyer, J., Rouwendal, J., Schneekloth, N., et al. (2004). Final report of action 2.1.1. of the European spatial planning observatory network (ESPON) 2000–2006.
6. Christian-Albreschts-Universität Kiel, Kiel. Bröcker, J., Korzhenevych, A., & Schürmann, C. (2010). Assessing spatial equity and efficiency impacts of transport infrastructure projects. Transportation Research Part B, 44, 795–811.
7. Bruinsma, F. R., & Rietveld, P. (1993). Urban agglomerations in European infrastructure networks. Urban Studies, 30(6), 919–934.
8. Bruinsma, F. R., & Rietveld, P. (1998). The accessibility of European cities: Theoretical framework and comparison of approaches. Environment and Planning A, 30, 499–521.
9. Button, K. J. (1993). Transport economics. Cambridge: University Press. Campos, J., & de Rus, G. (2009). Some stylized facts about high-speed rail: A review of HSR experiences around the world. Transport Policy, 16, 19–28.
10. Domanski, R. (1979). Accessibility, efficiency and spatial organization. Environment and Planning, 11, 1189–1206.
11. EC (1999). European spatial development perspective (ESDP): Towards balanced and sustainable development of the territory of the European Union. Committee of Spatial Development, Luxembourg.
12. Garmendia, M., Ureña, J. M., & Coronado, J. M. (in press). Long-distance trips in a sparsely populated region: The impact of high-speed infrastructures. Journal of Transport Geography. doi:10.1016/j.jtrangeo.2010.06.002.
13. Geurs, K., & Ritsema van Eck, J. R. (2001). Accessibility measures: Review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transportation scenarios, and related social and economic impacts. RIVM Rapport 408505006,

RIVM. Bilthoven, The Netherlands.

14. Geurs, K., & Ritsema van Eck, J. R. (2003). Evaluation of accessibility impacts of landuse scenarios: The implications of job competition, land-use, and infrastructure developments for the Netherlands. Environment and Planning B: Planning and Design, 30, 69–87.

15. Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. Journal of Transport Geography, 12(2), 127–140.

16. Givoni, M. (2006). Development and impact of the modern high-speed train: A review. Transport Reviews, 26(5), 593–611.

17. Gutiérrez, J. (2001). Location, economic potential and daily accessibility: An analysis of the accessibility impact of the high-speed line Madrid-Barcelona-French border. Journal of Transport Geography, 9(4), 229–242.

18. Gutiérrez, J., González, R., & Gómez, G. (1996). The European high-speed train network: Predicted effects on accessibility patterns. Journal of Transport Geography, 4(4), 227–238.

19. Gutiérrez, J., Monzón, A., & Piñero, J. M. (1998). Accessibility, network efficiency, and transport infrastructure planning. Environment and Planning A, 30, 1337–1350.

20. Halden, D. (2003). Accessibility analysis: concepts and their application to transport policy, programme and project evaluation. In A. Pearman, P. Mackie, & J. Nellthorp (Eds.), Transport projects programmes and policies: Evaluation needs and capabilities. Aldershot: Ashgate.

21. Hay, A. (1993). Equity and welfare in the geography of public transport provision. Journal of Transport Geography, 1(2), 95–101.

22. Holl, A. (2007). Twenty years of accessibility improvements: The case of the Spanish motorway building programme. Journal of Transport Geography, 15(4), 286–297.

23. Kobayashi, K., & Okumura, M. (1997). The growth of city systems with high-speed railway systems. Annals of Regional Science, 31(1), 39–56.

24. Laird, J. J., Nellthorp, J., & Mackie, P. (2005). Network effects and total economic impact in transport appraisal. Transport Policy, 12, 537–544.

25. López, E., Gutiérrez, J., & Gómez, G. (2008). Measuring regional cohesion effects of large-scale transport infrastructure investments: An accessibility approach. European Planning Studies, 16(2), 277–301.

26. López, E., & Monzón, A. (2010). Integration of sustainability issues in strategic transportation planning: A multi-criteria model for the assessment of transport infrastructure plans. Computer Aided and Civil Infrastructure Engineering, 25, 440–451.

27. López, E., Monzón, A., Ortega, E., & Mancebo, S. (2009). Assessment of cross-border spillover effects of national transport infrastructure plans: An ac-

cessibility approach. Transport Reviews, 29(4), 515–536.

28. Martin, F. (1997). Justifying a high-speed rail project: Social value vs. regional growth. The Annals of Regional Science, 31, 155–174.

29. Martín, J. C., Gutiérrez, J., & Román, C. (2004). Data envelopment analysis (DEA) Index to measure the accessibility impacts of new infrastructure investments: The case of the high-speed train Corridor Madrid-Barcelona-French Border. Regional Studies, 38(6), 697–712.

30. Martínez, H., & Givoni, M. (2009). The accessibility impact of a new High-speed Rail line in the UK – A preliminary analysis of winners and losers working paper N 1041, Transport studies unit. School of Geography and the Environment, University of Oxford.

31. Ministerio de Fomento (2005). Plan estratégico de infraestructuras y transporte 2005–2020 (PEIT). Secretaría de Estado de Infraestructuras y Planificación, Dirección General de Planificación y Coordinación Territorial, Madrid.

32. Peters, D. (2003). Cohesion, policentricity, missing links and bottlenecks: Conflicting spatial storylines for Pan-European transport investments. European Planning Studies, 11(3), 317–339.

33. Plassard, E. (1991). Le train á grande vitesse et le réseau des villes. Transports, 345, 14–22.

34. Pol, P. M. J. (2003). The economic impact of the high-speed train on urban regions. European regional science association econpapers. (Retrieved 06.12.09).

35. Puga, D. (2002). European regional policy in light of recent location theories. Journal of Economic Geography, 2(4), 372–406.

36. Reggiani, A. (1998). Accessibility, trade and location behaviour. Aldershot: Ashgate.

37. Rietveld, P., & Nijkamp, P. (1993). Transport and regional development. In J. Polak & A. Heertje (Eds.), European transport economics, European conference of ministers of transport (ECMT). Oxford: Blackwell Publishers.

38. Román, C., Espino, R., & Martín, J. C. (2010). Analyzing competition between the high speed train and alternative modes: The case of the Madrid-Zaragoza-Barcelona Corridor. Journal of Choice Modelling, 3(1), 84–108.

39. Schürmann, C., Spiekermann, K., & Wegener, M., (1997). Accessibility indicators. Berichte aus dem Institüt for Raumplanung 39, IRPUD, Dortmund.

40. Talen, E. (1998). Visualizing fairness: Equity maps for planners. Journal of the American Planning Association, 64(1), 22–49.

41. Talen, E., & Anselin, L. (1996). Assessing spatial equity: An evaluation of measures of accessibility to public playgrounds. Environment and Planning A, 30, 595–613.

42. Ureña, J. M., Garmendia, M., Coronado, J. M., Vickerman, R., & Romero, V., (2010). New metropolitan processes encouraged by high-speed rail: The cases

of London and Madrid. In 12th WCTR, Lisbon-Portugal proceedings.

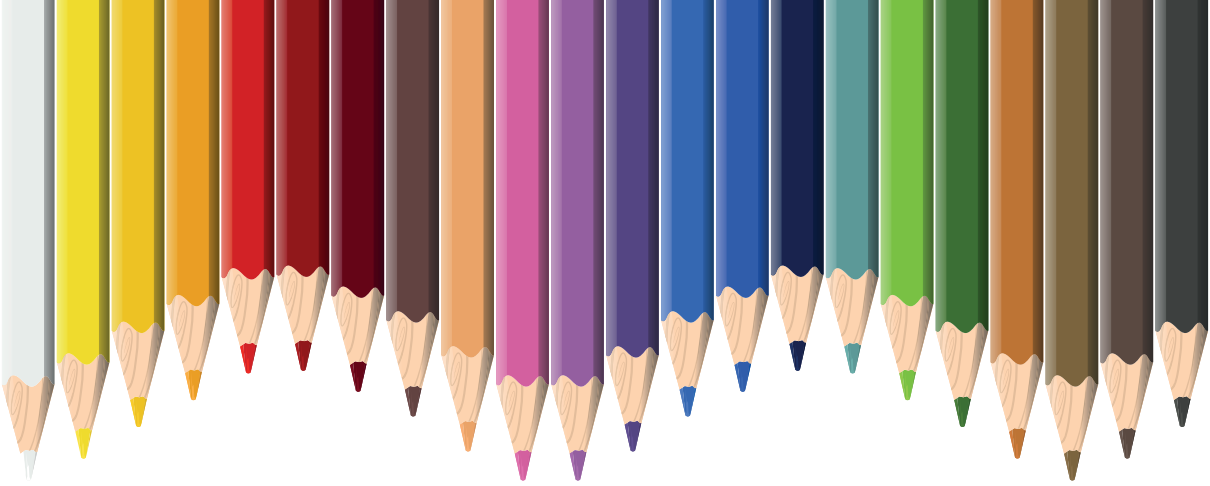
43. Ureña, J. M., Menerault, P., & Garmendia, M. (2009). The high-speed rail challenge for big intermediate cities: A national, regional and local perspective. Cities, 26(5), 266–279.

44. van den Berg, L., & Pol, P. M. J. (1998). The urban implications of the developing European high-speed-train network. Environment and Planning C: Government and Policy, 16(4), 483–497.

45. van Winden, W., van der Berg, L., & Pol, P. (2007). European cities in the knowledge economy: Towards a typology. Urban Studies, 44(3), 525–549.

46. Vickerman, R., Spiekermann, K., & Wegener, M. (1999). Accessibility and economic development in Europe. Regional Studies, 33(1), 1–15.

47. Vickerman, R., & Ulied, A. (2009). Indirect and wider economic impacts of high speed rail. In G. de Rus (Ed.), Economic analysis of high speed rail in Europe (pp. 89–118). Madrid: Fundación BBVA.



Bölüm 3

CNC FREZELEMEDE HİBRİD YAPAY ZEKA SİSTEMİ KULLANARAK ADAPTİF KONTROLLÜ OPTİMİZASYON SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Yusuf FEDAİ[1]
Ali ÜNÜVAR[2]

1 Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendsiliği bölümü, https://orcid.org/0000-0003-4546-8830 yusuffedai@osmaniye.edu.tr
2 İstanbul Ticaret Üniversitesi https://orcid.org/0000-0001-7285-1531. aunuvar@ticaret.edu.tr
* Not: "Frezeleme işlemlerinde sanal zeki adaptif kontrol sisteminin geliştirilmesi" isimli -Yusuf Fedai-Selçuk Üniversitesi- Fen bilimleri-Makine Mühendisliği bölümü-2016" doktora tezinden üretilmiştir.

1. Giriş

Günümüzde CNC işleme tezgâhlarındaki hızlı gelişmeler sayesinde, müşterinin istediği kalitede ürünlerin, hassas ve maksimum verimle üretilebilmesi sağlanmaktadır. Bu gelişmelere rağmen CNC işlemede hala birçok soruna cevap aranmaktadır. Bu sorunların başlıcalarını şu şekilde sıralayabiliriz;

- Nitelikli operatör: En uygun işleme parametrelerini seçebilecek nitelik ve nicelikte operatörün yetiştirilmesi sorunu,

Düşük talaş kaldırma oranları: Kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği gibi kesme parametrelerinin bir kısmının, operatör tarafından öngörülmesi veya kesici takım kataloglarından seçilmesi, dolayısıyla bu seçimde operatörün tecrübe, deneyim ve bilgisi etkin rol almaktadır. Operatör ise, pratikte nadiren meydana gelen en olumsuz koşulları hesaplayarak işleme değişkenlerini en koruyucu değerlerden seçmektedir(Koren, 1988).

- Düşük tezgâh verimi: Konservatif seçilen değerler yüzünden CNC tezgâhının verimsiz kullanımı,

- Büyük tolerans değerleri: İşleme esnasında zamana bağlı olarak artan takım aşınması ve bu aşınma sonucu ortaya çıkan değişken yüzey pürüzlülük değerleri.

- Zaman kaybı: karmaşık geometrik yüzeylerin sorunsuz ve güvenli bir şekilde işlenebilmesi için gereken işleme değerlerinin ayrı ayrı hesaplanması oldukça fazla zaman alır.

- Hataya yatkınlık: hesaplama ve veri işleme çok özellikli ve karmaşık yüzeylere sahip parçalar için oldukça uzun bir süreç alması hata olasılığını artıran bir etmendir.

Geri bildirim: Kontrol edilemeyen ve hesaba katılamayan değişkenlerin değerlendirilmek üzere geri bildirilememesi(Liang, Yeap, Rahmati, & Han, 2002) olarak sayılabilir.

Bu tür sorunları çözmek için araştırmacılar tarafından çok sayıda çalışmalar yapılmıştır(Stavropoulos, Souflas, Papaioannou, Bikas, & Mourtzis, 2023). Bu çalışmalar kapsamında Lui ve ark. CNC işleme sistemine müdahale edilerek, online işleme sürecini optimize etmek ve kontrol altında tutmak gerektiği fikrini ileri sürmüşlerdir(Liu, Cheng, & Zuo, 2001). *Adaptif kontrol* olarak adlandırılan bu sistem, çalışma anındaki değişiklikleri algılayarak tezgâhın optimizasyonu sağlayan sistemdir(Bousnina, Hamza, & Ben Yahia, 2023). İyi bir adaptif kontrol sistemi takım tezgâhının çalışma durumunu izlerken aynı zamanda sistemde meydana gelen değişiklikleri kullanıcıya aktarır ve sistem optimizasyonunu kendisi sağlar.

Ancak adaptif kontrolün uygulanmasına yönelik üç büyük engelle karşı-

laşılmaktadır. Bunlardan birincisi; gelişmiş CNC tezgahlarında parça işleme programlarının, bir çalışma süreci boyunca hazırlanmış programa, işleme esnasında dışarıdan parametre değişikliğine izin vermemesidir. Oysa adaptif kontrolün temel kuralı, çalışma esnasında meydana gelen değişikliği algılayarak sistemin yeni duruma kendisini ayarlamasıdır. Bu durum adaptif kontrolün temel yapısına ters düşmektedir. Diğer engel ise iş parçası-tezgah ikilisinin yapısal durumundan dolayı, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması gibi hedef çıktıların işleme esnasındaki online ölçümünün zorluğudur. Adaptif kontrolün önündeki son engel ise, Online bir adaptif kontrolde, günümüz tezgahlarının işleme hızı gözönüne alındığında cevap tepki süresinin oldukça yetersiz kalmasıdır.

Bütün bu olumsuzları gidermede sistemin, sanal olarak devreye girmesi çözüme yönelik en önemli adım olarak görülmektedir. Böylece parça işlenmeden önce sanal ortamda proses adım adım hazırlanarak süreç içerisinde ortaya çıkan değişimlere uygun koşullardaki işleme parametreleri belirlenmiş olacaktır.

Bu çalışma, online adaptif kontrolün uygulanmasındaki zorlukları elimine ederek optimum işleme koşullarının geliştirilmesi hakkındaki çalışmaları içermektedir. Çalışmanın ikinci bölümünde yapay zeka sistemleri kullanılarak yapılan tahmin ve optimizasyon yöntemleri konusundaki çalışmalar ele alınarak incelenmiştir. Üçüncü bölümde hibrit bir yapay zeka sisteminin yapısı, işleyişi ve deneysel çalışmalar konusunda bilgi verilmiştir. Dördüncü ve son bölümde ise sonuçlarla birlikte hibrid sistemin değerlendirilmesi ve beklentileri sunulmuştur.

2. Yapay zeka ve optimizasyon yöntemlerinin talaşlı imalatta kullanımı konusunda yapılan çalışmalar

Talaşlı imalatta işleme şartlarının çok karmaşık, doğrusal olmayan ilişkiler içinde olması, matematiksel teorilerin gelişim sürecini güçleştirdiğinden dolayı, Takım tezgahlarının adaptif kontrolüne yönelik çalışmalar son yıllarda zeki kontrolle bütünleşik olarak sürdürülmektedir. Yapay zeka tekniklerin daha kısa sürede bu karmaşık ilişkilere optimum çözümler üretebilmesi, talaşlı imalatta yapılan çalışmalarda yoğun olarak tercih edilmesine sebep olmuştur(Çolak, 2006). Gelişen Yapay Zeka Teknikleri, talaşlı üretimin tasarım ve analiz programlarının geliştirilmesinde, işleme şartlarının optimizasyonunda ve simülasyonunda, işleme anında gelişen problemlerin izlenmesinde ve önlenmesinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Talaşlı imalatta kullanılan yapay zeka ve optimizasyon yöntemleriyle yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak kesme kuvvetlerinin ölçümü, optimum kesme parametrelerinin tayini, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması tahminlerinde yapılmıştır. Kullanılan yöntemler ise Yapay Sinir Ağları, bulanık mantık, ANFIS, Genetik algoritma, Parçacık sürü optimizasonu, karınca koloni optimizasyonudur.

Adaptif kontrol konusunda yoğun çalışmalarda bulunan Lui ve ark. geleneksel CNC sistemlerindeki işleme parametrelerinin offline ayarlanmak zorunda kalması sebebiyle işleme sürecinde ortaya çıkan sıcaklık artışı, takım aşınması ve diğer bazı bozucu etkenlerden dolayı optimal işleme kriterlerini karşılamak amacıyla gerçek zamanlı ayarlanması gerektiğini belirtmişlerdir. Kısıtlı adaptif kontrolün (ACC - Adaptive Control Contstains) zamanla değişen işleme süresi sırasında maksimum çalışma koşullarını korumak için işleme parametrelerini kontrol ederek bu tür problemlerin çözümünde etkili olduğunu ileri sürmüşlerdir. Bu amaçla, Kısıtlı Adaptif kontrol (ACC) sistemlerini;

- Geri beslemeli kontrol (Feedback Controller Based ACC System),
- Parametrik Adaptif kontrol/kendinden dönmeli kontrole dayalı adaptif kısıtlamalı kontrol (Parameter Adaptive Control/Self-Turning Control Based ACC System),
- Model referanslı adaptif kontrol temelli adaptif kısıtlamalı kontrol (Model Reference Adaptive Control Based ACC System),
- Değişken yapılı kontrol temelli kısıtlı adaptif kontrol (Variable Structure System Based ACC System),
- Yapay Sinir Ağı temelli kısıtlı adaptif kontrol (Neural Network Based ACC System) ve
- Bulanık mantık kontrol temelli kısıtlamalı adaptif kontrol

olmak üzere teorik olarak 6 bölümde incelemişlerdir. Buradaki her bir sistemin ayrı ayrı avantaj veya dezavantajları olduğunu belirterek en uygun kontrol amacını karşılayan sistemin seçilmesi gerektiğini belirtmişlerdir(Liu et al., 2001).

Yapılan araştırmalarda optimum kesme parametrelerini elde etmek için Yapay Sinir Ağları, ANFIS, Genetik algoritmalar, parçacık sürü algoritması optimizasyonu, Yerçekimsel arama algoritması ve evrimsel algoritmalar kullanan çalışmalar yapılmıştır(Al-Zubaidi, Ghani, & Haron, 2013; Franci Cus & Balic, 2003; Pohokar & Bhuyar, 2014; Senthilkumaar, Selvarani, & Arunachalam, 2012; Suhail, Ismail, Wong, & Jalil, 2011). Evrimsel hesaplama teknikleri bir çok tümleşik eniyileme problemleri için geliştirilmiş olmasına rağmen, PSO temelde sürekli optimizasyon problemi için geliştirilmiştir. PSO doğrusal olmayan sürekli optimizasyon problemleri, tümleşik eniyileme problemleri ve karma tamsayılı doğrusal olmayan optimizasyon problemini çözmek için etkin bir optimizasyon aracı olabileceğini belirtmişlerdir(F Cus & Zuperl, 2009). Yine yapılan bir çalışmada Genetik algoritma, Tabu Arama algoritması, Karınca Kolonisi Optimizasyonu algoritması ve Parçacık Sürü Optimizasyonu, frezeleme işlemlerinde işleme parametrelerini optimize etmek

için üç amaç fonksiyonu ele alınarak (minimum üretim maliyeti, minimum üretim zamanı ve maksimum kâr oranı) incelemiştir. En uygun algoritmanın Parçacık Sürü Optimizasyonu olduğu görülmüştür(Baskar, Asokan, Prabhaharan, & Saravanan, 2005).

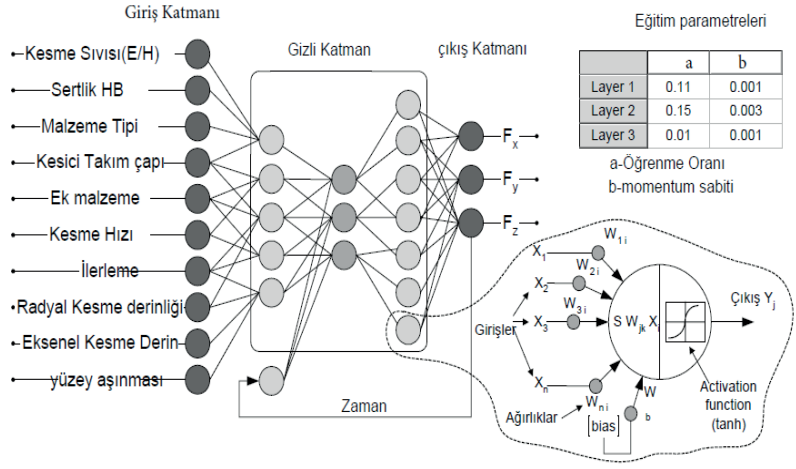
Özellikle tahmin problemlerinde bu konuda başarısı ispatlanmış olan ANFIS mimarisi Jang, tarafından bulunmuştur(Jang, 1993). Açık olarak uyarlamalı ağlara dayanan bulanık çıkarım sistemi veya uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi anlamına gelen ANFIS ismi, Adaptive Network- based Fuzzy Inference System veya Adaptive Neuro Fuzzy Inference System olan özgün adının baş harflerinden oluşmuştur. Esasen ANFIS yapısı, Sugeno tipi bulanık sistemlerin, sinirsel öğrenme kabiliyetine sahip bir ağ yapısı olarak temsilinden ibarettir. Bu ağ, her biri belli bir fonksiyonu gerçekleştirmek üzere, katmanlar halinde yerleştirilmiş düğümlerin birleşiminden oluşmuştur.

Sinirsel bulanık sistemler, Yapay Sinir Ağlarının paralel hesaplayabilme ve öğrenme kabiliyeti ile bulanık mantığın uzman bilgisini kullanarak sonuçlar çıkarabilme özelliklerinin birleşiminden oluşur. Sonuç olarak sinirsel bulanık sistemler sayesinde Yapay Sinir Ağları daha anlaşılır hale gelir(Chakradhar, Singaravel, Ugrasen, & Kumar, 2023).

ANFIS, ele alınan problem için oluşturulan yapıya göre olası tüm kuralları atayabilmekte veya kuralların veriler yardımıyla uzman tarafından atanmasına olanak vermektedir. ANFIS'in kural oluşturabilmesi veya kural oluşturulmasına olanak sağlaması uzman görüşlerinden faydalanması anlamına gelmektedir. Bu nedenle birçok tahmin probleminde Yapay Sinir Ağlarına uzman görüşlerinden faydalanma imkanı tanıdığı için ortalama hata kareler kriterine göre daha iyi sonuçlar elde edilmesini mümkün kılmaktadır. ANFIS'in öğrenme algoritması, en küçük kareler yöntemi ile geri yayılmalı öğrenme algoritmasının bir arada kullanılmasından oluşan melez öğrenme algoritmasıdır. Sinir ağına gömülü bilgilerden dilsel bir model çıkarır(Uros, Franc, & Edi, 2009). Özellikle son yıllarda ANFIS kullanılarak yapılan çalışmaların sayısında büyük bir artış gözlemlenmektedir(Balonji, Tartibu, & Okokpujie, 2023; Bousnina et al., 2023; Okokpujie & Sinebe, 2023; Siwawut, Srikhumsuk, & Butdee, 2023). Talaşlı üretim esnasında takım durumunun on-line olarak kontrolünün kaliteli ve ekonomik üretimdeki öneminden yola çıkarak yaptıkları çalışmada, Sağlam ve ark. takım durumunun izlenmesinde takım aşınmasını yansıtan doğrudan ve dolaylı izleme kriterleri incelenmiş, veri toplama ve değerlendirme teknikleri karşılaştırmışlardır. Özellikle takım durumu izleme ve takım aşınması ölçüm yöntemlerini gruplandırmışlardır. Gruplandırmalarına göre takım aşınması ölçüm yöntemlerini doğrudan ve dolaylı ölçüm metodu olarak iki grupta incelenmekte olup, doğrudan ölçme metodu; optik ölçme, Aşınma partikülleri ve radyoaktivite analizi, Takım/iş parçası teması elektrik direnci, İş parçası ölçüsündeki değişmenin ölçülmesi,

Takım iş parçası mesafesinin ölçülmesi ve Kesme kuvvetlerinin ölçümü olarak sayılabilir. Dolaylı ölçme metotlarına ise Akustik yayınım (Emisyon), Ses, Titreşim, Sıcaklık, Elektriksek giriş gücü ve Yüzey pürüzlülüğü sayılabilir. Bu metotlardan ölçümü en kolay ve kesin sonuçlara en yakın değerleri verdiği için kesme kuvvetlerinin ölçümü, literatürde en çok kullanılan metottur. Takım bozunumunu yansıtan birçok teknik geliştirilmiş olmasına rağmen endüstride bunlardan çok azı başarıyla kullanıldığını belirtmişlerdir. Tek bir ölçüm metodunun takım aşınmasını yansıtmadaki hata payını azaltmak ve takım aşınmasının karmaşık yapısı ve kesme parametreleri arasındaki nonlineer ilişkilerin çözümlenmesinde Yapay Sinir Ağlarının kullanılmasını yüksek tamlık ve hızlı çözümleme sağladığından, verilerin işlenmesinde tercihe değer bulmuşlardır. Sonuç olarak ta etkili bir otomatik takım körlenmesi algılama sistemi kurmak için kesme parametreleri ve takım aşınması arasındaki ilişkilerin iyi analiz edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir(Ünüvar & Sağlam, 1999). Alumic 79 malzemesini aşağı frezeleme yöntemi kullanarak yaptıkları bir çalışmada Matlab Programında ANFIS Kullanarak yüzey pürüzlülüğünü tahmin eden Dweri ve arkadaşları, değişken parametre olarak talaş hacmini oluşturan kesme hızı ilerleme oranı ve kesme derinliği ile 2 ve 4 kesici uçlu takımın etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada ANFIS tekniğinin, Alumic-79'un aşağı frezelemesinde efektif bir biçimde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu yaklaşımın diğer pek çok üretim süreçlerini optimize etmek için uygulanabilir olduğuna inanıldığını belirtmişlerdir(Dweiri, Al-Jarrah, & Al-Wedyan, 2003). Yang ve ark. parmak frezeleme operasyonlarında müşterinin isteklerini karşılayacak şekilde yüzey kalitesi elde etmek için, proses sırasında online kesme parametrelerini, yüzey pürüzlülüğünün iyileşmesini sağlayacak şekilde ayarlayan bir Bulanık ağ tabanlı adaptif yüzey pürüzlülük kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Sistem, Yapay Sinir Ağları ve bulanık mantıktan oluşmaktadır. Yapay Sinir Ağları sistemi, işleme süreçlerinden veri öğrenme yeteneğine sahip olmasını sağlarken bulanık mantık tekniği ise öğrenme süreci için akıl yürütülen ve kontrol veya sınıflandırma amaçlı bir kural bankası oluşturur. Yapı iki alt sistemden oluşmaktadır. Bu alt sistemlerden yüzey pürüzlülüğünü tahmin edip daha sonra arzu edilen değerle karşılaştırırken ikincisi, pürüzlülük değerinin arzu edilenden büyük olması halinde yeni bir ilerleme oranını işleme prosesi için önermektedir. Bu sonucun önemli bir gözlemi istenilen yüzey pürüzlülüğü üretmek için optimum proses verimliliğini koruyup optimum ilerleme oranı kullanarak uyarlanmış ilerleme oranının elde edilmiş olmasıdır. Sistemin deneysel test sonuçları, yüzey pürüzlülüğü tanıma sürecinde, adaptif ilerleme oranı uygulayarak% 94 oranında doğruluk olduğunu göstermiştir(Yang, Chen, Chow, & Lin, 2006). Özellikle ANFIS ile yüzey pürüzlülük tahminleri literatürde oldukça sık kullanılmıştır. Yapılan bir çalışmada, adaptif ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS)'i, yüksek hız çeliği (HSS) 4 kanallı elmas uçlu bir parmak freze kullanılarak, 6061 alüminyum iş parçasının yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek

için kullanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda yüzey pürüzlülüğüne, ilerleme oranının diğer iki parametreye göre daha etkin olduğu tespit edilmiştir(Lo, 2003). Kesme kuvvetlerinin tahmininde etkin bir model olan Yapay Sinir Ağları modelini kullanan Zuperl ve ark. bir yapay sinir ağı algoritmasını, küresel uçlu frezeleme ile işlemede meydana gelen kuvvetleri tahmin etmek için geliştirilmiştir. Geliştirilen geri beslemeli Yapay Sinir Ağları üç boyutlu Fx, Fy, Fz eksenlerinde kesme kuvvetlerini deneysel verilere % 4 yakınlıkla tahmin ederken, analitik yöntemlerdeki hata oranı % 11 civarında meydana gelmiştir. Karşılaştırma için 10 deney yapılmış girdi parametreleri olarak kuvvete etki eden 10 değişik parametre kullanırken ağın topolojisinde geri besleme parametresi olarak zaman değişkeni kullanılmıştır. Çalışmanın değerlendirilmesinde deney sonuçları kuvvet yönleri deney ve tahmin sonuçları olarak incelenmiş ve aralarındaki hata % payları karşılaştırılmıştır. Şekil 1'de oluşturulan yapay sinir ağının topolojisi gösterilmektedir(U Zuperl & Cus, 2004).



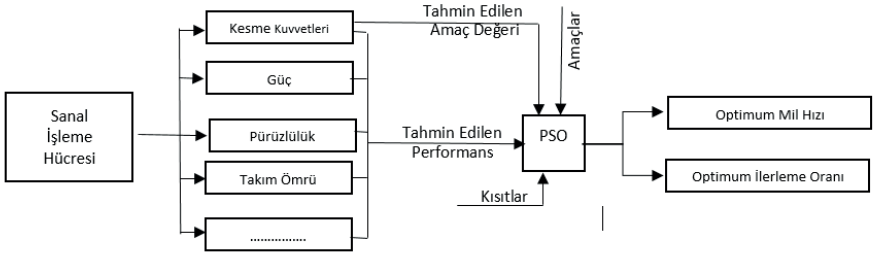
	a	b
Layer 1	0.11	0.001
Layer 2	0.15	0.003
Layer 3	0.01	0.001

Şekil 1. *Kuvvet Tahmininde Kullanılan Yapay Sinir Ağı Topolojisi(U Zuperl & Cus, 2004)*

(Zhang & Chen, 2007), çalışmalarının başlangıç aşamasında, adaptif kontrolün en önemli gerçek zamanlı ölçme elemanı olan sensörler üzerinde yoğunlaşmış ve 1993-2003 yılları arasında literatürde sensörlerle yapılan adaptif kontrol örneklerini bir tablo halinde sunmuşlardır. Yapacakları çalışmada en önemli iki bileşenin gerçek zamanlı yüzey pürüzlülük ölçüm datalarının elde edilmesi ve gerçek zamanlı karar verme mekanizmasının kurulması olduğunu göz önüne alarak çalışmalarını sürdürmüşlerdir. Bu şekilde parmak frezeleme operasyonlarında proses anında yüzey pürüzlülüğünün adaptif kontrolünü (An In-process Surface Roughness Adaptive Control (ISRAC)) adını verdikleri sistemi geliştirmişlerdir. Sistemde çoklu regresyon algoritması iki alt sisteme uygulanmak için kurulmuştur. Bunlar, proses anında yüzey pürüzlülüğü değerlendirmesi (In-process Surface Roughness Evaluation (ISRE))

ve proses anında adaptif parametre kontrolü (In-process Adaptive Parameter Control (IAPC)) alt sistemleridir. Bu sistemler hem ilerleme oranı, iş mili hızı, kesme derinliği hem de bir dinamometre sensörü ile saptanan kesme kuvveti sinyallerini içermektedir. Bunlardan ilki proses esnasında yüzey pürüzlülüğünü %91.5 tamlıkla tahmin etmektedir. İki sistem birleştiğinde % 100 başarı oranıyla frezeleme operasyonları esnasında yüzey pürüzlülüğünün adaptif olarak kontrolü sağlanmıştır. (Xu & Shin, 2008),Yaptıkları çalışmada parmak frezeleme prosesinde kuvvet kontrolü ile işleme prodüktivitesini arttırmak ve iş parçası kalitesini iyileştirmek için çok seviyeli bir bulanık kontrol sistemi (MLFC-Multi Level Fuzzy Control System) üzerine çalışmışlardır. Çalışmada sisteme gelen kuvvet verileri MLFC ve FLC sistemi tarafından ölçülerek takım ilerleme miktarını ayarlayabilen kontrol tekniği kullanılmıştır. Böylece istenen sabit kuvvet seviyesi korunurken ilerleme hızı gerçek zamanlı olarak ayarlanmıştır. Bu sistemde takım aşınması, iş parçası geometrisi ve malzeme özellikleri gibi frezeleme prosesinde var olan değişimlerin varlığında kuvvet, maksimum bir kabul edilebilir değerde tutulmuştur. Kontrolör tasarımında bulanık kuralları herhangi bir matematiksel model kullanmadan sezgisel olarak bulmuşlardır. Bir adaptasyon mekanizması kontrol parametrelerinin on-line olarak ayarlanması için oluşturulmuştur.

İşleme ekonomisi ve işleme kalitesi üzerinde önemli bir rol oynaması nedeniyle, optimum kesme parametrelerinin çok dikkatli seçilmesi gerekir. (Zhao, Li, Yao, & Liu, 2008), yaptıkları çalışmada, sabit kesme kuvveti elde etmek için kesme parametrelerin optimizasyonunu, kesme bazlı sanal işlemeye dayalı olarak incelemişlerdir. Çalışmada frezeleme işleminde kesme parametrelerinin sanal işleme dayalı optimizasyonu için Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) optimum mil hızı ve ilerleme oranını aramak kullanılmıştır. Zhao makalesinde, GA'nın, yaygın olarak kesme parametrelerinin optimizasyonunda kullanılmasına rağmen, kodlama ve kod çözme işlemlerinde genetik işlemlerin karmaşıklığı, değişken ikiden fazla olduğu zaman arttığını belirtip bunun da sürecin verimliliğini büyük ölçüde azaltacağı için değişkenin fazla olduğu durumlarda PSO algoritması kullanılması gerektiğini belirtmiştir. Yapılan fiziksel frezeleme ve simülasyon deneyleri sonucunda optimize edilmiş deneyin verimliliğinin % 16.7 daha fazla olduğu ölçülmüştür. Şekil 2'de yazarın sisteminde kullandığı optimizasyon şeması görülmektedir.



Şekil 2. *PSO Tabanlı Optimizasyon Şeması(Zhao et al., 2008)*

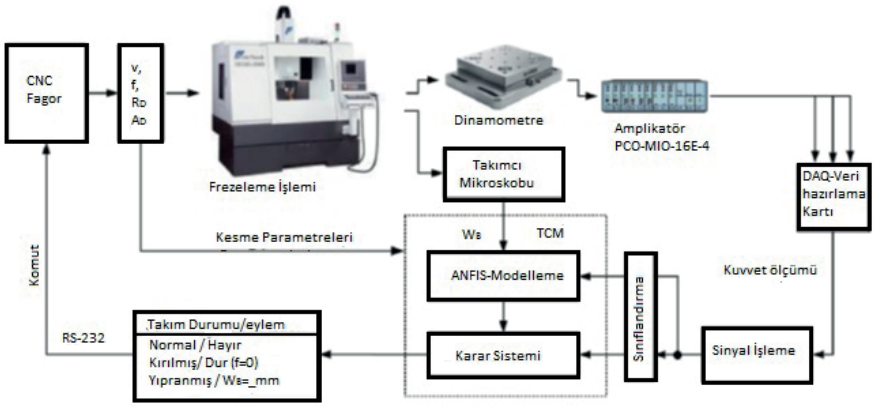
(Uros Zuperl, Čuš, & Kiker, 2006), parmak frezeleme işlemi için bir adaptif yapay kontrolör tanımlamışlardır. İki farklı YSA türü içeren yapı frezeleme prosesinin online olarak optimal kontrolü için kullanılmıştır. Geriye yayılım algoritmalı bir YSA prosesi tanımlamak ve optimal kesme girişlerini belirlemek için kullanılmıştır. İlerleme değeri optimize edilmiş değişken olarak seçilmiş frezeleme durumu ise ölçülen kesme kuvvetiyle tahmin edilmiştir. Bu çalışmalarının amacı takım aşınmasını, kırılmasını önlemek ve yüksek talaş kaldırma hacmi elde etmek için ilerlemeyi adaptif olarak ayarlayan güvenilir ve sağlam bir yapay kontrolör sağlamaktır. Aynı zamanda kesme kuvvetinin otomatik olarak düzenlenmesini sağlayarak frezeleme prosesinin verimliliğini arttırmaktır. (Zain, Haron, & Sharif, 2010), Yapay Sinir Ağları kullanarak, frezeleme işleminde yüzey pürüzlülüğüne etki eden değişkenlerin etkilerini araştırmışlardır. Özellikle yaptıkları çalışmayı kendilerinden önce yapılan çalışmalara dayandırarak bir tablo hazırlamışlar ve yapay sinir ağı yapılarını karşılaştırarak yüzey pürüzlülük tahmininde en iyi performansı veren ağı, 3 - 1 – 1 ağı olarak belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışmada aynı zamanda tahmin performansını ölçmek için deneysel bir çalışma yapmışlar ve küçük bir deneysel veri seti kullanarak en iyi sonucun elde edilebileceğini de göstermişlerdir. Yapılan çalışmada elde edilen analiz sonuçları; en iyi yüzey pürüzlülüğü değerinin yüksek devir, düşük ilerleme ve radyal talaş açısı ile elde edilebileceğini göstermiştir. (Asilturk, 2011), yaptıkları çalışmada, çoklu regresyon ve Yapay Sinir Ağları modelleri kullanarak yüzey pürüzlülüğünü tahmin eden bir sistem geliştirmişlerdir. Çalışmada kesme hızı, ilerleme oranı ve kesme derinliği gibi parametreler tam faktöryel deney tasarımı ile ölçülmüştür. Elde edilen veriler, yüzey pürüzlülük modelleri geliştirmek için kullanılmıştır. Deney tasarımı için, deneysel verilerin güvenilirliği ve güven sınırını artırmak için Yapay Sinir Ağları (YSA) ve çoklu regresyon analizi kullanmışlardır. Çoklu regresyon ve yapay sinir ağı modelleri, istatistik yöntemler kullanılarak mukayese edilmiştir. Analizler sonucunda, yapay sinir ağı modeli(%99,8) çoklu regresyon(%98,4) analiziyle mukayese edildiğinde, daha yüksek hassasiyette yüzey pürüzlülüğünü tahmin ettiği görülmüştür.

Yine Yapay Sinir Ağlarının, basitlik, hız ve öğrenme kapasitesi olarak çoklu regresyon analiziyle karşılaştırıldığında, yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmede çok güçlü bir araç olduğu görülmüştür.

Uygulamada çok sık karşılaşılan problem, CNC tezgahlarındaki online adaptif kontroldür. (U Zuperl, Cus, & Reibenschuh, 2011), bu soruna çözüm bulmak için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalıştıkları sistem genel olarak güç kontrol stratejisine dayanmaktadır. Bu tasarımın temel fikri off-line kesme koşullu optimizasyon algoritması ve adaptif kuvvet kontrolünü birleştirmektir. Bu yeni birleşik kontrol sistemi, çok karmaşık süreçleri standart yaklaşımlara kıyasla daha kolay ve doğru bir şekilde kontrol edilebilir. Geliştirilen kombine kontrol sisteminin amacı, mümkün olduğunca Talaş Kaldırma Hızını (MRR) yüksek tutarak ve mümkün olduğunca yakın bir referans değerine kesme kuvvetini muhafaza etmektir. Kombine kontrol sisteminde, ilerleme oranı anlık kesme koşullarına uyarlanacak şekilde ayarlanır. Kesme yükleri düşük olduğu zaman, sistem işleme zamanını ve üretim maliyetlerini önemli oranda azaltacağından, önceden programlanmış değerlerinin üzerinde ve ötesinde ilerlemeyi arttırır. İş mili yükleri yüksek olduğu zaman, ilerleme oranları hasar ve takım kırılmasını önlemek için emniyetli orana indirilir. Sisteme aşırı bir kuvvete algıladığında, otomatik olarak tezgah ve takımı korumak için makineyi durdurur. Günümüz tezgahları işleme programı harici dışarıdan müdahale kabul etmemektedir. Yazarlar bu sorunu CNC tezgahlarda bir emniyet tedbiri olarak sisteme monte edilen ve çalışma esnasında ilerleme oranın ve kesme hızını belirli oranlarda değiştirilmesi sağlayan kontrol düğmeleriyle aşmışlardır.

Kendini ayarlayabilen otomatik imalat sistemi elde etmenin en önemli unsurlardan biri, güvenilir bir takım aşınma izleme sisteminin kurulmasıdır. Bu prensipden yola çıkan (Čuš & Župerl, 2011), Yapay Sinir Ağlarından oluşan bir karar sistemi ile ANFIS takım aşınması tahmincisini bir arada kullanıldığı gerçek zamanlı, kırık takım tespit edebilen gelişmiş bir Takım İzleme Sistemini kurmuşlardır(Şekil 3). Temel varsayım takım koşullarını belirlemek için gerekli bilgileri içermesidir. Bu nedenle, kesme kuvvet sinyallerinden takım durum özelliklerini çıkararak serbest yüzey aşınması ve kesme kuvveti gibi kesme parametrelerinin arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla ANFIS metodu kullanılmıştır. Girdi parametreleri; kesme hızı, ilerleme oranı, kesme derinliği ve zaman, çıkış parametreleri ise serbest yüzey aşınması genişliği ve takım aşınma durumudur. Deneyde elde edilen kuvveti ve aşınma verileri, ANFIS modellemeye dayanan gelişmiş simülasyonu eğitmek için kullanılmıştır. Yapılan deneylerde Yapay Sinir Ağları kuvvet modellerine göre eğitilmiş takımın kırılacağı kuvvet değerlerini tanıyacak duruma getirilmiştir. Yapılan test deneylerinde gerçek zamanlı olarak takım koşullarını tanıma oranı % 94.9 bulunmuştur. Yapay sinir ağı, aynı zamanda ölçülen sinyallerin farklı arıza durumlarını ayırt etmek için kullanılmıştır. Geliştirilen bu takım izle-

me sisteminde (TCM), işleme sürecinde on-line olarak önceden ayarlanmış bir takım aşınma sınırında sistemi durdurarak takım değişikliği yapılabilir.



Şekil 3. *Takım İzleme Sistemi (TCM)(Čuš & Župerl, 2011)*

İşleme süreçlerinin denetim uygulamalarında Sinirsel Uyarlamalı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) bilimsel literatürde giderek daha yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu sistemler uyarlamalı koşullar ya da girdilere verilen bir dizi olası sonucu tahmin yeteneği nedeniyle, konvansiyonel kontrol teknikleri için çok zor olan süreçleri kontrol etmek için gereken potansiyele sahiptir. (Kabini, 2011), işleme süreçlerinin kontrolü ve uygulamalarında ANFIS e bakış isimli çalışmalarından bir çok alandaki ANFIS bir çok disiplindeki kullanımını araştırmışlar ve aşağıdaki alanlarda uygulanabileceğini önermişlerdir.

- Taşlama Frezeleme, tornalama ve delme gibi işleme işlemlerinde meydana gelen ısı hasarlarını tahmin ederek önlemek için.

- Talaşlı imalatta Frezeleme, kesme ve taşlama gibi güç gerektiren yerlerde takım kırılmasını tahmin etmek için,

- Tornalama Frezeleme gibi işleme sürecinde bileşenlerin boyut ve şekil kontrolünde,

- İşleme sürecinde titreşim kontrolünde,

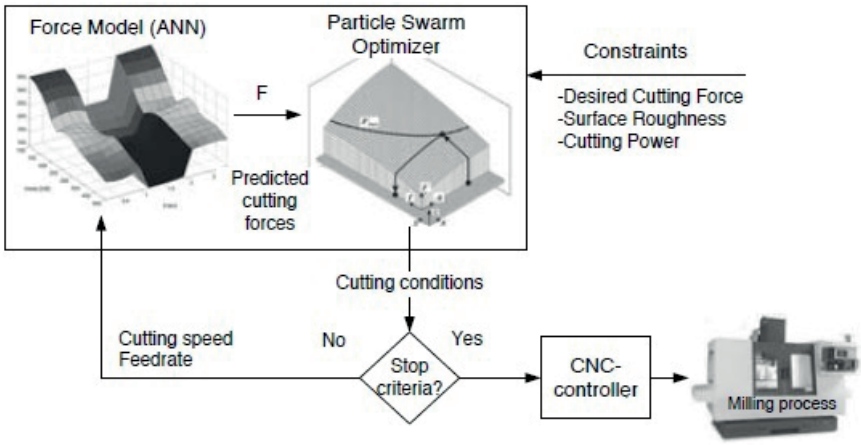
- Otomatik işleme süreçlerinde ilerleme ve iş parçasının konumlandırma durumlarında kullanılabilir.

Uygulamada, freze parametrelerin etkin seçimi maksimum takım ömrü, işleme yüzeyi istenilen pürüzlülük değeri, hedef operasyon verimliliği, metal kaldırma oranı, vb. dahil olmak üzere, birden fazla hedeflerin aynı anda dikkate alınmasını gerekir. Bazı durumlarda, tek bir tanımlanmış amaç fonksiyonu için optimum olan parametre ayarlarını, özellikle başka bir amaç fonk-

siyonu için uygun olmayabilir. Geleneksel optimizasyon yöntemleri ile çok amaçlı sorunların çözülmesi zordur ve tek yolu, amaçları tek bir hedef kümesi haline getirecek şekilde azaltmak ve buna göre ele almaktır. Bu nedenle genetik algoritmalar ve parçacık sürüsü optimizasyonu gibi evrimsel algoritmalar daha uygundur ve genellikle çok amaçlı optimizasyon problemlerinde kullanılmaktadır. (F Cus & Zuperl, 2009) yaptıkları çalışmada, yapay sinir ağ modelleme ve Parçacık Sürü Optimizasyonu ile frezeleme işlemini çok amaçlı optimize edilmesini sağlayan bir sistem geliştirmişlerdir. Sistemde Parçacık Sürü Optimizasyonu, birden fazla birbiriyle çelişen amaçlar mevcut olduğunda işleme parametrelerini, yüksek hızda freze işlemlerini verimli bir şekilde ve eşzamanlı olarak, optimize etmek için kullanılmaktadır. Bir Yapay Sinir Ağı modeli işleme sırasında kesme kuvvetleri tahmin etmek için, PSO algoritması ise optimum kesme hızı ve ilerleme elde etmek için kullanılmıştır. Optimizasyon esansında ilerleme oranı, kesme hızı, eksenel kesme derinliği, radyal kesme derinliği, kesme gücü, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü olmak üzere 7 adet dizi kullanılmıştır. Sonra, yapay sinir ağı kuvvet modeli amaç fonksiyonunu tahmin etmek için kullanılmıştır. Daha sonra, PSO algoritması kesme hızı ve ilerleme oranını optimize etmek için kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar MRR oranında % 28 bir iyileşme olduğunu göstermektedir. % 20 kadarda işleme süresi düşüşü gözlemlenmiştir.

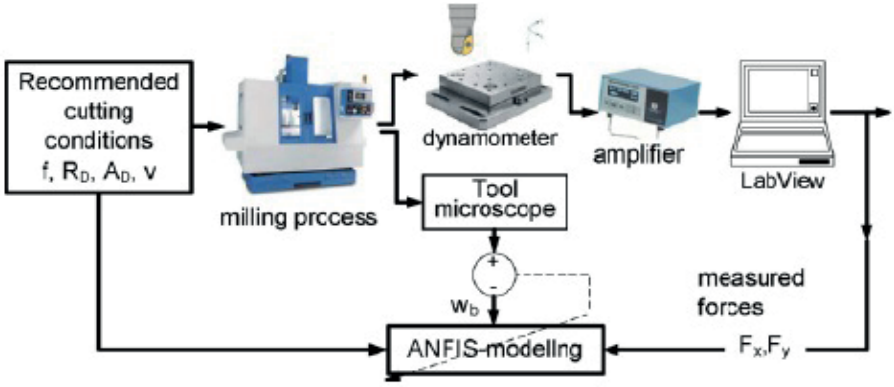
(F Cus & Zuperl, 2009; Župerl, Čuš, & Gečevska, 2007), yaptıkları çalışmada, yapay sinir ağ modelleme ve Parçacık sürü optimizasyonu ile frezeleme işlemini çok amaçlı optimize edilmesini sağlayan bir sistem geliştirmişlerdir(Şekil 4). Sistemde PSO, birden fazla birbiriyle çelişen amaçlar mevcut olduğunda işleme parametrelerini, yüksek hızda freze işlemlerini verimli bir şekilde ve eşzamanlı olarak, optimize etmek için kullanılmaktadır. Bir YSA modeli işleme sırasında kesme kuvvetleri tahmin etmek için, PSO algoritması ise optimum kesme hızı ve ilerleme elde etmek için kullanılmıştır. Optimizasyon esnasında ilerleme, kesme hızı, eksenel kesme derinliği, radyal kesme genişliği, kesme gücü, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü olmak üzere 7 adet dizi kullanılmıştır. Sonra, yapay sinir ağı kuvvet modeli amaç fonksiyonunu tahmin etmek için kullanılmıştır. Daha sonra, PSO algoritması kesme hızı ve ilerleme değerini optimize etmek için kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar MRR oranında %28 bir iyileşme olduğunu göstermektedir. % 20 kadarda işleme süresi düşüşü gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmanın, işleme alanında evrimsel hesaplama (evolutionary computation – EC) tabanlı optimizasyon teknikleri konusunda yeni bir sınıf oluşturduğunu ileri sürmüşlerdir. yapılan çalışma ayrıca, PSO optimizasyon tekniklerinin temellerini sunmaktadır. Evrimsel hesaplama teknikleri birçok tümleşik eniyileme problemleri için geliştirilmiş olmasına rağmen, PSO temelde sürekli optimizasyon problemi için geliştirilmiştir. PSO doğrusal olmayan sürekli optimizasyon problemleri, tümleşik eniyileme problemleri ve karma tam sayılı doğrusal olmayan opti-

mizasyon problemini çözmek için etkin bir optimizasyon aracı olabileceğini belirtmişlerdir.



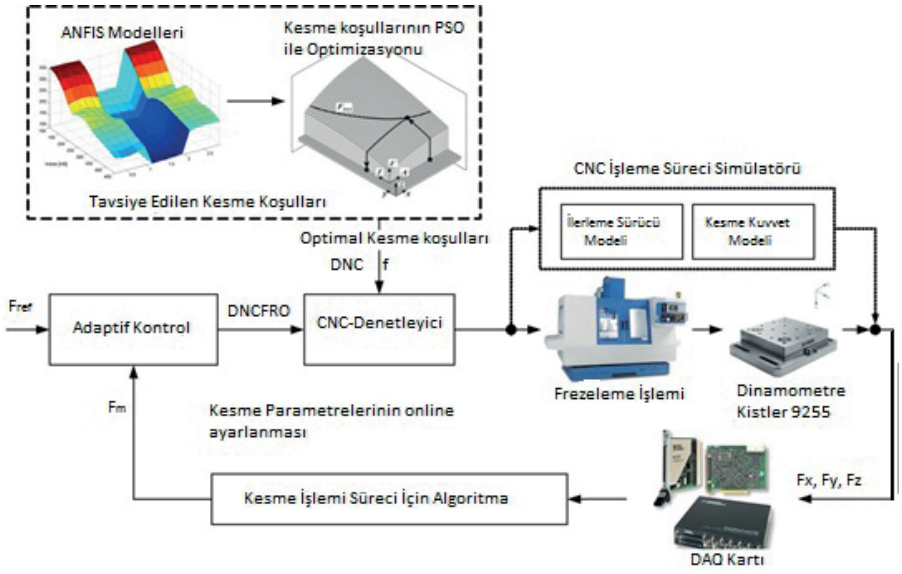
Şekil 4. *PSO tabanlı sinir ağı optimizasyon şeması(Župerl et al., 2007)*

(F Cus & Zuperl, 2009), yaptıkları çalışmanın amacını frezeleme işlemi sırasında yüzey aşınması tahmin edecek güvenilir bir yöntem geliştirmek olarak belirlemişlerdir. Dinamometreden alınan kesme kuvvet sinyalleri değerlendirerek takım aşınmasını tahmin eden bir adaptif bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) modeli uygulamışlardır(Şekil 5). ANFIS dilsel ögelerle takım aşınmasının değerini gelen kuvvet değişkenlerine göre tahmin etmektedir. Önerilen yöntem kullanılarak yapılan işleme deneylerinde, uygun maksimum kuvvet sinyalleri kullanarak, serbest yüzey aşınması farklı freze takımlarıyla yapılan işleme koşulları için gerçek aşınma değerine % 4 yakınlıkta tahmin edilebilir olduğunu göstermiştir.



Şekil 5. *ANFIS tahminli sistemin şeması(F Cus & Zuperl, 2009)*

(U Zuperl et al., 2011), yaptıkları çalışmada literatürde çok sık karşılaşılan bir problem olan CNC tezgahlarındaki çevrimiçi adaptif kontrole çözüm bulmak için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalıştıkları sistem genel olarak güç kontrol stratejisine dayanmaktadır. Bu tasarımın temel fikri çevrimdışı kesme koşullu optimizasyon algoritması ve adaptif kuvvet kontrolünü birleştirmektir. Bu yeni birleşik kontrol sistemi, çok karmaşık süreçleri standart yaklaşımlara kıyasla daha kolay ve doğru bir şekilde kontrol edilebilir. Geliştirilen kombine kontrol sisteminin amacı, mümkün olduğunca Talaş Kaldırma Hızı (MRR) yüksek tutarak ve mümkün olduğunca yakın bir referans değerine kesme kuvveti muhafaza etmektir. Kombine kontrol sisteminde ilerleme, anlık kesme koşullarına uyarlanacak şekilde ayarlanır. Kesme yükleri düşük olduğu zaman, sistem işleme zamanını ve üretim maliyetlerini önemli oranda azaltacağından, önceden programlanmış değerlerinin üzerinde ve ötesinde ilerlemeyi arttırır. İş mili yükleri yüksek olduğu zaman ilerleme, hasar ve takım kırılmasını önlemek için emniyetli değere indirilir. Sisteme aşırı bir kuvvete algıladığında, otomatik otomatik olarak tezgah ve takımı korumak için makineyi durdurur. Günümüz tezgahları işleme programı harici dışarıdan müdahale kabul etmemektedir. Yazarlar bu sorunu CNC tezgahlarda bir emniyet tedbiri olarak sisteme monte edilen ve çalışma esnasında ilerleme ve kesme hızını belirli oranlarda değiştirilmesi sağlayan kontrol düğmeleriyle aşmışlardır. Tezgahtan tezgaha değişmekle beraber yine de ilerleme hızı değişim oranı % 0-150 arasında değişmektedir. Yapılan deney sonuçlarına göre işleme zamanı % 40 azalmış MRR ise % 27 oranında artmıştır. Sistemin şematik çalışması Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. *Adaptif kontrollü sistemin şematik resmi(U Zuperl et al., 2011)*

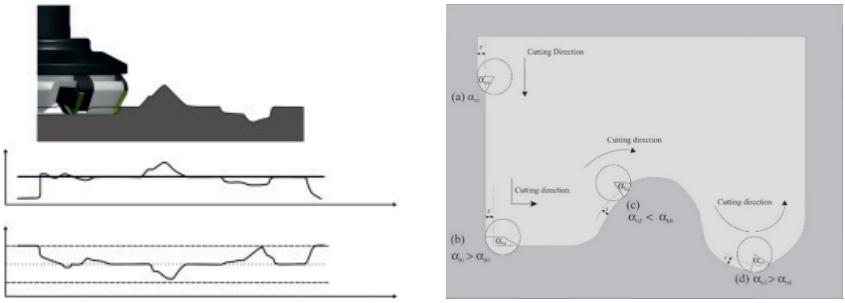
Frezelemede karşılaşılan verimli kesme problemlerinin temelinde çalışma esnasında, aynı süre içerisinde kaldırılan talaş hacminin değişimine karşılık, takıma gelen kesme kuvvetlerindeki değişimi karşılayacak optimum kesme parametrelerinin belirlenmesidir. Ekesenel kesme derinliği, radyal kesme genişliği, ilerleme ve kesme hızı, işleme operasyonun başarısında en büyük etkiye sahiptir. Eksenel kesme derinliği genellikle iş parçası geometrisi ve operasyon sırasına göre önceden belirlenir. Bu durum, işleme süresi ve maliyeti düşük tutmak için, iş parçasına gerekli derinlik verilerek mümkünse tek pasoda işlemin tamamlanması istenir. Bu nedenle aslında işleme parametresi seçme, uygun kesme hızı ve ilerleme kombinasyonunu seçme durumuna gelir(Baskar, Asokan, Saravanan, & Prabhaharan, 2006).

Literatürde ve teknolojik uygulamalarda yapılan birçok çalışmanın esası bu parametrelerden sadece ilerleme değerinin optimizasyonuna dayanır.

Esasında sabit bir ilerleme değerinde yapılan kesme işleminde kaldırılan talaş hacminin, dolayısıyla kesme kuvvetinin değişimi aşağıdaki sebeplerden meydana gelmektedir.

– Kaba pasolama esnasında ilk pasoda parça yüzeyinin imalat yöntemlerinden kaynaklanan şekil ve geometrik bozuklukları(Şekil 7a),

– Özellikle serbest formlu cep veya alın frezelemede takım yoluna bağlı olarak, takımın iç kavisli veya dış kavisli kesmelerinde meydana gelen hacim değişimini karşılayacak olan optimum parametrelerin seçimi Şekil 7b).



(a) *(b)*

Şekil 7. *Kaba pasolamada (a) ve serbest formlu cep veya alın frezelemede (b) talaş hacmi değişimi(Kloypayan & Lee, 2002)*

– Kesici takımın çalışma esnasında takım ömrü boyunca oluşan aşınmasıyla oluşan kuvvet artışları olarak sayılabilir.

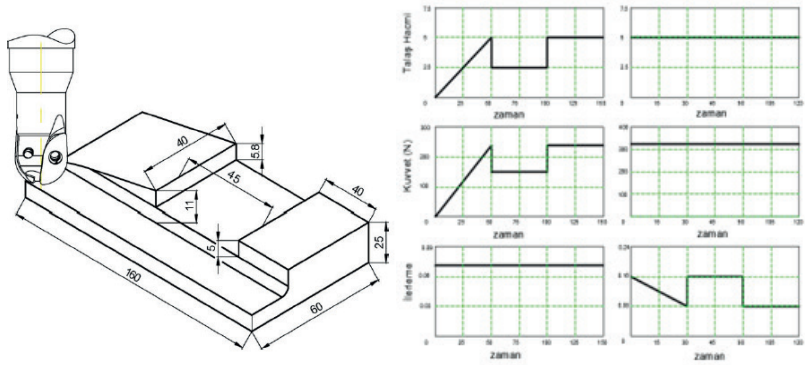
Literatürde yapılan çalışmaların temelinde adaptif kontrol kavramından değişen kesme koşullarına göre ilerleme değerinin optimizasyonuna dayanmaktadır. Aşağıdaki örnekte bu konuda yapılmış çalışmaların temel prensibi açıklanmıştır.

Çalışmaların esası, sistemdeki geometrik boyutsal değişim sonucu ortaya çıkan kuvvet değişimlerini karşılayan ilerlemenin değerinin ayarlanma durumudur. Kısa takım yoluna sahip geometrik boyutsal değişimlerde, değişim miktarına göre kesme kuvvetlerinde artma veya azalma meydana gelmektedir. Bu durumda geometrideki bu değişim boyunca tüm kesme kuvvetlerini maksimum değerde sabit tutabilmek için ilerleme değerinin artışlara paralel olarak değiştirilmesi gerekmektedir. Geometriye göre kuvvet değişimleri 3 değişik biçimde görülebilir. Sabit eksenel kemse derinliği kesme kuvvetlerinde de sabit bir artış görülecektir. Ancak geometrideki eksenel kesme derinliği düzgün artan ya da düzgün azalan bir yapıya sahipse kesme kuvvetleri de benzer şekilde düzgün artacak ya da düzgün azalacaktır. Değişen bu kuvvetleri dengelemek için ilerlemeyi de benzer şekilde değiştirmemiz gerekmektedir. Aşağıdaki Şekil 8. deki grafiklerde kaba frezeleme tasvir edilerek işleme boyunca a_p eksenel kesme derinliğinin nasıl düzensiz değiştiği görülmektedir.

Buna göre yapılacak kesme parametrelerinin optimize edilmesinde a_p eksenel kesme derinliği parçanın geometrisine bağlı olduğu için optimizasyon işlemi yalnızca ilerlemenin değiştirilmesiyle yapılabilmektedir. Sonuç olarak kaba işlemede oluşan kesme kuvvet değerindeki artış, takımın o ana kadar aşınması sonucu meydana gelen kuvvet değişimi ile takımın o andaki kesme geometrisindeki değişen a_p boyutuna bağlı değişimin toplamı şeklindedir. Böylece sistem bütünlüğü açısından kesme işlemi sürekliliği gözönüne alındığında sistemdeki gerçek kesme kuvvet değerinin değişimine cevap veren gerçek ilerleme değeri her iki sistemden gelen değerlerin toplamı şeklinde olmalıdır.

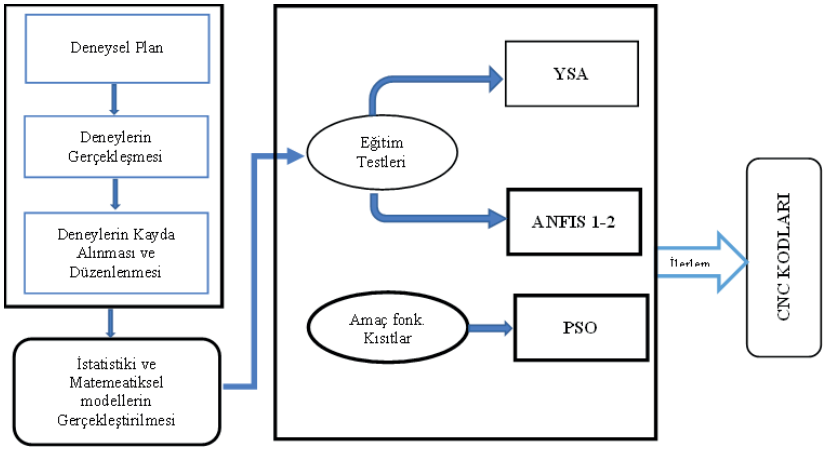
Araştırmacılarında yaptıkları çalışmalarda sıklıkla belirttikleri gibi yapılan çalışmalar ya sadece laboratuvar imkanlarıyla sınırlı kalmakta veyahut ta gerçek bir adaptif kontrolden ziyade, sadece belirli değerlerin değişimine bağlı kalan sistemler şeklinde olmaktadır. Özellikle çok sayıda sensörlerle yapılan ölçümlere dayalı adaptif sistemlerin hem maliyeti, hem de piyasa koşullarında öngörülen çalışma şartlarının imkansızlığı, çok daha düşük maliyet değeri olan bu çalışmanın önemini ortaya koymaktadır. Çalışmamıza esas olan sanal sistemin temelleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Çalışmada temel hedef; Kesme boyunca takım aşınması sonucu ortaya çıkan güç artışından doğan kuvvet değişimlerini karşılayacak kesme parametre değerlerini, değişen kuvvet ve aşınma değerlerine göre adaptif olarak optimize etmektir. Bu koşullarda öncelikli olarak kesme parametrelerinin başlangıç koşullarındaki en uygun kesme değerlerinin belirlenen takım yolu veya aşınma değeri periyodu boyunca, tekrarlanan bir şekilde optimizasyon işleminin uygulanmasına dayanır.



Şekil 8. *Değişik formdaki parçaların frezelemesine karşılık ilerleme ve kuvvetin değişimi*

Bu yapıda öncelikli olarak PSO tarafından optimum kesme parametreleri tayin edilir. PSO, optimizasyon işlemini yapısındaki amaç fonksiyonu doğrultusunda belirlenen kısıtlar dahilinde gerçekleştirir(Şekil 9). Bulunan bu optimum değerler daha önce yapılan deneylerle eğitilmiş ANFİS yapısına ve Yapay sinir ağlarına gönderilir. ANFIS/Regresyon denkleminden bulunan takım ömrüne göre takım yolu hesaplanır. Hesaplanan takım yolu kesilecek parçanın geometrisi de dikkate alınarak optimizasyon döngüsünün tekrarlanacağı L kesme yolu belirlenir. Belirlenen L takım yolu ve PSO'dan gelen kesme parametreleri eğitilmiş YSA'ya gönderilir. YSA kendisine verilen bu girdilere karşılık gelen Kesme kuvvet değeri ile takım aşınma miktarını çıktı olarak verir. YSA'dan elde edilen kuvvet çıktısının belirlenen değerler arasında olduğu kontrol edildikten sonra yeni döngü için PSO'ya gönderilir. YSA'dan elde edilen ikinci çıktı olan Vb aşınma miktarı da kontrol edilerek takım değiştirme durumu belirlenir.



Şekil 9. *Sanal sistem akış şeması*

3. **Zeki Adaptif Sanal Sistem**

Zeki adaptif sanal sistem; parçacık sürü optimizasyon algoritması kullanılan bir algoritma sistemi, geri beslemeli yapay sinir ağı ve sinirsel bulanık çıkarım sisteminden oluşan kompleks bir yapıya sahiptir.

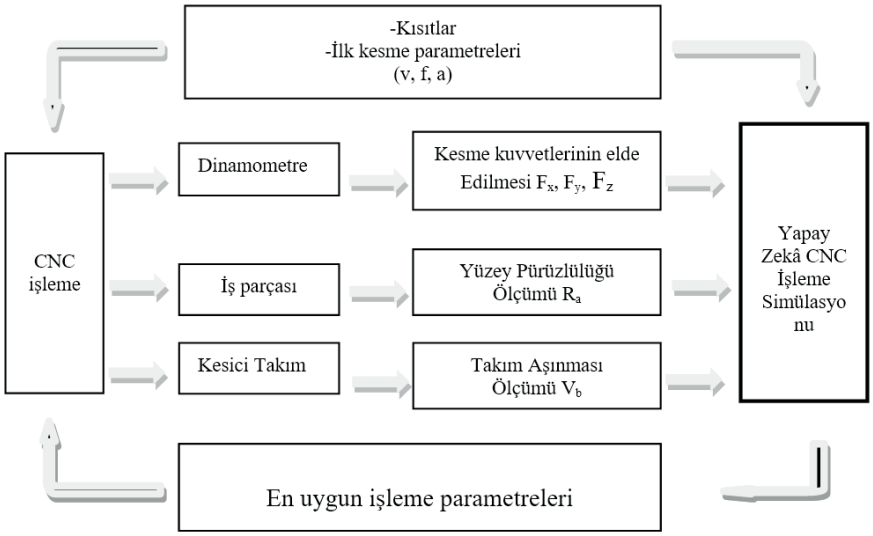
Çalışmada, girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki herhangi bir matematiksel işleme ihtiyaç duymadan, doğrusal olmayan modellemeyi sağlayabildiği, öğrenme, hafızaya alma ve veriler arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarma kapasitesine sahip olduğu için kesme kuvvetlerinin tahmininde Yapay Sinir Ağları, ana çıktıyı yani optimum kesme parametrelerinin tayinindeki başarısından dolayı Parçacık Sürü Optimizasyonu, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının tayin edilmesinde, son yıllarda bu konuda uygulanmış ve yüksek hassasiyette başarı göstermiş Uyarlamalı Sinirsel Bulanık çıkarım Sistemi (ANFİS) kullanılmaktadır. Akış şeması Şekil 10'da görülen sistemin çalışması şu şekilde özetlenebilir.

- Belirlenen deney planı doğrultusunda kesme parametreleri tezgaha girilerek deney iş parçasının kesme işlemi yapılır.

- Kesme işlemi süresince dinamometre vasıtasıyla tüm kesme zamanı boyunca oluşan F_x, F_y ve F_z kesme kuvvetleri amplikatör üzerinden bir DAQ kartı vasıtasıyla toplanarak PC ye aktarılır. PC'deki sinyal işleme programı ile sinyaller görüntülere dönüştürülerek kaydedilir.

- Her bir paso sonrası işlenen yüzeyden bir yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile çok sayıda pürüzlülük değeri ölçülerek bunların ortalaması alınır.

- Her bir paso sonrası bir takımcı mikroskobuyla takımda meydana gelen aşınma şeridi genişliği ölçülür. Deneyler takımdaki yan yüzey aşınma miktarı ISO 8688-1 de belirtilen Vb=0,3 mm değerine kadar sürdürülmüştür.



Şekil 10. *Sistemin Çalışma Döngüsü*

Hazırlanan deney planı doğrultusunda malzemenin CNC tezgahında işlenmesiyle elde edilen veri grubu eğitim ve test olarak ikiye ayrılır. Eğitim grubu verileri ile ANFIS ve YSA'nın eğitimi yapılır. Böylece sanal operatör çalışır duruma gelmiş olur.

Şekil 13'te Zeki sanal sistemin akış şeması görülmektedir. Sistemde kullanılan zeki sistemlerin görevleri, yapısı ve çalışması aşağıda açıklanmıştır.

a. PSO: Parçacık sürü optimizasyonu sistemdeki kesme parametrelerini optimize eden kısımdır. Optimizasyon işlemi için amaç fonksiyonu olarak minimum üretim zamanı ile maksimum talaş hacmi seçilmiştir. PSO belirlenen amaç fonksiyonunu min. yapmak için fonksiyon kısıtları dahilinde, kesme kuvvet parametrelerinin optimum değerlerini kendi çalışma döngüsü içerisinde bulur. Amaç fonksiyonunda kullanılan takım ömrü denklemi ile kısıtlarda kullanılan yüzey pürüzlülük ve kuvvet kısıtının kullanıldığı değerler, daha önce yapılan deneylerden elde edilen regresyon denklemleriyle sağlanmıştır. PSO'nun bulduğu ilk kesme parametreleri (v_0, f_0, ap_0, ae_0) olarak gösterilmiştir. Bu parametreler yardımıyla;

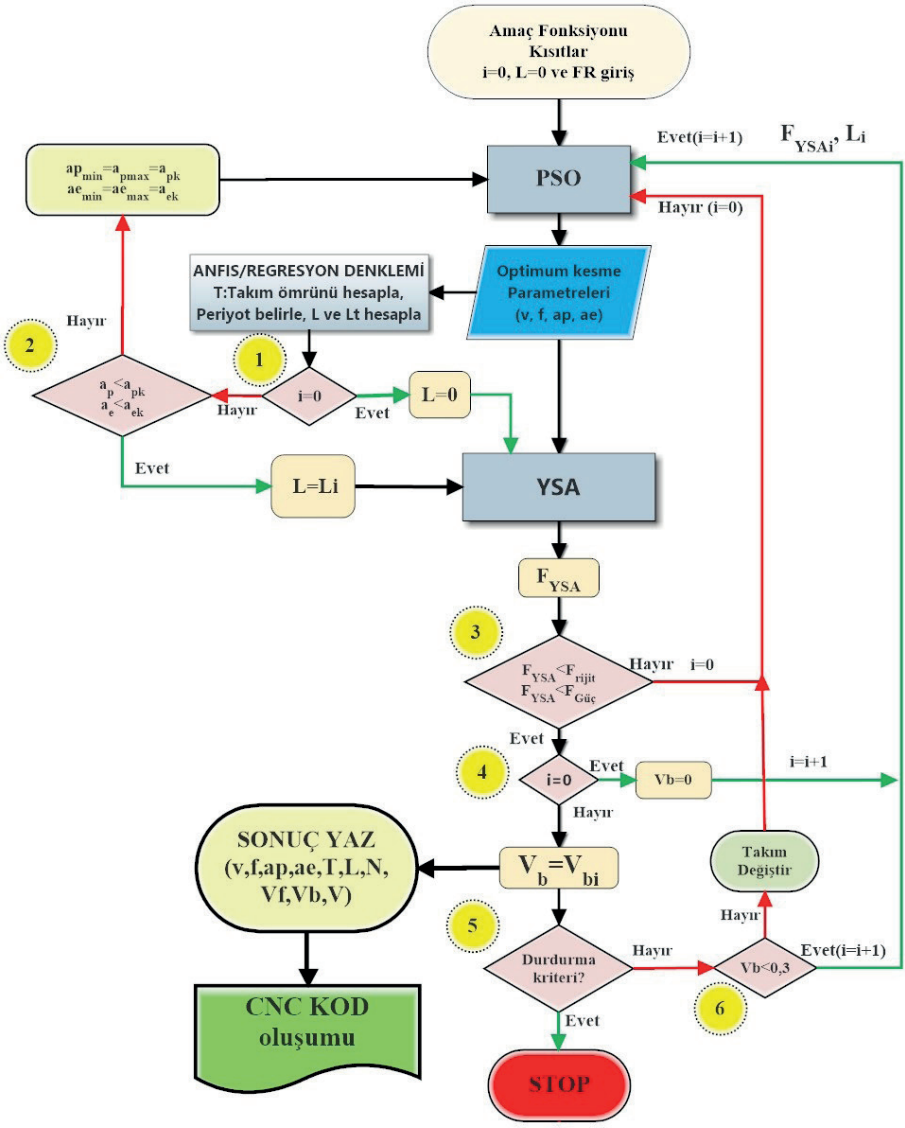
$N_0=v.1000/(\pi.d)$ dev/dk (devir)

$V_{f0}=f.z.N_0$ (Tabla ilerlemesi)

değerleri de hesap yardımıyla bulunmaktadır.

b. YSA: PSO'dan gelen optimum kesme parametreleri ile ANFIS/Regresyon denkleminden gelen L takım yolu verileri eğitilmiş yapay sinir ağından

geçirilerek kesme esnasında oluşan kuvvet değeri ile takım aşınma miktarı V_B'nin tahmin edilmesinde kullanılır. YSA'ya gönderilen takım yolu değerine göre elde edilen kuvvet değeri ve takım aşınması kademeli olarak artma eğilimindedir. İlk verilen L=0 değeri kesme kuvvetin başlangıç değerini verirken, bu değere karşılık gelen takım aşınması değeri, takım aşınma eğrilerindeki uniform olmayan aşınma bölgesini temsil eder. Bu bölgedeki aşınma değeri, takım yolu (veya işleme süresi) çok küçük değerlerdeyken meydana gelen takımdaki ilk anda düzensiz yüksek aşınmaya sebep olan aşınma değeridir. Sistem sonraki döngülerinde işlenecek parçanın geometrisine uygun takım yolunu hesaplayarak YSA'ya gönderir. YSA kendisine gelen her L takım yoluna karşılık yeni bir FR kesme kuvveti ve takım aşınması değeri üretir.



Şekil 13. *Sanal Operatörün Akış Şeması*

4. Sonuçlar ve değerlendirmeler

Bu çalışmada, hızlı gelişen CNC ile işlemede karşılaşılan sorunlar tespit edildikten sonra bu sorunların çözümünde kullanılan adaptif kontrol yöntemlerinin gelişimi incelenmiştir. Ayrıca yine bu konuda zeki sistemlerle şimdiye kadar yapılan çalışmalardan örnekler verilmiş ve çok yaygın kullanıma sahip olan Yapay Sinir ağları, Bulanık Mantık, ANFİS, Genetik algoritma,

Parçacık sürü Optimizasyonu gibi zeki sistemlerin bu alandaki kullanımıyla ilgili uygulama örnekleri sunulmuştur.

Yapılan çalışmalardan da görüleceği gibi adaptif kontrolün CNC işlemesinde ortaya çıkan pek çok sorunun çözümünde kullanılabileceği yönünde görüşlere karşın, online adaptif kontrolün, önündeki pek çok sorundan dolayı pratikte kullanılamadığı görülmüştür.

Bu çalışma, adaptif kontrolün sanal olarak gerçekleştirilmesine imkan tanıyan, "Zeki Sanal Operatör" sistemine temel teşkil edeek bir altyapı sunmaktadır. Sanal operatör parçanın işlenmesinden önce, iş parçasının işleme parametrelerinin, kısıtlar, iş parçası malzemesi, takım ve takım tezgahının özelliği vb. çerçevesinde, operatörün bilgi ve tecrübesine bağlı kalmaksızın belirlenmesini sağlayacaktır. Böylece işleme esnasında zamana ve geometrik yapıya bağlı değişimlere paralel olarak işleme parametrelerindeki değişimlerde karşılanmış olacaktır.

Sistemin yan çıktısı olarak, ilgili malzeme için değişken parametrelerin optimizasyonunu sağlayan bir bilgi tabanı oluşturulabilecektir. Böylece daha sonra aynı malzemenin işlenmesi anında parametrelerden bazılarını istenen değerlere sabitleyerek, diğer parametrelerin en optimum değerlerinin seçilmesi sağlanacaktır. Zeki Sanal operatörün en önemli çıktılarından birisi de işleme esnasında takım aşınma durumunu tahmin etmsidir. Böylece takımın kırılarak işlenen malzemeye ve yüksek maliyetli tezgahlara büyük zararlar vermesi önlenmiş olacaktır. Yine yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametrelerden birisi takım aşınması olduğu için aşınmanın tahmini bize o andaki yüzey pürüzlülük değerlerini de verecektir. Sonuç olarak, aşınma miktarına bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerleri de operatör tarafından belirlenebilecektir.

Geliştirilen modelden beklentileri şu şekilde sıralayabiliriz.;

- Frezeleme prosesini iyi bir şekilde modellenmesi
- İşleme zamanını azaltması
- Optimum kesme şartlarını sağlayarak verimliliği arttırılması
- Daha kaliteli ve istenilen değerde parça yüzeyi elde etme
- Malzeme, tezgah ve takım üçlüsünden oluşan bir veri tabanı oluşturulması.
- Yapılan her deney sonucu bu veri tabanı genişleyerek sonraki yapılacak parça işlemelerinde çalışma parametrelerinin sanal optimize edilmesi

gibi getirilerinin olmasıdır.

KAYNAKÇA

Al-Zubaidi, S., Ghani, J. A., & Haron, C. H. C. (2013). Optimization of cutting conditions for end milling of Ti6Al4V Alloy by using a Gravitational Search Algorithm (GSA). *Meccanica, 48*, 1701-1715.

Asilturk, I. (2011). On-line surface roughness recognition system by vibration monitoring in CNC turning using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *International Journal of the Physical Sciences, 6*(22), 5353-5360.

Balonji, S., Tartibu, L. K., & Okokpujie, I. P. (2023). Prediction Analysis of Surface Roughness of Aluminum Al6061 in End Milling CNC Machine Using Soft Computing Techniques. *Applied Sciences, 13*(7), 4147.

Baskar, N., Asokan, P., Prabhaharan, G., & Saravanan, R. (2005). Optimization of machining parameters for milling operations using non-conventional methods. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 25*, 1078-1088.

Baskar, N., Asokan, P., Saravanan, R., & Prabhaharan, G. (2006). Selection of optimal machining parameters for multi-tool milling operations using a memetic algorithm. *journal of materials processing technology, 174*(1-3), 239-249.

Bousnina, K., Hamza, A., & Ben Yahia, N. (2023). Prediction of QCE using ANN and ANFIS for milling Alloy 2017A. *Advances in Mechanical Engineering, 15*(9), 16878132231196408.

Chakradhar, B., Singaravel, B., Ugrasen, G., & Kumar, A. K. (2023). Prediction of cutting forces using MRA, GMDH and ANN techniques in micro end milling of titanium alloy. *Materials Today: Proceedings, 72*, 1943-1949.

Cus, F., & Balic, J. (2003). Optimization of cutting process by GA approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 19*(1-2), 113-121.

Cus, F., & Zuperl, U. (2009). Particle swarm intelligence based optimisation of high speed end-milling. *Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering, 1*(3), 148-154.

Čuš, F., & Župerl, U. (2011). Real-time cutting tool condition monitoring in milling. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 57*(2), 142-150.

Çolak, O. (2006). *CNC freze tezgahı için kesme parametrelerinin akıllı yöntemlerle elektronik ortamda optimizasyonu.* Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi,

Dweiri, F., Al-Jarrah, M., & Al-Wedyan, H. (2003). Fuzzy surface roughness modeling of CNC down milling of Alumic-79. *journal of materials processing technology, 133*(3), 266-275.

Jang, J.-S. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 23*(3), 665-685.

Kabini, K. (2011). Review of ANFIS and its Application in Control of Machining Processes. *Sustainable Research and Innovation Proceedings, 3*.

Kloypayan, J., & Lee, Y.-S. (2002). Material engagement analysis of different endmills for adaptive feedrate control in milling processes. *Computers in Industry, 47*(1), 55-76.

Koren, Y. (1988). *Adaptive control systems for machining.* Paper presented at the 1988 American Control Conference.

Liang, M., Yeap, T., Rahmati, S., & Han, Z. (2002). Fuzzy control of spindle power in end milling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42*(14), 1487-1496.

Liu, Y., Cheng, T., & Zuo, L. (2001). Adaptive control constraint of machining processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 17*(10), 720-726.

Lo, S.-P. (2003). An adaptive-network based fuzzy inference system for prediction of workpiece surface roughness in end milling. *journal of materials processing technology, 142*(3), 665-675. doi:https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00687-3

Okokpujie, I. P., & Sinebe, J. E. (2023). An Overview of the Study of ANN-GA, ANN-PSO, ANFIS-GA, ANFIS-PSO and ANFISFCM Predictions Analysis on Tool Wear During Machining Process. *Journal Européen des Systèmes Automatisés, 56*(2).

Pohokar, N., & Bhuyar, L. (2014). Neural networks based approach for machining and geometric parameters optimization of a CNC end milling. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol, 3*.

Senthilkumaar, J., Selvarani, P., & Arunachalam, R. (2012). Intelligent optimization and selection of machining parameters in finish turning and facing of Inconel 718. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 58*, 885-894.

Siwawut, S., Srikhumsuk, P., & Butdee, S. (2023). Tool life and wear prediction of HSS and PVD material using ANFIS system. *Materials Today: Proceedings*.

Stavropoulos, P., Souflas, T., Papaioannou, C., Bikas, H., & Mourtzis, D. (2023). An adaptive, artificial intelligence-based chatter detection method for milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 124*(7-8), 2037-2058.

Suhail, A. H., Ismail, N., Wong, S., & Jalil, N. A. (2011). Cutting parameters identification using multi adaptive network based Fuzzy inference system: An artificial intelligence approach. *Scientific Research and Essays, 6*(1), 187-195.

Uros, Z., Franc, C., & Edi, K. (2009). Adaptive network based inference system for estimation of flank wear in end-milling. *journal of materials processing technology, 209*(3), 1504-1511.

Ünüvar, A., & Sağlam, H. (1999). Takım Aşınmasına Dayalı on Line Takım Durumu İzleme Sistemleri ve Verilerin Değerlendirilmesi. *Makina-İmalat Teknolojileri Sempozyumu*, 27-39.

Xu, C., & Shin, Y. C. (2008). An adaptive fuzzy controller for constant cutting force in end-milling processes.

Yang, L.-D., Chen, J. C., Chow, H.-M., & Lin, C.-T. (2006). Fuzzy-nets-based in-process surface roughness adaptive control system in end-milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 28*, 236-248.

Zain, A. M., Haron, H., & Sharif, S. (2010). Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network. *Expert Systems with Applications, 37*(2), 1755-1768.

Zhang, J. Z., & Chen, J. C. (2007). The development of an in-process surface roughness adaptive control system in end milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 31*, 877-887.

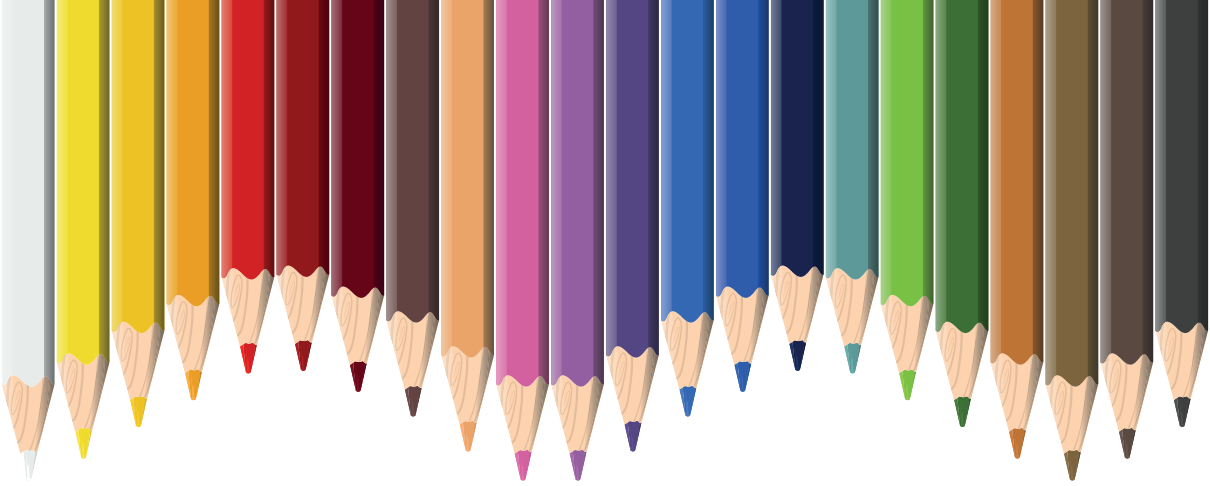
Zhao, H., Li, J. G., Yao, Y. X., & Liu, C. Q. (2008). Cutting parameters optimization for constant cutting force in milling. *Applied Mechanics and Materials, 10*, 483-487.

Zuperl, U., & Cus, F. (2004). Tool cutting force modeling in ball-end milling using multilevel perceptron. *journal of materials processing technology, 153*, 268-275.

Župerl, U., Čuš, F., & Gečevska, V. (2007). Optimization of the characteristic parameters in milling using the pso evaluation technique. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 53*(6), 354-368.

Zuperl, U., Čuš, F., & Kiker, E. (2006). Intelligent adaptive cutting force control in end-milling. *Tehnički vjesnik, 13*(1, 2), 15-22.

Zuperl, U., Cus, F., & Reibenschuh, M. (2011). Neural control strategy of constant cutting force system in end milling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27*(3), 485-493.



Bölüm 4

İŞARET DİLİ ALGILAMADA YAPAY ZEKANIN YERİ

Funda AKAR[1]
Veli ŞİMŞEK[2]

1 Dr.Öğr.Üyesi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi,
ORCID ID: 0000-0001-9376-8710, fakar@erzincan.edu.tr
2 Lisans Öğrencisi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, 201104010@ogr.ebyu.edu.tr

1. Giriş

İletişim canlıların varoluşundan beri en önemli unsurlardan biri olmuştur. Geçmişten günümüze insanoğlu iletişim kurmak için birçok yol bulmuştur. Bunlardan bazıları; dumanla haberleşme, duvarlara resimler çizme, beden dilimizle ve konuşarak iletişim sağlama gibi örneklerdir (Arıcı & Erten, 2022; Kın, 2019). İşaret dili işitme ve konuşma engelli bireylerin kendi aralarında aynı zamanda diğer bireylerle iletişim sağlamak için kullanılan görsel bir iletişim yoludur. İşaret dili konuşulan dillere göre, duyma yerine görmeye yöneliktir. Bu yüzden iletişimde bireylerin işaretlerinin anlayabilecekleri bir şekilde görmelidirler. İşaret dili, el işaretleri, vücut duruşu, jest ve mimikler gibi öğeleri kullanarak anlatılmak isteneni karşı tarafa iletir. İşaret dili doğal diller arasındadır ve kendisine ait kelime ve dilbilgisi yapısı vardır. Bu yüzden her coğrafya kendine özgü işaret diline sahiptir. Türkiye ve Kuzey Kıbrıs'ta işitme ve konuşma engeli olan bireyler genellikle Türk işaret dili (TİD) ile iletişim kurarlar. Türkiye'de 2011 verilerine göre 1,3 milyon işitme ve konuşmada zorluk çeken engelli bireylerin olduğu bildirilmiştir (eyhgm, 2021), bu rakamlar işaret dilinin toplumdaki yerinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar arasında işaret dili algılama teknolojisi gittikçe önem kazanmaktadır. İşaret dili algılama teknolojisi, yapay zekânın işitme ve konuşma engelli bireylere sunabileceği önemli bir faydadır. Bu teknoloji sayesinde, işaret dili bilmeyenlerle bilenler arasında da iletişim sağlanabilir. Yapay zekâ fotoğraf, video, ses veya anlık görüntüleri yakalayıp metne dönüştürerek toplumda iletişimin önündeki engelleri kaldırmaya yardımcı olmaktadır. Bu işlemler için derin öğrenme, görüntü işleme, doğal dil işleme gibi yöntemler kullanılır. Bu yöntemler arasında kullanılan popüler algoritmalar YOLO, RNN ve CNN gibi algoritmalardır.

2. İşaret Dilinin Önemi

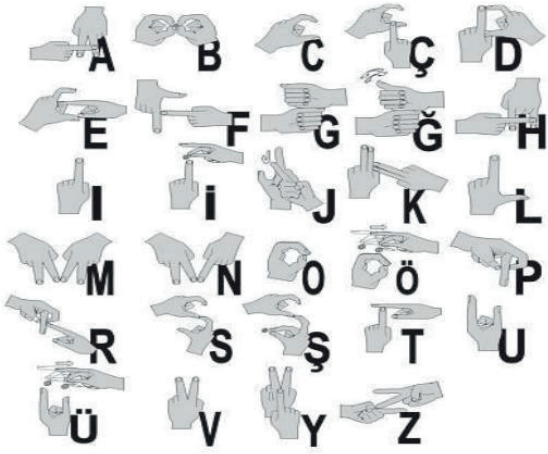
İşaret dili, işitme ve konuşma engelli bireylerin toplumla etkileşimde bulunmalarını sağlayan önemli bir araçtır. Bu dil, eğitimden sağlığa, kültürden sanata, spordan siyasete kadar her alanda kendilerini ifade etmelerine, duygu, düşünce, hayal ve yaratıcılıklarını paylaşmalarına olanak tanır. İşitme ve konuşma engellilere yönelik yazılı iletişim de

kullanılabilir ama sürekli yazı yazmak, işitme ve konuşma engelli bireyler için hem zorlayıcı hem de zaman alıcı olabilir. Bu sebeple işaret dili, onlar için en çok tercih edilen bir iletişim yöntemidir. İşitme ve konuşma engeli olmayan bireyler için de işaret dilini bilmek önemlidir çünkü işitme engelli bireylerle daha rahat iletişim kurmayı, onların ihtiyaçlarına ve duygularına daha duyarlı olmayı ve destek olmayı sağlar. Aynı zamanda işaret dili bilmek, empati yeteneğini geliştirir ve farklı bir dil ve kültürü anlamak için bir fırsat sunar. İşaret dili evrensel kurallara sahip bir dil değildir. Dünyanın farklı yerlerinde farklı işaret dilleriyle karşılaşabiliriz, bu da iletişimde bazı zorluklara neden olabilir (Erten & Aric, 2022; Fatih & Bayır, 2018; Zeynep ORAL, 2016).

3. Türk İşaret Dili

Dünya da 100'den fazla işaret dili olduğu tahmin edilmektedir (Arıcı & Erten, 2022). TİD, Türkçe konuşulan bir coğrafyada ortaya çıktığı için konuşulan Türkçe ile bazı ortak kelimeleri ve kültürel öğeleri paylaşsa da dil bilimi yönünden farklı özelliklere sahiptir (Kın, 2019). Türkçe'de olduğu gibi TİD'de de cümlede özne-nesne-yüklem sırası vardır (Oral, 2016). Ayrıca, TİD'de ekler de kullanılır. Bu ekler, el işaretlerinin şeklini veya yönünü değiştirerek yapılır. TİD, diğer işaret dillerinden farkı, bazı harfleri ve rakamları farklı şekillerde gösterir. Örneğin:

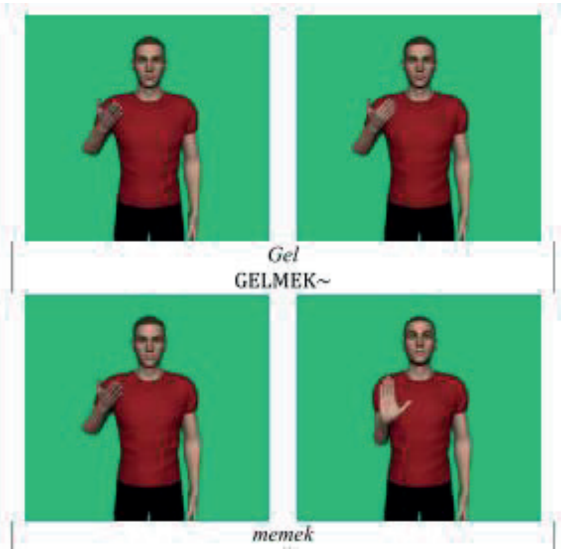
TİD'de 'D' iki el kullanılarak gösterilirken, Amerikan işaret dilinde (AİD) tek el kullanılarak gösterilmektedir. Şekil 1'de Türkçe alfabede bulunan harflerin gösterimi verilmiştir.



Şekil 1. Türk İşaret Dili Alfabesi (Oral, 2016)

TİD Türkçe gibi sondan eklemeli bir dil değildir. Ancak, işaretlerin sonuna eklenen "değil" "hiç" ve "yok" (Oral, 2016) gibi işaretlerle çekim yapılabilir. Örneğin:

- "Yapmak" işaretinin sonuna "değil" işaretini ekleyerek "yapmamak" ifadesi oluşturulabilir.
- "Gelmek" işaretinin sonuna "değil" işaretini ekleyerek "gelmemek" ifadesi oluşturulabilir. Bu örnek Şekil 2'de gösterilmiştir.
- "Okumak" işaretinin sonuna "-dı" işaretini ekleyerek "okudu" ifadesi oluşturulabilir (Fatih & Bayır, 2018).



Şekil 2. "Gelmemek" Kelimesinin TİD'de gösterimi (Fatih & Bayır, 2018)

Ayrıca, TİD'de Türkçe'deki gibi zamanlar bulunur ve zamanı belirtmek için farklı işaretler ve mimikler kullanılır (Arıcı & Erten, 2022; Çelik & Odabaş, 2020).

4. İşaret Dili Alanında Yapay Zekâ Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

- **Evrişimsel Sinir Ağları ile İşaret Dili Tanıma:** 0-9 arası rakamlardan oluşan 2062 adet görüntünün bulunduğu veri seti evrişimsel sinir ağı ile eğitilip %98,55 oranında başarı elde edilmiştir (Sevli & Kemaloğlu, 2019).
- **Türk İşaret Dili Alfabesinin Derin Öğrenme Yöntemi ile Sınıflandırılması:** Toplamda 29 TİD alfabe karakterini içeren 32 sınıf (Yanlış yazılan karakteri silme ve boşluk koyabilmek için iki karakter) ve 48,000 görüntü üzerinde evrişimsel sinir ağı modeli kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma çalışmasında elde edilen test başarısı %99,9 olarak belirlenmiştir (Kın, 2019).
- **İşaret Dilini Metne Çeviren Yapay Zekâ:** MediaPipe kütüphanesi kullanılarak video sınıflandırması modeli oluşturulan bir çalışma, işitme engelli bireylerin iletişimini kolaylaştırmayı amaçlar.

Türkçe ve İngilizce dil seçenekleriyle, gerçek zamanlı çeviri özelliğiyle, Android üzerinde çalışabilen bir uygulama geliştirilmiştir. İlk olarak VGG16 kullanılan modelde, başarı oranı düşük olduğundan MediaPipe'e geçilmiştir. Türkçe modelin başarılı olması üzerine İngilizce diline de uyarlanmış, bu sayede uluslararası iletişim sorunları azaltılmıştır. (Balkaya, Uçan, Turan, & Oral, 2021).

- **Amerikan İşaret Dili Tespiti:** AİD tanıması için derin öğrenme modelleri kullanılmıştır. Uygulanan model, 6000'den fazla görselden ve 26 tane etiketten oluşmaktadır. Bu modelin eğitiminde YOLO %95 doğruluk oranına sahipken, Faster R-CNN %78, SSD Mobnet V2 %81'lik doğruluk oranına sahiptir (Patel, 2023).
- **YOLOv4 Yöntemi ile Amerikan İşaret Dili Tanıma:** 8000 görüntüden oluşan geniş bir veri seti üzerinde eğitilen model, farklı arka plan ve aydınlatma koşullarında çekilmiş 200 görüntü içeren ve her biri 40 farklı sınıfa ait olan bir veri setini kullanarak eğitilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, görüntü verileri için %98.01 MAP doğruluğu elde edilmiştir (Mahmood Al-Shaheen, Çevik, & Alqaraghuli, 2022).
- **Derin öğrenme kullanarak işaret dili tanıma:** AİD'nin 26 harfinin bulunduğu MNIST veri setinden 27455 görselin kullanıldığı 24 (J ve Z hariç) etiketten oluşan model CNN ile eğitilip %93 üzerinde bir doğruluk oranı elde edilmiştir (Sabeenian, Sai Bharathwaj, & Mohamed Aadhil, 2020).
- **CNN ve LSTM ile Mısır İşaret Dili Tanıma:** 9 sınıftan oluşan ve her sınıf için 100 video veri seti ile CNN ve LSTM yöntemiyle oluşturulan model sırasıyla %90 ve %72 oranında doğruluk sağlamıştır (Gomaa & Gla Elrayes, 2021).

5. Yapay Zekanın Önemi

Günümüzde karmaşık problemleri insan yardımıyla çözmek oldukça zordur. Bu yüzden insan zekasını taklit eden ve iyi bir çözüm yöntemi buluncaya kadar mevcutta bulunan verilerle kendini eğiten bilgisayar sistemleri veya makineler geliştirildi (Köroğlu, 2017). Yapay zekâ dediğimiz kavramda bu tanıma karşılık gelmektedir. İnsanların hayatını daha iyi hale getirmek, işleri daha hızlı ve ucuz yapmak, toplumun karşılaştığı zorluklara çözüm bulmak için yapay zekâ çalışmaları sürekli

geliştiriliyor. Bu amaç doğrultusunda, işitme ve konuşma engelli bireylerin yaşamını kolaylaştırmak ve işaret dilini herkesin anlayabileceği bir dile çevirmek için yapay zekâ önemli bir yerdedir. Yapay zekâ ile işaret dili algılanıp metne dönüştürebilmesi ve insanların daha kolay iletişim kurması sağlanabilir. Bunun dışında yapay zekâ, insanlara sayısız alanda yarar sağlar, örneğin; verileri hızlı ve doğruya yakın bir şekilde inceleyerek, daha iyi kararlar almasına yardımcı olabilir, insanlar için zorlayıcı veya tehlikeli olabilecek işleri yapabilir, sürücüsüz (otonom) arabalar, fabrika robotları, askeri uçaklar, ürün veya hizmetlerin kalitesini artırabilir, sesli yardımcılar, kişiye özel tavsiyeler, müşterilerin memnuniyetini, sadakatini ve deneyimlerini yükseltebilir, müşteri servisi, sosyal medya, eğitim süreçleri, tedarik zinciri ve lojistik gibi iş süreçlerini iyileştirilmesi, stok takibi, yol planlama, talep tahmini.

Yapay zekâ, iyi olduğu kadar dikkat edilmesi gereken yanları da vardır. Bunlardan bazıları güvenlik sorunlarına yol açması, mahremiyeti ihlal etmesi, insani değerleri veya amaçları ile çelişebilmesi, sesleri taklit edebilmesi, görüntü sahteciliği ve sahte görüntüler ile dolandırıcılık yapılabilmesi gibi durumlar söz konusu olabilir (Aydın & Akar, 2022) .

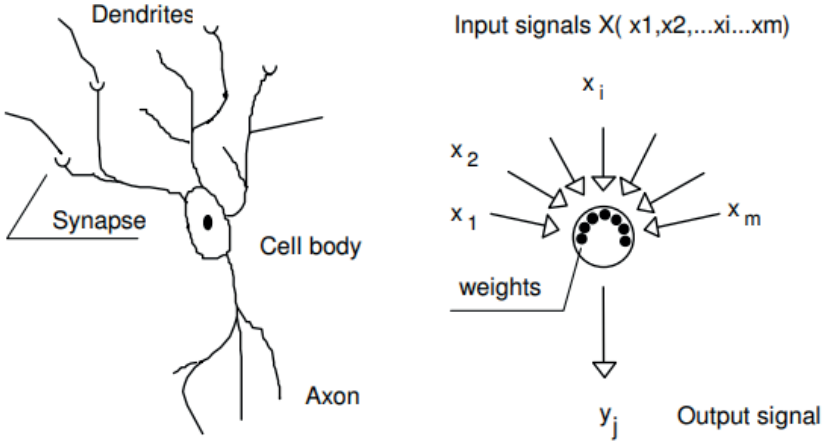
Yapay zekâ, kullanımına göre hem yararlı hem de zararlı yanları olan çok önemli bir teknolojidir. Toplum üzerindeki etkisinin iyi olabilmesi için hukuk, etik, güvenlik ve kontrol gibi birçok alanda yapılan çalışmaların incelenmesi ve geliştirilmesi gereklidir.

6. Yapay Zekâ Algoritmaları

Algoritma, problemleri küçük birimlere bölerek adım adım ilerleyerek istenen sonuca ulaşmaktır. Algoritmaların insan yardımı olmadan da çalıştırılabilir olduğu ilk defa 17. yy.'da hesap makinesiyle gerçekleştirilmiştir (Köroğlu, 2017). Bu nedenle bilgisayarların daha zorlu problemleri çözebilmeleri için yapay zekâ algoritmaları geliştirilmiştir. Yapay zekâ Makine Öğrenmesi, Derin Öğrenme, Bulanık Mantık gibi alt dallara ayrılmaktadır. İşaret diline yönelik yapay zekâ çalışmalarında genellikle derin öğrenme kullanılır. Bu çalışmada da derin öğrenme yöntemi ele alınacaktır.

7. Derin Öğrenme

Derin öğrenme, makine öğreniminin bir alt kümesidir, verileri katmanlar halinde işler ve her ardışık katman, çıktı olarak aldığı veriyi bir sonraki katmanda girdi olarak kullanır. Bu yöntem insan beyninin çalışma şeklini taklit eden bir yapıya sahiptir ve yapay sinir ağı olarak adlandırılır. Başka bir anlatımla derin öğrenme, yapay sinir ağlarının temelini oluşturan insan beyin hücrelerin matematiksel modelidir (Zupan, 1994; Balık, Diri, & Şeker, 2017; Köroğlu, 2017). Şekil 3'te bu yapının şematik gösterimi verilmiştir.



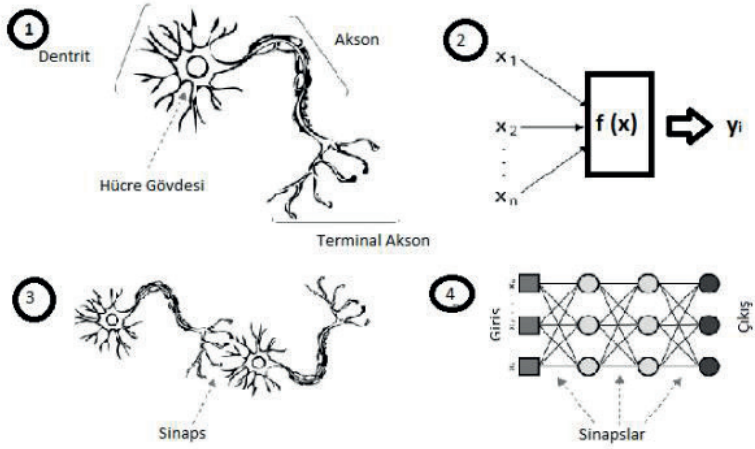
Şekil 3. Biyolojik ve yapay nöronun karşılaştırılması (Zupan, 1994)

Bir özellik elde edebilmek için bir öncekinden farklı bir işlem yaparak veriyi katmanlar arasında geçirerek öğrenimine devam eder. Derin öğrenme, çok katmanlı yapay sinir ağlarını kullanarak, özellikle görüntü, ses ve metin sınıflandırılması gibi karmaşık görevleri gerçekleştirmek için kullanılır. Derin öğrenme yöntemlerinin temel amacı girdi olarak verilen verileri kullanarak sınıflandırma (denetimli öğrenme) ve kümeleme (denetimsiz öğrenme) yapmaktır (Balık et al., 2017; DOĞAN & Türkoğlu, 2018).

7.1. Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network (ANN))

Biyolojik sinir hücreleri, vücut içindeki iletişimi sağlayan yapılardır. Bu hücreler, aralarında sinaps denen bir tür bağlantı noktasıyla iletişim kurarlar. İletişimde kullanılan bilgileri akson adı verilen yapıyla da diğer

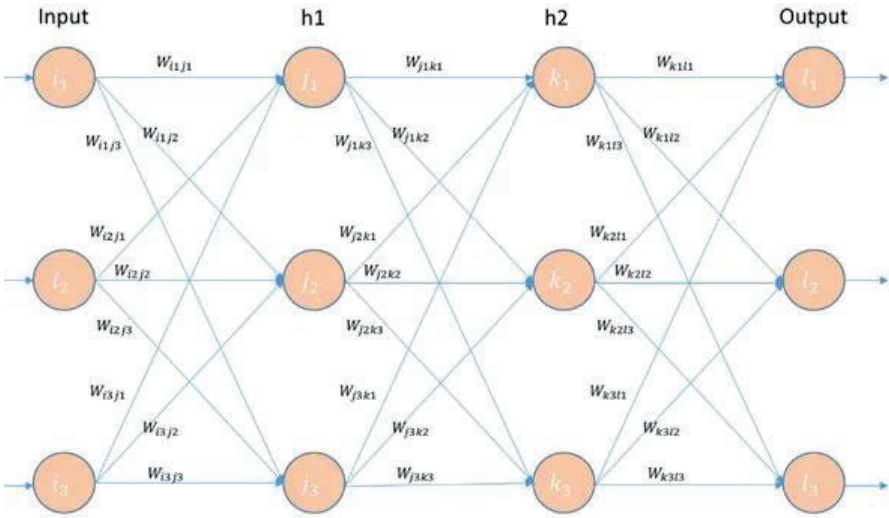
hücrelere taşırlar (Ersoy & Karal, 2012). Bunu yaparak vücut içindeki sinir sistemini düzenli hale getirirler. Yapay sinir ağları (ANN) ise insan doğasından ilham almış biyolojik sinir hücrelerinin çalışma mantığını benimsemiş yapay zekâ sistemleridir. ANN, dışarıdan gelen bilgileri bir araya toplar sonra, bu bilgileri bir aktivasyon fonksiyonundan (ReLU, Sigmoid gibi) geçirerek çıktıyı üretirler (Öztürk & Şahin, 2018; Zupan, 1994). Yani, bir nevi düşünme işlemi gerçekleştirirler. Bu çıktılar da yapay sinir ağının bağlantıları aracılığıyla diğer hücrelere iletilir. Böylece yapay zekâ sistemleri, biyolojik sinir sistemine benzer bir iletişim modeli oluşturur. Şekil 4'te Biyolojik sinir ağı ve yapay sinir ağının gösterimi verilmiştir (Ersoy & Karal, 2012; Öztemel, 2012; Zupan, 1994).



Şekil 4. Biyolojik sinir hücresi ve Yapay sinir ağı (Öztürk & Şahin, 2018)

Yapay sinir ağlarında girdi katmanı, ara katmanlar ve çıktı katmanları bulunur. Şekil 5'te gösterimi verilmiştir. Girdi katmanı verinin alındığı katmandır burada girdi değerleri 'w' (weight) ile gösterilen ağırlıklarla çarpılır daha sonra b (bias) dediğimiz değerle de toplanır ve bir çıktı oluşturularak ara katmanlara bu değerler dağıtılır, bu süreç ara katmanlarda da işlendikten sonra en sonunda çıktı katmanıyla bir sonuç elde edilir. Bu sürece ileri yayılım işlemi denir. Buradaki ağırlık değerleri öğrenme sürecindeki en önemli değişkenlerdir. Bias ise öğrenme sürecine katkıda bulunan bir değerdir ve bu iki parametre başlangıçta rastgele bir sayı ile tanımlanır. En iyi sonucu verene kadar ağırlık ve bias değerleri

sürekli güncellenir. Bu işlem parametrelerin bulunduğu en iyi konuma gradyan inişi diye tanımlanan yöntem ile ulaşılarak yapılır. Bu sürece de geri yayılım denir (Ersoy & Karal, 2012; Zupan, 1994).



Şekil 5. Yapay Sinir Ağı şematik gösterimi (Ali, 2019)

Gizli katmanlar ağın öğrenme sürecinde karmaşıklığı ele almak ve veri setinden özellikleri çıkarmak için kullanılır. w ve b değerleri burada da başlangıçta olduğu gibi alacağı ilk değerler rastgele sayılardan oluşur. Çıktı katmanı ise girdilerle çıktılar arasındaki karmaşık ilişkileri öğrenmek ve genelleme yapmak için kullanılır (Öztemel, 2012; Öztürk & Şahin, 2018; Zupan, 1994).

ANN ileri yayılım ile bir sonuç çıkartır bu sonucu beklenen değerle karşılaştırıp bir hata değeri bulur. Geri yayılım ile parametrelerin (w,b) değerini güncelledikten sonra bu sürecin tamamı en iyi sonucu verene kadar tekrarlanır. Kaç iterasyon (epoch) yapılacağı modele bağlı olarak değişir.

- **İleri yayılım**

Şekil 5'te ki j_1 değerini bulabilmek için (1) nolu eşitlik kullanılır:

$$\text{net}j_1 = w_{i1j1} \times i_1 + w_{i2j1} \times i_2 + b_1 \qquad (1)$$

Bu formül bahsedilen ağırlık ile çarpılıp bias ile toplandığı formüldür. Daha sonra çıkan değer (2) nolu eşitlikteki sigmoid fonksiyonundan geçirildikten sonra 0-1 arasında j_1 ait bir çıktı değeri elde edilir.

$$\text{out}j_1 = \frac{1}{1+e^{-(net j_1)}} \quad (2)$$

Bu değer bir sonraki düğümlere girdi olarak iletilir. Diğer parametreler (j_2, j_3 k_1, k_2, k_3, l_1, l_2 ve l_3) için de bu işlem yapılarak sonuçta Şekil 5'te görüldüğü gibi 3 tane çıktı yani tahmin değeri ($\hat{y}$) elde edilir. Çıktı katmanında sigmoid yerine softmax fonksiyonu da kullanılır.

Bu tahmin değeri Mean Squared Error (Ortalama Kare Hatası) formülüne uygulanırsa gerçek değerle tahmin edilen değer arasındaki hata ya da kayıp (cost, lost) denilen değer bulunur (3). Burada $\hat{y}$ = tahmin değeri, y = beklenen değer, n = veri sayısıdır.

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (3)$$

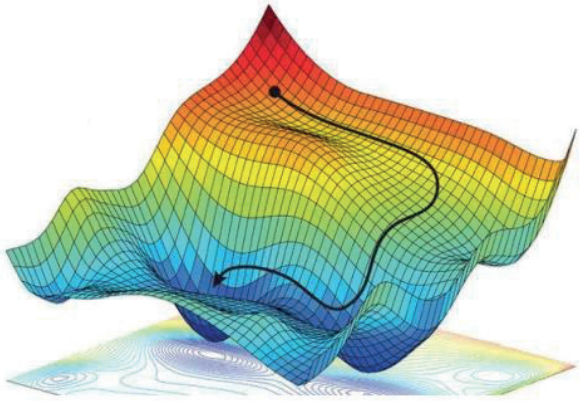
- **Geri yayılım**

Hata değerini bulduktan sonra geri yayılım ile w ve b değerlerini güncellemek için aşağıdaki gradyan iniş formülü kullanılır (4): Burada ': =' atama operatörü, w = ağırlık, b = bias, α = öğrenme oranı, $\frac{\partial J(\omega,b)}{\partial \omega}$ = hata değerinin w değerine göre kısmi türevi, $\frac{\partial J(\omega,b)}{\partial b}$ = hata değerinin b değerine göre kısmi türevidir.

$$w := w - \alpha \frac{\partial J(w,b)}{\partial w} \quad , \; b := b - \alpha \frac{\partial J(w,b)}{\partial b} \quad (4)$$

Bir fonksiyonun bir noktadaki türevi o fonksiyonun maksimum artış yönünü verir. Bu yönün tersine gidildikçe minimum azalma yönünü verir. Gradyan inişi ile minimum değer bulunur. Buradaki öğrenme oranı (α) minimum değeri bulabilmek için kaç adım atılarak aşağı inilmesine karar verir (Francisco de Abreu e Lima, 2023). Öğrenme oranı 3 ise basamakları 3 er adımla inildiği 2 olursa 2 şer adımla inildiği düşünebilir. Öğrenme oranı da rastgele seçilen bir değerdir, iyi sonuç verebilmesi için bu değer ideal bir sayı seçilmelidir. Eğer çok yüksek olursa basamakların çoğuna basılmamış olunur ve minimum değer kaçırılabilir, eğer çok küçük bir değer olursa bu defa sürecin gereğinden fazla bir şekilde uzatılması söz

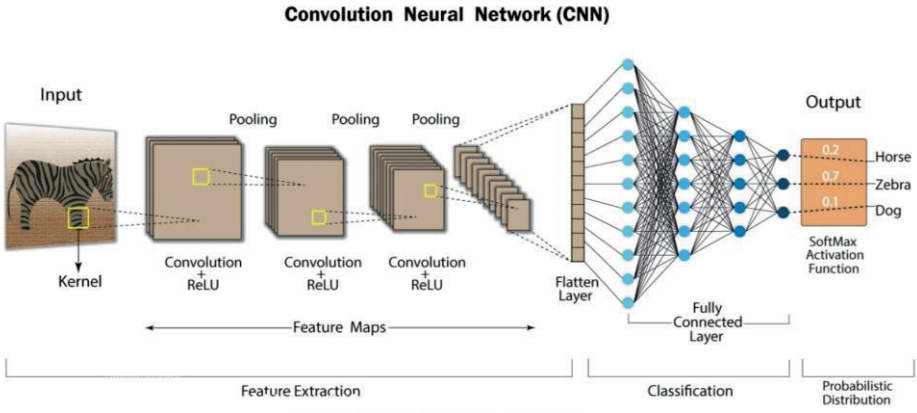
konusu olur. Bu şekilde ANN öğrenme sürecini tamamlar. Daha iyi sonuçlar alabilmek için de dropout katmanı ile bazı düğümler işlevsiz hale getirebilir ya da veri seti yükseltilebilir. Gradyan inişini Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Minimum noktaya gradyan inişi (Francisco de Abreu e Lima, 2023)

7.2. Evrişimşel Sinir Ağları (Convolutional Neural Network (CNN))

Evrişimsel sinir ağları (CNN) görüntü işleme problemleri için geliştirilmiş çok katmanlı bir yapay sinir ağı olarak ortaya çıktı. Yapay sinir ağının işleyişinden farklı olarak evrişim katmanı (convulation), toplu normalleştirme (batch normalization), havuzlama katmanı (pooling), tam bağlantı katmanı (fully connected) ve düzleştirme katmanı (flatten) vardır (Balık et al., 2017; Lecun, Bottou, Bengio, & Haaner, 1998; Sevli & Kemaloğlu, 2019; Tüfekçi & Karpat, 2019; Shahriar, 2023). CNN mimari yapısı Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. CNN mimari yapısı (Shahriar, 2023)

- **Evrişim katmanı**

Giriş görüntüsü üzerinden öznitelik çıkarımı yapılmaktadır. Tıpkı bir insan gözünün bir resme baktığında tüm resmi değil de göz önünde bulunan kısımların hafızada kalması gibi düşünülebilir. nxn bir görüntüden öznitelik çıkartmak için filtre yöntemi kullanılır. Filtreler sadece öznitelik için kullanılmaz amacına uygun bir şekilde seçildiğinde kenar belirleme ve nesne algılama olarak da kullanılır. Filtreleme sonucunda görüntünün boyutu küçülmemesi için filtreleme öncesi dolgu işlemi (padding) gerçekleştirilir (Balık et al., 2017; Erhandi, 2020; Shahriar, 2023; Tüfekçi & Karpat, 2019). Padding için (5) nolu formülü kullanarak kaç piksel ekleneceğine karar verilir.

$$\left(\frac{f-1}{2}\right) \tag{5}$$

Filtreleme sonucu çıkan matrisin boyutu ise (6) formül ile bulunur. Burada n = giriş matrisin boyutu, f = filtre matrisin boyutu, p = padding sayısı, s = adım sayısı (yani kaç adım ötelenecek)

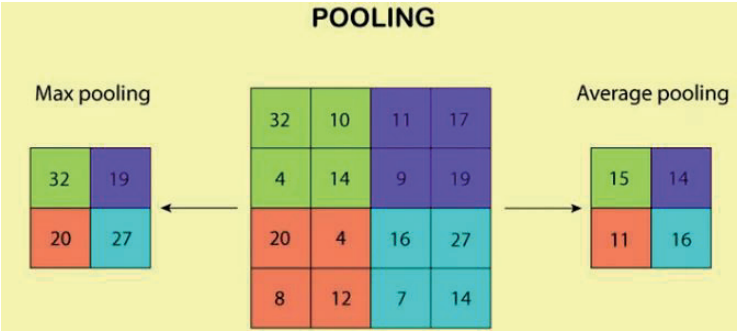
$$\left(\frac{n-f+2P}{s}+1\right)\times\left(\frac{n-f+2p}{s}+1\right) \tag{6}$$

- **Toplu normalleştirme**

Zorunlu bir katman değildir eğitim sürecini hızlandırır ve gizli katmanlar arasında normalleştirmeyi sağlar.

- **Havuzlama katmanı**

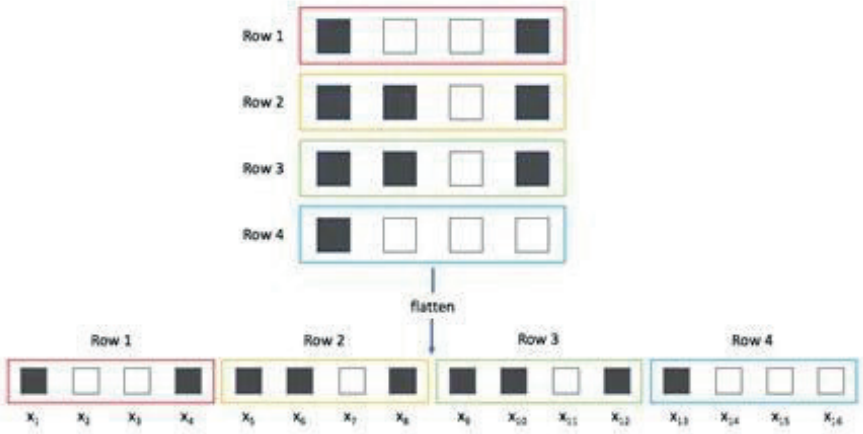
Bu katman süreci hızlandırmak için veri kaybı yaşanmadan boyutunun küçülmesini sağlar. Buradaki işlem filtrelemeye benzer şekilde gerçekleşmektedir. Bunun için de Average Pooling (sayıların ortalaması) ya da Max Pooling (sayıların en yüksek değeri) işlemi yapılır. Akıllara filtreleme yaparken boyutunun küçültmesini engellemek için evrişim katmanında padding işlemi gelebilir. Evrişim katmanı öznitelik çıkarımı yapmak için kullanılıyor burada ise veri kaybı olmadan boyutun küçültülmesi sağlanıyor. Şekil 8'de kullanılan iki yöntem görülebilir.



Şekil 8. Havuzlama katmanı (Shahriar, 2023)

- **Tam bağlantı ve flatten katmanı**

Flatten katmanı nxn'lik görüntüyü tek boyutlu bir matris haline getirerek yapay sinir ağının anlayacağı hale dönüştürür daha sonra tam bağlantı katmanıyla değerleri yapay sinir ağına girdi olarak verir bu şekilde öğrenme sürecine hazır hale getirilir. Şekil 9'da flatten katmanı verilmiştir.



Şekil 9. Flatten katmanı (Gözütok Şakar, 2021)

- **Dropout katmanı**

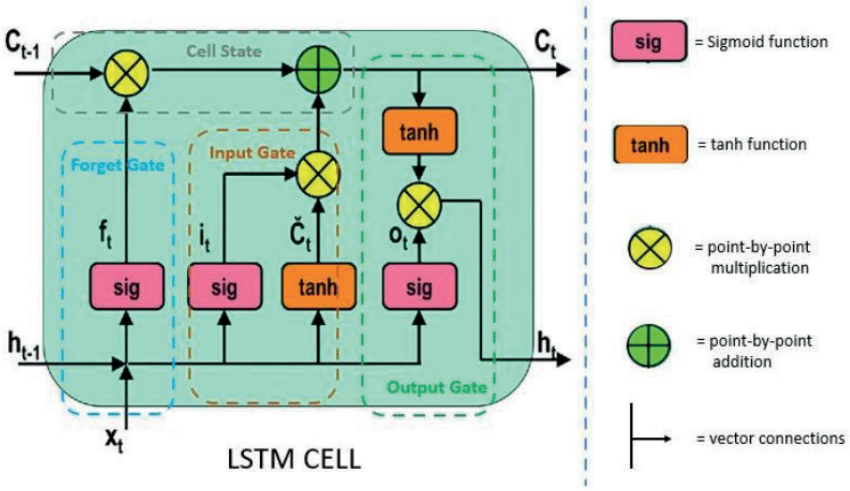
Rastgele elemeyle bazı katmanların sönümlenmesi sağlanır. Amacı ağın aşırı uyum (overfitting) riskini azaltmak ve daha genelleyici modeller oluşturmaktır.

7.3. Yinelemeli Sinir Ağı (Recurrent neural network (RNN))

Yinelemeli sinir ağı (RNN), diğer derin öğrenme yöntemlerinden farklı olarak verileri hafızada tutarak bir önceki adımdan gelen veriyle şimdiki verinin çıktısına etkide bulunur. Bu da onu sıralı veri türlerini işlemek için uygun bir yapay sinir ağı türü yapar. Kısaca insanlar gibi hatırlama özelliğine sahiptir. Bu özellik, uzun vadeli bağımlılıkları ve sıralı verilerdeki desenleri daha etkili bir şekilde anlamalarını sağlar (Zolaktaf, 2016). Örneğin, bir dil modeli oluştururken RNN, önceki kelimelerin bağlamını hatırlayarak bir sonraki kelimenin tahminini yapabilir. Bu, dildeki sıralı yapıları ve bağlamsal ilişkileri modellemek için önemlidir. Ancak, basit RNN yapıları zamanla karşılaştıkları kaybolan gradyan sorunu nedeniyle uzun vadeli bağımlılıkları etkili bir şekilde öğrenmekte zorlanabilirler. Bu tarz problemleri aşmak için geliştirilmiş RNN varyantları vardır. Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) bu tür problemlerle başa çıkmak için tasarlanmış varyantlardan bir tanesidir (Balık et al., 2017; Ergüder, 2018; Erhandi, 2020; Köroğlu, 2017; Singhal, 2020).

7.3.1. Uzun Kısa Süreli Bellek (Long short-term memory (LSTM))

LSTM sıralı veri türlerini ve birbiriyle ilişkili verileri işlemek için kullanılan, bir RNN varyantıdır. Yapısı, hücre durumu (cell state) ve üç ana kapı içerir bunlar giriş kapısı (input gate), çıkış kapısı (output gate) ve unutma kapısıdır (forget gate). Şekil 10'da LSTM yapısı gösterilmiştir (Ergüder, 2018; Erhandi, 2020; Singhal, 2020).



Şekil 10. LSTM Yapısı (Singhal, 2020)

- **Unutma Kapısı**

Unutma kapısı bellekte neyin kalacağına neyin kalmayacağına karar verilen kapıdır. Önceki veri ile şimdiki veriyi sigmoid fonksiyonundan geçirerek f_t değerini 0-1 arasında bir sonuçla verinin unutulup ya da yoluna devam etmesine karar verir. f_t değeri (7) nolu formülle bulunur (ER & IŞIK, 2021; Hochreiter & Schmidhuber, 1997; Singhal, 2020).

$$f_t = \sigma\left(w_f[h_{t-1}, x_t] + b_f\right) \tag{7}$$

Burada f_t = unutma kapısının çıkışı, σ = sigmoid aktivasyon fonksiyonu, w_f = unutma kapısı için ağırlık değeri, h_{t-1} = önceki verinin gizli durumu, x_t = giriş verisi, b_f = unutma kapısı için bias değeri.

- **Girdi Kapısı**

Giriş kapısı, hücreye yeni bilgilerin eklenmesinden sorumludur. Bu kapı, mevcut girişle hücre içindeki bilgilerin birleştirilmesini ve bu bilgilerin ne kadarının hücre içinde depolanacağını belirlemek için bir ağırlıklandırma yapar. Unutma kapısında olduğu gibi önceki veriyle sonraki veriyi sigmoid fonksiyonundan geçirir aynı zaman da bu iki veriyi tanh fonksiyonundan geçirerek -1 ile 1 arasında bir değer bulunur. Giriş kapısı formülleri (8)'de gösterilmiştir (ER & IŞIK, 2021; Hochreiter & Schmidhuber, 1997; Singhal, 2020).

$$i_t = \sigma(w_i[h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad , \quad \hat{C}_t = tanh(w_C[h_{t-1}, x_t] + b_C) \quad (8)$$

Burada i_t = giriş kapısının çıkışı, σ = sigmoid aktivasyon fonksiyonu, w_i = giriş kapısı için ağırlık değeri, h_{t-1} = önceki zamandan gelen gizli durum, x_t = giriş verisi, b_i = giriş kapısı için bias değeri, $\hat{C}_t$ = hücre güncellemenin çıkışı, tanh = hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu, w_C = hücre güncellemesi için ağırlık değeri, b_C = hücre güncelleme için bias değeridir.

- **Hücre Durumu**

Unutma ve giriş kapılarından gelen sonuçlara dayanarak hücre durumunu günceller. Giriş kapısındaki verilerin eklenmesini, geçmiş verilerin silinmesini ya da aktarılması görevlerini yerine getirir. Özetle giriş kapısındaki tanh ve sigmoid fonksiyonlarından çıkan sonuçları çarpar bu sonuç ile giriş kapısından gelen veriyle önceki hücre durumundaki verinin çarpımından gelen veriyi toplayıp yeni bir hücre durumu çıktısı üretir. (9)'da hücre durum formülü verilmiştir (ER & IŞIK, 2021; Hochreiter & Schmidhuber, 1997; Singhal, 2020). Burada C_t = güncellenmiş hafıza hücresi, f_t = unutma kapısının çıkışı, C_{t-1} = önceki zaman adımındaki hafıza hücresi, i_t = giriş kapısının çıkışı, $\hat{C}_t$ = hücre güncellemenin çıkışıdır.

$$C_t = f_t \times C_{t-1} + i_t \times \hat{C}_t \quad (9)$$

- **Çıkış Kapısı**

Çıkış kapısı, güncellenmiş hücre durumundan çıkan bilgilerin ne kadarının ağın bir sonraki adımına geçeceğini belirler. Bu kapı, LSTM'nin öğrenilen bilgileri kullanarak istenen çıktıyı üretmesine yardımcı olur.

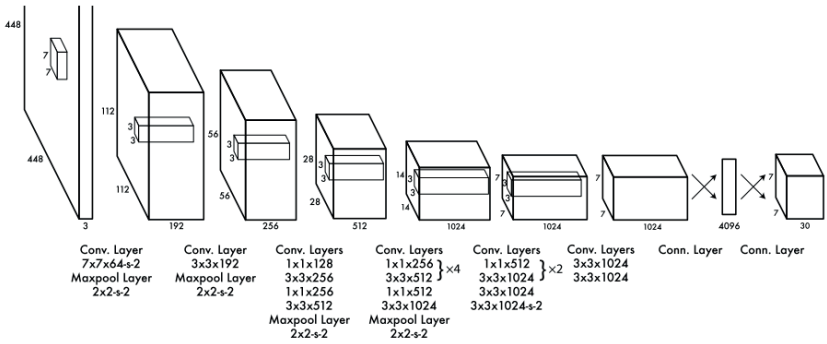
Özetle çıkış kapısı, güncellenmiş hücre durumu ile mevcut da bulunan giriş değerini sigmoid fonksiyonundan çıkan sonucunu çarpar ve çıkış değerini üretir. Bu, ağın öğrenme sürecinde önemli bilgilerin korunması veya ihmal edilmesini kontrol eder (ER & IŞIK, 2021; Ergüder, 2018; Erhandi, 2020; Hochreiter & Schmidhuber, 1997; Singhal, 2020).(10) nolu formülde çıkış kapısı formülleri verilmiştir. Burada O_t = çıkış kapısının çıkışı, σ = sigmoid aktivasyon fonksiyonu, w_o = çıkış kapısı için ağırlık değeri, h_{t-1} = önceki zamandan gelen gizli durum, x_t = giriş verisi, b_o = çıkış kapısı için bias değeri, h_t = gizli duurm çıkısı, O_t = çıkış kapısının çıkışı, tanh = hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu, C_t = güncellenmiş hafıza hücresidir.

$$O_t = \sigma(w_o[h_{t-1}, x_t] + b_o)\,,\ h_t = O_t \times \tanh(C_t) \qquad (10)$$

7.4. YOLO (You Only Look Once)

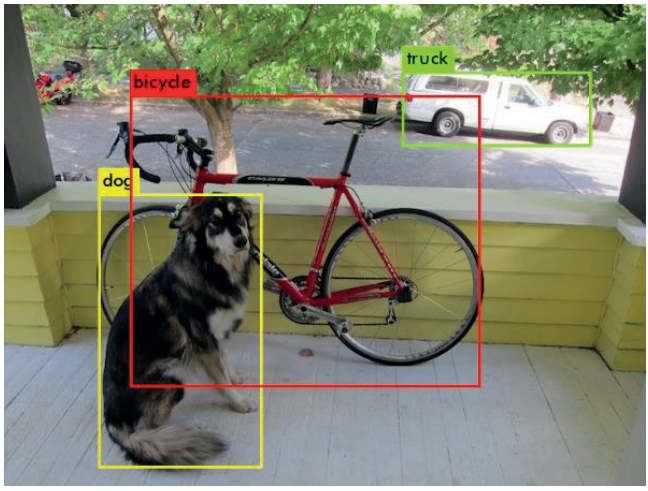
YOLO, görüntülerdeki nesnelerin tespiti için kullanılan bir derin öğrenme algoritmasıdır. YOLO, diğer algoritmalara göre daha hızlı ve daha doğru sonuçlar vermektedir. Bu hız ve doğruluk, YOLO'nun tek bir sinir ağı geçişinde görüntüdeki birden fazla nesneyi tespit edebilmesine dayanmaktadır. Adını da "Sadece bir kez bak" olarak bu özellikten almıştır. İlk olarak 2015 yılında geliştirilmiştir (Redmon, 2015). Daha sonra, YOLOv2, YOLOv3, YOLOv4, YOLOv5, YOLOv7 ve YOLOv8 gibi geliştirilmiş versiyonları yayınlanmıştır. Bu versiyonlarda performansı daha da iyi hale getirmek için farklı yöntemler kullanılmıştır. YOLO, 24 evrişim katmanından ve 2 tam bağlantı katmanından oluşan bir ağ yapısına sahiptir (Redmon, Divvala, Girshick, & Farhadi, 2016). Bu yapı Şekil 11'de gösterilmiştir.

YOLO'nun çalışma mantığı, görüntüyü eşit gridlere bölmektir. Her bir grid için, o gridde bulunan nesnelerin olasılığını ve konumunu tahmin eder. Bu tahminler, nesnenin sınıfını, koordinatlarını ve boyutlarını içerir. YOLO'nun hızlı olmasının nedeni, her bir kare için ayrı bir tahmin yapmasıdır.



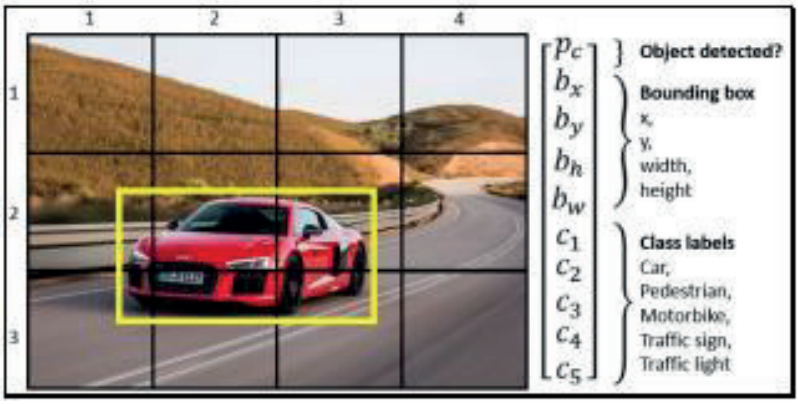
Şekil 11. YOLO Ağ yapısı (Redmon et al., 2016)

Ayrıca YOLO her bir kare için birden fazla nesneyi tahmin edebilme yeteneğine de sahiptir. Bu, nesnelerin birbirini örttüğü veya küçük olduğu durumlarda bile nesneleri yüksek oranla doğru bir şekilde tespit etmesini sağlar. Şekil 12'de farklı nesnelerin aynı anda algılandığı gösterilmiştir (Balık et al., 2017; Redmon et al., 2016).



Şekil 12. YOLO algoritmasıyla tanınmış 3 nesne (Redmon, 2015)

YOLO Şekil 13'teki araba nesnesini algılaması ve doğru bir sınırlayıcı kutu (bounding box) çizebilmesi için tüm gridleri nöral ağdan geçirerek bir tahmin vektörü oluşturur bu durumda her grid kendi içinde nesnenin varlığını, yüksekliğini, genişliğini ve orta noktasını bulmakta görevlidir. Grid içerisinde nesnenin olup olmama durumunu da güven skoru ile bulur.



Şekil 13. Bounding Box tahmin vektörü (Aleksa Ć, Velibor I, Siniša Đ, Mališa M, & Bogdan P, 2018)

Güven skorunu hesaplayabilmek için;

Güven skoru = Kutu güven skoru * Bağlı sınıf olasılığı

Kutu güven skoru ise;

Kutu Güven Skoru = P * IoU

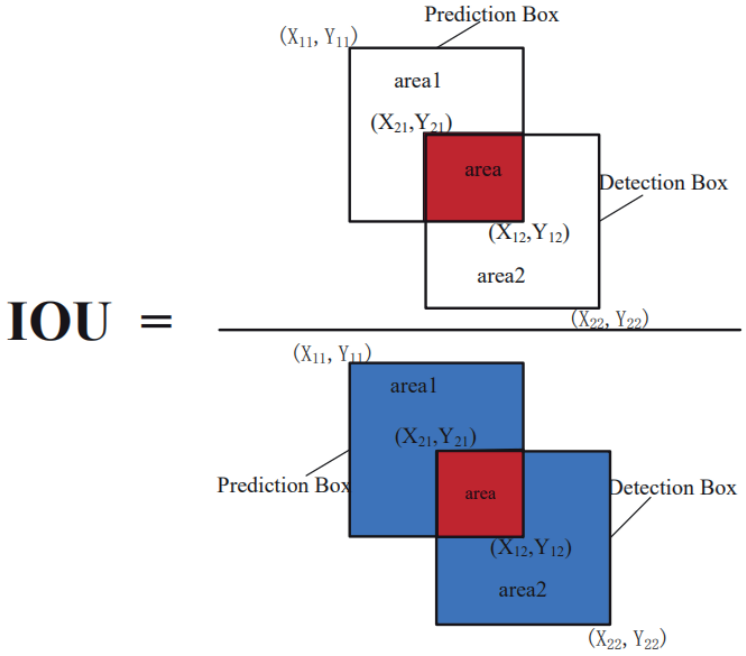
P*:* Kutunun nesneyi kapsayıp kapsamadığının ihtimali. Varsa 1 yoksa 0 değerini alır

IoU*:* İki kutunun birbiriyle olan benzerlik oranı

Bağlı Sınıf Olasılığı*:* Modelde kaç sınıf varsa o kadar sayıda tahmin değeridir

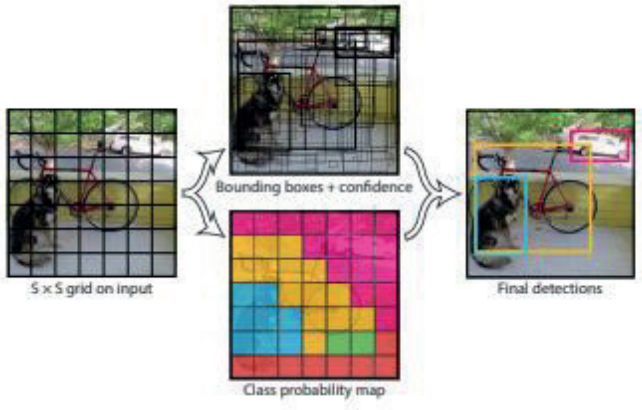
ile hesaplanır.

IoU (Intersection over union), amacı iki çerçevenin birbirleriyle olan ilişkisini gösterir. Şekil 14'te görüleceği üzere tahmin kutusuyla algılama kutusunun kesiştiği (prediction box ∩ detection box) alanla, bu iki kutunun birleştiği (prediction box ∪ detection box) alanın bölümünden çıkacak sonucu gösterir (Cheng, Zhao, & Zhang, 2019).



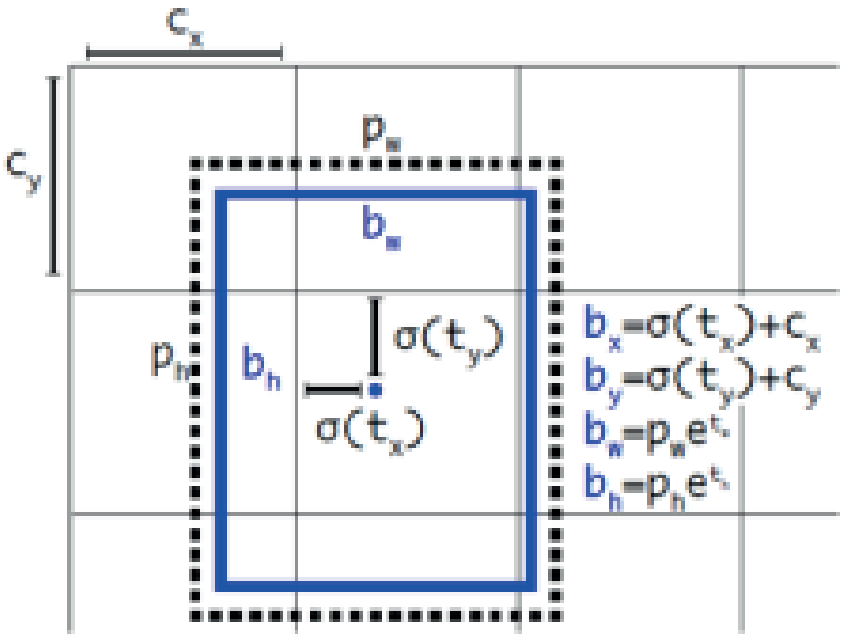
Şekil 14. IoU (Intersection over union) (Cheng et al., 2019)

Non-max Suppression algoritması da görüntü üzerinde çizilen bounding box'ların hangisinin doğruluk oranının fazla olduğunu bulmak ve diğerlerini çıkartma işlemini gerçekleştirir. Buda gereksiz kutuların gösterilmemesini sağlar. Bu algoritmada IoU değerine bağlıdır. IoU değeri belli bir seviyenin altındaysa o seviyede bulunan bounding box'lar atılır. Şekil 15'te oluşan birçok kutunun atıldığı gösterilmiştir.



Şekil 15. Sınıf olasılık haritası (Redmon et al., 2016)

Bir grid içerisinde birden fazla nesne bulunuyorsa bu sorunu çözebilmek için de bağlantı kutusu (anchor box) kullanılır. Önceden belirtilen bu kutuların grid içerisindeki hangi nesneye benzediğini IoU ile bulup yeni bir tahmin vektörü oluşturulur. Şekil 16'da Anchor Box matematiksel gösterimi mevcuttur. Burada b_x= Nesnenin orta noktası X koordinatı, b_y= Nesnenin orta noktasının Y koordinatı, b_w= Nesnenin genişliği, b_h= Nesnenin yüksekliğidir.



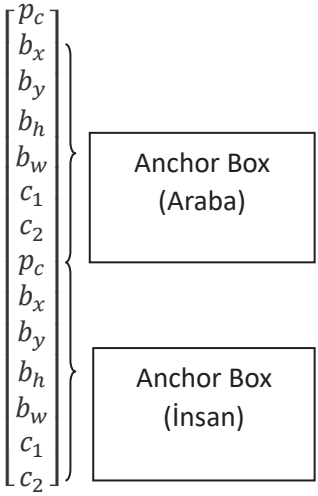
Şekil 16. Anchor Box ile Konum ve Boyut Tahmini yapan sınır kutusu (Devrim Kiliç, Aydemir, & Özdemir, 2022)

Tahmin vektörünün yapısı 2 tane nesne ile oluşturulduğunda aşağıdaki yapıyla gösterilir.

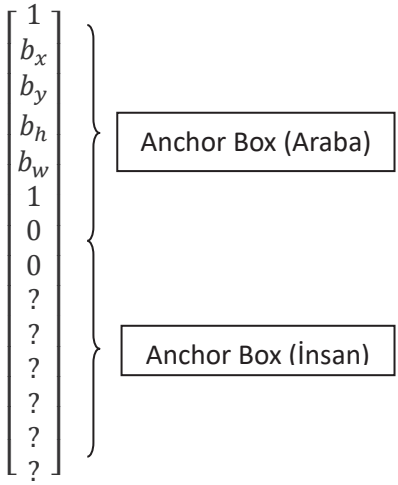
c1 = Araba c2 = İnsan

$$\begin{bmatrix} p_c \\ b_x \\ b_y \\ b_h \\ b_w \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}$$

İki tane nesne olduğundan önceden iki tane anchor box belirtilmiş olmalıdır (biri insanı biri arabayı temsil ediyor). O zaman da tahmin vektörümüz;



şeklini alır. Görsel içerisinde sadece araba nesnesi varsa araba için p_c değeri 1 insan içinse 0 olacaktır ve diğer parametrelerin bir önemi kalmayacaktır bu yapıda aşığıda gösterilmiştir.



Bu şekilde YOLO birden fazla nesneyi aynı kare içerisinde algılamaya çalışır.

YOLO hata fonksiyonu olarak 3 temel hatadan oluşur. Sınıflandırma hatası, Sınırlayıcı kutu hatası ve Nesne varlığı hatasıdır.

- **Sınıflandırma hatası**

Bu hata fonksiyonu, her bir hücredeki her bir sınıfın tahminini gerçek sınıf değerleriyle karşılaştırarak yanlış tahminde bulunulan sınıf hatalarının toplamını ölçer. (11) nolu formülde sınıflandırma hatası formülü verilmiştir. Burada S = grid sayısı, 1_i^{obj} = obje olduğunda 1 yoksa 0, $p_i(C)$ = gerçek sınıf, $\hat{p}_i(c)$ = tahmin sınıfıdır.

$$\sum_{i=0}^{S^2} 1_i^{obj} \sum_{c \in classes} (p_i(c) - \hat{p}_i(c))^2 \qquad (11)$$

- **Sınırlayıcı kutu hatası**

Bu hata, nesnelerin sınırlayıcı kutularının (bounding box) tahmin edilen konumunu ve gerçek konumu arasındaki farkı ölçer. (12) nolu formülde sınırlayıcı kutu hatası formülü verilmiştir. Burada S = grid sayısı, 1_i^{obj} = obje olduğunda 1 yoksa 0, B = Her bir hücre için kullanılan anchor box sayısı, x, y = x ve y koordinat sistemi, w, h = Genişlik ve yükseklik, $\hat{x}$, $\hat{y}$ = Modelin tahmin ettiği x ve y koordinat sistemi değerleri,

$\widehat{w}, \widehat{h}$ = Modelin tahmin ettiği genişlik ve yükseklik değerleri, λ_{coord} = Koordinat tahminlerinin doğruluğunun ne kadar önemli olduğunu belirler.

$$\lambda_{coord} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} 1_{ij}^{obj} \left[(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2\right]$$

$$+ \lambda_{coord} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} 1_{ij}^{obj} \left[(\sqrt{w_i} - \sqrt{\widehat{w}_i})^2 + (\sqrt{h_i} - \sqrt{\hat{h}_i})^2\right] \quad (12)$$

- **Nesne varlığı hatası**:

Nesne varsa: Bu hata, bir hücre içinde gerçekten bir nesnenin bulunup bulunmadığını belirlemeye odaklanır. Eğer bir hücrede gerçekten bir nesne varsa bu hata fonksiyonu, ağın bu nesneyi doğru bir şekilde tespit etme çabalarını değerlendirir. Bu durum yaklaşık olarak 1 olmalıdır, yani ağ nesnenin varlığını doğru bir şekilde tahmin etmiştir. (13) nolu formülde Nesne varlığı (nesne varsa) hatası verilmiştir. Burada S = grid sayısı, 1_i^{obj} = obje olduğunda 1 yoksa 0 , B = Her bir hücre için kullanılan anchor box sayısı, C_i = sınıf olasılığı, $\hat{C}_i$ = tahmin edilen sınıf olasılığıdır.

$$\sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} 1_{ij}^{obj} (C_i - \hat{C}_i)^2 \quad (13)$$

Nesne yoksa: Bu hata, bir hücre içinde gerçekten bir nesnenin bulunmamasını değerlendirir. Eğer bir hücrede gerçekte bir nesne yoksa bu hata fonksiyonu, ağın o hücredeki yanlış tahminlerini değerlendirir. Bu durumda değer yaklaşık olarak 0 olmalıdır, yani ağ nesnenin var olduğunu yanlış bir şekilde tahmin etmiştir. (14) nolu formülde Nesne varlığı (nesne yoksa) hatası verilmiştir. Burada S = grid sayısı, 1_i^{obj} = obje olduğunda 1 yoksa 0 , B = Her bir hücre için kullanılan anchor box sayısı, , C_i = sınıf olasılığı, $\hat{C}_i$ = tahmin edilen sınıf olasılığı , λ_{noobj} = Bir nesnenin varlığının tahmininin doğruluğunun ne kadar önemli olduğunu belirler.

$$\lambda_{noobj} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} 1_{ij}^{noobj} (C_i - \hat{C}_i)^2 \quad (14)$$

Bu üç hatanın toplamı YOLO için toplam hatayı verir.

8. Sonuç

Bu çalışmada, işaret dili algılamada yapay zekanın önemli bir yeri olduğu vurgulanmaktadır. İşaret dilinin genel önemi üzerinde durulmuş ve özellikle TİD hakkında bilgi verilmiştir. İşaret dili, işitme ve konuşma engelli bireyler arasında iletişim kurmanın en önemli yollarından biridir ve bu nedenle yapay zekâ, bu önemli iletişim biçimini daha etkili hale getirmek için kullanılır. İşaret dili algılama alanında TİD için yapılan çalışmaların az olması sebebiyle bu çalışmanın bir kaynak niteliği taşıdığını ve geçmiş çalışmalardan bazı örnekler inceleyerek yapay zekanın bu alandaki kullanımını ve bu örneklerde kullanılan algoritmalar (YOLO, CNN, RNN ve ANN) hakkında bilgi vererek gelecekteki çalışmalara katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

KAYNAKÇA

Aleksa Ć, Velibor I, Siniša Đ, Mališa M, & Bogdan P. (2018). The Real-Time Detection of Traffic Participants Using YOLO Algorithm. Retrieved from www.youtube.com/watch?v=nnVPnK-B-P0

Ali, A. (2019). Artificial Neural Network (ANN) with Practical Implementation | by Amir Ali | The Art of Data Scicne | Medium. Retrieved 18 December 2023, from https://medium.com/machine-learning-researcher/artificial-neural-network-ann-4481fa33d85a

Arıcı, N., & Erten, H. (2022). İşaret Dilinin Tarihi Serüveni ve Türk İşaret Dili. *Afyon Kocatepe University Journal of Social Sciences*, *1*(1), 1–14.

Aydın, Y., & Akar, F. (2022). SURF ve MSER kombinasyonu ile kopya taşı sahteciliği algılama Copy move forgery detection with SURF and MSER combination. *Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci*, *11*(3), 513–521. doi:10.28948/ngmuh.1075784

Balık, H. H., Diri, B., & Şeker, A. (2017). Derin Öğrenme Yöntemleri ve Uygulamaları Hakkında Bir İnceleme, *3*(3), 47–64.

Balkaya, E., Uçan, E., Turan, G., & Oral, S. G. (2021). Yapay Zeka ile İşaret Dilini Farklı Dillerde Metne Çeviren Mobil Uygulama - Bilişim Yıldızları 2021. Retrieved 4 December 2023, from https://bilisimyildizlari.org.tr/2021/yapay-zeka-ile-isaret-dilini-farkli-dillerde-metne-ceviren-mobil-uygulama

Çelik, Ö., & Odabaş, A. (2020). Konvolüsyonel Sinir Ağları Kullanarak Türk İşaret Dili Tanıma. *European Journal of Science and Technology*, (19), 923–934. doi:10.31590/ejosat.747231

Cheng, S., Zhao, K., & Zhang, D. (2019). Abnormal water quality monitoring based on visual sensing of three-dimensional motion behavior of fish. *Symmetry*, *11*(9). doi:10.3390/sym11091179

Devrim Kiliç, Ö., Aydemir, M. E., & Özdemir, Ö. (2022). Uçak Görüntülerinin Sınıflandırılmasında Farklı Yapay Zekâ

Algoritmalarının Performansı, *5*(2), 84–88. doi:10.36287/setsci.5.2.018

DOĞAN, F., & Türkoğlu, İ. (2018). Derin Öğrenme Algoritmalarının Yaprak Sınıflandırma Başarımlarının Karşılaştırılması. *SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF COMPUTER AND INFORMATION SCIENCES*, *1*.

ER, M. B., & IŞIK, İ. (2021). LSTM Tabanlı Derin Ağlar Kullanılarak Diyabet Hastalığı Tahmini. *Cilt*, *10*(1), 68–74. doi:10.46810/tdfd.818528

Ergüder, H. (2018). Recurrent Neural Network Nedir?. Recurrent Neural Networks (RNN) 'ü… | by Hamza Ergüder | Medium. Retrieved 21 November 2023, from https://medium.com/@hamzaerguder/recurrent-neural-network-nedir-bdd3d0839120

Erhandi, B. (2020). DERİN ÖĞRENME İLE METİN ÖZETLEME YÜKSEK LİSANS TEZİ.

Ersoy, E., & Karal, Ö. (2012). YAPAY SİNİR AĞLARI VE İNSAN BEYNİ. *Journal of the Human and Social Science Researches | 2012 | Cilt*, *1*(2).

eyhgm. (2021). eyhgm_istatistik_bulteni_temmuz2021.

Fatih, M. F., & Bayır, Ş. (2018). Türk İşaret Dili İncelemesi: İletişim ve Dil Bilgisi, 35–58.

Francisco de Abreu e Lima. (2023). Gradient descent in R – poissonisfish. Retrieved 21 December 2023, from https://poissonisfish.com/2023/04/11/gradient-descent/

Gomaa, A. A., & Gla Elrayes, R. (2021). Egyptian Sign Language Recognition Using CNN and LSTM.

Gözütok Şakar, H. (2021). Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks - CNN) | by Hilal Gözütok Şakar | Medium. Retrieved 18 December 2023, from

https://hilalgozutok.medium.com/evri%C5%9Fimli-sinir-a%C4%9Flar%C4%B1-convolutional-neural-networks-cnn-e61470e9bdb1

Hochreiter, S., & Schmidhuber, j. (1997). LONG SHORT-TERM MEMORY.

Kın, Z. B. (2019). TÜRK İŞARET DİLİ ALFABESİNİN DERİN ÖĞRENME YÖNTEMİ İLE SINIFLANDIRILMASI.

Köroğlu, Y. (2017). Yapay Zeka'nın Teorik ve Pratik Sınırları.

Lecun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., & Haaner, P. (1998). Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition.

Mahmood Al-Shaheen, A., Çevik, M., & Alqaraghuli, A. (2022). International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies American Sign Language Recognition using YOLOv4 Method. *Ijmsit Research Article*, *2022*(1), 61–65. doi:10.36287/ijmsit.6.1.61

Oral, Z. (2016). TÜRK İŞARET DİLİ ÇEVİRİSİ. Retrieved from http://www.nancyrourke.com/paintings

Öztemel, E. (2012). YAPAY SİNİR AĞLARI. Retrieved from www.papatya.gen.tr

Öztürk, K., & Şahin, M. E. (2018). Yapay Sinir Ağları ve Yapay Zekâ'ya Genel Bir Bakış, *6*(2), 25–36. Retrieved from http://www.sloi.org/sloi-name-of-this-article

Patel, M. (2023). American Sign Language Detection.

Redmon, J. (2015). YOLO: Real-Time Object Detection. Retrieved 28 November 2023, from https://pjreddie.com/darknet/yolo/

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. Retrieved from http://pjreddie.com/yolo/

Sabeenian, R., Sai Bharathwaj, S., & Mohamed Aadhil, M. (2020). Sign Language Recognition Using Deep Learning and Computer Vision. *Article in Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, 12,* 2020. doi:10.5373/JARDCS/V12SP5/20201842

Sevli, O., & Kemaloğlu, N. (2019). *Evrişimsel Sinir Ağları ile İşaret Dili Tanıma.* Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/349057657

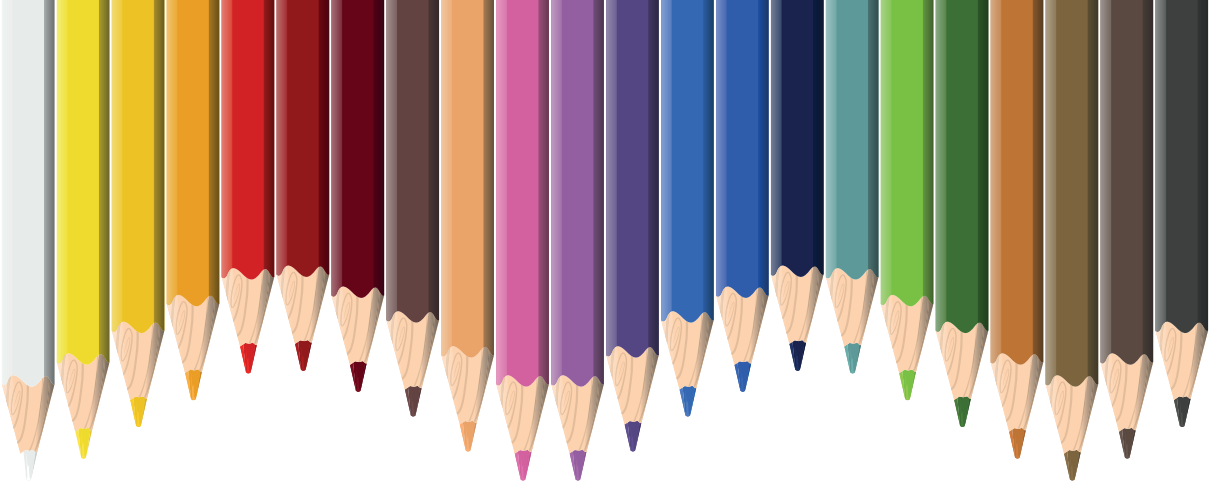
Shahriar, N. (2023). What is Convolutional Neural Network — CNN (Deep Learning) | by Nafiz Shahriar | Medium. Retrieved 12 December 2023, from https://nafizshahriar.medium.com/what-is-convolutional-neural-network-cnn-deep-learning-b3921bdd82d5

Singhal, G. (2020). Introduction to LSTM Units in RNN. Retrieved 22 November 2023, from https://www.pluralsight.com/guides/introduction-to-lstm-units-in-rnn

Tüfekçi, M., & Karpat, F. (2019). Derin Öğrenme Mimarilerinden Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN) Üzerinde Görüntü İşleme-Sınıflandırma Kabiliyetininin Arttırılmasına Yönelik Yapılan Çalışmaların İncelenmesi. doi:10.36287/setsci.4.5.007

Zolaktaf, N. (2016). Recurrent Neural Networks.

Zupan, J. (1994). Introduction to Artificial Neural Network (ANN) Methods: What They Are and How to Use Them*. *Acta Chimica Slovenica*, *41*, 327–352.



Bölüm 5

BİR YUMURTA VERİ SETİNİN K-NN MAKİNE ÖĞRENME ALGORİTMASIYLA SINIFLANDIRILMASI

Ahmet Çelik[1], Emre Tekin[2**]*

1 * Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı MYO, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Kütahya, ORCID: 0000-0002-6288-3182.

2 ** Bilişim Sistemleri Müdürü, Gedik Tavukçuluk ve Tarım Ürünleri San. Tic. A.Ş., Uşak, ORCID: 0000-0003-2189-9265.

Bilgi: Bu çalışma, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nde, Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇELİK danışmanlığında yürütülen, Emre TEKİN'in "Kanatlı Kuluçkahanelerinde Yumurta Sınıflandırmasının Görüntü İşleme Teknikleriyle Gerçekleştirilmesi" isimli yüksek lisans tezinin belirli bir kısmından, değiştirilerek, düzenlenerek ve özetlenerek üretilmiştir.

GİRİŞ

Yumurta en önemli gıda tüketim ürünlerinden biridir ve artan dünya nüfusuna bağlı olarak her geçen gün talep artmaktadır. Ayrıca yumurta üretimi, doğrudan bağlantılı olduğu beyaz et sektörü başta olmak üzere, birçok gıda üretim sektörünü etkilemektedir. Günümüzde yumurtaların sınıflandırması çoğu işletmede insan faktörü kullanılarak yapılmaktadır veya sınıflandırma yapılmamaktadır. Çünkü sınıflandırma hata oranı artmakta ve sınıflandırma başarısı düşük kalabilmektedir.

İnsan yaşamında gıdaya olan talep çok önemli yer tutmaktadır. Yumurta sadece beslenmede değil verimli kanatlı hayvan yetiştiriciliğinde önemli bir yere sahiptir. Kaliteli yumurta üretimi kaliteli hayvan ve verimli et üretiminin temelini oluşturmaktadır. Bu durumda yumurtaya olan talebin sürekli olmasını sağlamaktadır. Ayrıca Dünya nüfusunun hızlı artışına bağlı olarak gıda sektörüne olan talep sürekli artmaktadır. Sürekli bir artış içerisinde olan tavukçuluk sektöründe kuluçkahanelerdeki üretim ve kalite, üretimin ilk ve önemli adımıdır. Kuluçkahaneler hem ticari amaçlı hem de damızlık kanatlı hayvan yetiştiriciliğinde kullanılan işletmelerin başında gelmektedir. Çünkü kuluçkahanelerden elde edilen başarılı ve kaliteli sonuçlar tüm sistemin verimli ilerlemesini sağlamaktadır.

Görüntü işleme masa üstü ve mobil uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle üretime yönelik firmalarda kullanılması çok büyük fayda sağlayacaktır. Görüntü işleme için farklı ve başarı oranları değişen algoritmalar kullanılmaktadır. Ancak görüntü elde etme aşamasında çevresel olumsuz etkenlerin azaltılması, görüntü kalitesinin ve başarılı sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır. Yumurta şekil ve görüntüleri üzerinde birçok araştırma yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Aşçı ve Durmuş (2015) yaptıkları çalışmada, yumurta şekil göstergelerini kullanarak civciv kalitesi, cinsiyeti ve ağırlığı üzerine etkilerini belirlemek için çalışma yapmışlardır.

Javadikia, vd., (2011) yaptıkları çalışmada, yumurta görüntü analizi yaparak sertlik analizi yapılmışlardır. Ayrıca görüntü üzerinde ön işlem uygulanması yapılarak, segmentasyon işlemi ve yumurta boyutunun ölçümü işlemi gerçekleştirilmiştir. En son olarak; bu veriler ANFIS model ile değerlendirilerek yumurta ağırlığının tespit edilebileceği ifade edilmiştir.

Mertens vd., (2005) yaptıkları çalışmada, görüntü ön işlemi gerçekleştirilerek, parlaklık değerlerini kullanarak bir uygulama geliştirmiştir. Uygulamada, 400 adet kirli 100 adet temiz kahverengi yumurta kullanılmıştır.

Uygulama sonucunda, doğruluk oranı kirli yumurtalarda, %100 oranında doğru tespit edilmiş ancak temiz yumurtalarda ise %98 oranında başarılı olarak tespit edilmiştir.

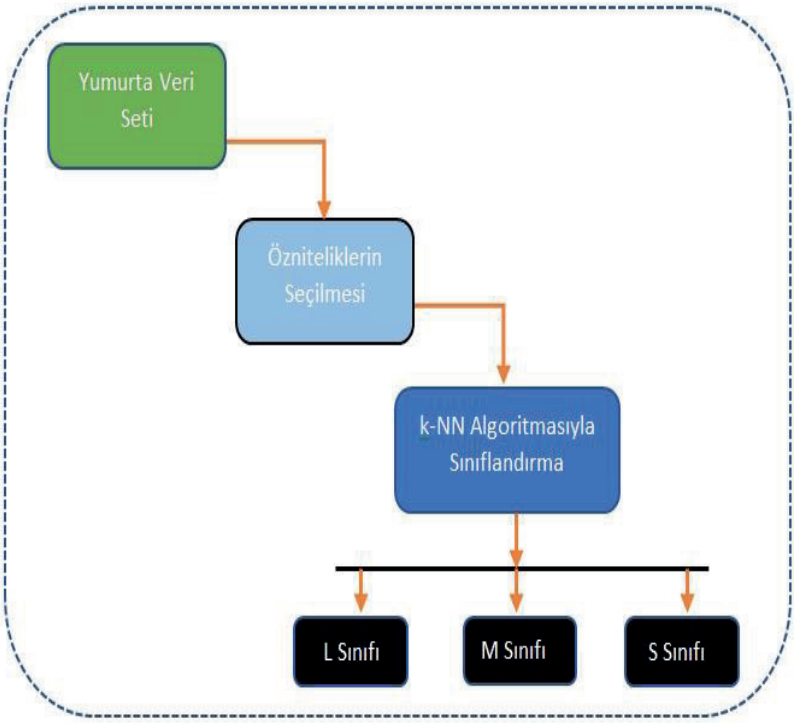
Bridge, vd., (2007) yaptıkları çalışmada, yumurta görüntüleri üzerinde, iki ölçüm noktası arasındaki pikselleri sayarak, Lineer bir boyutlandırma ölçümü sağlamışlardır. Daha sonra eşik değeri kullanılarak siyah beyaz bir görüntü elde edilmiş, yumurtanın fazlalık bölgeleri kırpılarak yumurta bölgesi siyah olacak şekilde belirlenmiştir.

Bu çalışmada, yumurta sınıflandırmasının doğru ve hızlı yapılabilmesi için bir tasarım yapılmıştır. Bu tasarım üzerinden alınan yumurta görüntüleri üzerinde görüntü işleme yöntemleri uygulanarak her yumurtanın öznitelikleri çıkartılmıştır ve veri seti içine kaydedilmiştir. Veri seti içinde 100 adet yumurtanın, L, M ve S sınıflandırma bilgileri yer almaktadır. Bu çalışmada kullanılan veri setinde her yumurtaya ait 3 adet öznitelik kullanılmıştır. Bu çalışmada, bu öznitelikler kullanılarak k-NN makine öğrenme algoritmasıyla L, M ve S sınıflandırma başarıları test edilmiştir.

MATERYAL ve METOT

Yapılan çalışmanın diyagramı Şekil-1 üzerinde gösterilmektedir. İlk aşamada, üzerine kamera montajı elde edilmiş sistem ile yumurta görüntüleri elde edilmiştir. İkinci aşamada, tespit edilen her yumurta görüntüsünün özniteliği çıkartılmıştır. Üçüncü aşama da ise k-NN makine öğrenme algoritmasıyla sınıflandırma gerçekleştirilmiştir.

Yumurta veri seti elde edilirken, kuluçkahane üretim bant sistemi üzerine bir kamera montajı yapılarak, yumurta tepsilerinin görüntüleri alınmış ve her bir yumurta tespit edilmiştir. Her yumurta görüntüleri için Box Perimeter, Area ve Contour Perimeter öznitelikleri çıkartılarak kaydedilmiştir.



Şekil-1. Tasarlanan Sistemin Diyagramı

Yumurta Veri Seti

Bu çalışmada yumurta veri setinin 100 tanesine ait 3 adet veri özelliği kullanılarak test gerçekleştirilmiştir. Tablo-1 üzerinde yumurta veri setinin 15 verisine ait örnek verilmiştir.

Tablo-1. Yumurta veri seti (15 örnek)

Kimlik No:	Box Perimeter	Alan	Contour Perimeter	Sınıf
1	268.79	5,749.51	288.39	M
2	276.57	6,086.84	295.81	M
3	267.68	5,701.99	286.15	M
4	258.80	5,329.71	276.49	M
5	254.36	5,148.28	271.66	M
10	276.78	6,095.95	295.56	L

11	282.12	6,333.84	302.05	L
12	276.57	6,086.84	295.81	L
17	287.69	6,584.78	308.29	L
22	283.23	6,383.72	302.63	L
30	232.14	4,288.27	248.35	S
31	247.69	4,882.03	264.84	S
32	225.48	4,045.59	241.52	S
33	241.03	4,622.85	258.84	S
34	236.58	4,453.99	253.18	S

Box Perimeter

Dikdörtgen şeklinde elde edilmiş olan yatayda a1 ve dikeyde b1 ölçüleri olan bir şeklin kontur alanının Ramanujan's approximation eşitliğine göre hesaplanmış halidir (eşitlik 1).

$$P \approx \pi \times (3(a1 + b1) - \sqrt{(3a1 + b1) \times (a1 + 3b1)}) \quad \text{(Eşitlik 1)}$$

Area

Dikdörtgen biçiminde elde edilmiş olan yatayda a1 ve dikeyde b1 ölçüleri olan şeklin Area ölçüsü eşitlik 2 ile hesaplanmaktadır.

$$Area = \pi * a1 * b1 \quad \text{(Eşitlik 2)}$$

Contour Perimeter

Kontur uzunluğu ölçüsü, Öklid Mesafe Metrik Metodu hesaplamasında kullanılan iki nokta arasındaki mesafenin bulunmasında kullanılan algoritma ile hesaplanmaktadır. Bu çalışmada elde edilen yumurta görüntüsünün elips veya çember görüntülerinin çevresel hesaplamalarında kullanılmaktadır. (eşitlik 3)

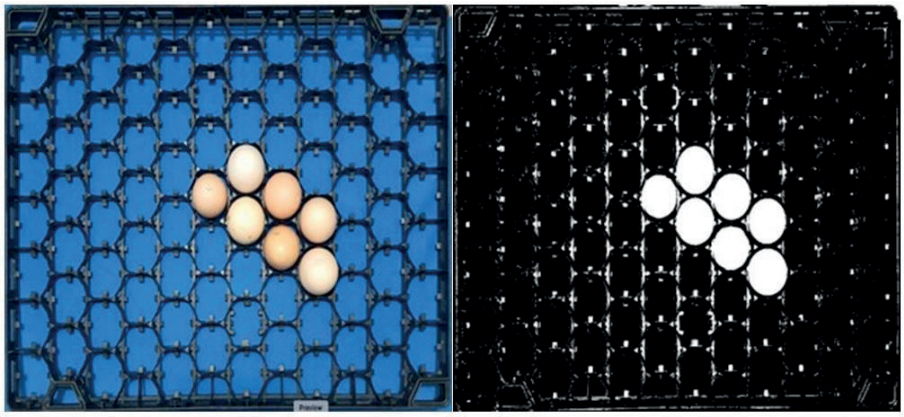
$$Contour\ Perimeter = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad \text{(Eşitlik 3)}$$

x_1 ve $x_2$yatay düzlem üzerinde iki noktayı göstermektedir. y_1 ve y_2 ise dikey düzlemdeki iki noktayı göstermektedir.

Yumurta Tepsi Görüntüsü

Kuluçka hane üretim tesislerinde kullanılan tepsi görüntüsü Şekil-2.a üzerinde gösterilmektedir. Her yumurta tepsisi üzerinde 84 yumurta yerleştirilmektedir. Kuluçkahanelerde yumurtalar düzenli olarak yerleştirilmektedir. Bu tepsilerin görüntüleri alındığında ilk olarak bir eşik değeri kullanılarak bitmap (ikili görüntü) formatına dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu yumurta tepsi görüntülerinin bitmap formatına dönüştürülmüş biçimi Şekil-2.b üzerinde gösterilmektedir.

Bitmap formatında dönüştürülen tepsi görüntüleri üzerinde Hough Transform algoritması kullanılarak, her bir yumurtanın tespiti gerçekleştirilmektedir. Tespit edilen yumurtaların 3 özniteliği kullanılarak veri seti içine kaydedilmesi sağlanmaktadır. Bitmap formatına dönüştürülmeyen görüntüler üzerinde yumurta tespitleri başarı olarak gerçekleştirilememektedir.



Şekil-2. Renkli Ve Bitmap Yumurta Tepsisi Görüntüsü (Tekin, 2023).

k-NN Makine Öğrenme Algoritması

k-NN algoritması, P. Hart ile T. Cover'ın 1967'de yaptığı, "Yakın Komşular Örüntü Sınıflama" çalışmasıyla literatürde tanıtılmıştır (Dilki ve Başar, 2020).

Makine öğrenmesi yöntemlerinin en yaygın tercih edilen algoritmalardan biri k-NN algoritmasıdır. Bu algoritmada, bir test veri örneğinin, eğitim veri setinde bulunan diğer verilerle mukayese edilmesiyle

hesaplanmaktadır. (Soğukpınar, 2008). Manhattan, Kosinüs, Hamming, Minkowski, Jaccard, Öklid, Mahalanobis gibi mesafe yöntemleri kullanılarak uzaklık hesaplaması sonucunda, bir sınıfa kaydedilmemiş olan veri, en yakın sınıfa kaydedilmektedir (Çalışkan ve Soğukpınar, 2008; Dilki ve Başar, 2020; İlhan ve Dinçer, 2023). En yaygın kullanılan uzaklık vektörü Öklid uzaklık vektörüdür.

Öklit Uzaklık Vektörü

Öklid uzaklık vektörü eşitlik 4 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$d_{Euclidean}(X_i, Y_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i - Y_i)^2} \quad \text{(Eşitlik 4)}$$

X_i örnek veri, Y_i ise veri seti içindeki kıyaslanan veridir. n ise özellik sayıdır. $d_{Euclidean}(X_i, Y_i)$, X_i ve Y_i verilerinin uzaklık değerleridir (Silahtaroğlu 2016, Akbaş and Berber 2020, Durak 2011).

PERFORMANS ÖLÇÜTLERİ

Literatürde kullanılan başarı metrik değerleri farklılık göstermektedir ancak bilimsel çalışmalarda, en yaygın olarak AUC Skor, doğruluk, F1 Skor, kesinlik ve duyarlılık başarı metrik değerleri kullanılmaktadır (Bkz.Tablo-2).

Tablo-2. Başarı Metrik Değerleri

Metrik Tanımları				
AUC Skor	Doğruluk	F1 Skor	Kesinlik	Duyarlılık
(Area Under the Curve: Eğri Altındaki Alan)	(Class Accuracy: Sınıf Doğruluğu)	(F1 Score: F1 Skor)	(Precision)	(Recall)

AUC Skor (Area Under The Curve)

AUC Skor, başarı metrik değeri, ROC (Receiver Operating Characteristic: Alıcı Çalışma Karakteristiği) eğrisinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla bulunmaktadır. Makine öğrenme algoritmalarını karşılaştırmak için kullanılan bir başarı metrik değeridir. AUC Skor değeri, 1(bir) değerine yakınlaşırsa daha yüksek başarılı sonuç elde edildiğini göstermektedir.

Doğruluk (Class Accuracy)

Doğruluk başarı metrik parametresi, doğru negatif değer sayısı ve doğru pozitif değer sayısının toplamının tüm örneklerin sayısına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Doğruluk başarı metrik hesaplamasıyla veri setleri içinde dengeli sınıf dağılımı olduğunda daha başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Doğruluk metrik hesaplaması eşitlik 5 ile hesaplanmaktadır (Güldalı, 2021; Demirel, 2023).

$$Doğruluk = \frac{Doğru\ Negatif\ Sayısı + Doğru\ Pozitif\ Sayısı}{Doğru\ Negatif\ Sayısı + Doğru\ Pozitif\ Sayısı + Yanlış\ Pozitif\ Sayısı + Yanlış\ Negatif\ Sayısı}$$

(Eşitlik 5)

F1 Skor (F1 Score)

F1 Skor, başarı metrik parametresi, kesinlik ve duyarlılık hesaplama değerlerinin harmonik ortalaması bulunarak hesaplanmaktadır. F1 Skor hesaplamasında, Kesinlik ve Duyarlılık metrik ölçüm değerlerinin her ikisi de önem taşımaktadır. F1 Skor başarı metrik parametresi hesaplaması eşitlik 6 üzerinde verilmektedir (Güldalı, 2021; Demirel, 2023).

$$F1\ Skor = 2 \times \frac{precision * recall}{precision + recall} \quad \text{(Eşitlik 6)}$$

Kesinlik (Precision)

Kesinlik başarı metrik parametresi hesaplaması, Doğru pozitif sayı değerlerin, doğru pozitif ve yanlış pozitif sayısı değerlerinin toplamına oranıdır. Uygulamada doğru tahmin edilen pozitif değer sayısının, doğru ve yanlış olan tüm pozitif değer sayısına oranıdır. Kesinlik başarı metrik parametre hesaplaması eşitlik 7 üzerinde verilmektedir (Güldalı, 2021; Demirel, 2023).

$$Kesinlik = \frac{Doğru\ Pozitif\ Sayısı}{Doğru\ Pozitif\ Sayısı + Yanlış\ Pozitif\ Sayısı} \quad \text{(Eşitlik 7)}$$

Duyarlılık (Recall)

Duyarlılık başarı metrik parametresi hesaplaması, doğru pozitif değerlerin, doğru pozitif ve yanlış negatif sayı değerlerin toplamına oranıdır. Bu başarı metrik değerinde yanlış negatif değer sayısı, 0 (sıfara) yakın, doğru pozitif değer sayısı 1 (bire) yakın olması durumunda, daha yüksek başarılı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Duyarlılık başarı metrik hesaplaması eşitlik 8 üzerinde verilmektedir (Güldalı, 2021; Demirel, 2023).

$$duyarlılık = \frac{\text{Doğru Pozitif Sayısı}}{\text{Doğru Pozitif Sayısı+Yanlış Negatif Sayısı}} \quad \text{(Eşitlik 8)}$$

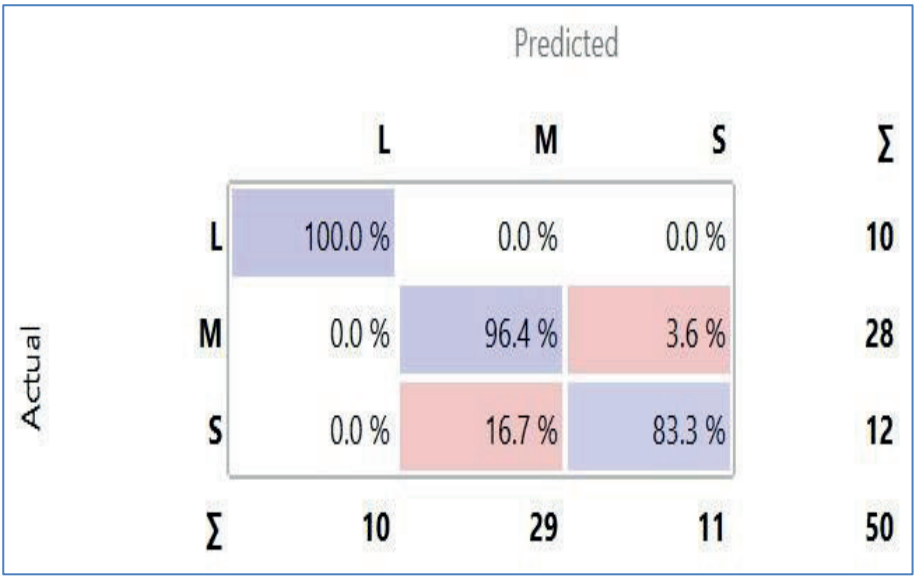
DENEYSEL SONUÇLAR

Yapılan çalışmada k-NN makine öğrenme algoritmasıyla her üç sınıfa (L, M, ve S) ait yumurtalardan 50 adet eğitim için, 50 adette test rastgele seçilmiştir. Yapılan test sonucuna göre k-NN algoritmasıyla elde edilen başarı metrikleri tablo 3 üzerinde gösterilmiştir. Test sonucunda, 0.991 AUC, 0.940 CA, 0.939 F1, 0.940 ve 0.940 Recall başarı metrik değeri elde edilmiştir.

Tablo 3: Uygulama Başarı Sonuçları

MODEL	AUC	CA	F1	Precision	Recall
k-NN	0.991	0.940	0.939	0.940	0.940

k-NN algoritmasıyla, L, M ve S sınıflarına ait karmaşıklık matrisi Şekil-3 üzerinde gösterilmektedir. Uygulamada L sınıfı, %100 doğrulukta, M sınıfı, %96.4 doğrulukta ve S sınıfı ise %83.3 doğrulukta sınıflandırma tahmini gerçekleştirilmiştir. M sınıfının %3.6'sı, S sınıfına ait olabileceği tahmin edilerek yanlış sınıflandırma yapılmıştır. S sınıfının, %16.7'si, M sınıfına ait olabileceği tahmin edilerek yanlış sınıflanma tahmini yapılmıştır.

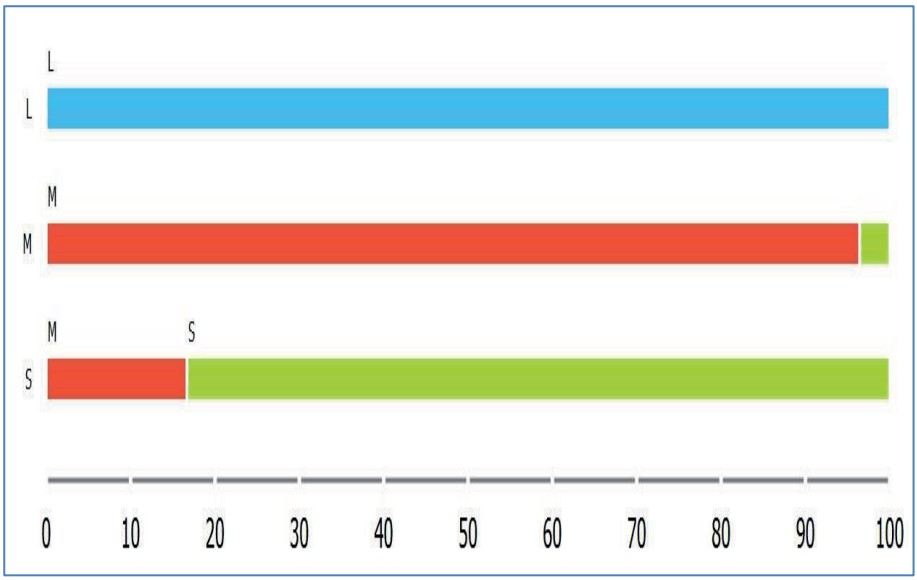


Şekil-3. Sınıflandırma Karmaşıklık Matrisi

k-NN algoritmasıyla elde edilen L sınıfına, M sınıfına ve S sınıfına ait doğru ve yanlış tespitler Şekil-4 üzerinde gösterilmektedir. Sadece M ve S sınıflarında az oranlarda yanlış sınıflandırma tahminleri gösterilmektedir.

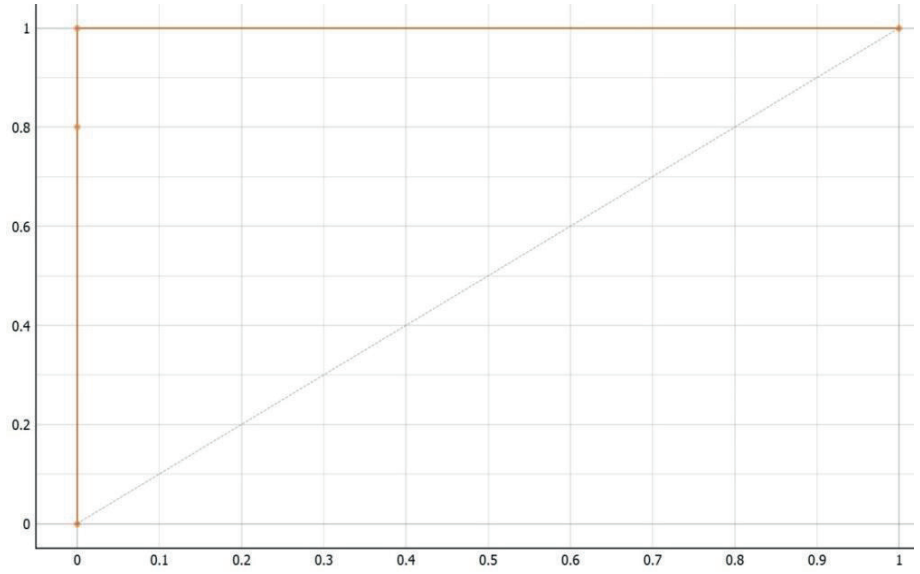
Sınıfının başarı oranı mavi renk ile gösterilmektedir. Grafikten elde edilen sonuçlara göre L sınıfının hatasız sınıflandırma başarısı vardır. M sınıflandırmasına bakıldığında çok az bölümünde S sınıflandırmasına ait olduğu görülmüştür. Ayrıca S sınıflandırmasına bakıldığında çok az bölümünün M sınıflandırmasına ait olduğu görülmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre L sınıflandırmasının, M ve S sınıflandırmasından daha yüksek oranda başarılı olduğu görülmektedir. Bu düşük başarı oranının nedeni, M ve S sınıflandırmasında eğitim için ayrılan veri sayısının veya öznitelik sayısının az olması olabilir. Bu oranı arttırmak için eğitim veri sayısını veya öznitelik sayısını arttırmak çözüm olabilecektir.



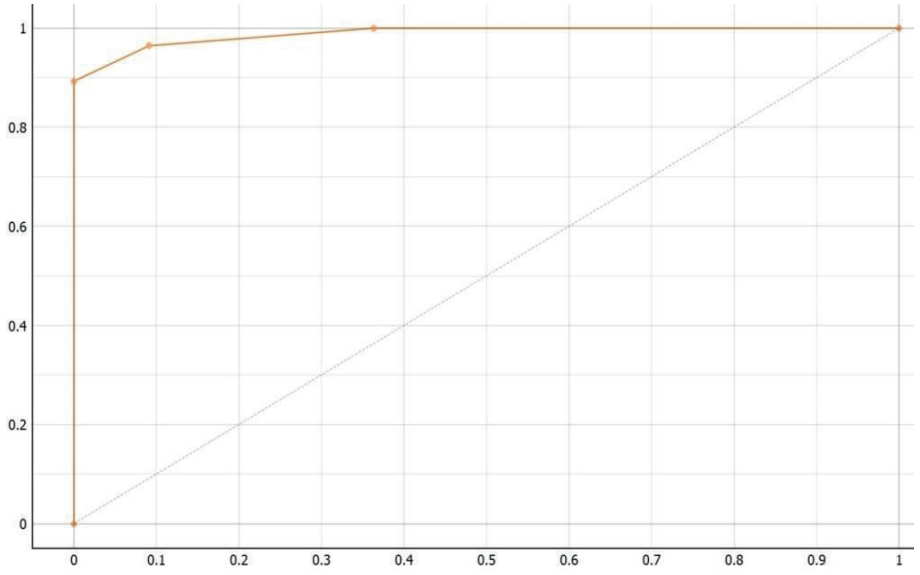
Şekil-4. Doğru Ve Yanlış Sınıflandırma Oranlarının Gösterimi

Model üzerinde k-NN algoritmasıyla L sınıfına ait başarının ROC grafiği, Şekil-5 üzerinde gösterilmiştir. Grafik üzerinden L sınıfının ait başarısını çok yüksek olduğu görülmektedir. Eğri altındaki alan en yüksek değerine ulaşmıştır.



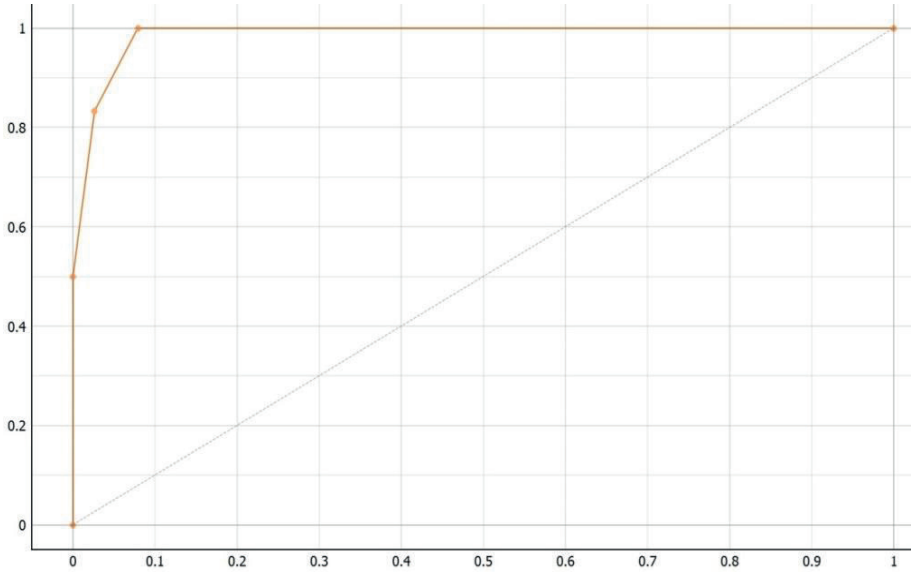
Şekil-5. L Sınıflandırma Başarısının ROC Eğrisi

Model üzerinde k-NN algoritmasıyla M sınıfına ait başarının ROC grafiği, Şekil-6 üzerinde gösterilmiştir. Grafik üzerinden M sınıfının ait başarısının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Eğri altındaki alan kabul edilebilir orana ulaşmıştır.



Şekil-6. M Sınıflandırma Başarısının ROC Eğrisi

Model üzerinde k-NN algoritmasıyla S sınıfına ait başarının ROC grafiği, Şekil-7 üzerinde gösterilmiştir. Grafik üzerinden S sınıfının ait başarının da yüksek olduğu görülmektedir. S sınıfını tespit ederken elde edilen eğri altındaki alanın da yüksek değerde görülmektedir.



Şekil-7. S sınıflandırma başarısının ROC eğrisi

SONUÇ

Bu çalışmada, L, M ve S sınıflarının yer aldığı 100 verilik yumurta veri seti kullanılmıştır. Bu yumurta verilerinin her biri 3 tane özniteliğe sahiptir. Bu öznitelikler yumurta görüntülerinden elde edilmiştir. Yumurta görüntüleri kuluçkahane tesisine montajı yapılmış görüntüleme sisteme üzerinden elde edilmiştir. Yumurta görüntüleri ilk adımda görüntü işleme algoritmaları ile işlenerek her birisinin 3 adet özniteliği çıkartılarak kaydedilmiştir.

Kayıt altına alınan 100 verinin 50 tanesi rastgele seçilerek eğitim için, 50 tanesi de rastgele seçilerek test için ayrılmıştır. Sınıflandırma tahmini için yaygın kullanılan k-NN algoritması seçilmiştir. Bu algoritmada Öklid uzaklık vektörü kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, AUC başarı metriğine göre %99.1 başarı elde edilmiştir. Bu çalışmada, yumurta verilerine ait 3 öznitelik

değeri kullanılarak, k-NN algoritmasıyla yüksek başarı oranıyla sınıflandırma yapılacağını göstermektedir.

ETİK PROTOKOL	
Etik Beyan	Çalışmanın süreçlerinde, tüm bilimsel ve etik kurallara uyulmuştur.
Çıkar Beyanı	Yazar/ların kendileri, Editörler, Hakemler ve diğer yazar/lar arasında çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.
Sorumluluk	Yazarlar olarak, tüm bölüm yazılarının sorumlulukları tarafımıza aittir.
Not	Bu çalışma, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nde, Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇELİK danışmanlığında yürütülen, Emre TEKİN'in "Kanatlı Kuluçkahanelerinde Yumurta Sınıflandırmasının Görüntü İşleme Teknikleriyle Gerçekleştirilmesi" isimli yüksek lisans tezinin belirli bir kısmından, değiştirilerek, düzenlenerek ve özetlenerek üretilmiştir.

KAYNAKÇA

Akbaş Y. ve Berber, T. (2020). Yanık Görüntülerinin Bulanık Kümelenmesinde Uzaklık Ölçülerinin Başarımlarının Değerlendirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 22(65), 639-647.

Aşcı, E. ve Durmuş İ. (2015). Tavuklarda yumurta şekil indeksinin kuluçka özellikleri üzerine etkisi. *Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi,* 3(7), 583-587.

Bridge, E. S., Boughton, R. K., Aldredge, R. A., Harrison, T. J., Bowman, R. ve Schoech, S. J. (2007). Measuring egg size using digital photography: Testing Hoyt' s method using Florida Scrub-Jay eggs. *Journal of Field Ornithology*, 78(1), 109-116.

Çalışkan, S. K. ve Soğukpınar, İ. (2008). Kxknn: K-means ve k en yakın komşu yöntemleri ile ağlarda nüfuz tespiti. *EMO Yayınları*, *24*, 120-125.

Çelik, A. (2022). Improving Iris Dataset Classification Prediction Achievement By Using Optimum k Value of kNN Algorithm, *Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi*, 3(2), 23-30.

Çelik, A. (2021). Zoo Veri Seti Üzerinde kNN Algoritmasının Öğrenme Başarısının Tespit Edilmesi. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 8(18), 78-82.

Demirel, S. (2022). *Makine Öğrenme Algoritmalarıyla Akciğer X-Ray Görüntü Özniteliklerini Kullanarak Pnömoni Tespiti ve Sınıflandırılması.* Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.

Çelik, A. ve Tekin, E. (2020). Hough Transform Görüntü İşleme Yöntemiyle Ekim Makineleri için Tohum Sayma Uygulaması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Ejosat Special Issue 2020 (ARACONF), 260-267.

Tekin, E. (2023). *Kanatlı Kuluçkahanelerinde Yumurta Sınıflandırmasının Görüntü İşleme Teknikleriyle Gerçekleştirilmesi.* Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.

Dilki, G. ve Başar, Ö. D. (2020). İşletmelerin iflas tahmininde K-en yakın komşu algoritması üzerinden uzaklık ölçütlerinin karşılaştırılması. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 19(38), 224-233.

Durak, B. (2011). *A Classification Algorithm Using Mahalanobis Distance Clustering of Data with Applications on Biomedical Data Sets.* Master of Science in Industrial Engineering Department. Middle East Technical University, Ankara, Türkiye.

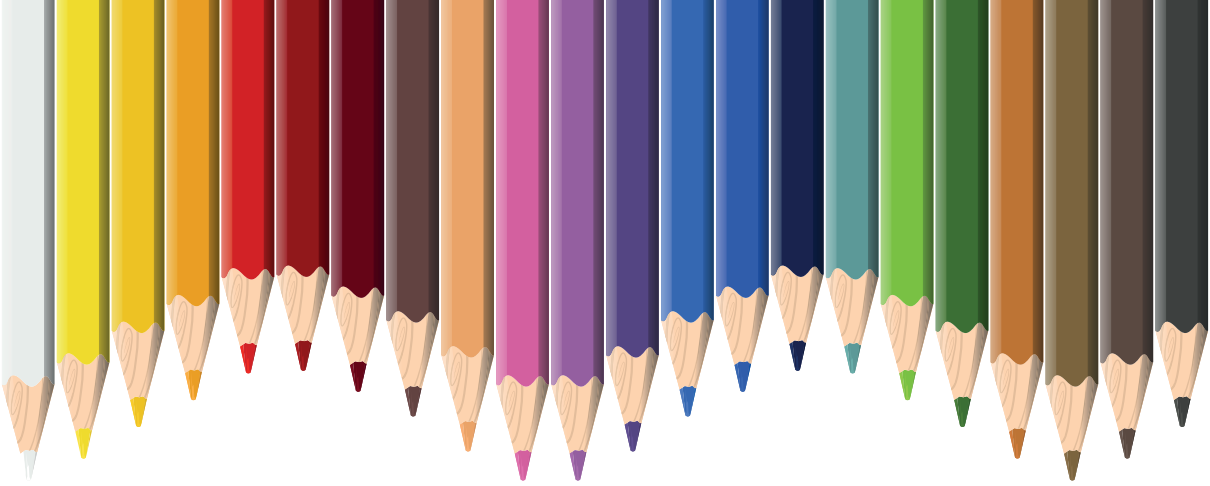
İlhan, U. ve Dinçer, A. (2023). Yapay zeka tarafından kontrol edilen yeni bir termoelektrik CPU soğutma sistemi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *39(1),* 113-124.

Javadikia, P., Dehrouyeh, M. H., Naderloo, L., Rabbani, H. ve Lorestani, A. N. (2011). *Measuring the weight of egg with image processing and ANFIS model.* In Swarm,

Evolutionary, and Memetic Computing: Second International Conference, SEMCCO 2011, Visakhapatnam, Andhra Pradesh, India, 19-21, 407-416.

Mertens, K., De Ketelaere, B., Kamers, B., Bamelis, F. R., Kemps, B. J., Verhoelst, E. M., De Baerdemaeker, J. G. ve Decuypere, E. M. (2005). Dirt detection on brown eggs by means of color computer vision. *Poultry Science*, 84(10), 1653-1659.

Silahtaroğlu, G., 2016. *Veri madenciliği (Kavram ve algoritmaları).* 3. Basım, İstanbul, Türkiye: Papatya Yayıncılık Eğitim; 2016. pp. 118-120.



Bölüm 6

ŞARZ EDİLEBİLİR PİLLERİN BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİNDE DURUM TAHMİNİ İÇİN YİNELEMELİ SİNİR AĞLARININ KULLANIMI

Mehmet KURUCAN[1]
Mete ÖZBALTAN[2]

1 Öğr. Gör. Dr.; Ardahan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. mehmetkurucan@ardahan.edu.tr ORCID No: 0000-0003-4359-3726

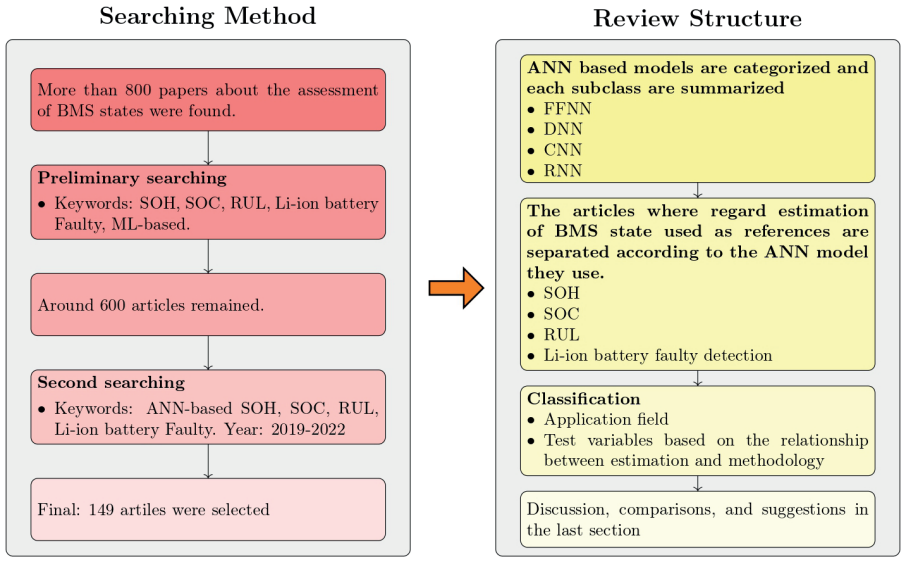
2 Dr. Öğr. Üyesi; Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. mete.ozbaltan@erzurum.edu.tr ORCID No: 0000-0002-3215-6363

GİRİŞ

Artan enerji talebi, geleneksel petrol kaynaklarının azalması ve çevresel sorunlar nedeniyle yenilenebilir enerjiye yönelik bir geçiş yaşanıyor. İlk aşamada hibrit araçlar (HEV'ler) emisyonları azalttı, ancak çevresel sorunları tamamen çözemedi. Daha sonra çevre dostu elektrikli araçlar (EV'ler) geliştirildi, bu araçlar yenilenebilir enerjiyi şarj edilebilir pillerle depoluyor. Lityum iyon piller (LIB'ler) bu teknolojinin temelini oluşturuyor. Pil sistemlerinin karmaşıklığı arttıkça, kompakt, verimli ve güvenli pil sistemlerine ihtiyaç duyuluyor. Pil yönetim sistemi (BMS), pilin güvenliği ve performansı için kritik bir rol oynar, aşırı şarj veya deşarj gibi riskleri azaltarak hasarı önler.

İyi bir BMS, şarj/deşarj döngüleri, voltaj, akım, sıcaklık ve hatalı durumlar gibi verileri izleyerek lityum iyon pilin durumunu tahmin etmek için önemli bilgiler sağlamalıdır. Bu bilgiler, SOC, SOH, RUL ve FOD gibi kritik BMS parametrelerinin tahmininde kullanılır. İlgili teknikler, genellikle model tabanlı ve makine öğrenimi tabanlı yaklaşımlar olmak üzere iki ana kategoride incelenir.

Makine öğrenimi tabanlı yaklaşımlar, BMS için veri kümeleri kullanarak modeller eğitir ve belirli giriş verileri ile çıkış tahminleri yapar. Bu veriler genellikle voltaj, akım, sıcaklık, zaman, şarj/deşarj döngü sayısı ve SOC değerlerini içerir. Model temelli yöntemler ise fiziksel anlayış gerektirir ve daha uzun geliştirme süresi gerektirebilir. Veri odaklı yaklaşımlar, büyük veri setlerinden öğrenir, ancak yüksek kalitede veri elde etmek zaman alabilir. Hangi yöntemin tercih edildiği, kaynaklar, doğruluk gereksinimi ve uygulama bağlamına bağlıdır. Her iki yaklaşımın da geliştirme süreçlerinde özgü zorluklar ve zaman gereksinimleri bulunmaktadır.



Şekil 1: *İncelemenin Şematik Diyagramı*

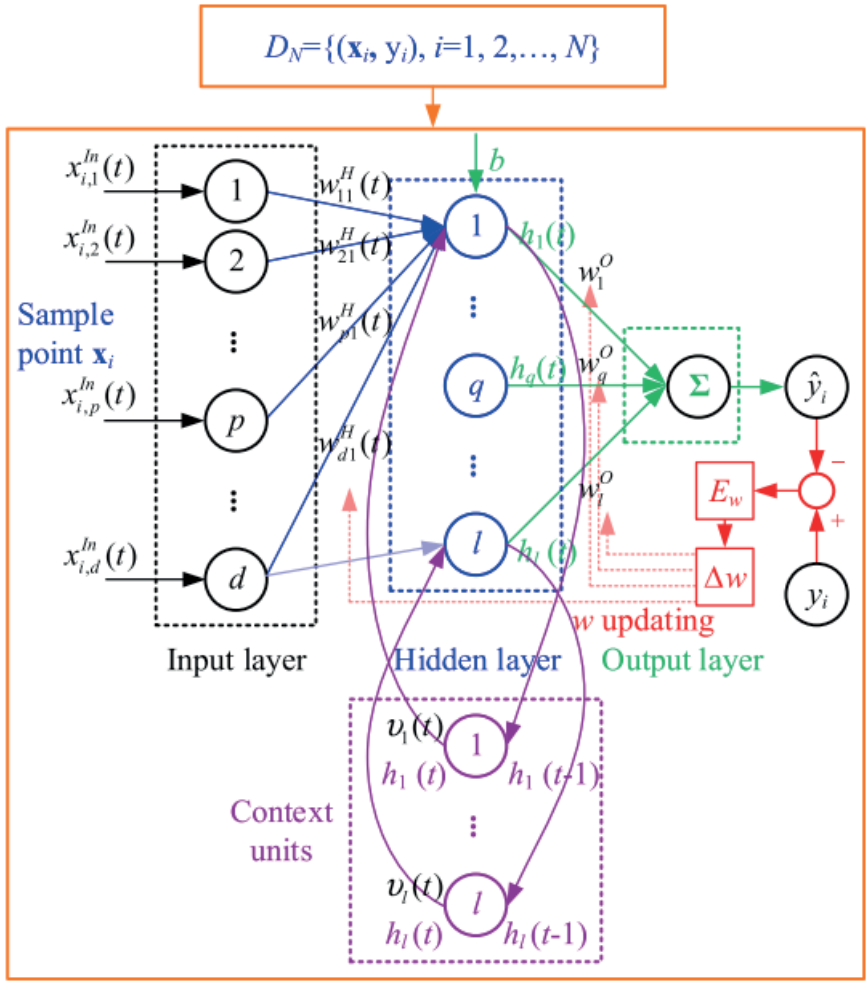
Bu çalışma, son dönemlerde BMS durumlarının tahmini üzerine yaygın olarak kullanılan bir makine öğrenimi algoritması olan RNN hakkında ayrıntılı bir inceleme ve analiz sunar. Ayrıca, Şekil 1'de gözüktüğü gibi bu derlemenin yazılmasında izlenen yöntemlerin özeti sunulmaktadır. Konuyla ilgili araştırma, Web of Science veritabanı ve güncel literatür kullanılarak gerçekleştirildi. Belirli anahtar kelimeler kullanılarak, referans sayısı 800'den 144'e indirildi. Son aşamada ise RNN yöntemini kullanan çalışmalar seçildiğinde yaklaşık olarak 50 tane makalenin derlemesi yapıldı. Ayrıca, kullanılan makalelerin çoğunluğunun yeni yayınlar olduğu, çağdaş yöntemlerin kullanımını yansıttığı söylenebilir.

Çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde ilerlemektedir: Bölüm 2'de, RNN'nin temel yapısı ile önemli temel bileşenleri sunulmaktadır. Bölüm 3'de RNN tabanlı SOH tahminleri, Bölüm 4'de SOC tahminleri, Bölüm 'de 5 RUL tahminleri ve Bölüm 6'da ise bataryalardaki hata tespit durumları için kullanılan RNN tabanlı yöntemlerinin incelenmesini sunar. Bölüm 7'de ise bu derlemede işlenen bütün çalışmaların kapsamlı bir analizini araştırmacılar için sunmaktadır. Son olarak, Bölüm 8'de bu çalışmanın sonuç kısmı ele alınmıştır.

YİNELEMELİ SİNİR AĞLARI

Yinelemeli Sinir Ağları (RNN), Çok Katmanlı İleri Beslemeli Sinir Ağı (FFNN) temel alınarak oluşturulan bir tür sinir ağıdır. Şekil 2'de genel bir RNN modeli gösterilmiştir. RNN'lerin ayırt edici özelliği, önceki gizli kat-

manlardan gelen verileri mevcut gizli katmanda kullanmak üzere depolayan hafızalarıdır (Sherstinsky, 2020). Basit bir ifadeyle, mevcut durumun tahmini, giriş ve önceki durum tarafından yapılır. Bu hafıza inovasyonu sayesinde RNN'ler, ardışık girişleri işleme yeteneğine sahip özel yetenekli, güçlü modeller haline gelirler (Sui vd., 2021). Ancak, ardışık girişleri işleme yeteneklerine rağmen, RNN'ler, uzun süreli zaman serileri için karşılaştıkları uzun vadeli bağımlılık sorunuyla başa çıkmak zorundadır, bu da türevin kaybolmasına neden olabilir. Bu sorunu aşmak için, kontrol edilen depolama kullanan Uzun Kısa Süreli Hafıza Ağı (LSTM) önerilmiştir (Sui vd., 2021). LSTM'den bahsedecek olursak eğer kısaca derin öğrenme alanında kullanılan bir tür tekrarlayan sinir ağı denilebilir. RNN'e göre daha etkili bir varyasyon olmasındaki sebepler ise gerek uzun vadeli bağımlılıkları daha iyi koruması gerekse de eğitim sırasında kaybolan gradyan sorunlarını azaltmasıdır. Yapısından bahsetmek gerekirse de bu ağın katmanları, üç kapı içerir: giriş kapısı, unutma kapısı ve çıkış kapısı. Bu kapılar, hafıza hücresine bilgi eklemenin, hafızadan bilgi silmenin ve hafızadan bilgi okumanın kontrolünü sağlar. Bu sayede LSTM'ler, uzun vadeli bağımlılık sorununu çözer ve ardışık verileri daha etkili bir şekilde işleyebilirler.



Şekil 2: *Yinelemeli Sinir Ağı Modeli*

PİLİN SAĞLIK DURUMU

LIB'lerin SOH (Sağlık Durumu) tahmininde kullanılan RNN yöntemleri hakkında bir dizi çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, (Chen vd., 2019) çalışmasında, ham yaşlanma verileri EMD (Ampirik Mod Ayrıştırma) yaklaşımı kullanılarak iki farklı dizi oluşturulur: anlık mod fonksiyonu, kapasite yeniden üretme sorununu aşmak için otoregresif hareketli ortalama modeli kullanılarak tahmin edilebilme ve birleştirme yaklaşımı, yerel kapasite kaybını yakalamanın yanı sıra doğru SOH tahminine olanak tanır. Benzer şekilde, (Li vd., 2019) çalışmasında, Elman NN, SOH tahmini için kullanılmış ve ayrıca gerçek zamanlı pil SOC düzeltmesi için de kullanılmıştır.

Uzun vadeli zaman serilerini işlerken ortaya çıkan uzun vadeli bağımlılık sorununu ele almak için RNN'leri kullanarak, LSTM gibi alternatif bir yaklaşım olarak ESN (Yankı Durum Ağı) önerilmiştir (Sánchez vd., 2018). ESN'nin güçlü hafızası, dinamik bir rezervuar kullanılmasından ve büyük sayıda seyrek bağlı nöron içermesinden kaynaklanmaktadır ve basit eğitim prosedürü, sadece çıkış ağırlıklarının eğitimini içerir, tıpkı aşırı öğrenme makinesi (ELM) gibi (Sui vd., 2021).

(Liu vd., 2015) çalışmasında, SOH, sabit akım (CC) gerilim eğrisini kullanarak çıkarılan eş deşarj gerilim farkı süresi olarak tanımlanmıştır. Nonlineer pil bozulma desenlerini izlemek için monotonic echo state networks (MONESNs) tekniği kullanılmıştır. Ayrıca, SOH özellik optimizasyonu için LSTM'nin geliştirilmesi, özellik çıkarma ve seçim teknikleri kullanılarak yoğun bir şekilde araştırılmıştır. Modeller, olasılık dağılımına uygun olarak istikrarı ve tahmin doğruluğunu artırmak için bir araya getirilmiştir.

(Wu vd., 2020) çalışmasında, yazarlar LSTM modelinin özelliklerini artırmak için gri ilişkisel analiz (GRA) ve entropi ağırlık tekniklerini kullanmışlardır. LSTM daha sonra geliştirilmiş özellikleri SOH tahminlerine eşlemek için eğitilmiştir. (Zhang vd., 2019) çalışmasında, lityum iyon pillerinin durumunu tahmin etmek için özellik eğrisini düzleştirmek için parçacık filtreleme (PF) kullanılmıştır. (Ungurean vd., 2020) çalışmasında ise Adaptive Moment Tahmini (Adam) yöntemi kullanılmış ve nöral ağın performansını önemli ölçüde artırdığı bulunmuştur. (Won You vd., 2017) çalışmasında k-means kümeleme yaklaşımı kullanılarak V/I (Gerilim/Akım) noktaları 30 alt bölgeye ayrılmıştır, bu bölgeler pil yaşlanmasını temsil edebilir. LSTM daha sonra bu alt bölgelerin yoğunluk dağılımına dayalı olarak SOH tahminini hesaplamak için kullanılmıştır ve kısa bir süre içinde sadece birkaç V/I örneği gerektirmiştir. Önerilen teknik yüksek doğruluk, esneklik, gürültüye dayanıklılık ve %2,46'nın altında ortalama hata oranı sergilemiştir.

(Choi vd., 2019) çalışmasında, pillerin SOH'unu tahmin etmek için V, I ve T profillerine dayanan çok kanallı bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntem, yalnızca gerilim kullanmaya kıyasla tahmin hatasında %25 azalma sağlamıştır. Ayrıca, çoklu hücre bozulma verilerini etkili bir şekilde birleştirmek için LSTM kullanılmış, pil paketinin SOH tahmininin doğruluğunu ve istikrarını artırmıştır. Bu bulgular, farklı seri, paralel ve seri-paralel mimarilere sahip pil paketlerinde de doğrulanmıştır (Wang vd., 2020).

Giriş sinyalinin çeşitliliğini artırmak için bir başka yöntem olan seyrek örnekleme, model performansını artırmak için kullanışlı bir tekniktir (Kaur vd., 2021). Seyrek veri, pil özelliklerini sıkıştırabilir ve optimizasyon teknikleri, bilgiyi feda etmeden daha az veriyle sinyali geri kazanmak için sinyal seyrekliğini kullanabilir. LSTM algoritmasının avantajları, ağı ağ topolojisini optimize ederek çevrimiçi uygulamayı basitleştirerek tam anlamıyla kullanı-

labilir. (Li vd., 2020) çalışmasında, LSTM kapıları arasındaki bağlantı yolu, SOH tahmini için değiştirilmiştir. Geliştirilmiş LSTM, giriş ve unutma kapılarında aynı anda taze ve eski bilgileri belirlemiştir. Geçmiş hücre durumları aynı zamanda giriş ve çıkış kapılarına geri beslenmiştir, böylece kullanışlı bilgiyi korumuş ve istenmeyen hata sinyallerini azaltmıştır. Önerilen yaklaşım NASA veri kümesinde ortalama RMSE'si %2,16 olan bir sonuç elde etmiştir.

(Zhang vd., 2020) çalışmasında, lityum iyon pillerin derin öğrenmeye dayalı yeni bir prognoz (gelecekteki olayları, sonuçları veya durumları tahmin etme sürecidir) yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşım, daha fazla etiketlenmiş örneklerle eğitilebilen LSTM ağına dayalı verimli bir varyasyon kullanır ve sistem verilerine dayalı gerçek zamanlı parametre ayarına olanak tanıyan çevrimiçi bir doğrulama tekniği önerir, böylece sürekli model iyileştirmeye olanak sağlar. Önerilen yaklaşım, çevrimiçi uygulama için tasarlanmış olup, gerçek zamanlı uygulamalar için uygundur.

Başka bir araştırma çalışması olan (Venugopal ve T., 2019), lityum iyon pillerin geçmiş verilerine dayalı yeni bir SOH tahmin tekniği önermektedir. Önerilen yaklaşım, karmaşık non-lineer pil özelliklerini yakalamak ve gradyan sorununu ortadan kaldırmak için bir tür bağımsız rekürren sinir ağı (IndRNN) kullanır ve kapasite azalmaları arasındaki uzun vadeli ilişkileri öğrenmeye olanak tanır. Deneysel sonuçlar, önerilen IndRNN tabanlı modelin bir pilin SOH'unu güvenilir bir şekilde tahmin edebildiğini göstermektedir ve RMSE'si %1,14 ve MAE'si %1,33'dür. Önerilen modelin test sırasındaki maksimum hatası (MAX) %5'lik izin verilen SOH hata aralığının çok daha altında olan %2,5943'tür. Bu önerilen yaklaşım, LIB'ler için güvenilir ve doğru SOH tahmini teknikleri sunar.

PİLİN ŞARJ DURUMU

Lityum-iyon pil SOC (Şarj Durumu) tahmini alanında, çeşitli çalışmalar RNN'leri ve onların uzantılarını kullanmıştır. Örneğin, (Liu vd., 2018) çalışmasında, SOC tahmini doğruluğunu artırmak için RNN'i iç direnç ölçme yöntemi ile birleştirmiştir. Diğer çalışmalar, örneğin (Yang vd., 2019, Li vd., 2019, Chen vd., 2021, Duan vd., 2020, Hannan vd., 2020, Zhang vd., 2021, Xiao vd., 2019), SOC tahminini ölçülen akım, gerilim ve sıcaklık sinyallerini kullanarak tahmin etmek için RNN'i ve GRU'ları (Gate'li Rekürren Üniteler) uzantıları ile genişletmiş ve pilin iç parametrelerinin bilgisine ihtiyaç duymadan önceki SOC bilgisini kullanarak geleneksel ağları aşmıştır. (Li vd., 2021) çalışmasında ise iki RNN kullanılmış ve SOC tahmin etmek için şarj ve deşarj süreleri giriş olarak dahil edilmiştir. (Wassiliadis vd., 2019) çalışmasında, eşdeğer devre modellerine dayalı RNN ile LSTM hücrelerini karşılaştıran bir karşılaştırmalı çalışma sunulmuştur. Lityum-iyon piller için bir SOC göstergesi geliştirmek amacıyla RNN ve parçacık filtrelemeye dayalı hataları düzeltme kombinasyonu, (Zhang vd., 2019) çalışmasında önerilmiştir.

Birçok çalışma, Li-İyon piller dahil olmak üzere çeşitli pil tiplerinin SOC tahmini için RNN'leri ve uzantılarını araştırmıştır (Li vd., 2019, Bockrath vd., 2019, Javid vd., 2021, Geng vd., 2020, Lai ve Kuo, 2021, Wang vd., 2020, Yang vd., 2019, Ma vd., 2021, Liu vd., 2021). EV'ler, İHA'lar vb. gibi uygulamalarda kullanılan pillerin SOC tahmini için NARX (Nonlinear AutoRegressive with eXogenous inputs) ağının performansı ve geliştirilmiş bir RNN, (Abbas vd., 2019, Wei vd., 2020, Chemali vd., 2017) çalışmasında değerlendirilmiştir. Ayrıca, iyi bilinen bir RNN alt sınıfı olan NARX ağı, (Lipu vd., 2018, Chen vd., 2017, Moura vd., 2019, Lipu vd., 2018, Chmielewski vd., 2019) çalışmalarında incelenmiştir. Uzun vadeli bağımlılıkları çözmek için gizli katmanları ayrı modüllere bölen yeni bir RNN yapısı olan Clockwork-RNN, (Feng vd., 2021) çalışmasında geliştirilmiştir.

Lityum-İyon piller için SOC ve kapasite'nin birlikte tahmini, (Wang vd., 2021) çalışmasında RNN ve destek vektör makinesi (SVM) kullanılarak önerilmiş ve RNN'nin uzun vadeli bağımlılık kaybı sorununu çözmek için hareketli pencere yöntemi uygulanmıştır. Bununla birlikte, zaman gecikmeli RNN'nin lityum-iyon pil modelleme ve SOC tahmini için kullanıldığında beklenmedik aşırı öğrenme veya düşük performanslar da bildirilmiştir (Xi vd., 2022). Son olarak, kurşun-asit pil modelleme ve simülasyon sorunu için bir SOC gözlemci sağlamak ve model parametre tahmini ve ayarlaması yapmak için RNN, (Capizzi vd., 2011) çalışmasında kullanılmıştır.

PİLİN KALAN KULLANIM ÖMRÜ

Son dönem çalışmalarda, lityum-iyon piller ve hava aracı bileşenlerinin RUL tahmini için RNN tabanlı birkaç yaklaşım önerilmiştir. Örneğin, (Xi vd., 2022) çalışmasında, lityum-iyon pillerin RUL değerlendirmesi için klasik RNN-LSTM ve hibrit CNN-LSTM yöntemlerinin performansı karşılaştırılmıştır. Hibrit yöntem, özellikle veri işleme süresi açısından üstün sonuçlar göstermiş ve bu nedenle elektrikli araç uygulamaları için uygun hale gelmiştir. Bir başka çalışma olan (Lu ve Andrian, 2018), RUL tahmini için RNN modellerinden özdeğerler çıkarmak için kategori teorisini kullanmıştır. Ayrıca, (Cheng vd., 2021), RUL tahmin modellerini yüksek doğrulukla geliştirmek için RNN-LSTM yöntemlerini deneysel mod ayrıştırma (EMD) ile birleştirmiştir. Hava aracı bakım alanında, (Thakkar ve Chaoui, 2022), tam ömür döngü verilerine dayalı olarak RUL tahmini için derin katmanlı RNN modelleri kullanmıştır, diğer yandan (Catelani vd., 2021), RNN yöntemini bir durum uzayı tahmini tekniği ile birleştirerek lityum-iyon piller için RUL tahmininin doğruluğunu ve hassasiyetini artırmıştır. Ayrıca, RNN yöntemi, (Catelani vd., 2021) ve (Lan vd., 2018) gibi çalışmalarda hava aracı bileşenlerinin RUL tahmininde kullanılmış ve sağlık izleme için aero-motor RUL tahmini için umut vadeden yöntemler sunmuştur.

HATA TESPİTİ

Batarya teşhisi ve tahmini için model tabanlı teknikler geniş ölçüde kullanılmış olsa da, ANNs gibi makine öğrenimi yaklaşımlarını kullanan çalışmalar nispeten nadirdir. (Samanta vd., 2021) ve (Ardeshiri vd., 2020) her ikisi de, batarya hatalarını tahmin etmek ve kaçış riskini azaltmak için bir LSTM-RNN kullanarak derin öğrenme (DL) tabanlı bir hata tahmini yöntemi sunan önceki bir çalışmaya atıfta bulunmaktadır (Hong vd., 2019). Önerilen yaklaşımın batarya voltajını tahmin etmede yüksek bir doğruluk sergilediği bulunmuştur. Ayrıca, çeşitli hiperparametrelerin karşılaştırılması, yöntemin hem sağlam hem de doğru olduğunu göstermektedir.

TARTIŞMALAR VE BULGULAR

Bu bölümde, LIB durum tahminlerini yapmak için RNN yöntemini kullanan bir çalışmanın gelişmiş bir analizini sunmaktayız. Bu analizi altı bölümde sınıflandırdık. Bunlar sırasıyla şunlardır: kullanılan batarya kimyasalı, modelin eğitim ve test aşamalarında kullanılan veri setleri, kullanılan ölçülebilir sinyaller, bataryanın şarj-deşarj döngü sayısı, test sırasında kullanılan yöntem ve hata hesaplamada kullanılan metrik.

Tablo 1'e bakıldığında, tüm pil durum tahminlerinde kullanılan pilin kimyasalının büyük çoğunlukla NMC (Nikel-Mangan-Kobalt) olduğu görülmektedir. Bunun nedenlerinden birisi enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılması ve bir diğer nedeni ise enerji depolamak için yüksek kapasite sunmaları.

Derlemede kullanılan çalışmaların, özellikle RUL ve SOH tahminlerinde, büyük çoğunluğunun NASA açık kaynak veri setlerini kullandığını görmekteyiz. SOH tahmini için laboratuvar ortamında elde edilen veri setlerini kullanan çalışmalar da mevcuttur.

Ölçümler sırasında kullanılan sinyallere bakıldığında çoğunlukla V, I ve T görünse de çok küçük de olsa bazı çalışmalar SOC değerlerini de sinyal olarak kullanmışlardır.

Kullanılan pillerin şarj-deşarj döngüsü, her tahmin durumu için farklılık göstermektedir. Bunların genel optimal değerleri minimum ve maksimum olarak Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1: *BMS durumlarının tahmini için RNN tabanlı yöntemlerin analizinin karşılaştırılması*

Estimation	Density of Using the Battery	Density of Using the Database	Measurement Signal	Cycles $[min - max]$	Test Method	Error Metric & Min-Error
SOH	• %86 NMC • %11 LFP • %3 LCO	• %50 NASA • %30 CCCV • %10 CALCE • %10 Lab exp.	• %33 V,I,T • %24 V,t • %18 V,I,T,t • %16 V,I • %6 I • %3 SOC determination	[200-6000]	• %85 validation • %15 cross-validation	• RMSE=%0.72 • MAE=%0.87 • MaxE=% 1.76 • MAPE=%1.03 • RE=%4.08
SOC	• %79 NMC • %21 LFP	• %32 CALCE • %23 US06 • %23 DST • %22 UDDS	• %55 V,I,T • %28 V,I • %17 V,t	[100-700]	• %100 validation	• EE=% <0.1 • RMSE=%0.03 • MAE=%0.64 • MAPE=%1.24 • MaxE=%12 • MSE=%0.012
RUL	• %78 NMC • %22 LFP	• %79 NASA • %11 CALCE • %10 UDDS • %10 NYCC	• %50 V,I • %17 V,I,T • %17 V,t • %16 V	[50-800]	• %60 validation • %40 cross-validation	• EE=%1 • RMSE=%0.175
FOD	• NMC	• SMC	• V, SOC	a year	• cross-validation	• MRE=%0.56 • RMSE=%0.032

Çalışmalarda kullanılan metotların test aşamasında çoğunlukla doğrulama yöntemi kullanılmıştır. SOC tahmini haricinde diğer tahminlerde belli oranlarda çapraz doğrulama kullanan çalışmalar mevcuttur.

Hata belirleme tekniklerine baktığımızda ise çok farklı hata metrikleri kullanılmıştır. Tablo 1'e bakıldığında her tahmin için kullanılan hata metriklerini ve bunlardan elde edilen minimum hata değerlerini görebilmekteyiz.

SONUÇ

Bu çalışma, batarya yönetim sistemlerinde Tekrarlayan Sinir Ağlarının (RNN) uygulamalarına derinlemesine bir bakış sunmaktadır. Çalışma, batarya yönetim sistemlerindeki dört temel tahmin durumunu, yani SOH (Sağlık Durumu), SOC (Şarj Durumu), RUL (Kalan Kullanışlı Ömür) ve FOD (Hata Tespiti) kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Bu çalışma, araştırmacılar için önemli bir kaynak olup temel bilgilere hızlı erişim için ayrıntılı bir referans sunmaktadır.

Çalışmamızın metodolojik yaklaşımı, birçok araştırma ve derleme makalesinin titiz bir analizini akış şemasında gösterildiği gibi içermekte olup bu analiz sonuçları ayrıntılı bir tablo halinde sistematik bir şekilde sunulmaktadır. Bu tablo, veritabanları, ölçüm sinyalleri, hata metrikleri ve algoritmaların tahmin doğruluğu gibi ek bilgileri içermekte ve kullanıcılar için kullanışlı bir referans noktası sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, RNN tabanlı batarya yönetim sistemleri araştırmalarında umut vaat eden fırsatları vurgulayarak bu alanda daha fazla keşfe yol açmaktadır. Bu nedenle, özellikle lityum-iyon pillerin yaygın olarak kullanıldığı endüstrilerde daha güvenli ve etkili enerji depolama çözümlerinin geliştirilmesine katkıda bulunma potansiyeline sahiptir.

KAYNAKÇA

Abbas, G., Nawaz, M., and Kamran, F. (2019). Performance comparison of narx & rnn-lstm neural networks for lifepo4 battery state of charge estimation. In 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), pages 463–468. IEEE.

Ardeshiri, R. R., Balagopal, B., Alsabbagh, A., Ma, C., and Chow, M.-Y. (2020). Machine learning approaches in battery management systems: State of the art: Remaining useful life and fault detection. In 2020 2nd IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES), volume 1, pages 61– 66.

Bockrath, S., Rosskopf, A., Koffel, S., Waldhör, S., Srivastava, K., and Lorentz, V. R. (2019). State of charge estimation using recurrent neural networks with long short-term memory for lithium-ion batteries. In IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, volume 1, pages 2507–2511. IEEE.

Capizzi, G., Bonanno, F., and Tina, G. M. (2011). Recurrent neural network-based modeling and simulation of lead-acid batteries charge–discharge. IEEE Transactions on Energy Conversion, 26(2):435–443.

Catelani, M., Ciani, L., Fantacci, R., Patrizi, G., and Picano, B. (2021). Remaining useful life estimation for prognostics of lithium-ion batteries based on recurrent neural network. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 70:1–11.

Chemali, E., Kollmeyer, P. J., Preindl, M., Ahmed, R., and Emadi, A. (2017). Long short-term memory networks for accurate state-of-charge estimation of li-ion batteries. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65(8):6730–6739.

Chen, J., Feng, X., Jiang, L., and Zhu, Q. (2021). State of charge estimation of lithium-ion battery using denoising autoencoder and gated recurrent unit recurrent neural network. Energy, 227:120451.

Chen, L., Wang, Z., Lü, Z., Li, J., Ji, B., Wei, H., and Pan, H. (2017). A novel state-of-charge estimation method of lithium-ion batteries combining the grey model and genetic algorithms. IEEE Transactions on Power Electronics, 33(10):8797–8807.

Chen, Z., Xue, Q., Xiao, R., Liu, Y., and Shen, J. (2019). State of health estimation for lithium-ion batteries based on fusion of autoregressive moving average model and elman neural network. IEEE Access, 7:102662–102678.

Cheng, G., Wang, X., and He, Y. (2021). Remaining useful life and state of health prediction for lithium batteries based on empirical mode decomposition and a long and short memory neural network. Energy, 232:121022.

Chmielewski, A., Możaryn, J., Piórkowski, P., and Bogdziński, K. (2019). Battery voltage estimation using narx recurrent neural network model. In Conference on

Automation, pages 218–231. Springer.

Choi, Y., Ryu, S., Park, K., and Kim, H. (2019). Machine learning-based lithium-ion battery capacity estimation exploiting multi-channel charging profiles. IEEE Access, 7:75143–75152.

Duan, W., Song, C., Peng, S., Xiao, F., Shao, Y., and Song, S. (2020). An improved gated recurrent unit network model for state-of-charge estimation of lithium-ion battery. Energies, 13(23):6366.

Feng, X., Chen, J., Zhang, Z., Miao, S., and Zhu, Q. (2021). State-of-charge estimation of lithium-ion battery based on clockwork recurrent neural network. Energy, 236:121360.

Geng, P., Xu, X., and Tarasiuk, T. (2020). State of charge estimation method for lithium-ion batteries in all-electric ships based on lstm neural network. Polish Maritime Research, pages 100–108.

Hannan, M., How, D. N., Mansor, M., Lipu, M. H., Ker, P. J., and Muttaqi, K. M. (2020). State-of-charge estimation of li-ion battery at variable ambient temperature with gated recurrent unit network. In 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pages 1–8. IEEE.

Hong, J., Wang, Z., and Yao, Y. (2019). Fault prognosis of battery system based on accurate voltage abnormity prognosis using long short-term memory neural networks. Applied Energy, 251:113381.

Javid, G., Ould Abdeslam, D., and Basset, M. (2021). Adaptive online state of charge estimation of evs lithium-ion batteries with deep recurrent neural networks. Energies, 14(3):758.

Kaur, K., Garg, A., Cui, X., Singh, S., and Panigrahi, B. K. (2021). Deep learning networks for capacity estimation for monitoring soh of li-ion batteries for electric vehicles. International Journal of Energy Research, 45(2):3113–3128.

Lai, C.-M. and Kuo, T.-J. (2021). Available capacity computation model based on long short-term memory recurrent neural network for gelled-electrolyte batteries in golf carts. IEEE Access, 10:54433–54444.

Lan, G., Li, Q., and Cheng, N. (2018). Remaining useful life estimation of turbofan engine using lstm neural networks. In 2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), pages 1–5. IEEE.

Li, C., Xiao, F., and Fan, Y. (2019a). An approach to state of charge estimation of lithium-ion batteries based on recurrent neural networks with gated recurrent unit. Energies, 12(9):1592.

Li, C., Xiao, F., Fan, Y., Yang, G., and Zhang, W. (2019b). A recurrent neural network with long short-term memory for state of charge estimation of lithium-ion batteries. In 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), pages 1712–1716. IEEE.

Li, P., Zhang, Z., Xiong, Q., Ding, B., Hou, J., Luo, D., Rong, Y., and Li, S. (2020). State-of-health estimation and remaining useful life prediction for the lithium-ion

battery based on a variant long short term memory neural network. Journal of Power Sources, 459:228069.

Li, S., Ju, C., Li, J., Fang, R., Tao, Z., Li, B., and Zhang, T. (2021). State-of-charge estimation of lithium-ion batteries in the battery degradation process based on recurrent neural network. Energies, 14(2):306.

Li, X., Wang, Z., and Zhang, L. (2019c). Co-estimation of capacity and state-of-charge for lithium-ion batteries in electric vehicles. Energy, 174:33–44.

Lipu, M. H., Hussain, A., Saad, M., Ayob, A., and Hannan, M. (2018a). Improved recurrent narx neural network model for state of charge estimation of lithium-ion battery using pso algorithm. In 2018 IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE), pages 354–359. IEEE.

Lipu, M. S. H., Hannan, M. A., Hussain, A., Saad, M. H., Ayob, A., and Blaabjerg, F. (2018b). State of charge estimation for lithium-ion battery using recurrent narx neural network model based lighting search algorithm. IEEE access, 6:28150–28161.

Liu, D., Xie, W., Liao, H., and Peng, Y. (2015). An integrated probabilistic approach to lithium-ion battery remaining useful life estimation. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 64:660–670.

Liu, V.-T., Sun, Y.-K., Lu, H.-Y., and Wang, S.-K. (2018). State of charge estimation for lithium-ion battery using recurrent neural network. In 2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing (ICAM), pages 376–379. IEEE.

Liu, Y., Shu, X., Yu, H., Shen, J., Zhang, Y., Liu, Y., and Chen, Z. (2021). State of charge prediction framework for lithium-ion batteries incorporating long short-term memory network and transfer learning. Journal of Energy Storage, 37:102494.

Lu, J. and Andrian, J. (2018). Using pixel array method to optimize battery remaining useful life model. In 2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), pages 1–4. IEEE.

Ma, L., Hu, C., and Cheng, F. (2021). State of charge and state of energy estimation for lithium-ion batteries based on a long short-term memory neural network. Journal of Energy Storage, 37:102440.

Moura, J. J., Albuquerque, K. R., Medeiros, R. P., Villanueva, J. M., Tavares, E. C., and Catunda, S. Y. (2019). State of charge estimation for li-ion batteries based on recurrent narx neural network with temperature effect. In 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), pages 1–6. IEEE.

Samanta, A., Chowdhuri, S., and Williamson, S. S. (2021). Machine learning-based data-driven fault detection/diagnosis of lithium-ion battery: A critical review. Electronics, 10(11).

Sherstinsky, A. (2020). Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network. Physica D: Nonlinear Phenomena, 404:132306.

Sui, X., He, S., Vilsen, S. B., Meng, J., Teodorescu, R., and Stroe, D.-I. (2021). A review of non-probabilistic machine learning-based state of health estimation techniques for lithium-ion battery. Applied Energy, 300:117346.

Sánchez, L., Anseán, D., Otero, J., and Couso, I. (2018). Assessing the health of lifepo4 traction batteries through monotonic echo state networks. Sensors, 18(1).

Thakkar, U. and Chaoui, H. (2022). Remaining useful life prediction of an aircraft turbofan engine using deep layer recurrent neural networks. In Actuators, volume 11, page 67. MDPI.

Ungurean, L., Micea, M. V., and Cârstoiu, G. (2020). Online state of health prediction method for lithium-ion batteries, based on gated recurrent unit neural networks. International Journal of Energy Research, 44(8):6767–6777.

Venugopal, P. and T., V. (2019). State-of-health estimation of li-ion batteries in electric vehicle using indrnn under variable load condition. Energies, 12(22).

Wang, Q., Ye, M., Wei, M., Lian, G., and Wu, C. (2021). Co-estimation of state of charge and capacity for lithium-ion battery based on recurrent neural network and support vector machine. Energy Reports, 7:7323–7332.

Wang, X., Fan, W., Li, S., Li, X., and Wang, L. (2020a). Soh estimation of lithium-ion battery pack based on integrated state information from cells. Applied Sciences, 10(19).

Wang, Z., Fotouhi, A., and Auger, D. J. (2020b). State of charge estimation in lithium-sulfur cells using lstm recurrent neural networks. In 2020 European Control Conference (ECC), pages 1079–1085. IEEE.

Wassiliadis, N., Herrmann, T., Wildfeuer, L., Reiter, C., and Lienkamp, M. (2019). Comparative study of state-of-charge estimation with recurrent neural networks. In 2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), pages 1–6. IEEE.

Wei, M., Ye, M., Li, J. B., Wang, Q., and Xu, X. (2020). State of charge estimation of lithium-ion batteries using lstm and narx neural networks. Ieee Access, 8:189236–189245.

Won You, G., Park, S., and Oh, D. (2017). Diagnosis of electric vehicle batteries using recurrent neural networks. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64:4885–4893.

Wu, Y., Xue, Q., Shen, J., Lei, Z., Chen, Z., and Liu, Y. (2020). State of health estimation for lithium-ion batteries based on healthy features and long short-term memory. IEEE Access, 8:28533–28547.

Xi, Z., Wang, R., Fu, Y., and Mi, C. (2022). Accurate and reliable state of charge estimation of lithium ion batteries using time-delayed recurrent neural networks through the identification of overexcited neurons. Applied Energy, 305:117962.

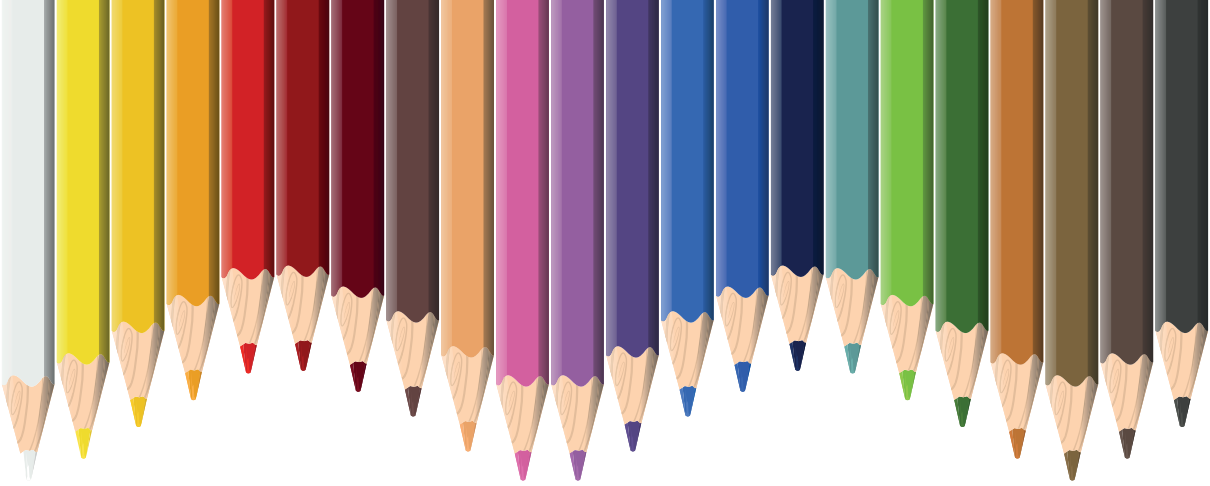
Xiao, B., Liu, Y., and Xiao, B. (2019). Accurate state-of-charge estimation approach for lithium-ion batteries by gated recurrent unit with ensemble optimizer. Ieee Access, 7:54192–54202.

Yang, F., Li, W., Li, C., and Miao, Q. (2019). State-of-charge estimation of lithium-ion batteries based on gated recurrent neural network. Energy, 175:66–75.

Zhang, C., Zhu, Y., Dong, G., and Wei, J. (2019). Data-driven lithium-ion battery states estimation using neural networks and particle filtering. International Journal of Energy Research, 43(14):8230–8241.

Zhang, W., Li, X., and Li, X. (2020). Deep learning-based prognostic approach for lithium-ion batteries with adaptive time-series prediction and on-line validation. Measurements, 164:108052.

Zhang, Z., Dong, Z., Lin, H., He, Z., Wang, M., He, Y., Gao, X., and Gao, M. (2021). An improved bidirectional gated recurrent unit method for accurate state-of-charge estimation. IEEE Access, 9:11252–11263.



Bölüm 7

KURAL TABANLI BULANIK MANTIK DESTEKLİ RİSK DEĞERLENDİRME VE SINIFLANDIRMA UYGULAMASI

Aslı ACERCE[1]

Tülay KORKUSUZ POLAT[2]

1 Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
asli.acerce1@ogr.sakarya.edu.tr
2 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, korkusuz@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ

Risk, kötü bir olayın oluşma olasılığı ve hedeflenen sonuçlara ulaşılmasına engel olan unsurlar olarak tanımlanabilir (Yerekapan ve Eskin, 2020). Risk değerlendirme ise meydana gelebilecek riskin büyüklüğünü tahmin etme ve belirlenen büyüklüğe göre riskin kabul edilebilir olup olmadığına karar verme sürecidir (Yılmaz ve Şenol, 2017). Risk değerlendirmesi son zamanlarda firmaların dikkatini çeken bir konu haline gelmiştir. Daha önceki dönemlerde risk yönetimi denildiğinde akla ilk gelen risk alanı iş sağlığı ve güvenliğiydi. Ancak son zamanlarda bu algı az da olsa değişmiş ve firmalar iş sağlığı ve güvendiği dışındaki üretim fonksiyonlarındaki risklere de önem vermeye başlamışlardır. İşletmeler hangi sektörde faaliyet gösterirlerse göstersinler üretim süreçlerinde risklere maruz kalabilmektedirler. Bu nedenle riskleri önceden öngörülebilmesini ve yok etmek veya azaltmak için gerekli önlemlerin önceden alınabilmesini kapsayan risk değerlendirme süreçleri, gelecek planlamasını daha net yapabilmek isteyen işletmeler için oldukça önemli süreçlerdir.

Risk değerlendirmede kullanılan farklı teknikler bulunmaktadır. Karar Matrisi Risk Analizi Yöntemi, HAZOP (Hazard and Operability), Hata Ağacı Analizi, Olay Ağacı Analizi, Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA) gibi. Bu tekniklerin uygulanabilirliklerini ve etkinliklerini arttırarak riskleri daha etkin yönetebilmek için genellikle bulanık mantık yaklaşımı, sosyal ağ analizi, yorumlayıcı yapısal modelleme (interpretive structural modeling), monte carlo simülasyonu ve çok kriterli karar verme teknikleri ile birlikte kullanılmaktadırlar.

Bu çalışmada süt ve süt ürünleri sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin süreçleri ile ilgili olarak belirlenen risklerin değerlendirilmesinde ve risk sınıflarına ayrılmasında Kural Tabanlı Bulanık Mantık yaklaşımı kullanılacaktır. Bulanık Modelin kurulmasında MATLAB programından faydalanılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatür içerisinde risk yönetimi ve risk değerlendirme konusunda birçok çalışma mevcuttur. Deveci vd. (2023) çalışmalarında sürdürülebilir madenciliği etkileyen riskleri değerlendirmişlerdir. Tomak ve KorkusuzPolat (2022) çalışmalarında AR-Ge süreçleri için başarı faktörleri temelli risk önceliklendirme yapmışlar ve risk önceliklendirme modelini çok kriterli karar verme teknikleri ile geliştirmişlerdir. Sultani ve Aliabadi (2023) çalışmalarında yangınla mücadele süreçlerindeki riskleri değerlendirmek için bulanık ortamda SWARA ve ARAS yöntemlerini entegre ettikleri bir model oluşturmuşlardır. Arat ve Akleylek (2023) çalışmalarında IoT tabanlı sistemler için risk değerlendirme yapmışlardır. Liu vd. (2023) çalışmalarında açık deniz platformu ekipmanı ve operasyonlarına yönelik bir risk değerlendirme uygu-

laması yapmışlardır.

Bulanık mantık yaklaşımı belirsizlik problemlerinin çözümünde kullanılan yaklaşımlardan birisidir. Literatürde uygulamalarına rastlamak mümkündür. Arslankaya (2023) çalışmasında işgücü kayıplarını tahmin etmek için bulanık mantık yaklaşımını kullanmıştır. TanakCoşkun ve YılmazYalçıner (2021) çalışmalarında doğrusal performans fiyatlandırması yapmak için bulanık mantık yaklaşımı kullanmışlardır. Yaşar ve KorkusuzPolat (2022) çalışmalarında Pazarlama 4.0 için bulanık mantık yaklaşımı için bir model geliştirmişlerdir. Aktepe vd. (2018) çalışmalarında klasik ABC sınıflandırma yöntemini uzman sistemler, kümeleme ve bulanık mantık yöntemleriyle bütünleştirmişlerdir.

Risk değerlendirme çalışmalarındaki belirsizlikleri azaltabilmek için son zamanlarda literatürde riske değerlendirme çalışmalarının Bulanık Mantık yaklaşımı ile entegre edildiği uygulamalara rastlamak mümkündür. Singer ve ÖverÖzçelik (2022) çalışmalarında metalik biyomalzemelerde risk değerlendirme için risk değerlendirme tekniklerinden HTEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi) yöntemini bulanık olarak uygulamış ve Bulanık AHP ve Bulanık EDAS (Evaluation Based On Distance From Average Solution) yöntemleri ile entegre etmiştir. KorkusuzPolat (2019), bir tekstil fabrikasındaki riskleri Bulanık Mantık yaklaşımını kullanarak önceliklendirmiştir. Haggag ve Barakat (2008) çalışmalarında, risk değerlendirme sürecinde görülebilen belirsizlikleri giderebilmek ve süreci iyileştirebilmek için Matris Risk değerlendirme yöntemi ile Bulanık Mantık yaklaşımını entegre şekilde kullanmışlardır. Mure ve Demichela (2009) çalışmalarında iş kazası risklerini değerlendirebilmek için Bulanık Mantık yaklaşımına dayalı Bulanık Uygulama Prosedürü oluşturmuşlardır. Apaydın vd. (2009) yaptıkları çalışmada, hayat sigortaları için belirlenen risk faktörlerine göre kişileri sınıflandırmak için bulanık çıkarım sistemi kullanmışlardır. Dalkılıç vd. (2014) çalışmalarında sigorta kararı verilirken riskleri bulanık mantık ile değerlendirmişlerdir. Özfırat (2014) çalışmasında HTEA risk değerlendirme tekniği ile Bulanık Mantık Yaklaşımını entegre şekilde kullanarak riskleri değerlendirmiştir. Zile (2015) çalışmasında iş sağlığı ve güvenliği risklerini değerlendirmek için Bulanık Mantık temelli bir risk değerlendirme modeli oluşturmuş ve model için bir yazılım geliştirmiştir.

3. VERİ SETİ VE METOT

Veri Seti

Çalışmada süt ve süt ürünleri sektöründe faaliyet gösteren ve altı farklı bölgede üretim tesisi olan bir işletme ile ilgili risk analizi yapılmıştır. Veri seti her bir riske ait oluşma olasılığı, oluştuktan sonraki etkisi (şiddeti) ve işletmenin riske verdiği önemi gösteren önem derecesi değerlerini içermektedir.

Yapılmış olan risk değerlendirmesinde belirlenmiş olan riskler şu şekildedir;

- ***Risk 1:*** Yabancı ortağın birleşmeyi sonlandırması ile birlikte işletmenin satış faaliyetlerinin etkilenmesi ve bunun sonucunda firmanın iflasa kadar gidebilecek finansal zarara uğraması.
- ***Risk 2:*** Yapılan kalite kontrol faaliyetlerinde ürün kalite test değerlerinin yanlış kaydedilmesi ile birlikte kalitesiz ürünlerin müşteriye ulaştırılması.
- ***Risk 3:*** Üretim sürecinde bulunan bir faaliyet ile ilgili bilgiye sahip çalışanın işe gelememesi ve yalnızca o çalışanın bilgisi olduğundan dolayı üretimin durması.
- ***Risk 4:*** Hazırlanmış olan ürün reçetesinin usta başı tarafından yanlış okunması ve bunun sonucunda yapılan karışımın yanlış olması nedeniyle kalitesinin etkilenmesi.
- ***Risk 5:*** Pazara sunulmuş olan yeni bir ürünün üretimi için fizibilite çalışmalarının bitirilmesi tam anlamıyla beklemeden üretilme kararının hızlı alınması ve müşteriye sunulduktan sonra beklenilen talep olmamasından dolayı finansal zarara uğraması.
- ***Risk 6:*** Ürünlerin ambalajlanma aşamasında gözle görülür hataların meydana gelmesi ve yeniden ambalajlama aşamasının yapılması nedeniyle ek mesai yapılmak zorunda kalınması ve işgücü konusunda ek maliyetlerin meydana gelmesi.
- ***Risk 7:*** Üretim tesisleri arasında iletişim konusunda meydana gelen aksaklıklardan dolayı iş süreçlerinde gecikmeler yaşanması.
- ***Risk 8:*** Çalışanların sağlığın etkileyebilecek bulaşıcı hastalıkların ortaya çıkması ve bu nedenle çalışanların işe gelme ve izin planlamalarında aksamaların olması.
- ***Risk 9:*** Çalışan performanslarını değerlendirme aşamasında, değerlendirme yapan kişinin objektif değerlendirme yapmamasından dolayı çalışanların bulunacağı pozisyonlar ile ilgili yanlış kararlar alınması. Bunun sonucunda çalışan verimliliğinin azalması.
- ***Risk 10:*** Ürünlerin saklandığı soğuk depolarda büyük bir arıza oluşması ve oluşan arızanın uzun süre giderilememesi sonucunda ürün kayıplarının meydana gelmemesi için yeni depolama alanlarının bulunamaması.

3.1. Risk Değerlendirme

Karar Matrisi Risk Değerlendirme veya daha fazla bilinen adı ile Risk Matrisi yönteminde, iki boyutlu matris grafiği oluşturulur. Genelde satırlarda

olasılık bileşeni için değerler, sütunlarda ise etki bileşeni için değerler gösterilmektedir (Wang ve Wang, 2020; Wu vd., 2018). Karar Matris içerisindeki risk seviyeleri genellikle üç renk kullanılarak gösterilir: kırmızı (kabul edilemez ve acil çözülmesi gereken risk seviyesi), sarı (kabul edilemez ama çözülmesi için biraz süre verilebilir risk) ve yeşil (genel olarak kabul edilebilir risk) (Duan vd., 2016).

Risk Matrisinde riskin büyüklüğünü ölçmek için kullanılan iki temel bileşen olan oluşma olasılığı ve oluştuktan sonraki etki (şiddet), risk önceliklendirme yapılacağı durumlarda bazen objektif sonuçlar veremeyebilir. İki bileşen risk önceliklendirme için yeterli olamayabilir. Bu nedenle bu çalışmada risk değerlendirmeye üçüncü bileşen olarak "riskin önem derecesi" de eklenerek değerlendirme ve sonrasında sınıflandırma yapılacaktır. Bulanık mantık yönteminde kurallar oluşturulurken üç bileşeni hesaba katarak kurallar oluşturulacaktır.

3.2. Bulanık Mantık

Bulanık Küme kavramı Zadeh tarafından ortaya atılmıştır (Zadeh, 1965). Klasik sistem kuramının matematiksel yöntemlerinin gerçek dünyadaki pek çok sistemde yetersiz kalmasından ortaya çıkmıştır (Kıyak ve Kahvecioğlu, 2003). Bulanık mantık, belirsizlik ve kesin olmayan gerçek problemlerin tanımlanması ve çözülmesi için kullanışlı bir tekniktir (Aydın ve Eren, 2018).

Kural tabanlı Bulanık Mantık Yaklaşımının temel aşamaları şu şekilde sıralanabilir (Ross, 2017; Belohlavek vd., 2017; Bhargava, 2013; Harb vd., 2019; Yüksel ve Börklü, 2021):

1. Giriş Aşaması: Kurulan model için ve verilerle ilgili girdi ve çıktı değişkenleri belirlenir.

2. Bulanıklaştırma aşaması: Giriş aşamasında elde edilen verilerin; dilsel şekilde ifade edilerek Bulanık Mantık için anlamlı bilgiler haline dönüştürmeye bulanıklaştırma denir. Yani elde edilen verilerin belirlenmiş olan üyelik fonksiyonu sayesinde bulanıklaştırarak sözel ifadelere çevrilmesi aşamasıdır.

3. Kural aşaması: Bulanıklaştırma aşamasından çıkan giriş değişkenleri ile çıkış değişkenleri arasındaki ilişkinin kurulduğu bulanık kuralların oluşturulduğu aşamadır.

4. Durulaştırma aşaması: Elde edilen bulanık kümenin tekrar sayısal değerlere dönüştürülmesi işlemidir. Sıklıkla kullanılan çıkarım yöntemleri: Mamdani çıkarım yöntemi, Sugeno çıkarım yöntemi ve Tsukomato çıkarım yöntemidir.

4. UYGULAMA

İşletme için belirlenen risklerin değerlendirilmesinde bulanık mantık uygulamasını da kapsayan aşağıdaki aşamalar takip edilecektir:

1. Giriş aşaması: Risk değerlendirmesi için verilerin toplanması,

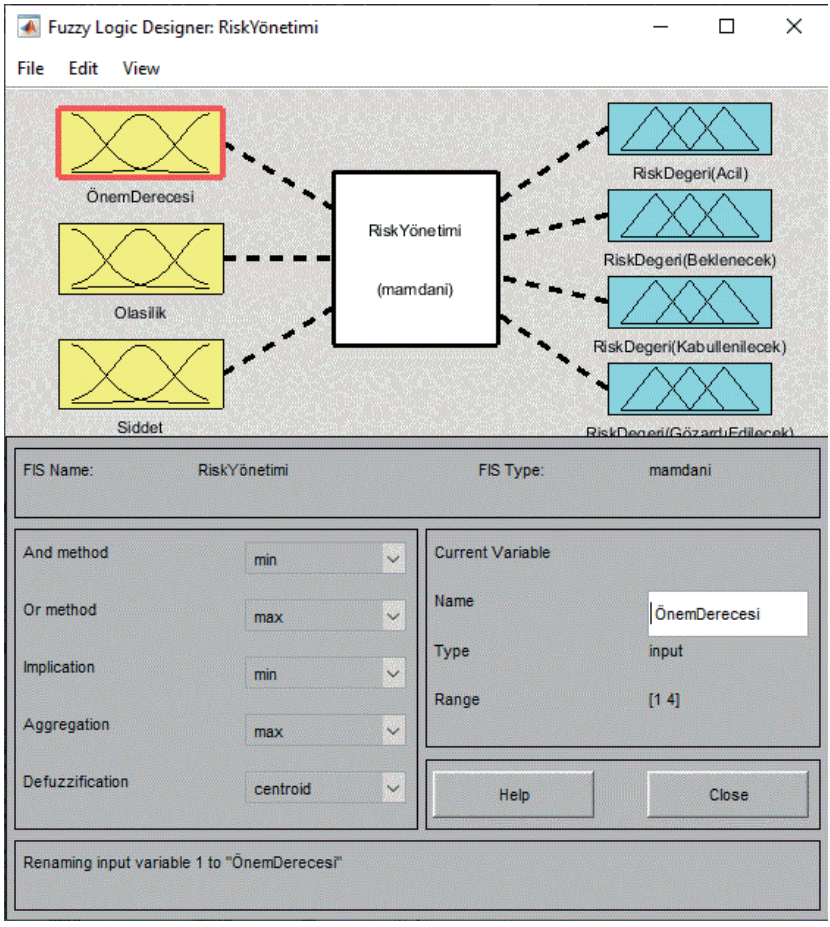
2. Bulanıklaştırma aşaması: Verilerin dilsel şekilde ifade edilmesi ve üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi,

3. Kural aşaması: Giriş ve çıkış değişkenleri arasındaki ilişkilerin kurulması,

4. Çıkarım aşaması: Bulanık sistemden sonuçların elde edilmesi.

4.1. Giriş Aşaması

Risk değerlendirmesi için verilerin toplanmış olduğu bu aşama içerisinde kullanılacak olan veriler toplanmıştır. Toplanmış olan veriler doğrultusunda kurulacak olan modelin girdi ve çıktı değişkenleri belirlenmiştir. **Girdi değişkenleri;** firmanın riske verdiği önem derecesi, riskin olma olasılığı ve riskin şiddeti olarak tanımlanmıştır. Aynı zamanda **çıktı değişkenleri**; risk değerini dört ayrı sınıfa ayırabilmek için dört adet olacak şekilde Acil-Beklenecek-Kabullenilecek-Göz ardı edilecek olarak belirlenmiştir. Belirlenmiş olan değişkenler ile birlikte MATLAB programı üzerinde kurulmuş modelin gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. Aynı zamanda model kurulurken çıkarım yöntemi olarak Mamdani çıkarım yöntemi tercih edilmiştir.



Şekil 1: *MATLAB programı üzerinde kurulmuş modelin gösterimi*

4.2. Bulanıklaştırma Aşaması

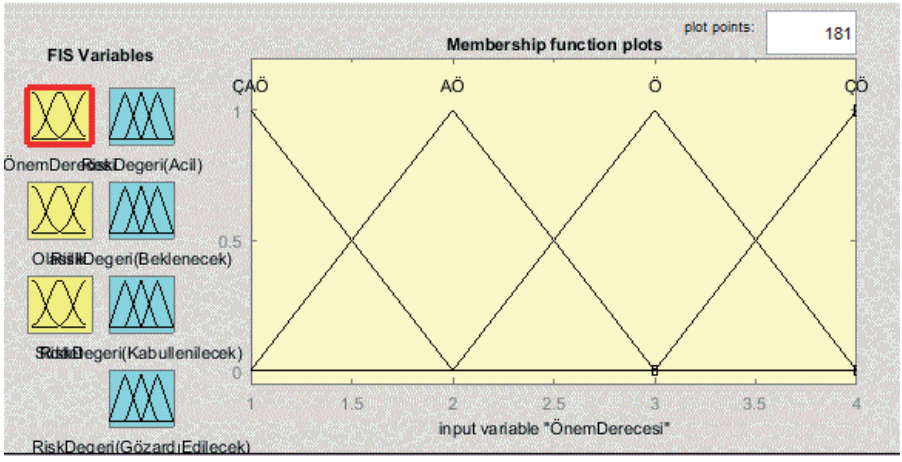
Bu aşama içerisinde giriş aşamasında tanımlanmış olan her bir girdi ve çıktı değişkeni için verileri ifade edecek dilsel ifadeler belirlenmiştir. Dilsel ifadelerin yanı sıra kullanılan üyelik fonksiyonu tipleri ve değişkenlerin aralıklarına da karar verilmiştir. Belirlenmiş olan dilsel ifadeler, değişken aralıkları ve kullanılan üyelik fonksiyon tipleri Tablo 1'de verilmiştir. Çıktı değişkenlerinin üyelik fonksiyonlarının S tipi olarak olmasına karar verilirken Atalay vd. (2018) gerçekleştirmiş oldukları çalışma referans alınmıştır. Atalay vd. (2018) yaptıkları çalışmada farklı üyelik fonksiyonlarının risk değerlendirmesine etkilerini karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda S tipi üyelik fonksiyonun diğer fonksiyonlardan daha iyi sonuç verdiği kararına varılmıştır. Bu doğrultuda çıktı değişkenlerinin üyelik fonksiyonları S tipi üyelik fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

Aynı zamanda çıktı değişkenleri dört ayrı değişken; acil risk değeri, beklenecek risk değeri, kabullenilecek risk değeri ve göz ardı edilecek risk değeri olacak şekilde oluşturulmuştur. Bu sayede tüm riskleri risk değerlerine ulaşılırken aynı zamanda risklerin sınıflandırılması ve önceliklendirilmesi de sağlanmıştır.

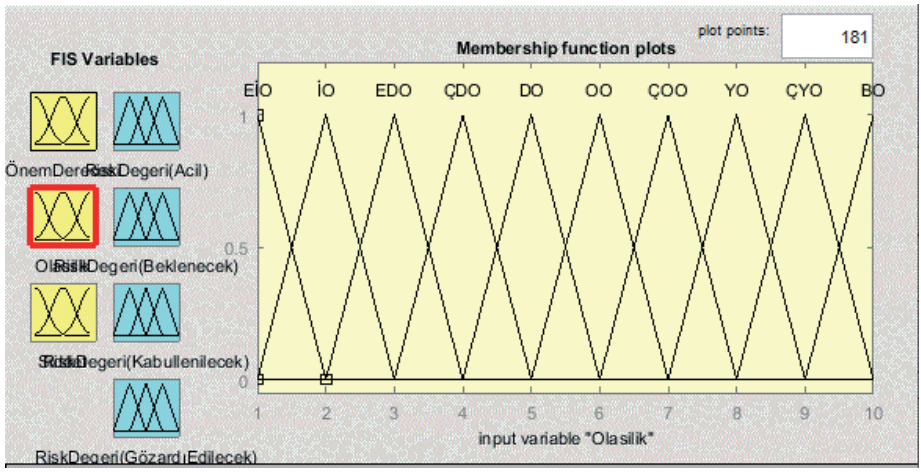
Tablo 1: *Belirlenmiş olan dilsel ifadeler, değişken aralıkları ve kullanılan üyelik fonksiyon tipleri*

Değişken Tipi	Değişken	Sözel İfade		Aralık	Üyelik Fonksiyonu
Girdi	Önem Derecesi	ÇÖ	(Çok önemli)	[1,3]	Üçgensel Üyelik Fonksiyonu
		Ö	(Önemli)		
		AÖ	(Az önemli)		
		ÇAÖ	(Çok az önemli)		
	Olasılık	BO	(Beklenen olasılık)	[1,10]	Üçgensel Üyelik Fonksiyonu
		ÇYO	(Çok yüksek olasılık)		
		YO	(Yüksek olasılık)		
		ÇOO	(Çok orta olasılık)		
		OO	(Orta olasılık)		
		DO	(Düşük olasılık)		
		ÇDO	(Çok düşük olasılık)		
		EDO	(En düşük olasılık)		
		İO	(İmkânsız olasılık)		
		EİO	(En imkânsız olasılık)		
	Şiddet	FE	(Felaket)	[1,10]	Üçgensel Üyelik Fonksiyonu
		ÇC	(Çok ciddi)		
		C	(Ciddi)		
		ÇK	(Çok kötü)		
		K	(Kötü)		
		O	(Orta)		
		H	(Hafif)		
		ÇH	(Çok hafif)		
		EH	(En hafif)		
		FA	(Fark edilir)		
Çıktı	Risk Değeri (Acil)	AR	(Acil risk)	[225,300]	S Tipi Üyelik Fonksiyonu
	Risk Değeri (Beklenecek)	BR	(Beklenecek risk)	[150,225]	
	Risk Değeri (Kabullenilecek)	KR	(Kabullenilecek risk)	[75,150]	
	Risk Değeri (Göz ardı edilecek)	GR	(Göz ardı edilecek risk)	[1,75]	

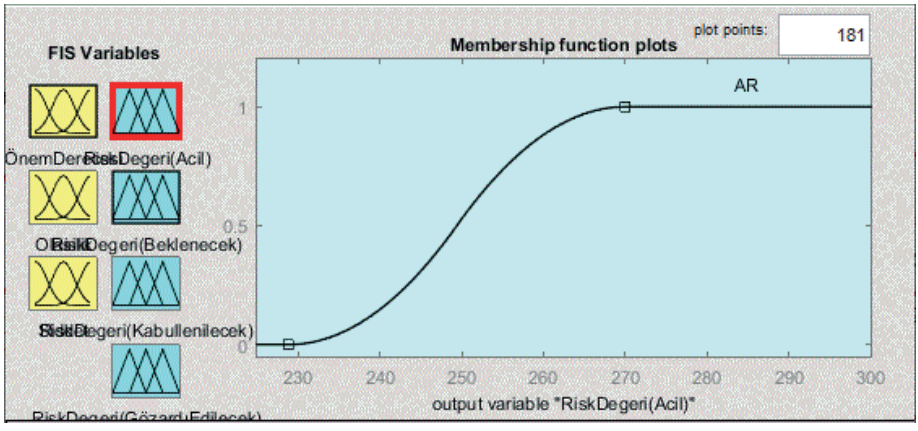
Şekil 1'de gösterilmiş olan model içerisindeki değişkenler için oluşturulmuş olan üyelik fonksiyonlarının birkaç tanesinin grafiksel gösterimi Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 2: *Önem derecesi girdi değişkeninin üyelik fonksiyon grafiği*



Şekil 3: *Olasılık girdi değişkeninin üyelik fonksiyon grafiği*



Şekil 4: *Acil risk değeri çıktı değişkeninin üyelik fonksiyon grafiği*

4.3. Kural Aşaması

Kural belirleme aşamasında her bir kombinasyon için bir kural oluşturulmuştur. Bulanıklaştırma aşamasında Tablo 1'de gösterilen her bir değişken için belirlenmiş sözel ifadelerin sayısı sayesinde kaç adet kural oluşturulması gerektiği belirlenmiştir. Kural sayısı Denklem (1) ile hesaplanabilmektedir. Hesaplama içerisine çıkış değişkenleri dahil edilememektedir.

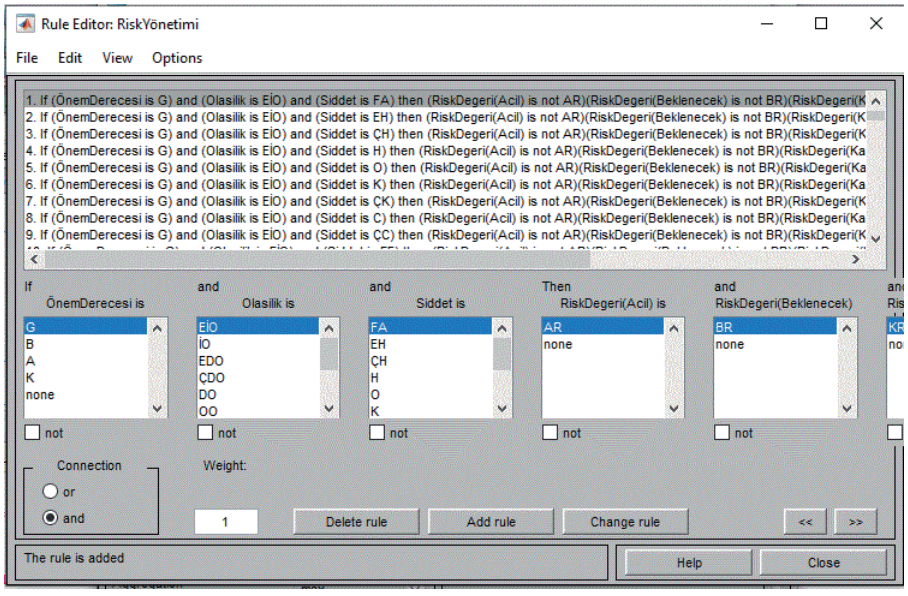
$$Toplam\ kural\ sayısı = x_1 * x_2 * x_3 * \ldots * x_i \quad (1)$$

Denklem (1) içerisinde verilmiş olan x_i değişkeni $i.$ girdi değişkeni için tanımlanmış dilsel ifade sayısını ifade etmektedir. Bu uygulama içerisindeki toplam kural sayısı ise Denklem (1) doğrultusunda hesaplanmış ($Toplam\ kural\ sayısı = 4 * 10 * 10 = 400$) ve 400 olarak bulunmuştur.

Kuralları oluşturmak için belirlenen şablon şu şekildedir;

Eğer =Önem Derecesi "…" ve Olasılık= "…" ve Şiddet= "…" ve ise Risk Değeri "…" = "…".

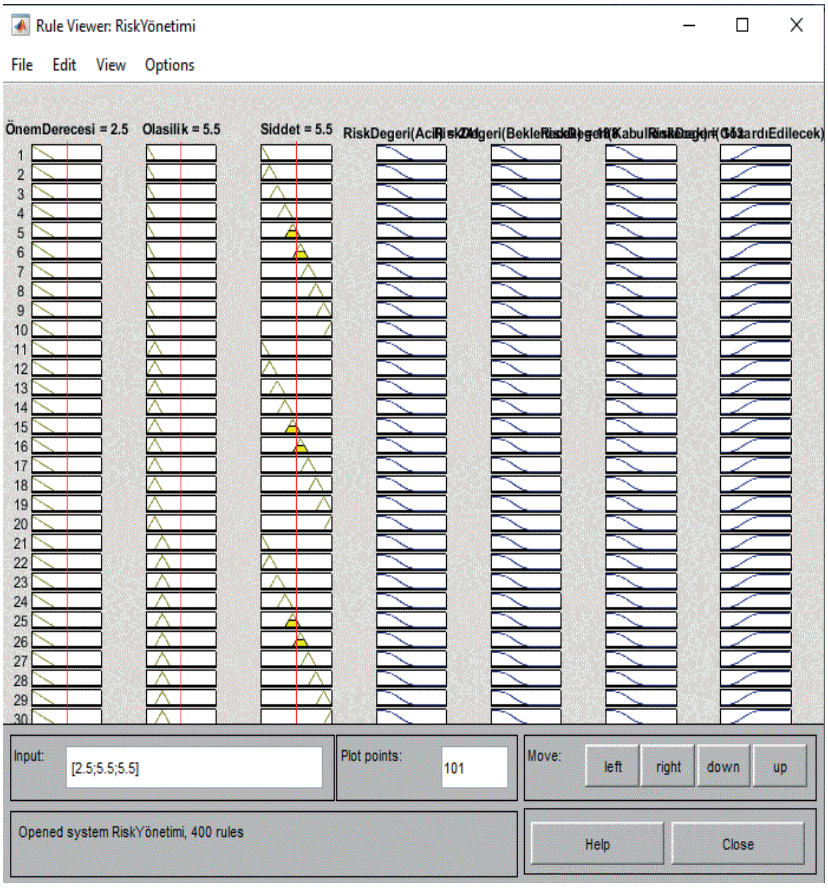
Yukarıda oluşturulmuş olan genel şablona uygun olacak şekilde MATLAB üzerinde kurallar oluşturulmuştur. MATLAB üzerinde oluşturulmuş kuralların bir kısmı Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5: *MATLAB üzerinde oluşturulmuş olan kuralların bir kısmı ve kural oluşturma ekranı*

4.4. Çıkarım ve Sonuç Aşaması

Oluşturulmuş olan model sayesinde veri bölümünde belirlenmiş olan on riskin risk değerlendirmesi Kural Tabanlı Bulanık Mantık yaklaşımı ile yapılmıştır. Kural aşamasında belirlenmiş olan kurallar MATLAB sayesinde grafiksel olarak gözlemlenebilmektedir. Bu sayede hem görsel olarak çıkarım yapılabilmekte hem de risk değerlendirmesi için girdi değişkenleri girilerek risk büyüklüğüne ulaşılabilmektedir. MATLAB arayüzü içerisinde kuralların grafiksel gösterimi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6: *MATLAB içerisinde kuralların grafiksel gösterimi ve girdi değişkenleri girilerek risk büyüklüğüne ulaşılabilen arayüz*

Oluşturulmuş olan Kural Tabanlı Bulanık Mantık modeli sayesinde on adet riskin risk büyüklüklerine ulaşılmıştır. Daha öncesinde klasik matris risk değerlendirme yöntemi ile hesaplanan risk büyüklükleri ve Kural Tabanlı Bulanık Mantık modeli ile elde edilmiş risk büyüklükleri Tablo 2'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 2: *Önceki çalışmada elde edilen risk büyüklükleri ve Bulanık Mantık tabanlı model ile elde edilmiş risk büyüklükleri*

Risk	Önceki Çalışmada Belirlenmiş Risk Büyüklüğü	Girdi Değişkenleri			Bulanık Mantık Tabanlı Risk Büyüklüğü
		Önem Derecesi	***Olasılık***	***Şiddet***	
Risk 1	30	ÇÖ	EDO	FE	Risk değeri (Acil)=274
Risk 2	32	ÇÖ	ÇDO	C	Risk değeri (Acil)=271
Risk 3	24	Ö	EDO	C	Risk değeri (Beklenecek)=189
Risk 4	30	ÇÖ	DO	K	Risk değeri (Acil)=267
Risk 5	48	Ö	OO	C	Risk değeri (Beklenecek)=198
Risk 6	20	AÖ	ÇDO	O	Risk değeri (Kabullenilecek)=92
Risk 7	48	ÇÖ	YO	K	Risk değeri (Acil)=272
Risk 8	30	Ö	EDO	FE	Risk değeri (Beklenecek)=193
Risk 9	42	AÖ	OO	ÇK	Risk değeri (Kabullenilecek)=124
Risk 10	36	ÇÖ	ÇDO	ÇC	Risk değeri (Acil)=239

Tablo 2'de verilmiş olan Kural Tabanlı Bulanık Mantık risk büyüklüklerine belirlenmiş olan on adet risk dört farklı çıktı değişkeni sayesinde sınıflandırma ve önceliklendirme için dört gruba ayrılmıştır. Çıktı değişkenleri bazında sınıflandırmanın tam olarak görülebilmesi için Tablo 2'deki değerler kullanılarak bulunan sınıflar (çıktı değişkeni) özet şekilde Tablo 3'te özet şeklinde verilmiştir.

Tablo 3: *Değerlendirilen on riskin Kural Tabanlı Bulanık Mantık ile elde edilen çıktı değerleri ile sınıflandırılması*

Risk Çıktı Değişkeni/ Sınıfı	**Riskler**
Risk Değeri (Acil)	Risk 1, Risk 2, Risk 4, Risk 7, Risk 10
Risk Değeri (Beklenecek)	Risk 3, Risk 5, Risk 8
Risk Değeri (Kabullenilecek)	Risk 9, Risk 6
Risk Değeri (Göz ardı edilecek)	

5. SONUÇ

Tablo 3'te görüldüğü üzere risk sınıfı: acil olarak nitelendirilen riskler için hemen hiç beklemeksizin önlem alınacaktır. Risk sınıfı: beklenecek olan riskler için ise önlem alınacak ancak belli bir periyoda yayılarak bir plan içerisinde önlem alınması kararına varılmıştır. Risk sınıfı: kabullenilecek riskler firma için var olan risklerdir yani varlıklarını kabul ederek meydana gelmeleri durumunda ortaya çıkan maliyetler firma tarafından karşılanmak üzere bir B planı oluşturulmuştur. Aynı zamanda Tablo 2'de verilmiş olan risk büyüklükleri ile sınıflar içerisinde de risk önceliklendirmesi yapılabilir.

Daha önce risk matrisi yöntemi ile yapılmış olan risk değerlendirme çalışmasında risklerin her biri manuel olarak önceliklendirilmişti. Yapılmış olan Kural Tabanlı Bulanık Mantık çalışması ile birlikte riskler girdi değişkenleri girildikten sonra dört farklı çıktı değişkeni sayesinde hem risk değerlerine ulaşılmış hem de risk sınıfı belirlenebilmiştir. Risk sınıflarına ayırma sayesinde hangi riske nasıl bir öncelik verileceği kararına kolaylıkla varılmıştır. İlerleyen zamanlarda ihtiyaca göre yapılmış olan model uyarlanabilir bir model olduğu için farklı sektörlerde, farklı firmalarda veya aynı firma için farklı risk değerlendirme politikalarında kullanılabilir.

KAYNAKÇA

Yerekapan, A., Eskin, İ. Kurumsal Risk Yönetimi ve Firma Büyüklüğünün Firma Performansı Üzerine Etkisi: BİST Örneği, Girişimcilik ve Kalkınma Dergisi, 15(1), 61-74, 2020.

Yılmaz, N., Şenol, M.B. İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirme Süreci İçin Bulanık Çok Kriterli Bir Model ve Uygulaması, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32(1), 77-87, 2017.

Deveci, M., Varouchakis, E.A., Brito-Parada, P.R., Mishra, A.R., Rani, P., Bolgkoranou, M., Galetakis, M. Evaluation of risks impeding sustainable mining using Fermatean fuzzy score function based SWARA method, Applied Soft Computing, 139, 110220, 2023

Tomak, N., KorkusuzPolat, T. Risk prioritization model driven by success factor in the light of multicriteria decision making, Open Chemistry, vol 20(1), page 759-776, https://doi.org/10.1515/chem-2022-0188 2022

Sultani, E., Aliabadi, M.M. Risk assessment of firefighting job using hybrid SWARA-ARAS methods in fuzzy environment, Heliyon, vol 9(11), e22230, 2023.

Arat, F., Akleylek, S. A new method for vulnerability and risk assessment of IoT, Computer Networks, vol 237, 110046, 2023.

Liu, K., Cai, B., Wu, Q., Chen, M., Yang, C., Khan, J.A., Wang, C., Pattiyakumbura, H.V.W., Ge, W., Liu, Y. Risk identification and assessment methods of offshore platform equipment and operations, Process Safety and Environmental Protection, vol 177, 1415-1430, 2023.

Arslankaya, S. Comparison of performance of fuzzy logic and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) for estimating employee labor loss, Journal of Engineering Research, Artricle in press, https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100107 2023.

TanakCoşkun, G., YılmazYalçıner, A. Determining the best price with inear performance pricing and checking with fuzzy logic. Computers&Industrial Engineering, 154, 107150, 2021.

Yaşar, Ö., KorkusuzPolat, T. A Fuzzy-based application for Marketing 4.0 brand perception in the Covid-19 Process, Sustainability, 14(24), 16407, https://doi.org/10.3390/su142416407 2022.

Aktepe, A., Ersöz, S., Türker, A.K., Barışçı, N., Dalgıç, A. An inventory classification approach combining expert systems, clustering, and fuzzy logic with the ABC method, and application, South African Journal of Industrial Engineering, 29(1), 49-62, https://dx.doi.org/10.7166/29-1-1784 2018.

Singer, H., ÖverÖzçelik, T. A risk-based decision making framework to analyze the properties of cobalt-chromium alloys, Emerging Materials Research, vol 12(4), page 1-14, 2023.

KorkusuzPolat, T. Risk priority with fuzzy logic: Application of a textile factory, Sakarya University Journal of Science, vol 23(2), 203-212, 2019.

Haggag, O.Y., Barakat, W. Application of Fuzzy Logic for Risk Assessment using Risk Matrix, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3(1), 49-54, 2008.

Mure, S., Demichela, M. Fuzzy Application Procedure (FAP) for the Risk Assessment of Occupational Accidents, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 22, 593-599, 2009.

Apaydın, A., Başer, F., Tosunoğlu, N.G. Hayat Sigortalarında Bulanık Risk Sınıflandırma, Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi, 34, 123-136, 2009.

Dalkılıç, N., Sevim, Ş., Gülbandılar, E. Hayat Sigortalarında Bulanık Mantık Yöntemi ile Risk Değerleme Modeli, İşletme Araştırmaları Dergisi, 6(1), 90-102, 2014.

Özfırat, P.M. Bulanık Önceliklendirme Metodu ve Hata Türü ve Etkileri Analizini Birleştiren Yeni Bir Risk Analizi Yöntemi, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(4), 755-768, 2014.

Zile, M. İş Güvenliği Risk Değerlendirme Analiz Modellemesi ve Yazılımının Bulanık Mantıkla Oluşturulması, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(2), 267-273, 2015.

Wang, R., Wang, J. Risk analysis of out-drum mixing cement solidification by HAZOP and risk matrix, Annals of Nuclear Energy, 147, 107679, 2020.

Wu, K.F., Sasidharan, L., Thor, C.P., Chen, S.Y. Crash sequence based risk matrix for motorcycle crashes, Accident Analysis and Prevention, 117, 21-31, 2018.

Duan, Y., Zhao, J., Chen, J., Bai, G. A risk matrix analysis method based on potential risk influence: A case study on cryogenic liquid hydrogen filling system, Process Safety and Environmental Protection, 102, 277-287, 2016.

Zadeh, L.A. Fuzzy Sets, Information and Control, 8(3), 338-353, 1965.

Kıyak, E., Kahvecioğlu, A. Bulanık mantık ve uçuş kontrol problemine uygulanması, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, Cilt 1, Sayı 2, 63-72, 2003.

Aydın, Y., Eren, T. Hava savunma sanayii alt yüklenici seçiminde bulanık mantık altında çok kriterli karar verme ve hedef programlama yöntemlerinin kullanılması, Journal of Aviation, 2, 10-30, 2018.

Ross T.J., Fuzzy Logic with Engineering Applications, Wiley, 4th Edition, UK, ISBN-13: 978-1119235866 ISBN-10: 1119235863, 2017.

Belohlavek, R., Dauben, J.W., Klir, G.J. Fuzzy Logic and Mathematics: A Historical Perspective, Oxford University Press, UK, ISBN-13: 978-0190200015 ISBN-10: 0190200014, 2017.

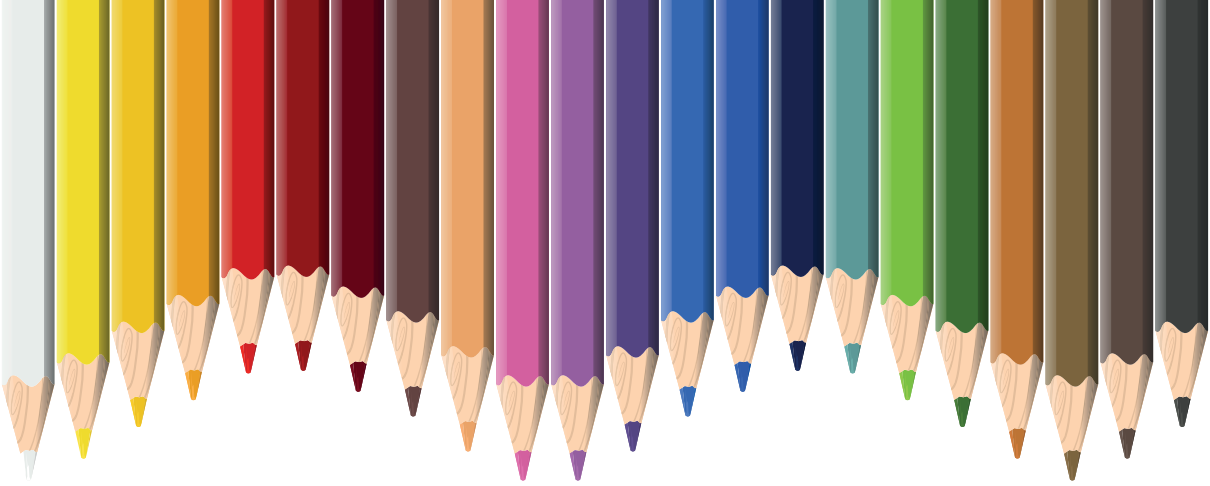
Bhargava, A.K. Fuzzy Set Theory, Fuzzy Logic and Their Applications, S. Chand & Company Pvt. Ltd., First Edition, New Delhi, ISBN-13: 978-8121941945 ISBN-10: 8121941946, 2013.

Harb, A.A.M., Durdu, A., Terzioğlu, H. Kavşak trafik sinyalizasyon kontrolü için bula-

nık mantık yöntemi ile gerçek zamanlı sistemin tasarımı ve uygulaması, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, özel sayı, 490-497, 2019.

Yüksel, N., Börklü, H.R. Yapay zeka destekli kavramsal tasarım: Tekerlekli sandalye tasarım seçenekleri değerlendirmede bulanık mantık kullanımı, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(3), 309-319, 2021.

Atalay, K.D., Can, G.F., Eraslan, E. Evaluation of Effect of Different Membership Functions on Risk Assessment, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 24(3), 373-385, 2018.



Bölüm 8

KARACİĞER BOZUKLUĞU HASTALIĞININ SINIFLANDIRILSMASINDA JAYA OPTİMİZASYON ALGORİTMASI

Nagihan YAĞMUR [1]

1 Dumlupınar Üniversitesi
ORCID: 0000-0002-6407-4338

1. GİRİŞ

İnsan vücudunun önemli bir iç organı olan karaciğerin başlıca görevleri, yiyecekleri sindirmek, üretilen atıkları ortadan kaldırmak, vitaminleri ve enerji maddelerini korumaktır [1]. Vücuttaki yiyecekleri sinidirmek için farklı türde kimyasal üreten karaciğer, omurgalıların belirli bir süreçle kendini yenileyebilen tek iç organıdır [1], [2]. Bu gibi sebeplerden dolayı karaciğerin korunması insan sağlığı açısından çok önemlidir. Karaciğerin eksik veya hatalı çalışması siroz, yağlı karaciğer hastalığı, gilbert sendromu vb. gibi birçok soruna yol açar. Karaciğer rahatsızlıklarına yol açan birçok neden vardır: 1) aile üyelerinden kalıtımsal olarak 2) virüs ve parazitlerle enfekte olma 3) aşırı alkol kullanımı 4) obezite/şişmanlık 5) tip 2 diyabet 6) dövme yaptırma 7) uyuşturucu ve kan enjekte etmek için ortak iğne kullanımı vb. [1], [3]. Hindistan'da her yıl yaklaşık 10 bin yeni karaciğer hastası teşhis edilmektedir. Teşhis edilen bu hastalar, yanlış tedavi edildiklerinde veya tedavi süreçleri uzun sürerse, bireyin yaşam kalitesi önemli ölçüde zarar görür. Ve bu ölümle sonuçlanan komplikasyonlara neden olabilir. Sonuç olarak, sağlıklı ve sağlıksız insanları sınıflandırmak için otomatik ve hassas sistemlere duyulan ihtiyaç, insan varlığı için kritik öneme sahiptir.

Geçmiş yıllarda tıbbi görüntüleme, laboratuvar incelemeleri ve klinik muayene, karaciğer hastalıklarını değerlendirmek için kullanlan yöntemlerken bu yöntemlerin yanlış teşhis edilebilme olasılığı, teşhiste gecikme sorunları vb. dezavantajları nedeniyle hastalar için kötü sonuçlar doğurabilmektedir. Teknolojik gelişmelerin hızla ilerlemesi, daha doğru ve hızlı bir şekilde teşhis yapıma olanaklarını iyileştirebilmektedir.

Sağlık alanı veri toplama ve işleme açısından en endişe verici sektörlerinden biri olduğu için sağlık alanında veri madenciliği işlemleri ile tıbbi verilerin etkinliğinin incelenmesi gerekmektedir [4]. Tıbbı veri madenciliğinde veri kümelerindeki gizli bilgileri ortaya çıkarılmaktadır [5]. Ortaya çıkarılan gizli bilgilerle çok büyük miktardaki verinin araştırılmasına olanak tanınmış olur [4], [6]. Sağlık alanında veri toplama ve işleme konusunda literatürde birçok başarılı çalışma bulunmaktadır [7]–[9].

Karaciğer kanseri gibi çeşitli ölümcül hastalıklara neden olan karaciğer hastalığının da riskini azaltmak için erken teşhis ve tedavi amacıyla hekimlere yardımcı olacak karar destek mekanızmalarının kurulması şarttır. Makine öğrenimi sınıflandırma algoritmalarının sağlık hizmetleri kuruluşlarına dahil edilmesi, sağlık hizmeti uygulayıcılarının hastalıkları daha hızlı ve doğru bir şekilde teşhis etmesine olanak tanıyarak olağanüstü sonuçlar doğurur. Makine öğrenimi teknikleri ve araçları, veri kümelerinden yararlı bilgilerin çıkarılmasına yardımcı olarak daha kesin bulgular elde edilmesini sağlar. Karaciğer hastalığının sınıflandırılması ve tahmininde kullanılan mevcut veri madenciliği yöntemleri arasında k-En Yakın Komşular (k-NN), Yapay Sinir Ağları (YSA), Destek Vektör Makineleri (DVM) gibi yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır [1], [10], [11]. Ancak, bu yöntemler farklı veri setleri üzerinde farklı performans gösterebilir, çünkü kullanılan veri setlerinin özellikleri, parametre sayıları ve hasta kayıt sayıları gibi faktörler değişebilir. Özellikle klasik yöntemlerin karmaşık problemleri çözmedeki sınırlılıklarından dolayı doğadan ilham alan yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Doğadan ilham alan bu yöntemlerin yerel optimum noktlardan kaçınmaları, türevsiz bir yapıya sahip olmaları, problemlere uygulama kolaylıkları vb. gibi avantajlarından dolayı literatürde kullanımı artmaktadır [12], [13].

Bu çalışma, Kaggle veri tabanındaki 345 adet hastaya ait karaciğer hastalığı teşhisi için gerekli 6 farklı parametre içeren veriler üzerinde doğadan esinlenen evrimsel algoritmalardan JAYA algoritmasının kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma, JAYA'nın üç farklı senaryoda detaylı bir şekilde analiz edilmesini içermektedir. Bu senaryolar arasında çoklu lineer form JAYA, ve çoklu karesel form JAYA ve çoklu üstel form JAYA modelleridir. Bu analiz, metasezgisel algoritmaların karaciğer hastalığını belirleme konusundaki etkinliklerini anlamak ve farklı modeller üzerindeki etkisini karşılaştırmak adına önemli bir adım oluşturmaktadır.

Çalışmanın bölümleri şu şekilde özetlenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde literatür sunulmuş, üçüncü bölümünde materyal ve metot sunulmuş, dördüncü bölümde JAYA yönteminin karaciğer sınıflandırma problemine uygulanması anlatılmış, beşinci bölümde önerilen modellerin değerlendirilmesi

sunulmuş, altıncı bölümde deneysel sonuçlar verilmiş, son olarak yedinci bölümde de sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR

Yapılan bir çalışmada karaciğer hastalığı oluşumunu tahmin etmek amacıyla çeşitli makine öğrenmesi modelleri ve topluluk öğrenm yöntemleri Doğruluk, Hassasiyet, Geri Çağırma, F-ölçümü ve eğri altındaki alan (AUC) açısından değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, Voting sınıflandırıcısının %80.1 doğruluk, geri çağırma ve F ölçümü, %80.4 hassasiyet ve 10 kat çapraz doğrulama ile SMOTE sonrasında %88.4'e eşit bir AUC ile diğer modellerden daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir [14]. Başka bir çalışmada Hint Karaciğer Hasta Veri Kümesini (ILPD) kullanarak karaciğer hastalığını tahmin etmek için toplu öğrenmeye ve gelişmiş ön işlemeye dayalı yeni bir mimari önerilmiştir. ILPD'ye altı topluluk öğrenme algoritması uygulanmış ve sonuçları mevcut çalışmalarla elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Önerilen model, uygun atamalarla doğruluğu artırmak için veri dengeleme, özellik ölçeklendirme ve özellik seçimi gibi çeşitli veri ön işleme yöntemlerini kullanmıştır. Eksik değerleri doldurmak için çok değişkenli atama uygulanmıştır. Ekstra ağaç sınıflandırıcısı ve rastgele orman kullanan önerilen model, sırasıyla %91.82 ve %86.06'lık en yüksek test doğruluğuyla diğer yöntemlerden daha iyi performans göstermiştir [15]. Bir çalışmada kalp ve karaciğer verilerinin sınıflandırılmasına yönelik olarak DVM yaklaşımı ve değiştirilmiş parçacık sürüsü optimizasyon modeli birleştirilerek hibrit bir model sunulmuştur [16]. Elde edilen sonuçlar DVM, hibrit parçacık sürüsü optimizasyonu destek vektör makine algoritması (PSOSVM), hibrit Crazy parçacık sürüsü optimizasyonu destek vektör makine algoritması (CPSOSVM) ile karşılaştırılmıştır. Diğer bir çalışmada tıbbi bakımın ertelenmesini önlemek, karaciğer hastalığını doğru bir şekilde teşhis etmek ve hasta hastalara sağlanan hatalı teşhislerin sayısını en aza indirmek için makine öğrenimi algoritmalarının nasıl kullanılabileceğini değerlendirilmiştir. Çalışmadaki temel amaç karaciğer hastalarının mümkün olan en kısa sürede doğru tanı almasını sağlamaktır [17]. Kronik karaciğer hastalığını sınıflandırmak için Kaliforniya Üniversitesi Irvin (UCI) deposundan Hint karaciğer hastası veri seti (ILPD)'nin kullanıldığı bir

çalışmada lojistik regresyon (LR), rastgele orman (RF), k-NN, DVM, çok katmanlı algılayıcı (MLP) ve topluluk oylama sınıflandırıcısı dahil olmak üzere çeşitli makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmıştır. Sonuçta karaciğer hastalıklarını öngörmede %88.10 doğruluk, %85.33 kesinlik, %92.30 geri çağırma, %88.68 F1 skoru ve %88.20 AUC skoruna sahiptir. Önerilen teknik mevcut en son çalışmalara göre %0.10-18.5 daha iyi sonuçlar vermiştir [18]. Yine karaciğer hastalığını tahmin etmek için makine öğrenimi yöntemlerinni kullanıldığı başka bir çalışmada tahmin sonuçlarının performansını artırmak için üstel düzeltme (ES) ile veri dönüşümü şeklinde veri ön işlemesi gerçekleştirilmiştir [19]. Karaciğer hastalıklarını tahmin etmek için farklı sınıflandırma tekniklerinin kullanıldığı bir çalışmada doğruluk skoru ve karışıklık matrisi sonuçlarını Lojistik Regresyon, DVM ve k-NN ile karşılaştırmışlardır [20]. Başka bir çalışmada farklı veri madenciliği sınıflandırma teknikleri önceki karaciğer tahmin yöntemleri ile karşılaştırılmıştır [21]. Doğruluk, doğruluğun daha iyi performansını elde etmek için karışıklık matrisleri yardımıyla ölçülmüştür. Çeşitli makine öğrenme algoritmaları kullanarak Hepatit prognostik verilerini aralarında karşılaştıran başka bir çalışmada da Naive Bayes tekniği iyi bir doğruluk sağlamış ve ayrıca bir model oluşturmak daha az zaman almıştır [22].

Bu çalışmada, karaciğer hastalığı sınıflandırma üzerine yapılan araştırmalar incelenmiş ve sürü tabanlı optimizasyon yöntemlerinin kullanımının oldukça sınırlı olduğu belirlenmiştir. Bu bağlamda, analitik yöntemlerle çözülemeyen karmaşık optimizasyon problemlerine çözüm getiren sürü zekası avantajlarından birine odaklanan ve metasezgisel yöntemler olarak adlandırılan JAYA algoritması üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu algoritmanın sınıflandırma problemlerindeki başarısını değerlendirmek amaçlanmıştır. Önerilen yöntem, 3 farklı model üzerinde gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemin başarısını vurgulamak için, veri seti parametreleri arasındaki doğrusal, karesel ve üstsel ilişkileri modellemek üzere yöntem üç farklı senaryo altında test edilmiştir. Bu testler, yöntemin sınıflandırma problemlerinde ne kadar etkili olduğunu değerlendirmeye yöneliktir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Veriseti ve Önişleme

Çalışmada kullanılan veriseti, Kaggle veri tabanından alınan 345 hastanın karaciğer hastalığı üzerinde etkili olan parametre değerlerinden oluşmaktadır. Çalışmada, 2 sınıf olan hasta/sağlıklı durumu için 6 öznitelik kullanılmıştır. 145 hasta verisi, 200 adet te sağlıklı kayıt verisi bulunmaktadır. Kullanılan parametreler "MCV", "ALKFOS", "SGPT", "SGOT", "GAMMAGT" ve "İçecekler"'dir. MCV değeri, vücuttaki eritrosit olarak bilinen kırmızı kan hücrelerinin (alyuvar) ortalama boyutunu ifade etmektedir. ALKFOS değeri, vücuttaki fosforun metabolizmasında görev alan iskelet sistemi ve gastrointestinal sistemde üretilen bir enzimdir. SGPT değeri, gıdalarla beraber vücuda alınıp sindirim sağlandıktan sonra karaciğere gelen besinlerin enerjiye dönüştürülmesinde rol oynar. SGOT değeri, kan dolaşımda her zaman olan ve karaciğer hasarının tespit edilmesinde ihtiyaç duyulan bir testtir. GAMMAGT değeri, vücut içerisinde yer alan moleküllerin rahat hareket etmesine olanak tanıyarak taşıma görevi bulunan bir enzimdir. İçecekler değeri ise günde içilen alkollü içeceklerin yarım litre eşdeğeri içecek sayısını ifade eder. Tablo da gösterildiği gibi parametreler arasındak isayısal farklardan dolayı verisetine ön işleme aşamasında kan değerleri 0.1 ile 0.9 arasına alınarak normalizasyon işlemi uygulanmıştır.

Tablo 1. Verisetindeki 10 hasta örneği

MCV	ALKFOS	SGPT	SGOT	GAM-MAGT	İçecekler
85	92	45	27	31	0
90	60	25	19	5	0.5
88	80	24	25	17	4
92	76	31	28	41	6
86	79	37	28	14	0.5

3.2 JAYA Optimizasyon Algoritması

2016 yılında Rao R.v. tarafından tanıtılan JAYA optimizasyon algoritması, tek aşamadan oluşmakta ve basit bir matematiksel yapıya sahiptir [23].

Bu nedenle problmelere kolay adapte edilebilir, hızlı çalışır ve daha kısa sürede sonuca ulaşması onu diğer popülasyon tabanlı yöntemlerden üstün kılmaktadır [24].

Algoritmanın ilk aşamasında rastgele bireyler oluşturulur. Ardından, amaç fonksiyonu kullanılarak en iyi ve en kötü bireyler seçilir. Bireyler, en iyiye yaklaşmak ve en kötüden uzaklaşmak için etkileşime girerek yenilenir. Yenilenen her bireyin popülasyonda kalıp kalmayacağı, önceki uygunluk değeri ile karşılaştırılarak belirlenir. Bu adımlar, durdurma kriteri sağlanana kadar devam eder. Yeni bireyler, en iyi çözüm (x_{best}), en kötü çözüm (x_{worst}), ve $[0-1]$ aralığında rastgele değerler (r_1 ve r_2) kullanılarak denklem 1'e göre güncellenir.

$$\boldsymbol{x_{new} = x_{old} + r_1(x_{best} - |x_{old}|) - r_2(x_{worst} - |x_{old}|)} \qquad (1)$$

Denklem 1'e göre, en kötü ve en iyi çözümler kullanılarak bireyin yeni konumu güncellenir. Bu süreç sonlandırma kriteri karşılanana kadar devam eder.

4. JAYA YÖNTEMİNİN KARACİĞER SINIFLANDIRMA PROBLEMİNE UYGULANMASI

Çalışma kapsamında JAYA ile 6 farklı parametre için özellik vektörü şu şekilde verilmiştir.

$$\boldsymbol{M = [M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6]} \qquad (2)$$

JAYA ile karaciğer hastalığını tespit etmek için sonuçlar 3 farklı formda modellenerek test edilmiştir. Tablo 2'de görüldüğü gibi Model-1JAYA doğrusal formu, Model-2JAYA karesel formu ve Model-3JAYA ise üstel formu ifade etmektedir.

Tablo 2. JAYA'nın uygulandığı modeller.

JAYA uygulanan Model İsmi	Model Tipi
Model-1JAYA	Çoklu Lineer Form
Model-2JAYA	Çoklu Kuadratik Form
Model-3JAYA	Çoklu Üstel Form

Denklem 2'ye göre, özellik vektörünün 1. sütunu ($\boldsymbol{M_1}$) MCV katsayısını, 2. sütun ($\boldsymbol{M_2}$) ALKFOS katsayısını, 3. sütun ($\boldsymbol{M_3}$) SGPT 'yi, 4. sütun ($\boldsymbol{M_4}$) SGOT 'yi, 5. sütun ($\boldsymbol{M_5}$) GAMMAGT 'yi ve 6. sütun ($\boldsymbol{M_6}$) İçecekler 'i göstermektedir.

Karaciğer değişkenlerinin kombinasyonu cinsinden Karaciğer hastalığı sınıflandırma problemine uygulanan çoklu doğrusal regresyon modelinin denklemi denklem 3'te verilmiştir.

$$\boldsymbol{y = M_0 + M_1 MCV + M_2 ALKFOS + M_3 SGPT + M_4 SGOT + M_5 GAMMAGT + M_6 Icecekler} = \boldsymbol{M_0} + \sum_{i=1}^{k} \boldsymbol{M_i x_i} \tag{3}$$

Karaciğer değişkenlerinin kombinasyonu cinsinden Karaciğer hastalığı sınıflandırma problemine uygulanan çoklu quadratic regresyon modelinin denklemi denklem 4'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{y} &= \boldsymbol{M_0 + M_1 MCV + M_2 ALKFOS + \ldots + M_6 Icecekler} \\ &\boldsymbol{+ M_7 MCV^2 + M_8 . MCV . ALKFOS + M_9 . MCV . SGPT + \ldots} \\ &\boldsymbol{+ M_{12} . MCV . Icecekler + M_{13} ALKFOS^2} \\ &\boldsymbol{+ M_{14} ALKFOS . SGPT + \ldots} \\ &\boldsymbol{+ M_{17} ALKFOS . Icecekler + M_{18} SGPT^2 + \ldots} \\ &\boldsymbol{+ \ldots + M_{27} Icecekler^2} \end{aligned} \tag{4}$$

Karaciğer değişkenlerinin kombinasyonu cinsinden Karaciğer hastalığı sınıflandırma problemine uygulanan çoklu üstel regresyon modelinin denklemi denklem 5'te verilmiştir.

$$y = M_0 + M_1 e^{M_7 \mathrm{MCV}} + M_2 e^{M_8 \mathrm{ALKFOS}} + M_3 e^{M_9 \mathrm{SGPT}} + M_4 e^{M_{10} \mathrm{SGOT}} + M_5 e^{M_{11} \mathrm{GAMMAGT}} + M_6 e^{M_{12} \mathrm{Icecekler}} \quad (5)$$

Eşitlik 3, 4 ve 5'teki y değerleri karaciğer hastalığı değeridir. S_i, $0 \leq i \leq 6$, $0 < i < 27$ ve $0 \leq i \leq 12$ sırasıyla JAYA kullanılarak Eşitlik 3-6 için belirlenecek parametrelerdir.

Örnek olarak çoklu doğrusal formdaki maliyet fonksiyonu denklem 6'da verilmiştir.

$$J(Q) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (Y - X_i M^T)^2 \quad (6)$$

X, girdi kümesini, X_i ise i. hasta kaydındaki kayıtları temsil eder, Y ise etiket değerleridir. Veri kümesindeki hasta sayısı N 'dir. Bu çalışma, veri madenciliği parametre optimizasyonunu ele alarak, JAYA kullanarak model parametrelerini (S) tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın odak noktası, karaciğer hastalığının var olup olmadığını sınıflandırarak veriyi analiz etmektir.

Tablo 3. Model-1JAYA için JAYA algoritmasının aşamaları.

Adım 1	Veri kümesi tanıtılır ve xtrain, ytrain, xtest ve ytest olarak ayrılmıştır.
Adım 2	Popülasyon büyüklüğü (N), maksimum iterasyon sayısı (T) tanımlanmıştır. (Çalışmada N=30 ve T=50 alınmıştır.)
Adım 3	Popülasyon büyüklüğü kadar bir M matrisi üretilir. ($-5<M_0<5$ ve $-3<M_1, M_2 \ldots M_N<3$)
Adım 4	Amaç fonksiyonu Denklem 8 dikkate alınarak hesaplanır $J = \frac{1}{2}(M_0 + \sum_{i=1}^{k} y_i - M_i x_i)^2$ (7)
Adım 5	M matrisinin her satırı iyi ve kötü bireylerin konumu olarak belirlenerek amaç fonksiyonuna göre hesaplanır. İterasyon sayısına göre amaç fonksiyonunu minimize eden birey hesaplanır.
Adım 6	En düşük hata değerine (y) sahip ağırlık vektörü (x_{best}) ve en yüksek hata değerine sahip ağırlık vektörü (x_{worst}) bulunur ve

	saklanır.
Adım 7	En iyi ve en kötü bireye göre ağırlık vektörü Denklem 1'e göre yenilenir.
Adım 8	Yeni bireyin popülasyona eklenip eklenmeyeceğine karar vermek için uygunluk değerleri karşılaştırılır. Yeni bireyin uygunluk değeri eski bireyden daha küçükse, yeni birey popülasyona eklenir.
Adım 9	İterasyon tamamlanana kadar 5. adıma geri dönülür.

Doğrusal, karesel ve üstel formdaki modellere uygulanan JAYA yönteminin ürettiği katsayılar Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da gösterilmektedir.

Tablo 4. Model-1JAYA ile bulunan parametre ağırlıkları.

Parameter	**Ağırlık**
1(S_0)	2.981
HBG (S_1)	-1.407
RBC (S_2)	-1.485
MCH (S_3)	-1.446
WBC (S_4)	1.197
MCV (S_5)	-0.226
HCT (S_6)	-1.852

Tablo 5. Model-2JAYA ile bulunan parametre ağırlıkları.

Parametre	Ağırlık
1	1.955
MCV	1.272
ALKFOS	-0.915
SGPT	-1.703
SGOT	0.709
GAMMAGT	0.290
Icecekler	1.596
MCV^2	-4.007
MCV*x*ALKFOS	0.086
MCV*x*SGPT	-4.764
MCV*x*SGOT	4.211
MCV*x*GAMMAGT	1.662
MCV*x*Icecekler	-2.117
ALKFOS^2	-0.564
ALKFOS*x*SGPT	-1.726
ALKFOS*x*SGOT	1.850
ALKFOS*x*GAMMAGT	-3.283
ALKFOS*x*Icecekler	-1.335
SGPT^2	-3.654
SGPT*x*SGOT	3.124
SGPT*x*GAMMAGT	-1.9
SGPT*x*Icecekler	-4.676
SGOT^2	4.022
SGOT*x*GAMMAGT	3.06
SGOT*x*Icecekler	4.220
GAMMAGT^2	2.443
GAMMAGT*x*Icecekler	0.528
Icecekler^2	-2.890

Tablo 6. Model-3JAYA ile bulunan parametre ağırlıkları.

Parametre	Ağırlık
1	0.735
M_0	-2.943
M_1	0.615
M_3	2.442
M_4	-2.803
M_5	-1.918
M_6	0.987
M_7	-8.652
M_8	-6.728
M_9	-7.616
M_{10}	-8.431
M_{11}	-6.958
M_{12}	-2.468

5. DEĞERLENDİRME

Bu çalışma kapsamında, veri kümesi %70 eğitim, %30 test kümesi olarak ayrılmıştır. Sınıflandırma yöntemlerinin performansları, ROC analizi metrikleri denklem 7-10 kullanılarak karşılaştırılmıştır.

$$\textbf{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{7}$$

$$\textbf{Hassasiyet} = \frac{TP}{TP + FN} \tag{8}$$

$$\textbf{Özgüllük} = \frac{TN}{TN + FP} \tag{9}$$

$$\textbf{Kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \tag{10}$$

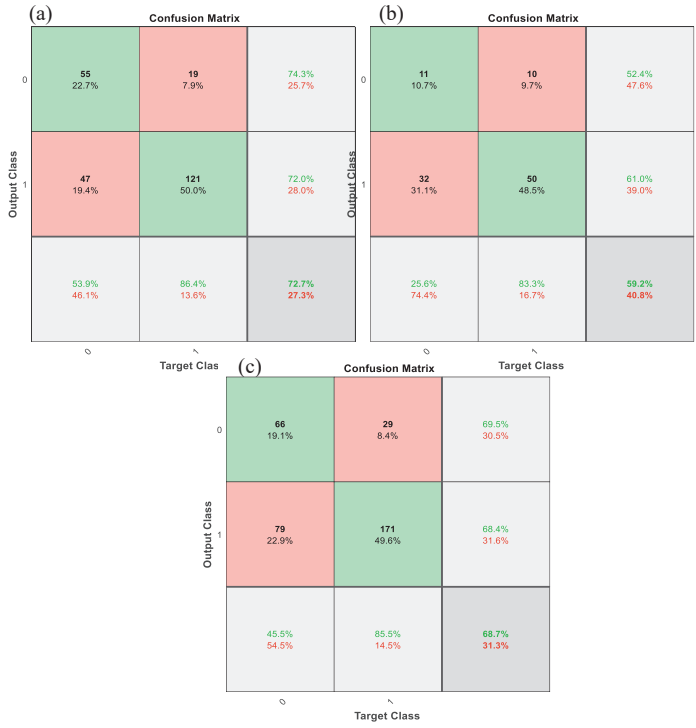
ROC analizi, çeşitli yöntemlerle elde edilen sonuçların performansını nesnel bir şekilde karşılaştırmanın yanı sıra, Duyarlılık, Özgüllük, Kesinlik, F1-Skoru, AUC ve doğruluk gibi metriklerle değerlendirme amacını

taşımaktadır.. Bu analiz, TP (Gerçek Pozitif) ve TN (Gerçek Negatif) gibi ROC parametreleri aracılığıyla karaciğer hastalığının doğru tahminini yansıtır. Diğer taraftan, FP (Yanlış Pozitif) ve FN (Yanlış Negatif), sınıflandırma sonuçlarının yanlış tahmin edilen durumları temsil eder. ROC analizi, bu temel parametreleri bir araya getirerek algoritma veya model performansının genel etkinliğini değerlendirmek için güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu metrikler, bir modelin karaciğer hastalığını tespiti konusundaki duyarlılığını, özgüllüğünü, doğruluğunu ve diğer performans ölçütlerini anlamak için sağlam bir temel sunar. Bu sayede, farklı algoritmalar veya modeller arasındaki karşılaştırmalar objektif bir şekilde yapılabilir, ve karaciğer hastalığının sınıflandırılmasıyla ilgili daha kapsamlı bir bakış elde edilebilir.

6. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu çalışma, karaciğer hastalığını sınıflandırmak amacıyla JAYA optimizasyon algoritmasının kullanılmasına odaklanmaktadır. JAYA yöntemi, doğrusal, ikinci dereceden ve üstel modelleri içeren Tablo 2'de belirtilen modeller kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirmiştir. Bu modellerin performansları karşılaştırılmıştır. İki farklı modelin performansı detaylı bir şekilde incelenmiş, ROC eğrileri ve karışıklık matrisleri her üç model için ayrı ayrı sunulmuştur. JAYA algoritması tarafından üretilen karışıklık matrisleri, Model-1, Model-2 ve Model-3 için Şekil 1-3'te belgelenmiştir. Elde edilen matrisler üzerinden ROC performans değerleri hesaplanmıştır, bu sayede her üç modelin sınıflandırma yetenekleri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. ROC analizi, kullanılan modellerin duyarlılık, özgüllük, doğruluk ve diğer performans metrikleri açısından karşılaştırılmasına imkan tanımıştır. Bu çalışma, karaciğer sınıflandırması alanında JAYA optimizasyon algoritmasının etkinliğini değerlendirmek adına önemli bir yaklaşım sunmaktadır.

Şekil 1 : Model-1JAYA'nın konfüzyon matrisi;
(a) Eğitim setinin konfüzyon matrisi, (b) Test setinin kofüzyon matrisi, (c) Tüm verinin konfüzyon matrisi



Şekil 2 : Model-2JAYA'nın konfüzyon matrisi

(a) Test setinin konfüzyon matrisi, (b) Test setinin kofüzyon matrisi , (c) Tüm verinin konfüzyon matrisi

Şekil : Model-3JAYA'nın konfüzyon matrisi
(a) Test setinin konfüzyon matrisi, (b) Eğitim setinin kofüzyon matrisi , (c) Tüm verinin konfüzyon matrisi

Şekil 1'deki karışıklık matrisleri değerlendirildiğinde Model-1JAYA ile test veri seti ile toplamda 94 hastanın, eğitim veriseti ile toplamda 43, bütün verisetiyle yapılan testte toplamda 137 hastanın doğru sınıflandırılamadığı görülmüştür. Şekil 2'deki karışıklık matrisleri değerlendirildiğinde Model-2JAYA ile test veri seti ile toplamda 66 hastanın, eğitim veriseti ile toplamda 42, bütün verisetiyle yapılan testte toplamda 108 hastanın doğru sınıflandırılamadığı görülmüştür. Model-3JAYA ile test veri seti ile toplamda 62 hastanın, eğitim veriseti ile toplamda 37, bütün verisetiyle yapılan testte toplamda 99 hastanın doğru sınıflandırılamadığı görülmüştür.

Tablo 4, üç farklı modelin test edilmesi sonucunda yapılan ROC performans analizlerini sunmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek başarı

oranı %71.84 doğruluk, %71.23 kesinlik, %86.67 hassasiyet, %51.56 özgüllük ile Model-1JAYA'dan elde edilmiştir.

Tablo 6. ROC performans analizleri.

Model İsmi	Doğruluk	Kesinlik	Hassasiyet	Özgüllük
Model-1JAYA	0.5825	0.5895	0.9333	0.0930
Model-2JAYA	0.5922	0.6098	0.8333	0.2558
Model-3JAYA	0.6408	0.6575	0.8000	0.4186

Bu çalışmada, karaciğer hastalığına ait parametreler arasındaki ilişkiyi daha etkili bir şekilde modelleyebilmek amacıyla doğrusal, karesel ve üstel senaryolarda çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde, JAYA metodu, her üç senaryo üzerinde kullanılan farklı modellerle detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan araştırmada, model karmaşıklığı arttıkça sınıflandırma başarısının da arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, parametreler arasındaki ilişkinin ve modelin karaciğer hastalığı sınıflandırma problemine katkısının önemli olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, parametreler arasındaki ilişkinin ve modelin karaciğer hastalığı sınıflandırma problemine olan katkısının önemine işaret etmektedir. Bu bulgular, karaciğer hastalığına dair daha iyi tahminler yapabilmek adına model karmaşıklığının göz önünde bulundurulmasının gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu çalışma, karaciğer sınıflandırma probleminin daha etkili bir şekilde çözülmesine yönelik gelecekteki araştırmalara da ışık tutabilecek önemli bir katkı sunmaktadır.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada JAYA yöntemi, karaciğer hastalığı ile ilgili Kaggle'dan alınan bir veri setinin 6 farklı bileşenini ve bunlara bağlı hastalık sonuç bilgilerini içeren bilgileri sınıflandırmak amacıyla kullanılmıştır. Üç farklı model olan doğrusal, karesel ve üstel modeller üzerinde test edilen algoritmalar, elde

edilen sonuçlarla değerlendirilmiştir. Yapılan tahminleme sürecinde, hedeflenen çıktılara başarıyla ulaşılmıştır. Veriler, doğrusal modeller üzerinde yapılan testler sonucunda %58.25, karesel model üzerinde yapılan testler sonucunda %59.22 ve üstel modelle yapılan testler sonucunda %64.08 doğrulukla karaciğer sınıflandırmasındaki performanslarını ortaya koymaktadır. Bu önerilen modellerin sınıflandırıcı performanslarının literatüre olumlu bir katkı sağlayacağına inanıyoruz.

KAYNAKÇA

1. Rabbi M.F., Hasan S.M.M., Champa A.I., AsifZaman M., Hasan M.K., Prediction of liver disorders using machine learning algorithms: a comparative study, in *2020 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technology (ICAICT)*, IEEE, 2020, 111–116.

2. Regeneration, https://www.medicalnewstoday.com/articles/305075#regeration. Accessed: Dec. 10, 2023. [Online]. Available: https://www.medicalnewstoday.com/articles/305075#regeration.

3. Liver desease, https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/liver-problems/symptoms-causes/syc-20374502. Accessed: Dec. 10, 2023. [Online]. Available: https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/liver-problems/symptoms-causes/syc-20374502

4. Arumugam K., Naved M., Shinde P.P., Leiva-Chauca O., Huaman-Osorio A., Gonzales-Yanac T., Multiple disease prediction using Machine learning algorithms, Materials Today: Proceedings, 80, 3682–3685, 2023.

5. Manne R., Kantheti S.C., Application of artificial intelligence in healthcare: chances and challenges, Current Journal of Applied Science and Technology, 40 (6), 78–89, 2021.

6. Prabhu P., Selvabharathi S., Deep belief neural network model for prediction of diabetes mellitus, in *2019 3rd international conference on imaging, signal processing and communication (ICISPC)*, IEEE, 2019, 138–142.

7. Dörterler S., Dumlu H., Özdemir D., Temurtaş H., Melezlenmiş K-means ve Diferansiyel Gelişim Algoritmaları ile Kalp Hastalığının Teşhisi, in *International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences içinde (ss. 1840-1844). Konya*, 2022.

8. Park C., Took C.C., Seong J.-K., Machine learning in biomedical engineering, Biomedical Engineering Letters, 8, 1–3, 2018.

9. Seo H. *et al.*, Machine learning techniques for biomedical image segmentation: an overview of technical aspects and introduction to state-of-art applications, Medical physics, 47 (5), e148–e167, 2020.

10. Haque M.R., Islam M.M., Iqbal H., Reza M.S., Hasan M.K., Performance evaluation of random forests and artificial neural networks for the classification of liver disorder, in *2018 international conference on computer, communication, chemical, material and electronic engineering (IC4ME2)*, IEEE, 2018, 1–5.

11. Sug H., Improving the prediction accuracy of liver disorder disease with oversampling, in *Proceedings of the 6th WSEAS international conference on Computer Engineering and Applications, and Proceedings of the 2012 American conference on Applied Mathematics*, 2012, 331–335.

12. YAĞMUR N., ÜÇ BOYUTLU ENGELLİ KÜBİK BİR ORTAMDA GENETİK ALGORİTMA İLE ROBOT YOL PLANLAMASINDA EN KISA YOL BULMA

13. Yagmur N., Dag İ., TEMURTAŞ H., A New Computer-Aided Diagnostic Method for Classifying Anemia Disease: Hybrid Use of Tree Bagger and Metaheuristics, 2023.

14. Dritsas E., Trigka M., Supervised machine learning models for liver disease risk prediction, Computers, 12 (1), 19, 2023.

15. Md A.Q., Kulkarni S., Joshua C.J., Vaichole T., Mohan S., Iwendi C., Enhanced Preprocessing Approach Using Ensemble Machine Learning Algorithms for Detecting Liver Disease, Biomedicines, 11 (2), 581, 2023.

16. Behera M.P., Sarangi A., Mishra D., Sarangi S.K., A Hybrid Machine Learning algorithm for Heart and Liver Disease Prediction Using Modified Particle Swarm Optimization with Support Vector Machine, Procedia Computer Science, 218, 818–827, 2023.

17. Kumari S., Mitawa G., Liver Cancer Identification Grid Search RFC Model using Machine Learning, International Journal of New Practices in Management and Engineering, 12 (1), 1–5, 2023.

18. Amin R., Yasmin R., Ruhi S., Rahman M.H., Reza M.S., Prediction of chronic liver disease patients using integrated projection based statistical feature extraction with machine learning algorithms, Informatics in Medicine Unlocked, 36, 101155, 2023.

19. Suryani I., Harafani H., Ispandi I., Buani D.C.P., Siahaan F.B., Improving machine learning performance using exponential smoothing for liver disease estimation, in *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing, 2023.

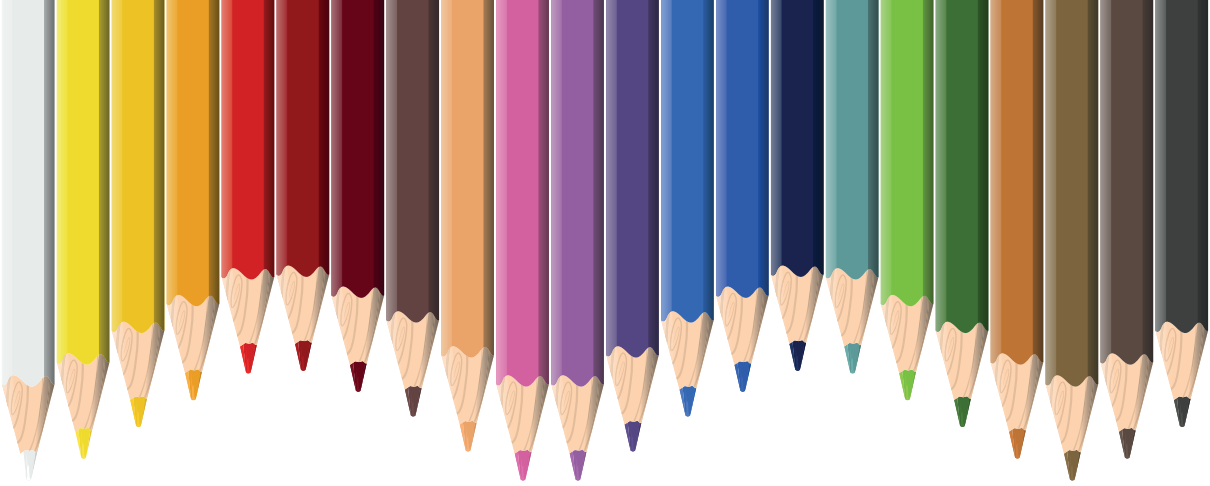
20. Gavgani A.M., Dogrusoz Y.S., Noise reduction using anisotropic diffusion filter in inverse electrocardiology, in *2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, IEEE, 2012, 5919–5922.

21. Masuda Y., Foruzan A.H., Tateyama T., Chen Y.W., Automatic liver tumor detection using EM/MPM algorithm and shape information, in *The 2nd International Conference on Software Engineering and Data Mining*, IEEE, 2010, 692–695.

22. Häme Y., Pollari M., Semi-automatic liver tumor segmentation with hidden Markov measure field model and non-parametric distribution estimation, Medical image analysis, 16 (1), 140–149, 2012.

23. Rao R., Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems, International Journal of Industrial Engineering Computations, 7 (1), 19–34, 2016.

24. Ergun U., Tayfun D., Estimating Electric Energy Consumption in Turkey Using Artificial Neural Networks Optimized with Jaya Algorithm, 2020.



Bölüm 9

TÜRKİYE'DEKİ UYGUN MALİYETLİ BEYİN-BİLGİSAYAR ARAYÜZ (BBA) SİSTEMLERİNİN DEĞERLENDİRMESİ

Sefa AYDIN[1], Mesut MELEK[2], Levent GÖKREM[3]

1 Gümüşhane Üniversitesi, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Gümüşhane / Turkey, e-mail: sefa.aydin@gumushane.edu.tr, ORCID:0000-0001-9965-2903

2 Gümüşhane Üniversitesi, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Gümüşhane / Turkey, e-mail: mesutmelek@gumushane.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7152-7788

3 Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi University, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Tokat / Turkey, e-mail: levent.gokrem@gop.edu.tr, ORCID:0000-0003-2101-5378

I. GİRİŞ

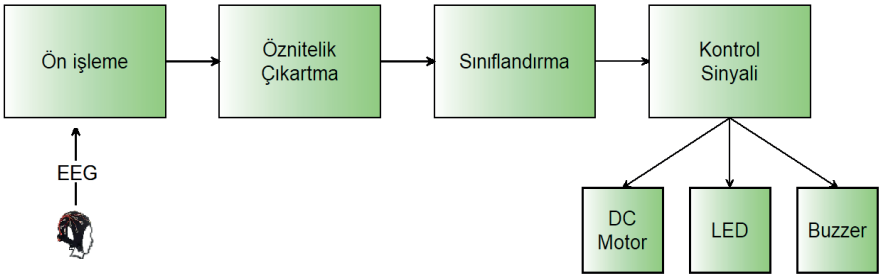
Günümüzde, bireylerin yaşam kalitesini olumsuz etkileyen birçok sağlık problemi vardır. Bu sağlık problemlerinden bir tanesi tıbbi olarak Parezi olarak adlandırılan ve halk arasında Felç olarak bilinen kişinin hareket yeteneğini kaybetmesi durumudur. Kısaca felç, omur ilikte yaralanma veya sinirsel bir rahatsızlık oluşması durumunda, vücudun herhangi bir bölümünde güç kaybı ya da tamamen kas kontrol kaybı gerçekleşmesi olarak tanımlanabilir. Bu durumdaki bireyler, beyinsel faaliyetleri sağlıklı olmasına rağmen, iletim ve sinirsel rahatsızlıklar sonucunda yatağa bağlı olmakta ve günlük ihtiyaçlarını karşılayamamaktadır. Felçli bireylerin günlük ihtiyaçlarını karşılayabilmeleri için çevre ile iletişim kurabilmelerini sağlayan İnsan Makine Arayüz (İMA) sistemleri geliştirilmiştir.

İnsan vücudundaki biyo-potansiyel sinyalleri kullanan İMA sistemlerinin temelini Beyin Bilgisayar Arayüz (BBA) sistemleri oluşturmaktadır. Beyindeki nöral sistemler 3 kısımdan meydana gelir; reseptörler (algılayıcılar), sinir ağı (iletim ve çıktı) ve efektörler (çıktıya tepki). Beyin yüzeyinde bulunan nöronlar sürekli şekilde etkindirler. Nöronlar arasındaki aktivite sonucunda meydana gelen ritimler frekans değerine göre gruplandırılmaktadır [1]. Bu gruplar; alfa bandı, beta bandı, teta bandı, delta bandı ve gama bandı olarak isimlendirilmiştir. Delta dalgaları frekans aralığı 0.5-4Hz aralığındaki dalgalardır. Grup içerisindeki en yüksek genliğe sahip ve en yavaş dalgadır. Bu dalga türü 1 yaşına kadar bebeklerde ve derin uyku durumunda yetişkin bireylerde görülmektedir [2]. Teta Dalgaları 4-7Hz aralığındaki dalgalar olup hafif uyku ve rahatlama durumlarında gözlemlenir. Alfa dalgaları 7-12Hz aralığındaki dalgalardır gözleri kapatma ve rahatlama ile ilişkilendirilmiştir. Beta dalgaları 12-30Hz aralığında gözlemlenir. Telaş, endişe durumlarında baskındır. Aynı zamanda matematik problemleri çözen bireylerde yüksek olduğu gözlemlenmiştir [3]. Gama dalgaları ise 30Hz'in üzerinde olan dalgalardır. En düşük genliğe sahip olan bu dalgalar nörolojik hastalıkların tespitinde önemli rol oynamaktadır. Algılama, tanıma vb. durumlar ile ilişkilendirilir [4]. Tanımlanan dalgaların genlik aralığı (μV) ve frekans aralığı (Hz) değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. EEG Dalga Bantlarının Özellikleri

Dalga ismi	**Frekans aralığı (Hz)**	**Genlik aralığı (μV)**
Delta (δ)	0.5-4	1-120
Teta (θ)	4-7	20-100
Alfa (α)	7-12	30-50
Beta (β)	12-30	5-30
Gamma (γ)	30+	Değişken

BBA sistemleri genellikle Elektroensefalografi (EEG) adı verilen, kişinin beyin sinyallerini kullanan ve cerrahi müdahale gerektirmeyen (non-invaziv) bir yöntem ile kullanılmaktadır. Bu yöntemde beyin sinyali alınan kişinin, beyin aktivitesine bağlı olarak sinyaller işlenmekte ve makinelere öğretilmektedir. Makineler tarafından yorumlanan sinyaller aracılığıyla hastanın bilgisayar, yatak, tekerlekli sandalye gibi birçok elektronik cihazı kontrol edebilmesi sağlanmaktadır. EEG yöntemini kullanan BBA sistemlerinde beyin ve bilgisayar arasında iletişim ve etkileşim kurmak için Görsel Uyarılmış Potansiyeller, Yavaş Kortikal Potansiyeller (YKP), Uyarılmış Potansiyellerin P300 bileşeni, Sinir Hücresi Aktivitesi (SHA), Zihni Görev Tepkisi, Çoklu Nöro-mekanizma ve Duyusal Motor Ritimleri (DMR') olmak üzere yedi farklı metot kullanılmaktadır. Bu yöntemler içerisinde en sık kullanılan yöntem Görsel Uyarılmış Potansiyel yöntemidir (GUP) [5]. GUP, kişiye bir takım ışık, resim vb. görsel uyaranlar gösterilmesi durumunda kayıt edilen EEG sinyallerine verilen addır [6]. GUP yönteminde frekans değeri 6Hz'in üzerine çıktığında Durgun Durum Görsel Uyaran Potansiyel (DDGUP) durumu oluşur. DDGUP tabanlı sistemde beyin sinyalleri alınmak istenilen kişiye bir monitör veya bir başka ışık kaynağı aracılığıyla belirli frekans değerlerinde yanıp sönen görsel uyaranlar gösterilir. İşlemin uygulandığı denek kişi farklı frekans değerlerine sahip bu uyaranlardan bir tanesini seçip odaklandığında beynin görme işlemi görevini üstlenen oksipital bölgede uyaran ile aynı frekansta salınım içeren örüntüler meydana gelir. Bu örüntüler araştırmacılar tarafından dijital filtreleme, öznitelik çıkartma aşamalarından geçirildikten sonra farklı makine öğrenme metotları ile sınıflandırılır. Sinyal işleme sonucunda elde edilen çıktı ile bir komut ilişkilendirildiğinde elektronik sistemler gibi birtakım sistemlerin kontrolü mümkün hale gelmektedir [7]. EEG kayıt, sinyal işleme ve çıktı ile cihaz kontrol aşamalarını gösteren temsili şema Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. EEG sinyal kayıt, işleme ve kontrol şeması

Beyin-Bilgisayar Arayüzü (BBA) sistemleri, genellikle Tıp, Nöro-pazarlama ve reklam, eğitim ve öz-düzenleme, oyunlar ve eğlence, güvenlik ve kimlik doğrulama, Nöro-ergonomi ve akıllı ortam gibi toplamda 6 araştırma alanında kullanılmaktadır [8].

Tıbbi alanda, BBA sistemleri çeşitli uygulamalarla ilişkilendirilebilir; bunlar, önleme, rehabilitasyon, tespit ve teşhis gibi alanları içerir. Pazarlama alanı, BBA çalışmalarından faydalanan bir diğer alandır. Vecchiato ve diğerleri [9], ticari ve politik alanlarda EEG değerlendirmesinin kullanımının faydalarını açıklamıştır. Benzer şekilde, nöro-pazarlama alanında araştırmacılar EEG sinyallerini kullanarak çalışmalar yürütmüşlerdir. Nöro-geribesleme, insan beyninin aktivite modülasyonunu hedefleyerek beyin performansını arttırmayı amaçlayan bir yaklaşımdır. Eğitim sistemlerinde, EEG sinyalleri çalışılan ve öğrenilen bilgilerin netlik derecesini belirlemek için kullanılabilir. Burada sistem, her bir kullanıcıyla etkileşime geçerek en uygun yaklaşımı belirleyebilir. Eğlence ve oyun uygulamaları, medikal olmayan BBA pazarını oluşturmuştur. Örneğin, Royer ve ekibi [10] , 2B veya 3B sanal dünyadaki bir helikopterin herhangi bir noktaya uçması gibi çeşitli oyunlarla BBA sistemlerini zevkli hale getirmişlerdir. Örneğin, oyuncular, iki BBA aracılığıyla işbirlikçi veya rekabetçi bir futbol maçına katılabilirler; sol veya sağ el hareketlerini hayal ederek gol atabilirler. Güvenlik sistemleri, bilgi, nesne veya biyometrik tabanlı kimlik doğrulamayı içerir. Bilişsel biyometri veya elektrofizyoloji gibi beyin sinyalleri, sadece biyo-işaretleri kullanan kimlik bilgi doğrulama sistemlerinde de kullanılabilir ve bu sistemlerin zayıflıkları için bir çözüm sunabilir [11]. Ayrıca, engelli bireyler ve fiziksel hastalıkları olan kişiler için de büyük bir katkı sağlanabilir.

BBA sistemlerinin temel amaçlarından biri, engelli bireylerin yaşamlarını kolaylaştırmak ve günlük ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmasıdır. Özellikle fiziksel engelli veya felçli bireyler için, BBA sistemleri akıllı evlerden işyerlerine ve ulaşım araçlarına kadar çeşitli akıllı ortamlarda kullanılarak, daha fazla güvenlik, konfor ve fizyolojik kontrol sunabilir. Bu teknoloji, engelli insanların hayatlarını iki farklı şekilde destekleyebilir. Birincisi, kullanıcının durumunu otomatik olarak algılayan ve ona göre tepki veren sistemlerdir. Örneğin, kullanıcının ihtiyaçlarına göre ışıkları kontrol eden veya ortam sıcaklığını ayarlayan otomatik sistemler bu kategoriye örnektir. İkinci olarak, kullanıcının isteğine bağlı olarak çalışan sistemler bulunmaktadır. Bu tip sistemler, kullanıcının bilinçli olarak kontrol ettiği özel cihazlar aracılığıyla çalışabilir. Örneğin, beyin sinyalleriyle tekerlekli sandalyeyi hareket ettirebilme veya belirli bir eylemi gerçekleştirebilme imkanı sağlayabilir. Bu yöntemlerle, BBA sistemleri engelli bireylerin günlük yaşamlarını daha bağımsız ve yönetilebilir hale getirebilir. Bu teknoloji, engelli insanların yaşam kalitesini artırmak ve günlük aktivitelerini daha kolay ve etkili bir şekilde gerçekleştirmelerine yardımcı olmak için büyük bir potansiyele sahiptir.

Beyin sinyallerini kullanmayan diğer sistemler insan vücudunda bulunan Elektrookülografi (EOG), Elektromiyografi (EMG) vb. biyo-potansiyel sinyalleri kullanan sistemlerdir. Vücudun farklı bölgelerinden kaydedilen bu sinyaller de felç gibi sinirsel rahatsızlıklara sahip kişilerin dış çevre ile etkileşim

kurması için kullanılmaktadır [12]. EMG, kişinin kol, bacak gibi uzuvların hareket etmesi sırasında meydana gelen gerilim değişimlerinin kaydedilmesi yöntemidir. Tamamen felçli bireyler için çok tercih edilen bir yöntem değildir. EOG ise, göz hareketlerinden kaynaklanan voltaj dalgalanmalarının ölçüldüğü yöntemdir [13]. EOG tabanlı İMA sistemleri, çoğu felçli insan gözlerini hareket ettirebildiği için avantajlı bir teknolojidir. Göz hareketleri, kullanıcıların isteğine bağlı ve rahat bir aktivitedir [14]. EOG sinyali, 15-200 μV arasında değişen sinyal genliği ile kornea-retina potansiyel farkının bir ölçüsüdür. Yeterli bir kalibrasyon prosedürü kullanılarak, sinyal dikey yönde 2 derecelik bir aralık ve yatay yönde 1.5 derecelik bir aralıkla göz küresi açısal konumuna eşlenebilir [15]. Göz hareketlerini yatay ve dikey olarak kaydetmek için, yüzey elektrotları gözlerin üst, alt, sol ve sağ bölgelerine yerleştirilir. Gözlerin üstüne ve altına yerleştirilen elektrot çifti gözün dikey hareketini ölçmek için, gözlerin sağına ve soluna yerleştirilen elektrot çifti ise gözlerin yatay hareketini ölçmek için kullanılır. Bakış sola kaydırıldığında, gözün sol tarafının elektrik alanı pozitif, karşı taraf ise negatif olmaktadır [16].

Günümüzde İMA sistemlerinden daha üst seviyelerde yararlanabilmek için çeşitli sinyal kaydetme yöntemleri birleştirerek hibrit sistemler oluşturulmuştur. Hibrit sistemler genellikle EEG yönteminin diğer biyo-potansiyel sinyaller ile birleşiminden meydana getirilmektedir. Hibrit Beyin Bilgisayar Arayüz (HBBA) sistemleri olarak adlandırılan bu sistemlerin oluşturulmasındaki amaç İMA'ların Doğruluk Oranının (DO) ve Bilgi Aktarım Oranının (BAO) arttırılmasıdır.

Geliştirilen EEG tabanlı BBA sistemlerinin büyük bir bölümü hasta bireylere fayda sağlamayı hedeflemektedir. Ancak bu sistemlerin bazı dezavantajları da vardır; bunlar: Sistem araştırma ve testlerinin sadece laboratuvar ortamında yapılması ve sinyal işleme ve kontrol sisteminin EEG tabanlı BBA sistemlerinin temel iki parçası olmasına rağmen çoğunlukla kontrol sisteminin uygulanmaması ve sadece bir sınıflandırıcı sonucu ile çalışmanın sonlandırılması olarak sıralanabilir. Öte yandan, sistem kullanıcılarının hayat boyu kullanmak zorunda olduğu bu sistemlerin konforunun yeteri kadar önemsenmemesi oldukça göze batmaktadır. Sistemlerin konforunu etkileyen parametreler ise, bu şekilde özetlenebilir; çevrimdışı ve yavaş çalışıyor olması, Maliyetlerinin yüksek olması, elektrotlar ve deri arasındaki empedansı düşürmek için jel kullanılma zorunluluğu, kaydedilen sinyalin kablo ile bir bilgisayara aktarılma zorunluluğu, ve çok sayıda elektrot kullanılması, sistemlerin kullanıcı için özellikle uzun süreli kullanıma uygun olmaması [17].

Literatür incelendiğinde [18], Durgun Durum Görsel Uyaran Potansiyel (DDGUP) yönteminin BBA sistemlerinde sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. DDGUP yöntemi kabaca, farklı frekans değerlerinde yanıp sönen görsel uyaranları (ışık vb.) odaklanarak izleyen sistem kullanıcısının, izleme esnasında beyninde meydana gelen salınımların kaydedildiği yöntemdir. Kaydedilen

sinyaller işlenerek, elde edilen frekans değerine bağlı olarak atama yoluyla iş çıktısı üretilmekte ve böylece kullanıcının dış dünyada bulunan herhangi bir cihazı kontrol edebilmesi sağlanmaktadır. Bu yöntemde sistem kullanıcısı sürekli olarak farklı frekans değerlerinde yanıp sönen uyaranlara odaklanarak bakmak zorundadır. Yine yapılan çalışmalar incelendiğinde [19] sistem kullanıcılarının görsel uyaranlara sürekli ve uzun süreli bakmalarına bağlı olarak zaman içerisinde göz problemleri yaşadıkları görülmüştür.

Tamamı görsel uyaran prensibi (GUP) ile çalışan bu sistemlerin kullanımı, kullanıcının göz sağlığına zararlı olmakla birlikte, uzun süreli kullanımlar için uygun değildir. Ayrıca bu sistemler, uyaranların frekans değerlerini ayırt edemeyecek seviyede mevcut göz sağlığı bozukluğu olan hastaların kullanımı içinde uygun değildir. Yine yapılan çalışmalar incelendiğinde [14] alanda yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu laboratuvar ortamında, test aşamasında kalmakta ve herhangi bir ürün ortaya konulmamaktadır. Dolayısıyla yapılan çalışmaların çoğunluğu kağıt üzerinde kalmakta ve fayda sağlamayı hedeflediği kitlenin kullanımına sunulamamaktadır. Alanda dikkat çeken bir diğer problem ise İMA sistemlerinin kullanıldığı çalışmaların kullanıcı konforu odaklı olmamasıdır.

II. EEG cihazi

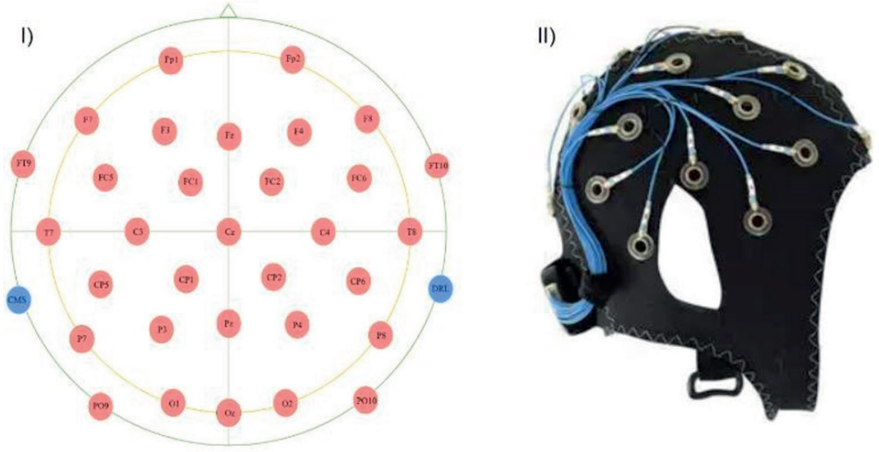
BBA sistemlerinde veri kaydı için, giyilebilir, kablosuz, düşük maliyetli ve konfor seviyesi yüksek EEG cihazı seçimi hedeflenmektedir. Jiang vd. [20] yapılması amaçlanan bir çalışma için EEG cihazı seçiminde; cihazın kanal sayısının, maliyetinin, kurulum süresinin, kolay kullanılabilirliğinin ve cihazın kullanılacağı BBA uygulamasının türünün etkili faktörler olduğunu söylediler. Värbu vd. [5] ise yapılan çalışmalarda EEG sinyal kaydı için Emotiv, Quik-Cap ve MindWave EEG cihazlarının sıklıkla kullanıldığını bildirdiler. Ayrıca araştırmacılar cihazların 2009 ve 2020 yılları arasında yapılan yayınlarda ki kullanım sıklığını aşağıda verilen Tablo 2.'deki gibi sıraladılar.

EEG Cihazı	**(%)**
Emotiv EPOC	40%
Quik-Cap	9%
MindWave	8%
Electrodes	5%
Easycap	4%
ActiCAP	3%
Active Two	3%
Enobio	3%
MyndPlay Brain BandXL	3%
Diğerleri	22%
Çoklu cihazlar	1%

Tablo 2. EEG cihazlarının 2009-2020 yılları arasında literatürde kullanım oranları

Tablo 2 incelendiğinde Emotiv firmasına ait EEG cihazlarının alanda yapılan çalışmalara büyük oranda öncülük etmektedir. Firmanın en gelişmiş cihazı olan Emotiv EPOC FLEX EEG cihazı 32 kanallıdır ve cihazda 2 adet referans elektrot bulunmaktadır. Bunlar Common Mode Sense (CMS) olarak isimlendirilen aktif elektrot ve Driven Right Leg (DRL) olarak adlandırılan pasif elektrotlardır. Ayrıca tüm elektrot dizilimleri uluslararası 10/20 sistemine göre düzenlenmiştir. Cihaz ile kaydedilen ham veriler kablosuz teknoloji kullanılarak ana makineye aktarılabilmektedir. Baş ölçülerine göre ayarlanabilen cihazın elektrot dizilimi (I) ve dış görünümü (II) şekil 2'de verilmiştir.

Şekilde 2'de gösterilmiş olan 32 kanallı Emotiv EPOC FLEX EEG cihazı yaklaşık 12 saate kadar aktif kullanım sağlayan lityum piller ile beslenmektedir. Cihaz kablosuz kullanım olanağı sağlayan, uygun maliyetli, değişken başlık ölçülerine ayarlanabilir ve kullanımı kolay bir cihazdır. Emotiv EPOC FLEX cihazının hazırlanma ve kurulum süresinin en fazla 30 dakika olması sebebiyle de diğer cihazlara oranla büyük avantaj sağlamaktadır. Aynı zamanda cihazda elektrotlar ile kafa derisi arasındaki empedansı azaltmak için özel bir salin (tuzlu su) solüsyonu kullanılmaktadır. Tuzlu solüsyonunun kullanılması verilerin alınmasından sonra denek bireyin duş almasını gerektirmemekte ve basit bir şekilde temizlenmesi açısından da büyük kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Emotiv EPOC FLEX cihazı kullanıcıya 16 bit çözünürlük ve 128 SPS veya 256 SPS imkanları sunmaktadır. Yapılan çalışmalar ve literatür incelendiğinde yapılacak bir çalışma için bir EEG cihazının seçiminde, cihazın kanal sayısının, maliyetinin, kurulum süresinin, kolay kullanılabilirliğinin ve cihazın kullanılacağı EEG tabanlı BBA uygulamasının türünün etkili faktörler olduğu görülmüştür.



Şekil 2. (I) Emotiv EPOC FLEX başlığın elektrot dizilimi ve (II) dış görünümü

III. Ulusal çalışmalar

a) Araştırma çalışmaları

Ülkemizde ucuz maliyetli, kullanışlı ve taşınabilir olan Emotiv firmasına ait EEG cihazları ile yapılan akademik çalışmalar aşağıda Tablo 3'de gösterilmiştir. Çalışmalar dergipark.org.tr ve webofscience.com internet adreslerinden "Emotiv, Emotiv EPOC ve EPOC" terimleri ayrı ayrı kullanılarak yapılan tarama sonucunda elde edilmiştir. Ülkemizde yapılan çalışmalar incelendiğinde BBA sistemleri üzerine yapılan çalışmaların yetersiz olduğu görülmektedir. Ayrıca yapılan çalışmaların büyük bölümü test aşamasında bırakılmış olup herhangi bir ürün ortaya koyulmamıştır. Alanda yapılan ulusal çalışmalar sınırlı sayıda olduğu için uluslararası ürün ve yöntem rekabeti açısından gerekli yol kat edilememiştir. BBA sistemlerinin maliyetli sistemler olması da çalışmaların yeterince gerçekleştirilememesine sebep olmaktadır. Tablo 3 incelendiğinde mevcut çalışmaların yeni yöntemler önermediği, çalışmaların test aşamasında kalarak ortaya bir ürün getirmediği görülmektedir.

Tablo 3. Ülkemizde Emotiv EEG başlıklar ile yapılan çalışmalar

EEG Tabanlı BBA Sistemlerindeki Önemli Parametreler					**Sinyal İşleme/Sınıflandırma ve Sonuç**				
Çalışma Referansı	**Kullanılan Cihaz**	**Denek Sayısı**	**Kullanılan Yaklaşım**	**Gerçek zamanlı veya Çevrimdışı**	**Kullanılan Filtre**	**Kullanılan Öznitelik Yöntemi**	**Kullanılan Sınıflandırma Yöntemi**	**Bilgi Aktarım Hızı (bit/min.)**	**Doğruluk Oranı (%)**
Sözer ve Fidan (2019) [21]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	5	DDGUP	Çevrimdışı	Sonsuz dürtü yanıtlı (IIR) 5–23Hz bant geçiren fitre	Güç Spektral Yoğunluğu Analizi	Kakonik Korelasyon Analizi (KKA)	68.8	82.2
Gümüş vd. (2022) [22]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	15	EEG Spektral Değişiklik Analizi	Çevrimdışı	-	Fourier Dönüşümü, Güç Spektral Analizi	-	-	-
Erat ve Onay (2021) [23]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	12	EEG Spektral Değişiklik Analizi	Çevrimdışı	-	-	-	-	-
Uyulan vd. (2022) [24]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	44	EEG Spektral Değişiklik Analizi	Çevrimdışı	0.2-45Hz FIR yüksek geçiren filtre	Dalgacık Dönüşümü	Destek Vektör Makinesi	-	91
Şeker ve Özerdem (2017) [25]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	6	EEG Spektral Değişiklik Analizi	Çevrimdışı	0.5-45Hz Bant geçiren filtre ve 50Hz çentik filtre	Güç Spektral Yoğunluğu Analizi	-	-	-

Mıshchenko vd. (2017) [26]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	1	Motor İmgeleme	Çevrimdışı	-	Fourier Dönüşümü	Destek Vektör Makinesi	-	92.5
Alakuş ve Türkoğlu (2019) [27]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	28	EEG Spektral Değişiklik Analizi	Çevrimdışı	-	Ayrık Dalgacık Dönüşümü, Hjorth Parametreleri	İkinci Derece Destek Vektör Makinesi	-	65
Gökbulut Vd., (2019) [28]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	5	DDGUP	Gerçek Zamanlı	Birinci dereceden 5-40Hz bant geçiren filtre	Dalgacık Dönüşümü, Spektral Çözümleme	Kakonik Korelasyon Analizi	-	87
Şahin vd., (2022) [29]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	-	-	Çevrimdışı	-	-	-	-	-
Alan ve Karabatak (2020) [30]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	-	DDGUP	Çevrimdışı	-	-	k-en Yakın Komşu(KNN), Karar Ağaçları	-	98.25 83.54
Daşdemir vd. (2017) [31]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	25	DDGUP	Çevrimdışı	3.Derece Butterworth 0.16-43Hz bant geçiren	Ayrık Dalgacık Dönüşümü	Çok Katmanlı Perceptron ve Rastgele Ağaçlar	-	81.6 73.7
Güneç vd. (2021) [32]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	43	EEG Spektral Değişiklik Analizi	Çevrimdışı	1.Derece 1-49Hz bant geçiren filtre	Çoklu Frekans Analizi, Welch Metodu	Uzun Kısa Süreli Bellek Derin Öğrenme	-	96.1 89.6
Selvi vd. (2017) [33]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	1	DDGUP	Çevrimdışı	5. Derece Butterworth 0.3-3Hz bant geçiren filtre	Dalgacık Dönüşümü	-	-	-
Öztürk ve Yılmaz (2018) [34]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	1	Motor İmgeleme	Çevrimdışı	50Hz çentik filtre	Çarpıklık, Logaritma enerjisi entropisi, Shannon entropisi	Destek Vektör Makinesi	-	97.4
Yayık ve Kutlu (2017) [35]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	19	DDGUP	Çevrimdışı	3.Derece Butterworth 0.1-20Hz bant geçiren filtre	Vektör oluşumu	Aşırı Öğrenme Makinesi Çok katmanlı YSA K-en Yakın Komlu	-	99.1 99.7 99.8
Melek vd. (2020) [36]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	5	İbreler	Çevrimdışı	-	Güç Spektral Yoğunluğu, Hızlı Fourier Dönüşümü	Destek Vektör Makinesi	15.79	93.72
Sözer ve Fidan (2019) [21]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	1	DDGUP	Çevrimdışı	-	Hızlı Fourier Dönüşümü	Lineer Diskriminant Analiz, Karar Tabanlı Sınıflandırma		75.28 84.64
Selvi vd. (2018) [37]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	-	DDGUP	Çevrimdışı	-	-	-	-	-

Öztürk vd. (2018) [34]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	2	DDGUP	Gerçek Zamanlı	50Hz çentik filtre	Hızlı Fourier Dönüşümü	-	-	-
Kaya vd. (2018)[38]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	4	DDGUP	Çevrimdışı	-	Güç Spektral Yoğunluğu, Fourier Dönüşümü	Destek Vektör Makinesi	-	84.9
Filiz ve Arslan (2020)[39]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	6	DDGUP	Çevrimdışı	-	Güç Spektral Yoğunluğu	Kakonik Korelasyon Analizi	-	66.72
Saylam vd. (2014)[18]	Emotiv EPOC X 14 Kanallı	8	DDGUP	Çevrimdışı	1.Derece 15-30Hz bant geçiren filtre	Güç Spektral Yoğunluğu, Fourier Dönüşümü	-	-	-

b) Patent, faydalı model ve tescil çalışmaları

Beyin Bilgisayar Arayüz sistemleri ile ilgili yapılan patent/model çalışmaları http://www.tpe.gov.tr ve tr.espacenet.com web adreslerinden "beyin" terimi filtresiz şekilde kullanılarak taranmıştır.

6359589 patent numaralı buluşta Ronael [40], kişinin beyin sinyalleri EEG cihazı ile okunarak şifrelendikten sonra iletim kanalının diğer tarafına gönderen bir sistem geliştirdi. Sistemde İletilen bilgiler kanalın diğer tarafında bulunan bilgisayar aracılığıyla çözülmekte ve bu sayede kişinin EEG sinyalleri korunmuş bir şekilde farklı bir iletim kanalına aktarılmış olmaktadır.

Alanda 6545359 patent numarası ile Serap [41] yaptığı farklı bir çalışmada, kullanıcının dikkat seviyesini beyin dalgaları kullanarak ölçen ve nöro-geribesleme yapan nöro-kulaklık geliştirildi. Araştırmacılar kulaklığı tasarlarken: kafa bandı, gürültü engelleme kulaklık birimi, beyin dalgası algılama sensörü ve referans sensör kullandılar. Cihaz ile kullanıcıdan alınan sinyallerin dalga boylarına göre cihaz tarafından kişinin dikkat seviyesi belirlenmektedir.

6234127 numarası ile patentlenen bir diğer çalışmada ise Yücesan vd. [42] akıllı ev yönetmek için bir mobil haberleşme yöntemi geliştirdiler. Yöntem, mobil haberleşme abonelerinin EEG sinyallerini kaydettikten sonra, kaydedilen sinyalleri mobil ev istasyonuna iletmektedir ve ev ortamında kablosuz şekilde kontrol edilebilir gerekli cihazların kontrol edilmesini sağlamaktadır. Sistem kullanıcının beyin dalgalarına göre farklı çıktılar üretmektedir.

Başka bir çalışmada Mengiliğ ve Selova [43] 6159689 numarası ile patentini aldıkları bal makinelerinin beyin sinyalleri ile uzaktan kontrol edildiği bir sistem geliştirdiler. Sistemin amacı bal işleme makinelerinin beyin dalgaları kullanılarak uzaktan temassız bir şekilde kontrol edilmesini sağlamaktı. Sistem gövde, gövdeye konumlandırılmış bir motor ve EEG cihazından meydana geliyordu. Beyin sinyallerinin iletildiği bir elektronik kart kullanan araştırmacılar beyinden gelen alfa, beta ve gama dalgaları ile makinaları çalıştırdılar.

6291814 patent numaralı bir çalışmada, Vardar vd. [44] beyin dalgalarının kullanıldığı öğrenmeyi kolaylaştıran ve artırılmış gerçeklik gözlüğü ile entegre edilmiş bütüncül kolay öğrenme sistemi ve çalışma yöntemi geliştirdi. Araştırmacılar buluşu, kişinin öğrenmek isteyeceği materyale veya derslere, ulaştığı beta alfa teta ve delta beyin dalgalarını üreterek kişiye belirli süreler ile öğrenme süreci boyunca öğrenmek isteyeceği bilgileri kolayca aktarabilen öğrenmeyi kolaylaştıran beyin dalgalarının kullanıldığı sanal ve artırılmış gerçeklik gözlüğü ile entegre edilmiş bütüncül kolay öğrenme ve çalışma yöntemi şeklinde tanımladılar. Buluşta serverlara yüklenen dersler, kişi tarafından kulaklıktan dinlenirken aynı zamanda arttırılmış gerçeklik gözlüğü ile izlenmektedir. EEG cihazı tarafından beyin sinyalleri alınan kullanıcının, beyin dalgalarına göre kulaklık ve gözlük tarafından çıktı üretilmektedir. Örneğin alınan dalgalar teta dalgaları ise sistem kullanıcının yorgun olduğuna karar vermekte ve çıktı olarak arka fon olarak klasik müzik etkinleştirmektedir.

6350287 patent numaralı bir diğer çalışmada ise Sarıoğlu vd. [45] beyin dalgaları ile elektriksel cihazların uzaktan kontrol edilmesini sağlayan bir sistem geliştirdiler. Araştırmacılar ilk olarak EEG cihazı ile kişiden aldıkları beyin sinyallerini güçlendirerek filtreledi ve bir monitöre aktardılar. Sistem alıcı ve verici olmak üzere iki temel parçadan meydana getirdiler. Sistemin verici kısmı EEG sinyallerinin kayıt edilmesi ve işleme sokulması aşamalarını kapsarken, alıcı kısmı ise vericiden gelen filtre uygulanmış sinyalleri komuta çevirerek, elektronik bir cihazın kontrol edilmesi aşamalarını kapsıyordu.

Başka bir çalışmada ise (patent numarası:5729692) Aydın vd. [47] kontrol uygulamalarında kullanılmak üzere bir asenkron BBA geliştirdiler. Geliştirilen sistemde asenkron denetim algoritması ve dinamik durdurma algoritması kullanıldı. Asenkron denetim algoritması, kullanıcının sistemi kullanmak istediği durumları tespit ederek çıkış komutu üretilmesini sağlıyordu. Dinamik durdurma algoritması ise üretilen çıkış komutlarının tekrar sayısını otomatik olarak belirliyordu. Araştırmacılar bu algoritmaları mikrobilgisayar kullanarak çalıştırdılar. Sistem EEG sinyal kayıt birimi, kontrol modülü, çıkış birimleri ve web arayüzünden meydana geliyordu. Özetle, beyin sinyali kaydı aşamasında p300 paradigmasını kullanan araştırmacılar, elde ettikleri sinyalleri analiz ederek kullanıcının kontrol etmek istediği cihazı yönetebilmesini sağladı.

6250058 patent numaralı çalışmada buluş sahibi Yılmaz [48] çoklu katılımcı ortamları için bir karar destek sistemi geliştirdi. Sistemde, bir eğitimcinin belirli bir süre içerisinde eğitim verdiği esnada salonda bulunan kişilerin anlık dikkat ve motivasyon seviyesinin ortalama değeri anlık olarak hesaplanıyor ve ortalamanın altında kalan katılımcı sayısının artması durumunda eğitmeni uyaran çıktılar üretiliyordu. Sistem yapısı, sinyal alım aşamaları ve sinyal işleme ile ilgili bir bilgi verilmedi.

6239306 numaralı bir diğer çalışmada ise Mutlu [49] el ve kol uzuvlarını hareket ettiremeyen engelli bireylerin kullanabileceği otonom bir tekerlekli sandalye geliştirdi. Kullanıcı tarafından verilen hedeflere otonom olarak hareket eden donanım ve yazılımdan meydana gelen sistem, donanım olarak temelde kullanıcının beyin sinyallerini kullanıyordu. Haritalandırma algoritmaları kullanılan sistem güncel olarak çevre yolları tarayarak en kısa rotayı oluşturuyordu.

Alanda yapılan 5357839 patent numaralı çalışmada, Kaya vd. [50] beyin sinyalleriyle çalışan bir robotik el geliştirdiler. Robotik el, kol uzvunu kaybeden insanların ihtiyaçlarını karşılaması için motorlar sayesinde güç, tork ve pozisyon kontrolü yapılabilmesinin yanı sıra, parmak basıncını kontrol edebilen, bireyin düşünce altında verilerini analiz ederek EEG sinyallerini kullanabilmekteydi. Sistemde 14 kanallı Emotiv EPOC X EEG başlık kullanan araştırmacılar, motor imgeleme yöntemiyle elde edilen sinyalleri kablosuz şekilde bilgisayara kaydettiler. Kaydedilen sinyalleri gerçek zamanlı olarak filtreledikten sonra farklı öznitelik çıkartma yöntemleri uygulayan araştırmacılar elde ettikleri verileri makine öğrenme yöntemleri ile işleyerek kablosuz şekilde robotik ele aktardılar ve motorların kontrolünü sağladılar.

6768951 patent numarası ile Ak [51] yaptığı buluşta, iş sağlığı ve güvenliği alanında kullanılmak üzere, çalışan işçilerin, şoförlerin veya iş makinesi kullanıcılarının yorgunluk seviyesinin tespit edilmesi, belirli bir yorgunluk seviyesine ulaşıldığında çevre cihazların durdurulması ve durumla ilgili yetkili birimlere bilgi verilmesini sağlayan bir sistem geliştirdiler. Sistem kişinin ID numarasını okuduktan sonra EEG sinyalleri vasıtasıyla kişinin yorgunluk seviyesini tespit ederek, web servisi üzerinden bağlı olduğu mobil cihazlara göndermektedir. EEG cihazı ile ölçülen beyin dalgalarının mikrodenetleyiciye gönderildiği bu sistem de örneğin gelen dalga boyu teta ise röle aktif olarak cihazları devre dışı bırakmaktadır.

Belirtilen web adreslerinde alanla ilgili yapılan patent çalışmaları taramasında açıkça görülmektedir ki, ortaya konulmuş olan sistemler veya yöntemlerde, ön işleme ve makine öğrenme algoritmaları yeteri kadar kullanılmamıştır. Sistemler yüzeysel olarak beyin dalgalarının ölçülmesi ve çıktı üretilmesi üzerine kurulmuştur ve sinyal işleme açısından oldukça yetersizdir. Alanda var olan herhangi bir sorunun çözümüne yönelik yapılmış/geliştirilmiş yenilikçi bir çalışma bulunmamaktadır.

IV. Bulgular

Yapılan çalışmalara bakıldığında, BBA sistemlerin çoğu DDGUP yaklaşımı gibi görsel uyaranlardan faydalanmaktadırlar. Bu görsel uyaranların zaman içerisinde sistem kullanıcılarında meydana getirdiği göz sağlığı problemlerinin yenilikçi yaklaşımlar ile en aza indirilmesi ve söz konusu sistemlerin uzun süreli kullanımlarına olanak sağlanmak amaçlanmalıdır. Çalışmalarda

geliştirilen/önerilen yöntemlerin birçoğu laboratuvar ortamından dışarıya çıkmadığı için sunulan projeler ve çalışmalarda gerçekleştirilmesi amaçlanan BBA sistemi için araştırmacılar tarafından bir kontrol ünitesi tasarlanarak, sistemin gerçek zamanlı kontrol yapabilen konuma getirilmesi amaçlanmalıdır. Böylece alanda rekabet edebilecek bir ürün ortaya konulması hedeflenmelidir. Ayrıca mevcut sistemlerin birçoğunda EEG ve EOG sinyal kaydı için pahalı ve konfor seviyesi düşük cihazlar kullanılmaktadır. Bu cihazlar sinyalleri jel ve kablo yoluyla gürültülerden korumaktadır. Fakat sistemleri sürekli kullanmak zorunda olan bireylerin bu elektrot ve kablolarla normal hayatı sürdürmesi oldukça zordur. Bu nedenlerle kullanıcının normal yaşamını kolaylaştırmak amacıyla çalışmalarda kullanıcılar için konfor seviyesi yüksek, kullanımı kolay, kablosuz ve başlık ölçülerine ayarlanabilir bir cihaz seçimi amaçlanmalıdır.

V. Sonuçlar

Bu çalışmada, BBA sistemlerinin ülkemizdeki son durumu ele alındı. Uygun maliyetli araştırma çalışmaları ve patent veya faydalı model olarak sunulan çalışmalar özetlendirildi ve bu alandaki sorunların çözümüne yönelik öneriler sunuldu. Çalışmalara bakıldığında, bundan sonraki çalışmaların amacı, engelli bireyleri görsel uyaran sistemlerden kurtarmak olmaları açık şekilde görünmektedir. Bunun yanında, sistemlerin doğruluğunu ve hızını arttırmak için, EEG ve EOG sinyallerini kullanan hibrit BBA sistemlerinin tasarlanması ve sistemin kullanılabildiği gerçekçi bir ortamda test edilmesi önerildi. Alanda dikkat çeken bir diğer husus olan EEG cihazlarının konfor seviyesidir. Gün içerisinde sürekli olarak sistemi kullanmak zorunda olan bireylerin konfor seviyesini iyileştirmek için, kablosuz, tuzlu suya batırılmış sensör yapısına sahip EEG başlık kullanımı ve gözlük yapısında bulunan EOG cihazı kullanımı önerildi.

KAYNAKÇA

[1] N. Manshouri and T. Kayikcioglu, "A Comprehensive Analysis of 2D&3D Video Watching of EEG Signals by Increasing PLSR and SVM Classification Results," *Comput J*, vol. 63, no. 3, pp. 425–434, Mar. 2020, doi: 10.1093/COMJNL/BXZ043.

[2] R. T. Hammond, "Intense ultrashort electromagnetic pulses and the equation of motion," Jul. 2006, Accessed: Dec. 24, 2023. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/physics/0607285v1

[3] X. Zhang *et al.*, "Class 1 integronase gene and tetracycline resistance genes tetA and tetC in different water environments of Jiangsu Province, China," *Ecotoxicology*, vol. 18, no. 6, pp. 652–660, Aug. 2009, doi: 10.1007/S10646-009-0332-3/TABLES/3.

[4] G. Rangaswamy, S. S. Raghuwanshi, G. B. Rout, P. K. Sharma, G. Mandal, and N. K. Johri, "Optimum borehole gamma ray log signal processing - a cubic spline based weighting." 2009. Accessed: Dec. 24, 2023. [Online]. Available: http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:41020842

[5] K. Värbu, N. Muhammad, and Y. Muhammad, "Past, Present, and Future of EEG-Based BCI Applications," *Sensors 2022, Vol. 22, Page 3331*, vol. 22, no. 9, p. 3331, Apr. 2022, doi: 10.3390/S22093331.

[6] G. Bin, X. Gao, Z. Yan, B. Hong, and S. Gao, "An online multi-channel SSVEP-based brain–computer interface using a canonical correlation analysis method," *J Neural Eng*, vol. 6, no. 4, p. 046002, Jun. 2009, doi: 10.1088/1741-2560/6/4/046002.

[7] R. D., "Human brain electrophysiology," *Evoked potentials and evoked magnetic fields in science and medicine*, 1989, Accessed: Dec. 24, 2023. [Online]. Available: https://cir.nii.ac.jp/crid/1572543025661076864

[8] S. N. Abdulkader, A. Atia, and M. S. M. Mostafa, "Brain computer interfacing: Applications and," *Egyptian Informatics Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 213–230, Jul. 2015, doi: 10.1016/J.EIJ.2015.06.002.

[9] G. Vecchiato *et al.*, "The study of brain activity during the observation of commercial advertsing by using high resolution EEG techniques," *Proceedings of the 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society: Engineering the Future of Biomedicine, EMBC 2009*, pp. 57–60, 2009, doi: 10.1109/IEMBS.2009.5335045.

[10] A. S. Royer, A. J. Doud, M. L. Rose, and B. He, "EEG control of a virtual helicopter in 3-dimensional space using intelligent control strategies," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 18, no. 6, pp. 581–589, Dec. 2010, doi: 10.1109/TNSRE.2010.2077654.

[11] I. Svogor and T. Kisasondi, "Two factor authentication using EEG augmented passwords," *Proceedings of the International Conference on Information Techno-*

logy Interfaces, ITI, pp. 373–378, 2012, doi: 10.2498/ITI.2012.0441.

[12] J. R. Wolpaw, N. Birbaumer, D. J. McFarland, G. Pfurtscheller, and T. M. Vaughan, "Brain–computer interfaces for communication and control," *Clinical Neurophysiology*, vol. 113, no. 6, pp. 767–791, Jun. 2002, doi: 10.1016/S1388-2457(02)00057-3.

[13] N. MELEK, "Comparison of EEG and EOG signals in classification of sleep stages," *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg. 2*, vol. 29, no. 6, pp. 607–616, 2023.

[14] J. Kwon, J. Hwang, and C. H. Im, "S2S-StarGAN: Signal-to-Signal Translation Method based on StarGAN to Generate Artificial EEG for SSVEP-based Brain-Computer Interfaces," *International Winter Conference on Brain-Computer Interface, BCI*, vol. 2023-February, 2023, doi: 10.1109/BCI57258.2023.10078582.

[15] S. L. Wu, L. De Liao, S. W. Lu, W. L. Jiang, S. A. Chen, and C. T. Lin, "Controlling a human-computer interface system with a novel classification method that uses electrooculography signals," *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 60, no. 8, pp. 2133–2141, 2013, doi: 10.1109/TBME.2013.2248154.

[16] S. Aungsakul, A. Phinyomark, P. Phukpattaranont, and C. Limsakul, "Evaluating Feature Extraction Methods of Electrooculography (EOG) Signal for Human-Computer Interface," *Procedia Eng*, vol. 32, pp. 246–252, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.PROENG.2012.01.1264.

[17] M. Melek, N. Manshouri, and T. Kayikcioglu, "Low-cost brain-computer interface using the emotiv epoc headset based on rotating vanes," *Traitement du Signal*, vol. 37, no. 5, pp. 831–837, Oct. 2020, doi: 10.18280/TS.370516.

[18] B. Saylam, O. Çaǂlayan, and R. B. Arslan, "Analysis of visual stimulus parameters for SSVEP based brain computer interfaces," *2014 18th National Biomedical Engineering Meeting, BIYOMUT 2014*, 2014, doi: 10.1109/BIYOMUT.2014.7026381.

[19] B. Allison, "The i of BCIs: Next generation interfaces for brain-computer interface systems that adapt to individual users," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 5611 LNCS, no. PART 2, pp. 558–568, 2009, doi: 10.1007/978-3-642-02577-8_61/COVER.

[20] J. Jiang, Z. Zhou, E. Yin, Y. Yu, and D. Hu, "Hybrid Brain-Computer Interface (BCI) based on the EEG and EOG signals," *Biomed Mater Eng*, vol. 24, no. 6, pp. 2919–2925, Jan. 2014, doi: 10.3233/BME-141111.

[21] A. T. SÖZER and C. B. FİDAN, "Emotiv Epoc ile Durağan Hal Görsel Uyarılmış Potansiyel Temelli Beyin Bilgisayar Arayüzü Uygulaması," *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no. 1, pp. 158–166, Mar. 2019, doi: 10.17798/BITLISFEN.445574.

[22] A. E. GÜMÜŞ, Ç. UYULAN, and Z. GULEKEN, "Detection of EEG Patterns for Induced Fear Emotion State via EMOTIV EEG Testbench," *Nat Eng Sci*, vol. 7, no. 2, pp. 148–168, Aug. 2022, doi: 10.28978/NESCIENCES.1159248.

[23] K. Erat *et al.*, "Düşük maliyetli EEG başlıklarının kullanıcı deneyimi değerlendirmesi," *dergipark.org.trE Kübra, PO DURDUPamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2021•dergipark.org.tr*, vol. 27, no. 5, pp. 646–659, 2021, doi: 10.5505/pajes.2021.78910.

[24] Ç. UYULAN, A. E. GÜMÜŞ, and Z. GÜLEKEN, "EEG-induced Fear-type Emotion Classification Through Wavelet Packet Decomposition, Wavelet Entropy, and SVM," *Hittite Journal of Science and Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 241–251, Dec. 2022, doi: 10.17350/HJSE19030000277.

[25] M. ŞEKER, M. Ö.-D. Ü. M. Fakültesi, and undefined 2017, "İyi–kötü koku uyartılarının EEG aktivitesine etkisinin Welch metodu ile incelenmesi," *dergipark.org.trM ŞEKER, MS ÖZERDEMDicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 2017•dergipark.org.tr*, 2017, Accessed: Dec. 24, 2023. [Online]. Available: https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/445043

[26] M. Kaya, M. Cömert, Y. Mishchenko, İ. E. Üniversitesi, and B. M. Bölümü, "BEYİN BİLGİSAYAR ARAYÜZÜ İÇİN DVM MAKİNE ÖĞRENME YÖNTEMİ KULLANILARAK EEG VERİLERİNDEN SAĞ VE SOL EL HAREKET DÜŞÜNCELERİNİN TESPİTİ," *TÜBAV Journal of Science*, vol. 10, no. 3, pp. 1–20, Sep. 2017, doi: 10.3389/CONF.FNCOM.2011.53.00081.

[27] T. Burak Alakuş, İ. Türkoğlu, T. B. Alakus, and I. Turkoglu, "Feature Selection with Sequential Forward Selection Algorithm from Emotion Estimation based on EEG Signals," *Sakarya University Journal of Science*, vol. 23, no. 6, pp. 1096–1105, Dec. 2019, doi: 10.16984/SAUFENBILDER.501799.

[28] A. B. GÖKBULUT, H. Yetiş, M. Karaköse, and İ. AYDIN, "Motor Nöron Yetilerini Kaybetmiş Bireylerin İletişimi için SSVEP Tabanlı Beyin Bilgisayar Arayüzü Geliştirilmesi," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 10, no. 1, pp. 13–22, Mar. 2019, doi: 10.24012/DUMF.403130.

[29] E. B. ŞAHİN, C. ÇELİKTAŞ, and P. ONAY DURDU, "Review of the Use of Electroencephalography in User Experience Evaluation Research," *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, vol. 15, no. 1, pp. 83–95, Jan. 2022, doi: 10.17671/GAZIBTD.842888.

[30] A. Alan *et al.*, "Veri Seti - Sınıflandırma İlişkisinde Performansa Etki Eden Faktörlerin Değerlendirilmesi," *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 32, no. 2, pp. 531–540, Sep. 2020, doi: 10.35234/FUMBD.738007.

[31] Y. DAŞDEMİR, E. YILDIRIM, and S. YILDIRIM, "Emotion Analysis using Different Stimuli with EEG Signals in Emotional Space," *Nat Eng Sci*, vol. 2, no. 2, pp. 1–10, Jul. 2017, doi: 10.28978/NESCIENCES.328851.

[32] K. GÜNEÇ, Ö. KASIM, M. TOSUN, and E. BÜYÜKKÖROĞLU, "ESTIMATION OF PAIN THRESHOLD FROM EEG SIGNALS OF SUBJECTS IN PHYSICAL THERAPY USING LONG-SHORT-TERM MEMORY DEEP LEARNING MODEL," *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 26, no. 2, pp. 447–460, Aug. 2021, doi: 10.17482/UUMFD.883100.

[33] A. O. Selvi, A. Ferikoğlu, D. Güzel, and E. Karagöz, "Göz Kirpmasi Tespiti İçin

EEG İşaretleri Tabanli Beyin Bilgisayar Arayüzü Tasarimi ve Uygulamasi," *2nd International Conference on Computer Science and Engineering, UBMK 2017*, pp. 544–548, Oct. 2017, doi: 10.1109/UBMK.2017.8093458.

[34] N. Öztürk, B. Yılmaz, and A. Y. Önver, "Beyin Dalgaları ve Baş Hareketiyle Gerçek Zamanlı Robotik Araba Kontrolü Real-Time Robotic Car Control Using Brainwaves and Head Movement," *researchgate.netN ÖZTÜRK, B YILMAZ, AY ÖNVERresearchgate.net*, doi: 10.1109/TIPTEKNO.2018.8596956.

[35] A. Yayik and Y. Kutlu, "Beyin Bilgisayar Arayüzü Tabanli Görsel Tespit Sistemi," *2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2017*, Jun. 2017, doi: 10.1109/SIU.2017.7960406.

[36] M. Melek, N. Manshouri, and T. Kayikcioglu, "Low-Cost Brain-Computer Interface Using the Emotiv Epoc Headset Based on Rotating Vanes," *TRAITEMENT DU SIGNAL*, vol. 37, no. 5, pp. 831–837, Oct. 2020, doi: 10.18280/TS.370516.

[37] A. O. Selvi, A. Ferikoglu, D. Guzel, and E. Dandil, "Selection of eligible channel and frequency components for visual evoked EEG applications," *26th IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2018*, pp. 1–4, Jul. 2018, doi: 10.1109/SIU.2018.8404740.

[38] M. Kaya *et al.*, "Daha verimli noninvaziv beyin makine arayüzlerinin geliştirilmesi," 2018, Accessed: Dec. 24, 2023. [Online]. Available: https://gcris.ieu.edu.tr/handle/20.500.14365/4238

[39] E. Filiz and R. B. Arslan, "Design and Implementation of Steady State Visual Evoked Potential Based Brain Computer Interface Video Game," *20th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON 2020 - Proceedings*, pp. 335–338, Jun. 2020, doi: 10.1109/MELECON48756.2020.9140710.

[40] RONAEL S., 2018, Beyin Dalgalarının Ölçülmesini, Şifrelenmesini ve İletilmesini Sağlayan Bir Sistem, Türk Patent Kurumu, Patent No:6359589.

[41] Serap S., 2017, Kullanıcının dikkat seviyesini beyin dalgaları kullanarak ölçen ve nöro-geribesleme ile dikkati artıran nöro-kulaklık, Türk Patent Kurumu, Patent No: 6545359.

[42] Yücesan B., Özer F. G., Kurt E. G., 2017, Mobil Haberleşme Abonelerinin Beyin Dalgaları Vasıtasıyla Akıllı Ev Sistemi Yönetmelerine İmkan Veren Bir Mobil Haberleşme Yöntemi, Türk Patent Kurumu, Patent No: 6234127.

[43] Mengiliğ M. S., Selova S., 2017, Bal İşleme Makinelerinin Beyin Dalgaları Kullanılarak Uzaktan Kontrol Edilmesi, Türk Patent Kurumu, Patent No: 6159689.

[44] Vardar E., 2016, Öğrenmeyi Kolaylaştıran Beyin Dalgalarının Kullanıldığı Sanal ve Arttırılmış Gerçeklik Gözlüğü ile Entegre Edilmiş Bütüncül Kolay Öğrenme Sistemi ve Çalışma Yöntemi, Türk Patent Kurumu, Patent No:6291815.

[45] Sarıoğlu B., Ürküt O., Arıkuşu Y. S., Anıl E. C., 2016, Beyin Dalgalarıyla Elektriksel Cihazların Uzaktan Kontrol Edilmesini Sağlayan Sistem, Türk Patent Kurumu, Patent No:6350287.

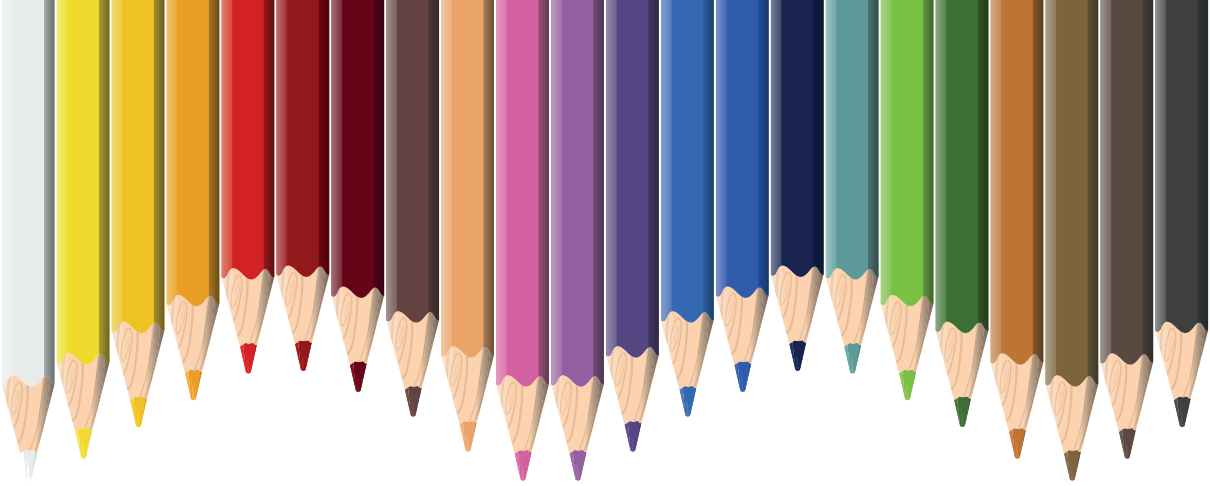
[47] Aydın E. A., Güler İ., Bay Ö. F., 2016, Kontrol Uygulamalarına Yönelik Asenkron Beyin Bilgisayar Arayüzü, Türk Patent Kurumu, Patent No: 5729692.

[48] Yılmaz T., 2015, Beyin Dalgası Analizine Dayalı Eğitimci Karar Destek Sistemi, Türk Patent Kurumu, Patent No: 6250058.

[49] Mutlu L., 2014, Beyin Dalgası Kontrollü Engelli Araçları için Akıllı Yönlendirme Sistemi, Türk Patent Kurumu, Patent No:6239306.

[50] Kaya. R. S., Dağ O., Güneş Ö., Diner A., Birinci Y., Akyüz A., 2023, Beyin Sinyalleri ile Kontrol Edilebilen Robotik El, Türk Patent Kurumu, Patent No: 5357839.

[51] Ak V., 2019, Beyin Dalgaları ile Yorgunluk Ölçüm Sistemi, Türk Patent Kurumu, Patent No: 6768952.



Bölüm 10

E-TİCARET SİTELERİNDE MOBİLYA ÜRÜNLERİNİN BEĞENİ DERECESİNE GÖRE YORUMLARDA KULLANILAN KELİMELERİN ANALİZİ

Timuçin BARDAK[1]

Selahattin BARDAK[2]

1 Doçent Doktor Timuçin BARDAK, Bartın Üniversitesi, Bartın Meslek Yüksekokulu, Malzeme ve Malzeme İşleme Teknolojileri Bölümü, Bartın, Türkiye, ORCID ID: 0000-0002-1403-1049

2 Doçent Doktor Selahattin BARDAK, Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Sinop, Türkiye, ORCID ID: 0000-0001-9724-4762

E-mail: timucinb@bartin.edu.tr

GİRİŞ

Mobilya, evin iç mekan düzenlemesinde kilit bir rol oynayan, özel tasarımları ve estetik çeşitliliği sayesinde, kullanıcılara evlerindeki bir odanın genel atmosferini zenginleştirme ve güzelleştirme imkanı sunabilen, fonksiyonel ve estetik değerleri bir araya getiren bir ürün kategorisidir (Adrianus et al., 2023). İnsanlar, mobilyayı sadece temel işlevselliğe yönelik bir gereklilik olarak değil, aynı zamanda sosyal ve kültürel bağlamda bir statü sembolü olarak algıladıkları için de satın almaktadırlar (Adrianus et al., 2023; Pirc Barčić et al., 2021). Günümüzde, mobilya endüstrisi hem küresel ölçekte ekonomik önem taşıyan bir sektör olmasıyla hem de istihdam ve katma değer yaratma potansiyeliyle dikkat çekmektedir. Bu endüstri giderek artan bir rekabet ortamında, yenilikçi tasarım, veri bilimi, sürdürülebilir malzemelerin kullanımı, üretim süreçlerindeki teknolojik ilerlemeler ve pazarlama stratejilerindeki gelişmeler gibi faktörlerle şekillenmektedir. Mobilya endüstrisi tüketicilerin istek ve ihtiyaçlarını doğru bir şekilde anlamanın, sadece mevcut talepleri karşılamakla kalmayıp aynı zamanda gelecekteki beklentilere uygun ürünler geliştirmenin kritik bir stratejik unsur olduğu gerçeğiyle yüzleşmektedir. Tüketiciler, artan bilinçle daha iyi hizmet ve kalite arayışında bulunmaktadır (Wu et al., 2023). Bu bağlamda, veri bilimi; tüketici davranışlarını anlamak, gelecekteki talepleri öngörmek ve bu bilgileri ürün geliştirme süreçlerine entegre etmek adına son derece değerli bir araç haline gelmiştir. İnternet teknolojisinin etkisiyle, imalat ve hizmet endüstrilerinin entegrasyonuyla birlikte, köklü bir dönüşüme uğramış ve bu dönüşüm, iş dünyasında önemli bir paradigma değişikliğini beraberinde getirmiştir (Li & Kumarasinghe, 2023). E-ticaret siteleri, tüketicilere geniş bir ürün yelpazesi sunarak alışveriş deneyimini evlerine taşıma imkanı sağlamaktadır. Bu çevrimiçi platformlar, özellikle mobilya alışverişinde sundukları çeşitlilik ve erişim kolaylığı ile dikkat çekmektedir.

Uluslararası firmalar, çeşitli platformlardaki verileri düzenli olarak analiz ederek, sundukları hizmetleri ve ürünleri geliştirmekte ve bu strateji doğrultusunda müşteri tabanlarını genişletmektedirler. Mobilya endüstrisi, bu tür veri analizi ve bilgi tabanlı stratejilerin daha fazla keşfedilmesi gereken bir alan olarak öne çıkmaktadır. Bu sektör, müşteri tercihlerinin değişkenliği ve tasarım trendlerindeki sürekli evrim nedeniyle, veri odaklı çözümlerin benimsenmesi ve uygulanması açısından önemli bir potansiyele sahiptir.

Bu araştırma, e-ticaret sitelerinde satılan mobilya ürünleri hakkında yapılan yorumlardaki kelimelerin, ürünlerin beğeni düzeyine göre nasıl değiştiğini analiz etmeyi amaçlamaktadır. Türkiye'de faaliyet gösteren önde gelen e-ticaret sitelerinden seçilen örnekler üzerinden yürütülen bu çalışma, mobilya ürünleri arasında en çok ve en az beğenilenleri belirlemeyi ve bu ürünlerle ilgili yapılan yorumları toplamayı içermiştir. Veri toplama sürecinde, özellikle sandalye mobilyası üzerine odaklanılmıştır. Toplanan yorumlardaki sıkça

geçen kelimeler belirlenerek, bu kelimelerin ürün beğeni derecesi ile ilişkisi incelenmiştir.

Veri Bilimi

Veri bilimi alanı, büyük ölçüde artan bir ilgi ile karşılanmış ve bu alanda gerçekleştirilen araştırma çabaları, ileri analitiklerin geliştirilmesi, veri modellerinin iyileştirilmesi ve yeni algoritmaların tasarlanması noktasında önemli ilerlemeler kaydetmiştir (Martinez et al., 2021). Aynı zamanda bu teknolojisi, birçok endüstrinin gelişimine önemli katkılarda bulunmuştur. Veri madenciliği, temel verilerin içinde gizlenmiş değerli bilgileri keşfetme sürecini ifade eder ve büyük veri kümesini işleme yeteneğine sahiptir. Bu disiplin, geniş veri setlerinden anlamlı bilgiler çıkarmak için çeşitli analitik yöntemleri kullanır (Feng & Fan, 2024).

Web Madenciliği

Bilgi ve İletişim Teknolojisi yenilikleri, ekonomik büyümeyi ve kalkınmayı destekleme potansiyeliyle birlikte, iş dünyasında ve toplumsal yapıda çeşitli dönüşümlere öncülük eder (Böhmecke-Schwafert & García Moreno, 2023; Fagerberg et al., 2010). İnternet üzerindeki çeşitli platformlar, büyük miktarda veri üreterek kullanıcı davranışları, tercihleri ve görüşleri hakkında bilgi elde etme potansiyeli sunar. Bu veri, çeşitli analitik yöntemlerle işlenerek, internet kullanıcılarının davranış kalıpları ve eğilimleri konusunda anlamlı bilgiler sağlayabilir (Lahiani & Frikha, 2023). Web içeriği madenciliği, web kaynaklarından anlamlı veriler elde etmek için metinsel nesneler üzerinde çalışan bir bilim dalıdır. Bu disiplin, web içeriğinin büyük hacimlerini işleyerek, değerli bilgileri ortaya çıkarmak için çeşitli teknikler kullanır. Bu yöntem, metin verilerine odaklanır ve bilgi çıkarma, duygu analizi ve içerik kategorizasyonu gibi uygulamalara olanak tanır, bu da hem endüstriyel hem de akademik alanlarda önemli faydalar sağlar (Brauner et al., 2022; Xu et al., 2010).

E-ticaret Platformlar

Elektronik ticaret, iş dünyasında ileri elektronik teknolojilerin kullanılması anlamına gelir. Bu ticaret biçimi, her iki ticaret tarafının, ticari bilgiler, ürün detayları, satış bilgileri, hizmet ayrıntıları ve elektronik ödeme gibi işlemleri gelişmiş bilgi işleme araçları ve bilgisayarlar aracılığıyla karşılıklı olarak gerçekleştirdiği bir süreçtir (Tao et al., 2011). E-ticaret siteleri, tüketicilere geniş bir ürün yelpazesi sunarak alışveriş deneyimini evlerine taşıma imkanı sağlamaktadır. Bu çevrimiçi platformlar, özellikle mobilya alışverişinde sundukları çeşitlilik ve erişim kolaylığı ile dikkat çekmektedir. Aynı zamanda, bu çevrimiçi platformlarda sunulan ürünlerle ilgili çok miktarda veri bulunmaktadır. Özellikle, müşterilerin gerçek düşüncelerini yansıtan kullanıcı yorumları, bu platformlarda önemli bir rol oynamaktadır. Bu yo-

rumlar, potansiyel alıcıların ürünleri daha yakından incelemelerine ve diğer müşterilerin deneyimlerinden faydalanmalarına olanak tanır. Bu zengin veri kaynağı, şirketlere müşteri tercihlerini anlama ve analiz etme fırsatı sunar.

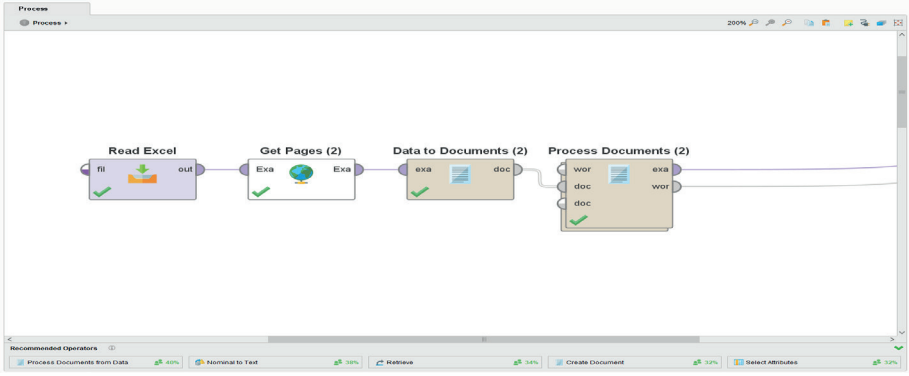
MATERYAL VE METOD

Veri Toplama

Bu araştırma, Türkiye'de faaliyet gösteren önde gelen e-ticaret sitelerinde satılan mobilya ürünleriyle ilgili müşteri yorumlarındaki anahtar kelimelerin, ürünlerin beğeni düzeyine göre nasıl değiştiğini analiz etmeyi hedeflemektedir. Çalışma, örnek olarak seçilen kamuya açık e-ticaret sitelerinden 20 Eylül 2023 ile 20 Kasım 2023 tarihleri arasında elde edilen veriler üzerinden yürütülmüş ve mobilya ürünleri arasında en çok ve en az beğenilenleri hakkında yapılan yorumlar toplanmıştır. Özellikle, veri toplama sürecinde odaklanılan kategori sandalye mobilyası olmuştur.

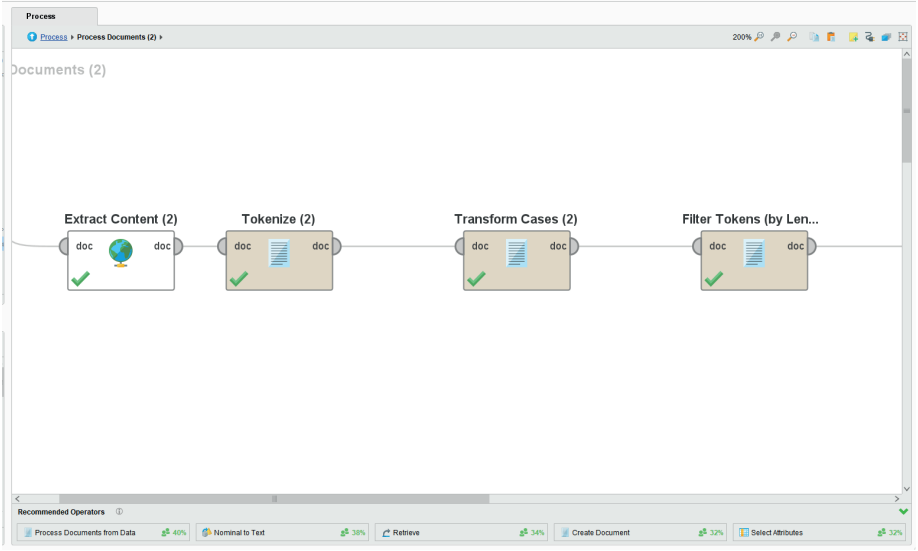
Veri Analizi

Sandalye mobilyası için kamuya açık e-ticaret sitelerinden elde edilen müşteri yorumları, RapidMiner yazılımı aracılığıyla detaylı bir analize tabi tutulmuştur. RapidMiner, geniş bir web madenciliği araçları yelpazesi içeren ve aynı zamanda birçok bilimsel araştırma ve endüstriyel uygulama alanında yaygın olarak benimsenen bir veri platformudur. Bu platform, veri analizi, örüntü tanıma, ve makine öğrenimi gibi disiplinlerde güçlü bir altyapı sunmaktadır (Bardak et al., 2021; Ersen et al., 2023; Karayılmazlar et al., 2019; Oliveira et al., 2019; Sözen et al., 2018). Çalışma, tüketicilerin sandalye mobilyası alımlarıyla ilgili deneyimlerini anlamak ve değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de, e-ticaret sitelerinden elde edilen verilerin analizi için hazırlanan RapidMiner yazılımına ait süreç şeması gösterilmektedir. Bu şema, verilerin elde edilmesini ve en çok geçen anahtar kelimelerin bulunmasını içermektedir.



Şekil 1. E-ticaret sitelerinden elde edilen verilerin analizi için hazırlanan RapidMiner yazılımına ait süreç şeması

Şekil 2'de veriler elde edildikten sonra anahtar kelimelerin tespiti için oluşturulan süreç şemasını göstermektedir.



Şekil 2. E-ticaret sitelerinden elde edilen verilerin dayalı anahtar kelimelerin tespiti için oluşturulan süreç şeması

Anahtar kelimeler, en çok beğenilen ve en az beğenilen e-ticaret sitelerindeki mobilya ürünleriyle ilgili yapılan yorumlar için ayrı ayrı belirlenmiştir. E-ticaret sitelerinde yer alan kullanıcı yorumlarını özetlemek üzere belirlenen anahtar kelimeler, müşteri geri bildirimlerinin temel öğelerini yansıtmaktadır. Anahtar kelimeler, genellikle uzun metinlerin özeti niteliğindedir (Madani & Weber, 2016).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, veri madenciliği yöntemlerinden olan web madenciliği ile e-ticaret sitelerinden toplanmış sandalye ürünleriyle ilgili kullanıcı yorumlarına odaklanılmıştır. Özellikle, en fazla beğeni ve en az beğeni toplayan sandalyelerin kullanıcı yorumları incelenmiştir. Analiz süreci, yorumlarda en sık geçen kelimelerin belirlenmesine yöneliktir ve elde edilen sonuçlar, belirli kelimelerin ne kadar yaygın olduğu konusunda detaylı bilgi sunmaktadır. Tablo 1'de sandalye mobilyalarıyla ilgili en çok beğenilen mobilyalara yönelik yapılan yorumların analizi sonucu elde edilen temel anahtar kelimeler yer almaktadır.

Tablo 1. Sandalye mobilyalarıyla ilgili en çok beğenilen mobilyalara yönelik yapılan yorumların analizi sonucu elde edilen temel anahtar kelimeler

Kelime	Kelimenin Geçme Sıklığı
Ürün	597
Sandalye	175
Kaliteli	139
Güzel	115
Farklı	108
Teslimat	95
Sağlam	81
Yeni	74
İlgili	73
Satıcı	72
Kullanım	69
Kısa	68
Sürede	68
Tercih	68
Fiyat	66
Kullanımı	64
İletişim	64
Ahşap	63
Başarı	62
Fırsatlar	62
Renk	62

Kelime bulutu, analiz edilen metindeki kelime sıklığını görsel bir biçimde yansıtan bir araçtır. Metindeki sıklığı artan sözcükler, oluşturulan görselde belirgin bir şekilde yer alır. Şekil 3, e-ticaret sitelerinden toplanan en popüler sandalye ürünleriyle ilgili kullanıcı yorumlarındaki en sık tekrar eden kelimeleri içeren kelime bulutunu göstermektedir.

Şekil 3. E-ticaret sitelerinden toplanan en popüler sandalye ürünleriyle ilgili kullanıcı yorumlarındaki en sık tekrar eden kelimeleri içeren kelime bulutu

En çok beğenilen sandalye mobilyalarıyla ilgili yapılan anahtar kelime analizi, tüketicilerin öncelikli olarak kalite, estetik, benzersizlik, teslimat süresi, müşteri memnuniyeti ve fiyat gibi faktörlere odaklandığını göstermektedir. Bu bulgular, tüketicilerin tercihlerinin, ürün kalitesi, satıcıyla olan iletişim ve hızlı teslimat gibi unsurları içeren faktörler üzerinde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır.

Tablo 2'de sandalye mobilyalarıyla ilgili en az beğenilen mobilyalara yönelik yapılan yorumların analizi sonucu elde edilen temel anahtar kelimeler yer almaktadır.

Tablo 2. Sandalye mobilyalarıyla ilgili en az beğenilen mobilyalara yönelik yapılan yorumların analizi sonucu elde edilen temel anahtar kelimeler

Kelime	Kelimenin Geçme Sıklığı
Ürün	306
İade	152
Kargo	141
Mağaza	138
Sandalye	132
Teslim	80
Ofis	69
Çalışma	64
Aydınlatma	62
Teslimat	57
Satıcı	55

Geç	52
Model	52
Bilgi	48
Dönüş	48
Farklı	47
Kişisel	47
Süre	44
Cevap	42
Değişim	42

Şekil 4, e-ticaret sitelerinden toplanan en az beğenilen sandalye ürünleriyle ilgili kullanıcı yorumlarındaki en sık tekrar eden kelimeleri içeren kelime bulutunu göstermektedir.

Şekil 4. E-ticaret sitelerinden toplanan en az beğenilen sandalye ürünleriyle ilgili kullanıcı yorumlarındaki en sık tekrar eden kelimeleri içeren kelime bulutunu

En az beğenilen sandalye mobilyalarıyla ilgili yapılan anahtar kelime analizi, tüketicilerin öncelikli konuları genellikle "iade", "kargo", "teslim", "teslimat süresi" gibi kelimeler olduğunu ortaya koymaktadır. Bu anahtar kelimeler, müşterilerin ürünlerden memnun kalmadıkları durumlarda hızlı bir iade süreci talep ettiklerini ve kargo ile teslimat konularında sorunlar yaşadıklarını göstermektedir. Bu bulgular, tüketicilerin ürünlerle ilgili olumsuz deneyimler yaşadıklarında, özellikle iade süreçlerinde ve teslimat hızında gelişmeler beklediklerini işaret etmektedir.

Çalışma sonuçları, mobilya sektöründeki üreticilere ve perakendecilere önemli rehberlik sağlamaktadır. Bulgularımız, müşteri memnuniyetini artırmak amacıyla özellikle ürün kalitesi, iade süreçleri, kargo ve teslimat hızı gibi faktörlere odaklanmalarının gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu sonuçlar, mevcut literatürle uyumludur. Gerçekleştirilen bir çalışmada, yapılan bir ankette katılımcıların yarısından fazlasının satın alma kararlarında kalite ve tasarımın belirleyici faktörler olduğunu ifade ettiği tespit edilmiştir (Pirc Barčić et al., 2021b).

SONUÇ

Mobilya endüstrisi, birçok gelişmiş ülke için en kritik sektörlerden biri olarak öne çıkmaktadır, çünkü bu sektördeki ürünlerin katma değeri oldukça yüksektir. Bu çalışma kapsamında, e-ticaret platformlarında sandalye mobilyası için yapılan yorumlar en çok ve en az beğenilen mobilyalar için ayrı ayrı analiz edilmiş ve önemli kelimeler belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en çok beğenilen sandalye mobilyalarıyla ilgili yapılan yorumlarda belirgin anahtar kelimeler arasında kalite, estetik, benzersizlik, teslimat süresi, müşteri memnuniyeti ve fiyat bulunmaktadır. Bu bulgular, tüketici taleplerinin özellikle ürün kalitesi, satıcıyla iletişim ve hızlı teslimat gibi kritik unsurlara odaklandığını göstererek, bu faktörlerin beğeni üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan, en az beğenilen sandalye mobilyalarına dair anahtar kelime analizi, tüketicilerin başlıca rahatsızlıklarının genellikle "iade", "kargo", "teslimat" ve "teslimat süresi" gibi konuların olduğunu göstermektedir. Bu terimler, müşterilerin ürün memnuniyetiyle ilgili yaşadıkları sorunlarda hızlı bir iade süreci talep ettiklerini ve teslimat süreçlerinde yaşadıkları zorlukları vurgulamaktadır. Bu bulgular, tüketicilerin olumsuz deneyimler yaşadıklarında özellikle iade süreçleri ve teslimat hızında gelişmeler beklediklerini göstermektedir. Sonuç olarak, veri bilimi mobilya endüstrisinde, müşteri ihtiyaçlarını anlamak ve ürün kalitesini geliştirmek için etkili bir araç olarak kullanılabilir.

KAYNAKÇA

Adrianus, W., Edwin, M. R. S. P., & Yanfi, Y. (2023). Furpare: Third-party application as furniture comparison in Indonesia's e-commerce. Procedia Computer Science, 216, 77–85. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.113

Bardak, S., Bardak, T., Peker, H., Sözen, E., & Çabuk, Y. (2021). Predicting Effects of Selected Impregnation Processes on the Observed Bending Strength of Wood, with Use of Data Mining Models. Bioresources, 16(3).

Böhmecke-Schwafert, M., & García Moreno, E. (2023). Exploring blockchain-based innovations for economic and sustainable development in the global south: A mixed-method approach based on web mining and topic modeling. Technological Forecasting and Social Change, 191, 122446. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122446

Brauner, T., Heumann, M., Kraschewski, T., Prahlow, O., Rehse, J., Kiehne, C., & Breitner, M. H. (2022). Web content mining analysis of e-scooter crash causes and implications in Germany. Accident Analysis & Prevention, 178, 106833. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106833

Ersen, N., Bardak, T., & Usta, U. C. (2023). Veri Madenciliğine Dayalı Olarak Çalışanların Örgütsel Bağlılık Düzeyinin Belirlenmesi: İstanbul ve Kocaeli Örneği. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 25(3), 398–410. https://doi.org/10.24011/barofd.1329758

Fagerberg, J., Srholec, M., & Verspagen, B. (2010). Innovation and economic development. In Handbook of the Economics of Innovation (Vol. 2, pp. 833–872). Elsevier.

Feng, G., & Fan, M. (2024). Research on learning behavior patterns from the perspective of educational data mining: Evaluation, prediction and visualization. Expert Systems with Applications, 237, 121555. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121555

Karayılmazlar, S., Bardak, T., Avcı, Ö., Kayahan, K., Karayılmazlar, A. S., Çabuk, Y., Kurt, R., & İmren, E. (2019). Determining the orientation in choosing furniture based on social media based on data mining algorithms: Twitter example. Turkish Journal of Forestry | Türkiye Ormancılık Dergisi, 2019(4), 447–457. https://doi.org/10.18182/tjf.609967

Lahiani, H., & Frikha, M. (2023). A Systematic Review of Social Media Data Mining on Android. Procedia Computer Science, 225, 2018–2027. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.192

Li, Y., & Kumarasinghe, P. J. (2023). A behavioral model of service-derived manufacturing in e-commerce companies from the innovation chain perspective: A case study from China. Heliyon, 9(12), e23080. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23080

Madani, F., & Weber, C. (2016). The evolution of patent mining: Applying bibliomet-

rics analysis and keyword network analysis. World Patent Information, 46, 32–48. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wpi.2016.05.008

Martinez, I., Viles, E., & G. Olaizola, I. (2021). Data Science Methodologies: Current Challenges and Future Approaches. Big Data Research, 24, 100183. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bdr.2020.100183

Oliveira, C., Guimarães, T., Portela, F., & Santos, M. (2019). Benchmarking Business Analytics Techniques in Big Data. Procedia Computer Science, 160, 690–695. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.026

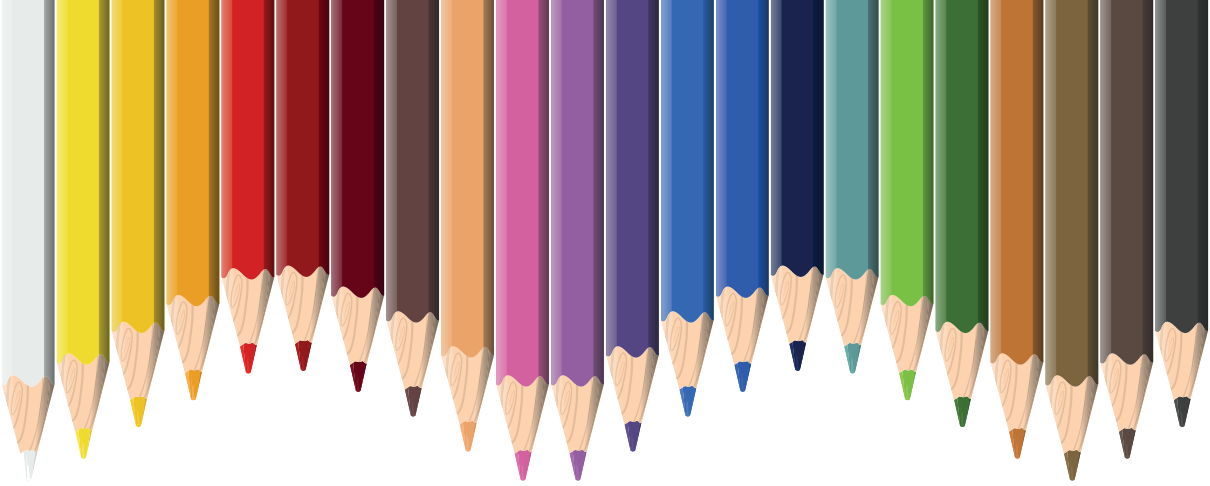
Pirc Barčić, A., Kitek Kuzman, M., Vergot, T., & Grošelj, P. (2021). Monitoring consumer purchasing behavior for wood furniture before and during the COVID-19 pandemic. Forests, 12(7), 873.

Sözen, E., Bardak, T., AydemİR, D., & Bardak, S. (2018). Estimation of deformation in nanocomposites using artificial neural networks and deep learning algorithms. Journal of Bartin Faculty of Forestry, 20(2), 223–231.

Tao, Z., Li, Z., & Dingjun, C. (2011). The Predicting Model of E-commerce Site Based on the Ideas of Curve Fitting. Physics Procedia, 22, 641–645. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.11.099

Wu, Z., Zong, F., Zhang, F., Wang, J., Zhu, Z., Guo, X., & Cao, P. (2023). Investigation of the customized furniture industry's production management systems. Journal of Engineering Research, 11(3), 164–175. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100072

Xu, G., Zhang, Y., & Li, L. (2010). Web mining and social networking: techniques and applications (Vol. 6). Springer Science & Busines



Bölüm 11

OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE GÖVDE TASARIM PROSESİ

Mehmet ÇALIŞKAN[1]

1 Prof. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-7835-9414

1. GİRİŞ

Tarihçesi 17. yüzyıla kadar uzanmasına rağmen, asıl evrimini 20. yüzyılda gerçekleştiren otomobil ve onun meydana getirdiği otomotiv endüstrisi, ilk olarak Ford T modeliyle sadece zenginlerin ulaşabildiği düşsel bir araç olmaktan çıkıp, geniş halk kitlelerine erişmiştir. O zamanlar fonksiyonelliğin ön planda olduğu otomobillerde bugün fonksiyonelliğin, emniyet ve sağlamlığın yanı sıra, ileri teknoloji kullanımının, kalitenin, konforun ve estetik görünümün ön plana çıktığı gözlenmektedir. Bu durum, toplumun beğeni ve isteklerinin bu yöne doğru kaymasından kaynaklanmaktadır. Hal böyle olunca mükemmel otomobillerin tasarımına doğru ivmeli bir hareket oluşmakta ve bu durum otomotiv sektörünü günden güne daha pahalı bir hale sokmaktadır. Böyle bir rekabet ortamında tasarımcı daima her yönüyle bir önceki modelden veya rakiplerinden daha iyi bir otomobili daha ucuza ve daha kısa zamanda üretip müşterinin beğenisine sunmak durumundadır.

2. TASARIM MÜHENDİSLİĞİ VE OPTİMİZASYON

Mühendisliğin farklı alanlarındaki sistem tasarım proseslerinin genel olarak benzerlik gösterdiğinin anlaşılması, konuya daha geniş bir bakış açısı kazandırmak açısından önemlidir. Aslında günümüzde otomotiv, havacılık, uzay, mekanik, inşaat, kimya, elektrik, medikal, denizcilik, ziraat, hatta nükleer mühendislik uygulamalarında yeni sistemler tasarlamak, yukarıda da değinildiği üzere benzer zorlukları ve problemleri içermektedir. Daima mümkün olan en iyi sistemi tasarlamak hangi disipline mensup olursa olsun bütün mühendislerin ortak amacıdır. Günümüzün yüksek rekabete dayalı dünyasında “en iyi” ifadesi, genel anlamda en verimli, en fonksiyonel ve maliyet – etkin anlamına gelmektedir. Mühendislik, analiz – tasarım – fabrikasyon – satış- araştırma ve geliştirme gibi kavramları içeren, iyi tesis edilmiş bir dizi aktiviteden meydana gelir. Mühendislik faaliyetlerinin önemli bir adımı olan tasarım prosesi ve fabrikasyon sistemleri ise yüzlerce yıldır süre gelen bir gelişme içinde olup, günümüzün uzay araçları, uçakları, otomobilleri, dev gökdelenleri ve köprüleri gibi mühendislik ürünleri, bugün

ulaşılan seviyeyi kanıtlayan çarpıcı örneklerdir. Özetle mühendislik prosesleri, önemli ölçüde insan ve malzeme kaynağı gerektiren, dar zamanlı ve pahalı süreçlerdir.

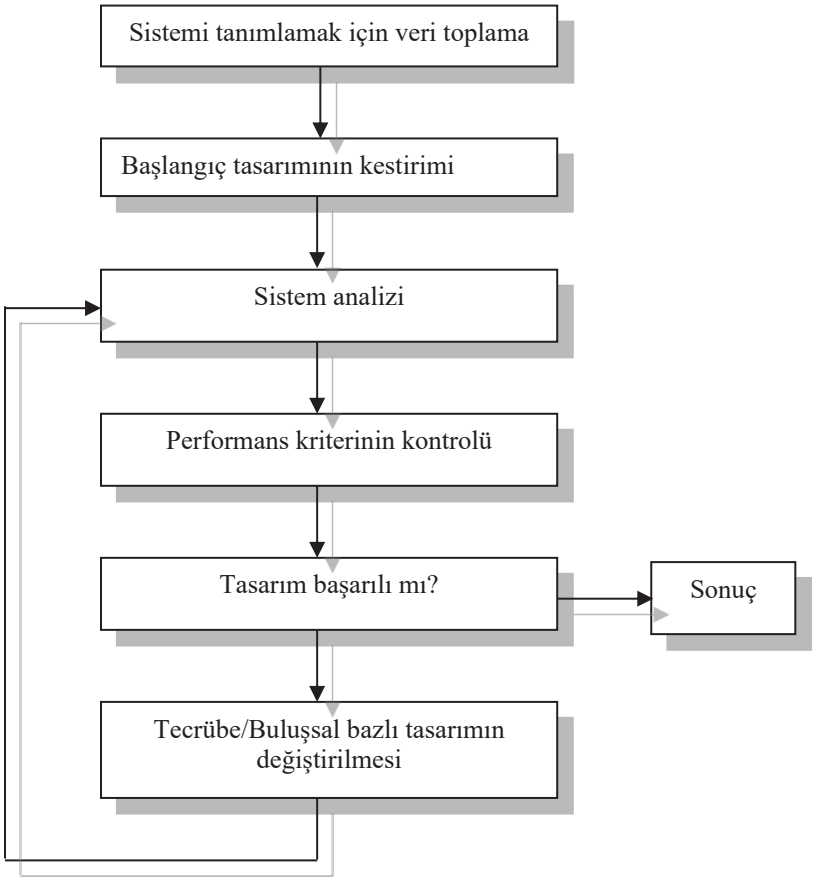
Kompleks sistemlerin tasarımı geniş hesaplamalar ve veri işlemlerini gerektirmektedir. Son otuz yıl zarfında bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ve nümerik hesaplamalar büyük mesafeler kat etmiş olup günümüz bilgisayarları karmaşık hesaplamaları ve yüksek miktarda data işlemini yapabilmektedir. Mühendislik tasarım prosesi de bu gelişmelerden payını büyük ölçüde almıştır. Günümüzde daha iyi sistemler kısa bir süre içerisinde farklı analiz opsiyonları kullanılarak tasarlanabilmektedir.

Sistemlerin tasarımı, ön görülen bütün sınır koşullarını sağlayabilen bir performans kriterini optimize edecek bir optimizasyon (eniyileme) problemi olarak formüle edilebilmektedir. Son yıllarda nümerik optimizasyon metotları oldukça geliştirilmiştir. Optimizasyon teorisi, nümerik metotlar, gelişmiş bilgisayar donanımı ve yazılımı, daha iyi mühendislik sistemlerinin tasarımı için birer araç olarak kullanılabilir. Daha iyi sistemlerin tasarlanabilmesi için uygun analitik, deneysel ve nümerik araçlara ihtiyaç olduğu bir gerçektir. Optimum tasarım metotlarının ise bu araçların çoğunun kullanımına izin verecek ölçüde geniş olduğu görülmektedir. Bir bilgisayar programı aracılığıyla ve doğru olarak uygulandığı taktirde bu metotlar, tasarım için oldukça güçlü araçlar sağlayabilir.

Bu aşamada konvansiyonel ve optimum tasarım proseslerinin bir karşılaştırması yapılabilir. Konvansiyonel tasarım, daha çok tasarımcının sezgilerine, tecrübesine ve yeteneğine bağlı kalmaktadır. İnsan faktörünün bir tasarımda bu denli ağırlığının olması, bazen kompleks sistemlerin sentezinde hatalı sonuçlara neden olabilmektedir. Tasarımcının tecrübe ve sezgileriyle oluşturduğu bir ya da birkaç deneme tasarımının bir araya getirilişini gösteren konvansiyonel tasarım yaklaşımı, Şekil 1 de görülen bir akış diyagramıyla açıklanabilir. Optimum tasarım prosesi ise tasarımcıya dizayn değişkenlerinin uygun maliyet ve sınır koşulları fonksiyonlarının belirlenmesinde güç

kazandırmaktadır. Mühendislik sistemlerinin bilgisayar kullanmak suretiyle daha hassas ve doğru bir şekilde ve daha kısa zamanda analiz edilebilmesi imkânı, tasarımın daha doğru ve verimli olmasını sağlamaktadır.

Günümüzün rekabet ortamında kaynakların kısıtlılığı ve buna karşılık verimli sistemlere duyulan ihtiyaç, mühendisleri daha ekonomik ve daha iyi tasarımlar yapmaya yöneltmiştir. Tüm bu düşünce ve çalışmalar ışığında son zamanlarda Bilgisayar Destekli Tasarım Optimizasyonu (CADO) yaklaşımı gündeme gelmiştir [1]. Şekil 2 de bu yaklaşıma ait tasarım prosesi görülmektedir.

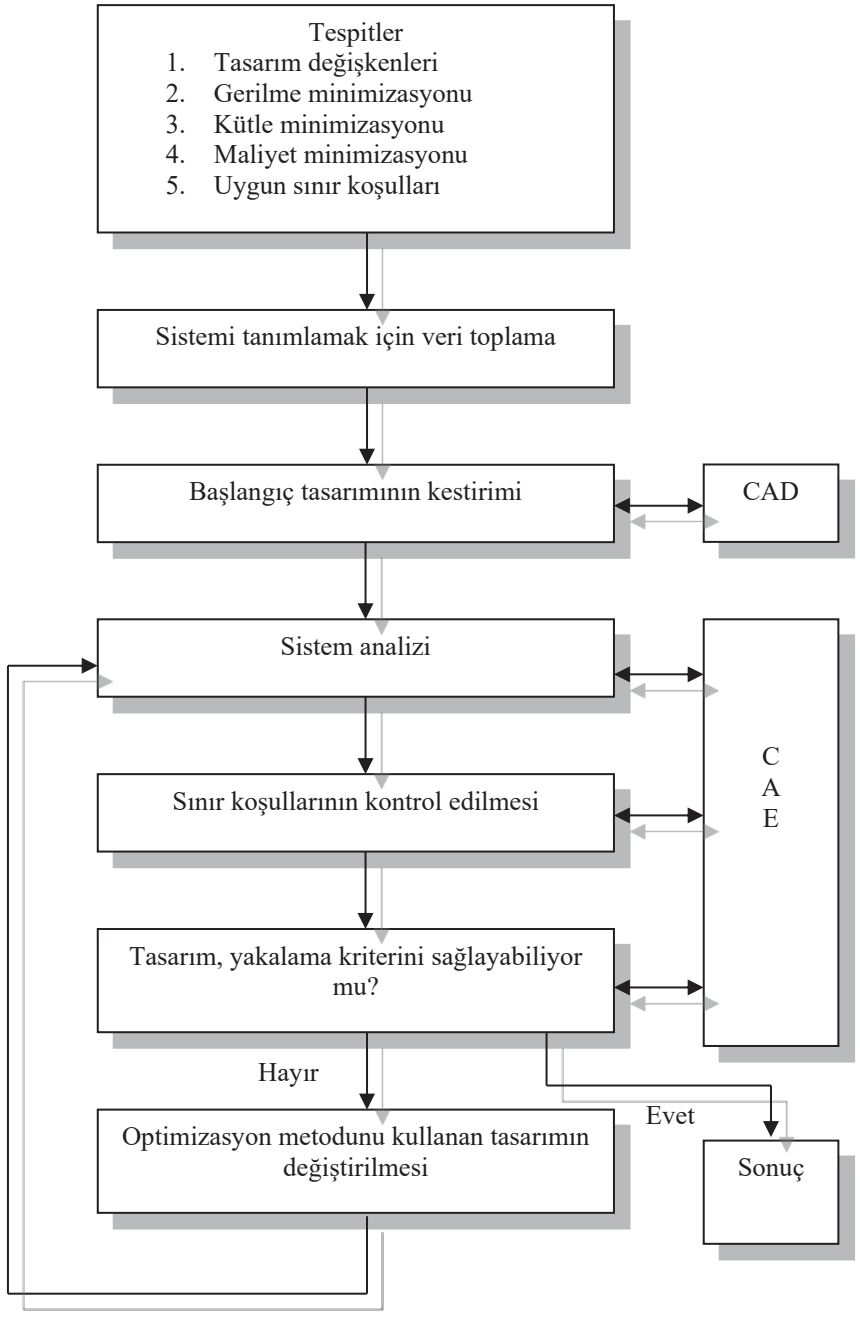


Şekil 1. Konvansiyonel Tasarım Prosesi.

Sonuç olarak tasarım prosesi ister konvansiyonel, isterse optimum olsun, benzer tipteki tekrarlı (iterasyonlu) aşamaları içermektedir. Tekrarlı proseslerin doğal bir sonucu olarak üretilen veri miktarı oldukça fazla olduğu için, sonuçların sunumunda grafik yöntemler tercih edilmektedir. Karmaşık sonuçların renk kodlu ekranlarda sunulmasının görsel karar verme için etkili olduğu düşünülmektedir.

3. OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE TASARIM PROSESİ

Bir tasarımın başarılı olabilmesi için her şeyden önce tasarımcının yaratıcı olması ve etik bir birikime sahip olması gereklidir. Çünkü tasarımda bu iki kavram, fikirlere şekil vermede ve estetik görünüm kazandırmada önemli bir yere sahiptir. Son teknolojilerin kullanıldığı otomobillerin ortaya çıkarılması ve seri üretimi için ise yukarıdakilere ek olarak ürün ve proses mühendisliğinin imkanlarından yararlanmak gereklidir.



Şekil 2. Bilgisayar Destekli Optimum Tasarım Prosesi.

Amacı yeni bir ürünün fonksiyonelliğini, teknolojik karakteristiklerini ve fiziksel görünümünü belirlemek olan bir geliştirme prosesinde başlangıç adımı, öncelikle spesifik ihtiyaçların tanımlanmasıdır. Bu noktada gereksinimler açık ve net olarak belirlenir, müşteri ve son kullanıcı talepleri incelenir. Bu aşamada piyasadaki güncel talepler iyice belirlenmeli, tasarlanacak olan ürünün hangi kategoriye dahil olacağı iyi tespit edilmeli ve ürün karakterinin belirlenmesi için doğru bir rekabet analizi yapılmalıdır. Bu safha, tasarım prosesindeki araştırma – geliştirme zamanlarını aşağı çekmede ve yaratıcı düşünceleri yenilikçi ve gerçekleştirilebilir makul formlara yönlendirmede etkin bir rol oynaması bakımından önemlidir. Bu aşamada fikirler çok sayıda üretilir ve üzerinde düşünülmekte olan tasarım problemi için farklı çözümler ortaya atılır, müşteri talepleri, güncel konseptler, estetik görünüm, pazar durumu ve endüstriyel üretim gibi konularda yapılmış olan fizibilite çalışmalarının sonuçları incelenir.

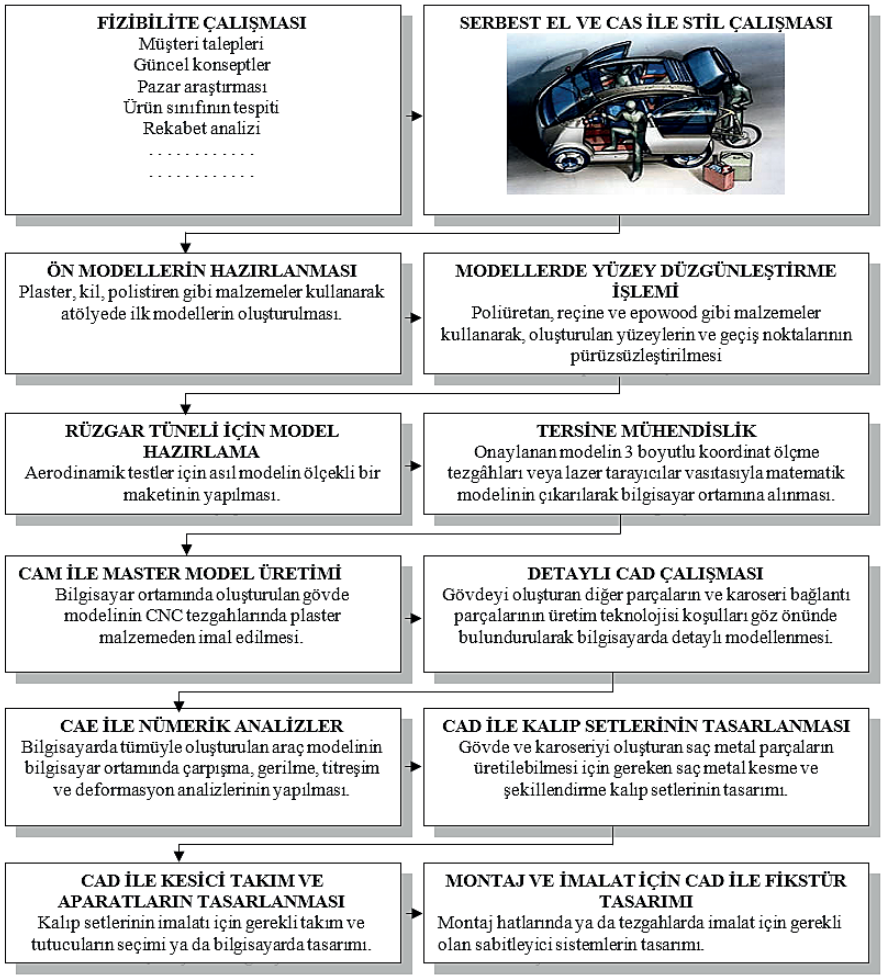
Her nesnede olduğu gibi, bir otomobilde de öncelikle göze çarpan unsur, otomobilin fiziki görünümü olmaktadır. Yukarıda sözü edilen karakteristiklerin içinde bu özellik öne çıkmaktadır. Otomobilin hava ile temas eden, çevre ile ısı alışverişinde bulunan, insanla temas halinde olan ve ergonomik olarak etkileşim içinde bulunan kısmı daima dış yüzeyi olmaktadır. Bu noktada günümüzde ulaşılan çözüm metodu ise, bilgisayar teknolojilerinin kullanıldığı, sanal 3 boyutlu modelleme sistemleri olan CAD (Computer Aided Design) ve CAS (Computer Aided Styling) metotlarıdır.

Otomobil gövde yüzeyleri modellenirken, estetik görünümün yanı sıra, gövdeyi oluşturan diğer komponentler ve karoserinin gövde ile ilişkili diğer parçaları da üretilebilirlik bazındaki teknolojik koşullar göz önüne alınarak modellenir. Çünkü, bilgisayar ortamında oluşturulan gövde modelinin makul ve mantıklı görünmesi, son şeklin verilmesi için yeterli değildir. Ortaya çıkan yüzey formunun üretim tezgahlarında gerçekleştirilebilirlik onayı alması gerekmektedir. Sanal modelin ergonomisi, bu modele ait gerçek maketlerin üretilerek incelenmesi suretiyle kontrol edilir.

Bu şekilde ürünün bazı kısımlarının gözden geçirilerek modifiye edilmesi, optimum şekle ulaşma yolunda tekrarlanabilen olağan prosedürlerdir.

Yukarıda anlatılardan da anlaşılacağı gibi, endüstriyel tasarım yalnızca ürüne şekil vermeden oluşan bir proses değil, aynı zamanda bu şekli oluştururken teknolojik, ekonomik ve endüstriyel imalat koşullarını hemen her safhada göz önünde bulunduran ve bu doğrultuda icra edilen bir prosestir.

Sonuç olarak çeşitli mühendislik safhalarını kapsayan tasarım prosesi, ürün şeklinin tespit edilmesi paralelinde ilerleyen, ilişkili diğer komponentlerin şekillendirilmesiyle detaylandırılan, teknik test ve deneyler için prototip modellerin hazırlanmasıyla devam eden bir karmaşık işlemler zinciri olarak ifade edilebilir. Şekil 3, bu aşamaları detaylı olarak gösteren bir örnektir.



Şekil 3. Otomobil gövde tasarım prosesi adımları.

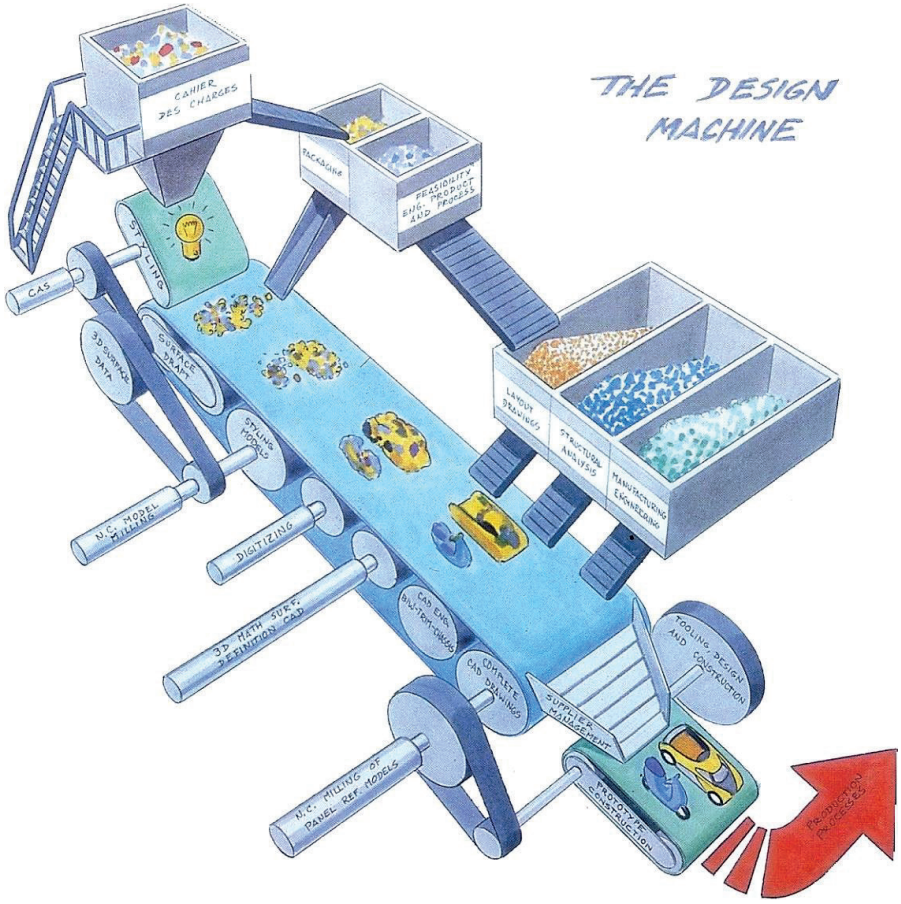
Dünyanın önde gelen tasarım bürolarından biri olan Pininfarina, yeni bir otomobil gövdesi için araştırma – geliştirme prosesini aşağıdaki gibi tanımlamıştır [2]:

- Otomobilin yapısal mimarisi için ön projelendirme,
- Gövde kabuğu ve iç ve dış elemanların son şeklinin belirlenmesi çalışması,
- Şasiyi oluşturan parçalara entegrasyon ve enstalasyon çalışması,

- Bazı on-board aygıtların entegrasyonu,
- İmalat metotlarının entegrasyonu,
- Edinilen tecrübeler ışığında yönetim geri beslemesi,
- Aracın uygunluğu ve sertifikasyonu için ilgili dokümanların hazırlanması,
- Ön üretim ve asıl üretim safhaları, ürün kalitesi iyileştirme aşamaları gibi adımlar sırasında yönetim geri beslemesi.

Görüldüğü gibi, Pininfarina'da ürün araştırma ve geliştirme safhası sürekli geri beslemelerle prosesin ilerleyişini kontrol eden son derece koordineli, hızlı ve esnek bir yapıya sahiptir. Çünkü böyle bir prosesin doğrulukla yürütülebilmesi için esneklik ve sürat çok önemlidir. Prosesin hemen tüm aşamalarında paydaş firmaların kendi organizasyon ve metotları arasında tam bir uyum sağlanmalı, asıl amacı kalite, ekonomi gibi hedeflerin tutturulması olan araç geliştirme prosesinin ürün gereksinimleri tam anlamıyla kavranarak belirlenmeli ve bu hedeflere ulaşmak için gerekli malzeme seçimleri yapılarak uygun imalat teknolojileri kararlaştırılmalıdır.

Dünyanın bu alanda önde gelen diğer bir tasarım bürosu olan Bertone ise, tasarım prosesi için yukarıdakine benzer ve kendine özgü bir yaklaşım getirmiş ve bunu "tasarım makinası" olarak adlandırmıştır [3]. Bertone'ye göre, zamana karşı sürdürülen bir yarışta kaliteyi tehlikeye atmamak için uzun uzun düşünüp taşınmaya zaman olmadığı bir ortamda, tasarım makinası daima prosesi yüksek bir performansla yürütmeyi başarır (Şekil 4). Bertone'nin proje yönetimi ve otomobil tasarımı konusundaki tecrübeli uzmanı Roberto Piatti, bir müşterilerinin acil talebi üzerine, personeline yalnızca iki ay içerisinde bir tasarım yapmaları gerektiğini ve bunu takip eden iki ay içinde de projeyi tamamıyla bitireceklerini ifade etmiştir.



Şekil 4 Bertone tasarım makinası.

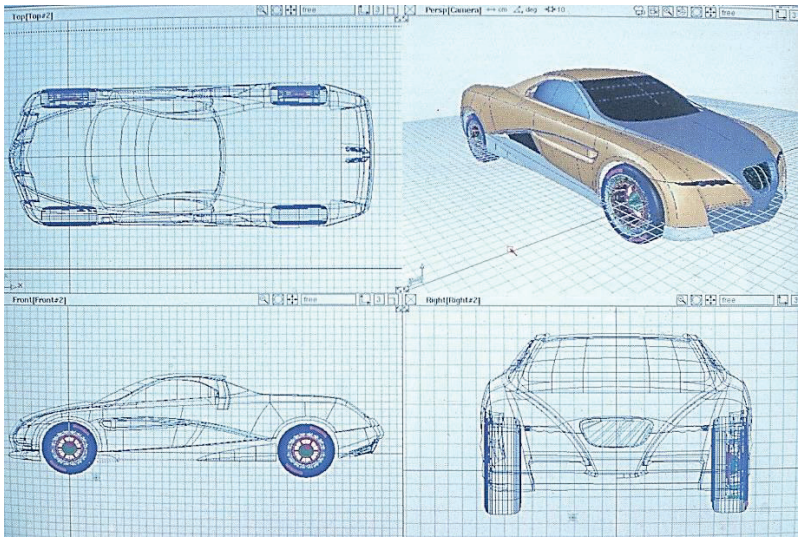
Bunun üzerine projeye başlanmış ve ilk aşamada, oluşan fikirlerden öne çıkanların ilk çizimleri ve temsili sunum resimleri animasyonlarıyla birlikte dev ekranlarda sunulmuştu. Buna paralel olarak üzerinde durulan iki tasarım, ekonomik ve endüstriyel fizibilite çalışmaları ve rüzgâr tüneli testleri için ölçekli modeller oluşturmak amacıyla matematik modellere dönüştürüldü. Takip eden iki ay içinde çalışma sürdürüldü ve bilgisayar destekli olarak optimize edilen matematik modellerden tam boyutta maketler oluşturuldu ve uzman modelciler tarafından rötuşlanıp boyanarak son prova ve sunuşlar için hazırlandı. Bu sırada, fizibilite çalışmaları parametrik CAD metodu kullanılarak daha da geliştirildi. Bu değerli 3 boyutlu tasarım yönetimi programı böylece daha geniş ve çok yönlü işlevlere kavuştu. Bu sayede

tasarımda yapılması gereken lokal değişiklikler, tasarımcının bütün komponentleri gözden geçirerek yenilemesine gerek kalmaksızın kısa bir sürede gerçekleştirilebilmekteydi. Çünkü ilişkili parçalardaki güncelleştirmeyi bilgisayar programı otomatik olarak yapabilmekteydi (Parametrik CAD). Yukarıda değinilen prosedürler günümüz otomotiv sektöründe yaygın olarak benimsenmiştir. Çünkü müşteri firma talep ettiği tasarımın bir an önce sonuca ulaşmasını istemekte ve ortaya çıkan tasarımın minimum zaman sarfiyatıyla imalat mühendisliği sürecine geçirilmesini beklemektedir.

Sektördeki tüm bu kronolojik kazanımlar, tasarımın ilk aşamalarında itibaren taşıt gövde tasarım projelerinin daima kitle üretimine odaklanarak yürütülmesi gerektiği sonucunu doğurur. Bütün tasarım prosesi, kararlı bir biçimde deneysel ve nümerik (CAE) mühendislik analizlerinden geçirilerek ve CAD/CAM desteği ile sürdürülür. Bertone'nin Opel Signum projesine yapmış olduğu katkı bu konuda çarpıcı bir örnek olarak verilebilir. Bu projede sunum arabalarının tasarımı ve şekillendirilmesi tamamıyla Opel'in Rüsselsheim'deki stüdyolarında yapılmıştır. Bertone ise gövdenin iç ve dış biçimlendirmesini yaparak bunların modellerini ve rüzgâr tüneli testleri için ölçekli modelini ve gerçek boyutlardaki prototip modelini hazırlamıştır. Bütün bu işlemler ise toplam 6 ay sürmüştür. Söz konusu araç Astra modelinin Coupe versiyonu olacağı için, tamamıyla yeni bir otomobil tasarlamak yerine Astra'nın baz versiyonu üzerinde Opel tasarımcılarıyla birlikte çalışılarak türetilmiş bir model oluşturulmuştur. Daha sonra üretilen gerçek prototip araba Cenevre Motor Show'da sergilenmiştir.

Şekil 3'deki tasarım aşamalarında sözü edilen, CAS ile stil çalışmasına örnek olarak, Bertone'nin Pickster modeli stil çalışması gösterilebilir (şekil 5). Bu aşamada bir endüstriyel tasarım yazılımı IDS (Industiral Design Software) kullanılarak, el yordamıyla bilgisayar ortamında serbest çizimler yapılır. Şekil 6 da ise, bir önceki adımda yapılan çizimler ışığında bir ön model hazırlama işleminden kestiler görülmektedir. Atölye ortamında yapılan bu çalışmalarda

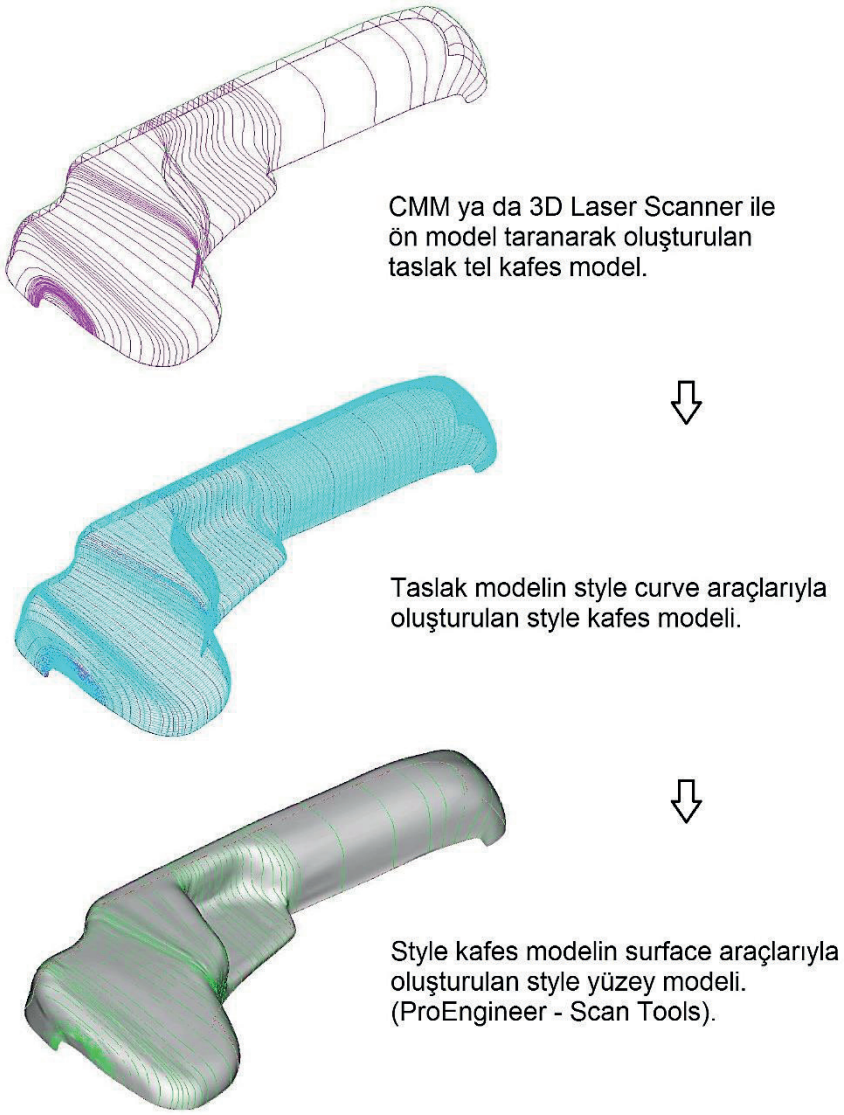
genellikle plaster, kil, polistiren, poliüretan, epowood ve reçine gibi malzemeler kullanılmaktadır.



Şekil 5. CAS ile stil çalışması.

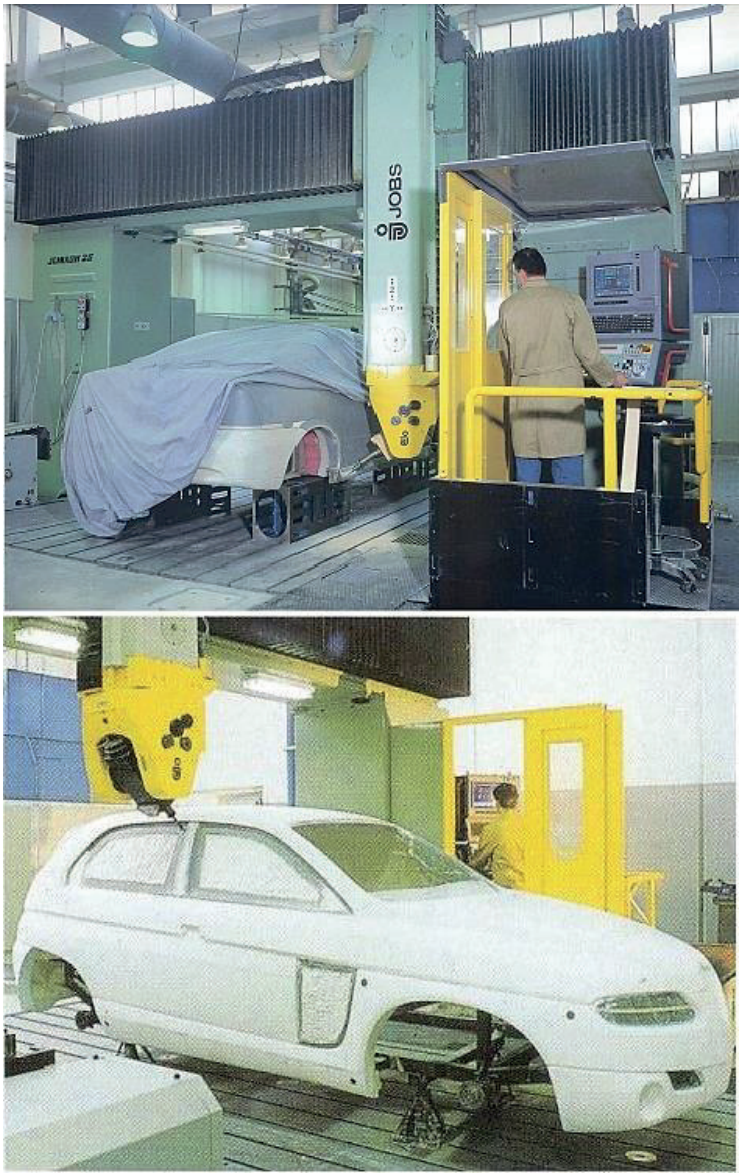
Şekil 6. Ön model hazırlama.

Şekil7, tipik bir dijitizasyon çalışmasında modelin oluşum safhalarını göstermektedir. Bu aşamada, elde edilen taslak model tersine mühendislik çalışmasıyla bilgisayar ortamına aktarılır. Aktarım işlemi için genellikle bir lazer tarayıcı ya da CMM (Coordinate Measuring Machine) kullanılır [4].



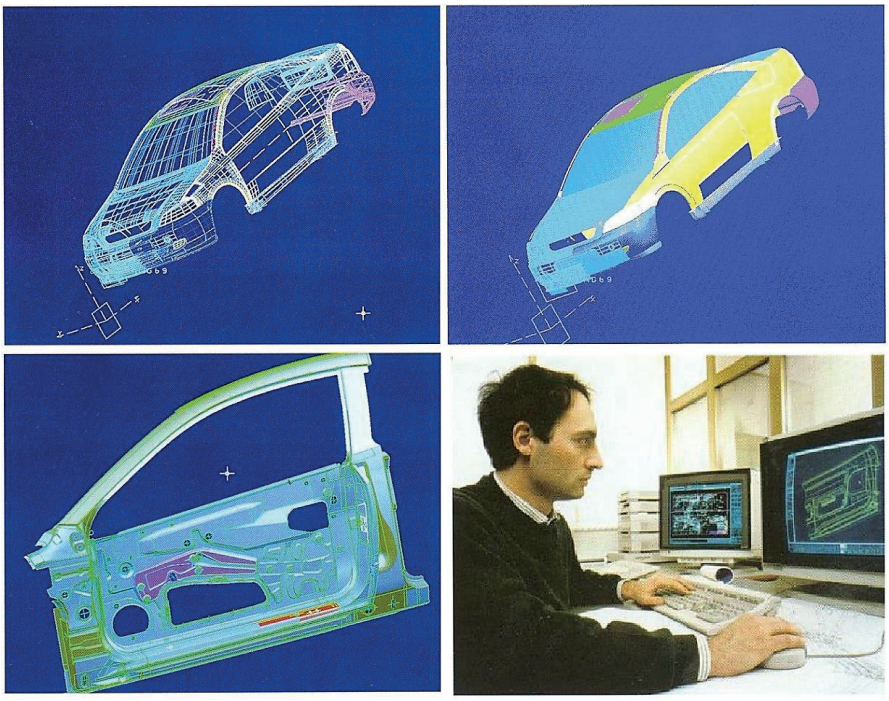
Şekil 7. Otomobil gövde iç ve dış parçalarının tersine mühendislik yardımıyla dijitizasyon çalışması.

Şekil 8 de, tersine mühendislik ile elde dilen CAD modeli kullanılarak CNC işleme merkezi ile master gövde modelinin elde edilişi görülmektedir. Genellikle plaster malzeme kullanılarak üretilen model, çalışmalarda referans olarak kullanılır.



Şekil 8. CAM ile master model üretimi.

Master modelin onaylanmasını takiben, bilgisayar ortamında oluşturulan gövde modelinin detaylandırma çalışmaları başlar, kapıların, destek elemanlarının, dayanımı artırıcı ve montajda kullanılacak bağlantıların detayları oluşturularak imalat mühendisliği kapsamında oldukça karmaşık ve çok parçalı montaj modelleri hazırlanır (Şekil 9).



Şekil 9. Detaylı CAD çalışması (Opel Astra coupe).

Oluşturulan bu detaylı CAD modelleri daha sonraki aşamalarda Şekil 3 de değinildiği üzere, bilgisayar destekli mühendislik yazılımları kullanılarak (CAE), dayanım ve çarpışma analizleri yapılır. Parçaların sac metal, plastik enjeksiyon ve döküm gibi metotlarla üretilecek olanları için kalıp tasarımları yapılarak bunlara ilişkin CNC imalat programları, kaynaklı birleştirmeler için punta kaynak programlarının CAM ile hazırlanması gibi uzun ve detaylı adımlarla süreç tamamlanır. Şekil 10 da bu süreçlerden geçmiş bir Bertone prototipi görülmektedir.

Bilgisayar destekli tasarım, mühendislik ve üretim teknolojileri (CAD/CAE/CAM), bugün endüstrinin vazgeçilmez araçları konumundadır ve gelecekte bu rolleri artarak devam edecektir.

Şekil 10. Tamamlanmış prototip model. (Bertone Pickster).

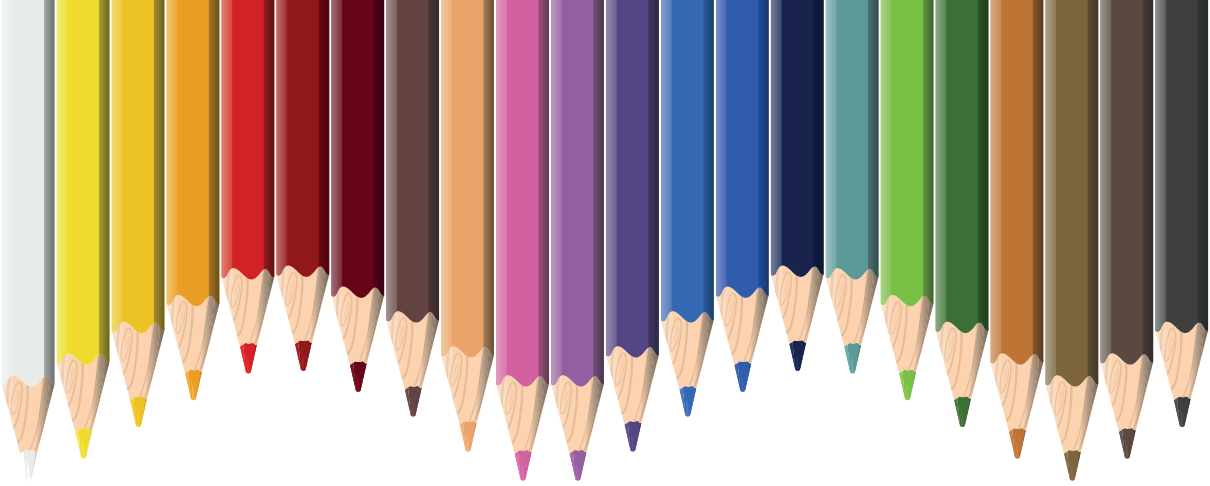
KAYNAKLAR

1. ARORA J., Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill International Editions, Singapore, 1989.

2. PININFARINA Leading Italian Design House – www.pininfarina.com

3. PERINI G., Car-Men 1 BERTONE Design Machine – Automobilia 1998.

4. CALISKAN M. Reverse Engineering Approach In Nurbs Surface Modeling And An Application, International Conference on Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering (CMMSE 2005). Alicante, Spain, 27-30 June 2005.



Bölüm 12

ELEKTRİKLİ VE HİBRİT ARAÇLARDA KULLANILAN LİTYUM İYON BATARYALAR VE ÖZELLİKLERİ

Haluk Güneş[1], M. Akif Kunt[2]

1 Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Tavşanlı, Kütahya, Türkiye
(ORCID: 0000-0002-0915-0924)
2 Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Tavşanlı, Kütahya, Türkiye
(ORCID: 0000-0001-5710-7253)

GİRİŞ

Günümüzde içten yanmalı motorların (İYM) kirletici etkileri ve küresel ısınmaya sebep olan egzoz emisyonları yüzünden kullanımları kısıtlanmaya başlanmıştır. Bu motorların sera gazı üretimi her geçen gün daha ağır şartlar öne sürülerek azaltılması istemektedir. Ülkemizde de 1993 yılında başlamak üzere günümüze kadar uygulanılan Euro normu emisyon standartları her aşamada daha da sıkılaşarak üreticileri temiz İYM geliştirmesine zorlamaktadır (Güney & Küçüksarıyıldız, 2019). Bu yaklaşım 2023 yılında Avrupa üreticilerinin sıfır emisyon sözü ile taşıtların elektrikli yada yenilenebilir yakıtlar ile çalıştırılması için aldıkları karar ile son aşamaya gelmiştir. Aynı zamanda gerçek sürüş şartlarının uygulandığı WLTP sürüş çevrimi de İYM'ler için dramatik sonuçlar ortaya çıkartmıştır (Pavlovic vd., 2018; European Automobile Manufacturers' Association, n.d.). Dolayısıyla günümüzde uygulanan Euro 6 normu ve WLTP sürüş çevrimi hali hazırda birçok motor üreticilerinin geleneksel motorlarının üretimini sonlandırmalarına sebep olmuştur. Özellikle Avrupa ve Amerika başta olmak üzere Dünyada bu motorların üretilmesi ve geliştirilmesinden vazgeçilmektedir. 1 Temmuz 2025'de geçilmesi planlanan Euro 7 normu ise artık İYM'ler için en son emisyon standardı olması düşünülmektedir (Mulholland vd., 2022). Euro 6 normuna bakıldığında Euro 7 normunda dizellerin benzinlilere yakın bir kirletici üretimi planlanmaktadır. Özellikle partikül üretimi her iki motor içinde 60mg/km olması önemli bir karardır. Yeni normda balataların aşınması esnasında açığa çıkan kirleticileri de sınırlandırılmaktadır. Lastik aşınması esnasında atılan atıklar ise kapsam dışı bırakılmıştır. Bununla birlikte şarj edilebilen hibrit (PHEV) ve tamamen elektrikli araçlar (EV) içinde 200.000 km ve 10 yıllık kullanım sonrasında batarya performansının standartlaştırılması da norm içinde bulunmaktadır. Özellikle bu madde bir önceki standardın 2 katıdır (European Commission, n.d.).

Tablo-1. İYM'lerin Euro Normlarına Göre Emisyon Değerleri

Norm	Geçerlilik tarihi	CO		HC+NO_x		NO_x		HC		NMHC		PM	
		gr/km		gr/km		gr/km		gr/km		gr/km		gr/km	
		Benzinli	Dizel	Benzinli	Dizel	Benzinli	Dizel	Benzinli	Dizel	Benzinli	Dizel	Benzinli	Dizel
Euro1	1.07.1992	3,16	3,16	1,13	1,13	0,15	0,5	0,2	X	0,068	X	X	X
Euro2	1.01.1996	2,2	1	0,5	0,7	X	0,25	X	X	X	X	X	0,08
Euro3	1.01.2000	2,3	0,64	X	0,56	0,15	0,18	0,2	X	X	X	X	0,05

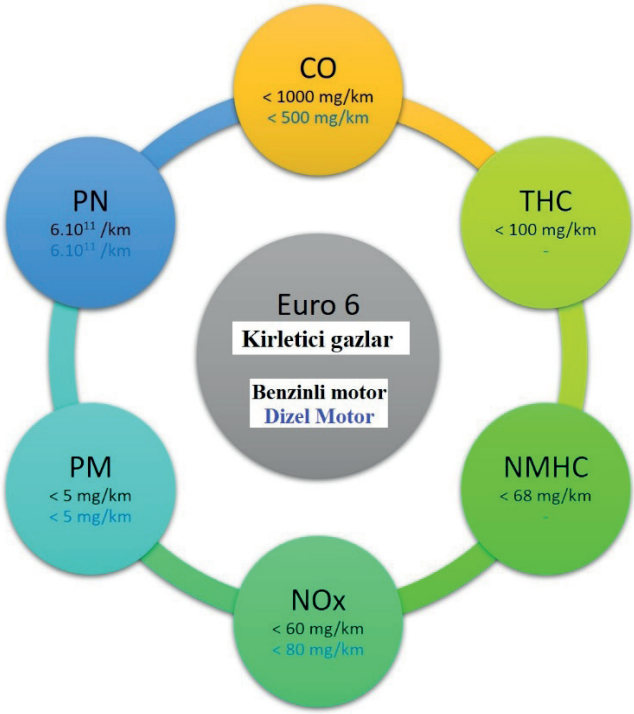
Euro4	1.01.2005	1	0,5	X	0,3	0,08	0,25	0,1	X	0,068	X	X	0,025
Euro5	1.09.2009	1	0,5	X	0,23	X	0,18	0,1	X	0,068	X	0,005	0,0045
Euro6	1.09.2014	1	0,5	X	0,17	X	0,08	0,1	X	0,068	X	0,0045	0,0045
Euro7	1.07.2025												

İYM motorlarda yanma sonu oluşan egzoz gazında Tablo 1' de gösterildiği gibi benzinli motorlar için karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO_2), hidrokarbon (HC), metan içermeyen hidrokarbonlar (NMHC), dizellerde bunlara ek olarak partiküller (PM), azot oksitler (NO_x) bulunmaktadır. Ayrıca Tablo 1 Avrupa emisyon standartlarının günümüze kadar gelen bir tarihçesini vermektedir. Otomobil üreticileri bu kirletici gazları azaltabilmek ve yeni emisyon standartlarına uyum sağlayabilmek için çok fazla yatırım yapmaktaydılar. Bunlara örnek olarak 1 -1,2 litre hacimli yüksek teknoloji gerektiren küçük motorlar, daha verimli ve yüksek basınçlı yakıt enjeksiyon sistemleri, katalitik konvertörler, partikül filtreleri, azot oksitleri indirgemek için bir tür üre ve su karışımı olan adblue sıvısının egzoz gazlarının üzerine püskürtülmesi prensibi ile çalışan seçici katalitik indirgeme (SCR) sistemi kullanmaktadır (Kmieć, 2020). Bu sistemler üreticilere ek maliyetler getirmekle beraber araç fiyatlarının artmasına sebep olmaktadır. Ancak son gelişmeler artık sıfır emisyon düşüncesiyle İYM'ların sona doğru yaklaştığını göstermektedir. Bu düşünce özellikle bireysel ve sivil kullanıcıların bu motorlar yerine elektrikli taşıtları tercih etmesi için teşvik edilmesini doğurmuştur. Birçok gelişmiş ülkede kullanıcıların bu taşıtları alabilmesi için vergi indirimi ve maddi kaynak yardımı yapılmaktadır. Elektrikli ve hibrid taşıtlarda en önemli unsur hiç şüphesiz bataryalardır. Çünkü günümüzde kullanılan bataryalar, İYM'ler ile kıyaslandığında hem kullanım ömrü hem de tam şarjlı iken gidebileceği mesafe anlamında geri kalmaktadır. Bu onlardan istenilen performansı vermelerine engel bir durumdur. Ancak bataryaların kapasiteleri, enerji yoğunlukları ve kat edebileceği menzil konuları gelişmeye açık durumdadır. Gelecekte daha uzun mesafeler kat edebilecek bataryalar üzerinde çalışmalar devam etmekle beraber elektrikli araçlara geçişin hızlanması buna bağlıdır (Çetin vd., 2021; Morali & Erol, 2020; Demirkan & Doğrusöz, 2021).

Euro 7 emisyon normunun 2025 yılının ikinci yarısından itibaren yürürlüğe gireceği planlanmaktadır. Tabi burada bazı belirsizliklerin olduğu düşünüldüğünde bu tarihin ertelenebileceği söylenebilir. Çünkü bu emisyon normu öncekilere nazaran çok katı şartlar içermekte ve hali hazırda hem araç üreticileri hem de orijinal parça üreticileri açısından endişeye yol açmaktadır. Avrupa otomobil üreticileri derneği (ACEA) ve orijinal yedek parça üreticilerinin (OEM) gerçekte endişeleri yeni normun getireceği maliyetlerdir.

Yeni norm, özellikle egzozdan atılan emisyonların çok düşük seviyelere çekilmesini istemektedir. Ayrıca fren balatalarının kullanımı esnasında atılan atıklarında kısıtlanması metin içerisinde yer almaktadır. Frenlerdeki aşınma 7 miligramı geçemeyecektir. Bu miktar 2035'te 3 miligramı geçemeyecektir. Euro 7 normu, içten yanmalı motorlarda bir adet elektrikli katalizör, iki adet bir litrelik üç yollu katalizör ve iki litrelik partikül filtresi kullanımını zorunlu hale getirilmesini istemektedir. Ayrıca bu norm NH_3 (amonyak) katalizörü de isteyebilir. Bunlardan başka Euro 7 normu içten yanmalı motorlu araçlar için 240.000 km içinde emisyon şartlarına uygun kalması için araca takip sisteminin takılmasını zorunlu hale getirebilir. Özellikle küçük araçlarda bu sistemler hem maliyeti çok fazla artırabilir hem de fiziksel olarak üreticileri zorlayabilir. Bu tür sebeplerden dolayı Euro 7 normunun çıkması gecikebilir. Bu arada yeni düzenlemelerle Euro 6 normu b, d-temp, c ve d sıralamasıyla Euro 7 normuna zaman kazandırma işlevini yerine getirmektedir. Şekil 1'de Euro 6 emisyon standardının benzinli ve dizel araçlar için en yüksek değerleri gösterilmektedir.

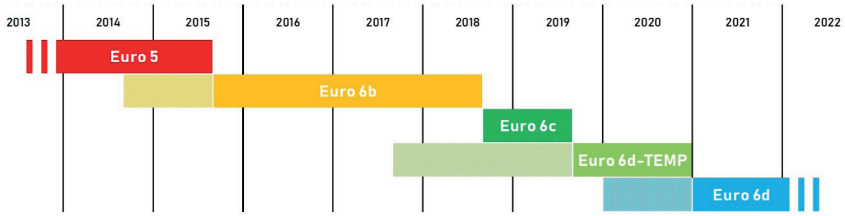
Şekil-1. Euro 6 emisyon standartlarının en yüksek emisyon değerleri



Euro 6b NEDC sürüş çevrimine göre test prosedürlerini karşılaması gereken bir emisyon normudur ve 01.09.2014 yılında yürürlüğe girmiştir. Euro 6 d Temp hem NEDC hem de WLTP sürüş çevriminin standartlarını karşılaması için 01.09.2017 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Euro 6c 01.09.2018

ve Euro 6d ise 01.01.2020 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Artık bu aşamadan sonra Euro 7 için gün sayılmaktadır. Şekil 2'de Euro 6 emisyon standardının zaman içerisindeki gelişimi verilmiştir.

Şekil-2. Euro 6 emisyon standartlarının zaman içerisindeki değişimi



Euro7 emisyon standardında benzinli ve dizel araçların arasındaki emisyon farkının kalkması beklenmektedir. Bu durum artık dizellerin üretilmesinin durdurulması anlamına geleceği için gelecekte zor zamanlar dizel motorlarını beklemektedir.

Elektrikli araçlar içinde Euro 7 normu yenilikler içermektedir. Özellikle büyük batarya ağırlıkları yüzünden bu araçların lastikleri çok fazla zorlanmakta ve aşınmaları artmaktadır. Bu durum içinde bir kısıtlama beklenmektedir. Elektrikli araçların bataryaları içinde bazı maddeler bulunmaktadır. Bataryaların 5 yıl 100.000 km sonrasında kapasitelerinin en az %80'nini koruması gerekiyor. Ayrıca 8yıl 160.000 km sonrasında ise kapasitelerinin %70'ini korumaları gerekiyor.

Yeni nesil elektrikli araçlarda üreticiler daha uzun mesafeler teklif ederek cazip olduklarını öne sürmektedirler. Renault'un yeni Zoe modeli için WLTP sürüş çevrimine göre 386 km menzil kat edebileceğini söylemektedir. Bu araçta kullanılan elektrikli motor 100 kW güce, bataryası 52 kWh'lık bir kapasiteye sahiptir. Aracın boş ağırlığı yaklaşık 2000 kg civarındadır (Reanult, n.d.).. Böyle boyutları küçük bir aracın bile oldukça büyük bir ağırlığa sahip olması günümüz batarya teknolojisinin araca katmış olduğu yükü göstermektedir. Bununla birlikte şarj süreleri de incelenmesi gereken bir durumdur. Tablo 2'de bu araca ait fabrikanın vermiş olduğu çeşitli şarj istasyonlarındaki örnek şarj süreleri gösterilmektedir. Buradan anlaşıldığı gibi Alternatif akım ile şarj etmek doğru akıma göre uzun zaman almaktadır. Özellikle ev tipi şarj işlemi en uzun zamana sahiptir. En hızlı şarj yöntemi ise doğru akım ile yapılan hızlı şarj yöntemidir. Ancak bu yöntem diğerlerine göre daha maliyetlidir. Yakıt tüketimi 6 l/100km olan bir benzinli araç ile kıyaslandığında hızlı şarj yöntemi ile şarj edildiğinde bu araç neredeyse aynı maliyete sahiptir. Aynı zamanda ev tipi şarj yöntemi ile hızlı şarj yöntemi arasında da yaklaşık 3,5 kat maliyet farkı ortaya çıkmaktadır. Veriler incelendiğinde elektrikli taşıtlardan

istenilen batarya ve maliyet performansı beklentilerin biraz gerisindir. Buna rağmen motor ve aracın performansı kıyas edilen İYM'lere göre oldukça iyidir. Aynı zamanda sıfır CO_2 emisyonu ile çevreci oldukları bilinmektedir.

Tablo-2. Renault Zoe E-Tech %100 Elektrikli Araç İçin Şarj İstasyonlarına Göre Şarj Süreleri

	Hızlı şarj istasyonu	Halka açık şarj istasyonu			Lokal soket	Ev tipi şarj aleti
	50kW DC (125A)	22kW AC (3x32A)	11kW AC (3x16A)	7,4kW AC (32A)	3,7kW AC (16A)	2,3kW AC (10A)
%0'dan %100'e	1saat 29 dakika	2 saat 54 dakika	5 saat 48 dakika	9 saat 33 dakika	18 saat 48 dakika	32 saat
%0'dan %80'e	1saat 5 dakika	2 saat 15 dakika	4 saat 30 dakika	7 saat 43 dadika	14 saat 58 dakika	25 saat 25 dakika
%15'dan %80'e	54 dakika	1saat 49 dakika	3 saat 37 dakika	6 saat 19 dakika	12 saat 12 dakika	20 saat 22 dakika

Mercedes EQE modeli 2350 kg ağırlığı ile orta sınıf sedan olarak bilinen bir araçtır. Bu araçta 215 kW güce sahip bir motor ve 90,56 kWh lik bir enerji içeren li-ion batarya bulunmaktadır. Bu batarya ile tam dolu iken WLTP sürüş çevrimine araç göre 515-558 km arasında bir menzile sahiptir (Mercedes, n.d.). Tablo 3'de çeşitli şarj istasyonlarına göre EQE modelin şarj olma süreleri gösterilmektedir. Buradan anlaşıldığına göre ev tipi şarj aleti en az 24 saatlik bir dolum süresi vermektedir. Doğru akımlı hızlı şarj yöntemleri ile kısa sürede şarj olabildiği açıktır. Ancak bu yöntemler ile %80 den sonra şarj işlemi oldukça yavaşlamaktadır. Bu örneklere bakıldığında hızlı şarj yöntemleri maliyetli olmakla beraber çok daha hızlı şarj hizmeti vermektedirler. Evlerde şarj etmek için kullanıcılar standart olarak en fazla 22kW'lık 3 faz 16 amper bir şarj istasyonu kurabilirler. Bu ürünler çeşitli marka ve fiyatla ayrıca satılmaktadır.

Tablo-3. Mercede EQE Modeline Ait Fabrika Verilerine Göre Çeşitli İstasyonlardaki Şarj Süreleri

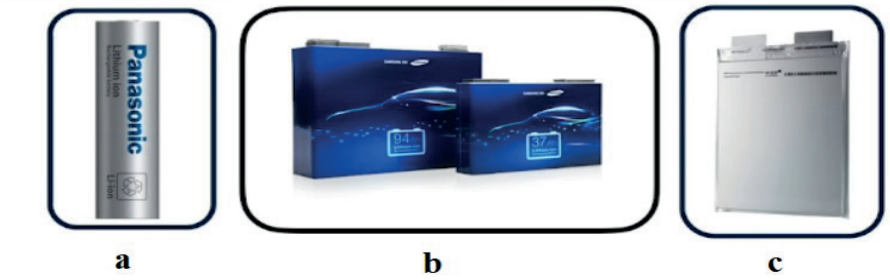
	Hızlı şarj istasyonu		Halka açık şarj istasyonu		Ev tipi şarj aleti
	350kW DC (875A)	50kW DC (125A)	22kW AC (3x32A)	11kW AC (3x16A)	1,8kW AC (8A) en az
%0'dan %100'e	1 saat 15 dakika	2 saat 07 dakika	4 saat 45 dakika	9 saat 15 dakika	24 saat
%0'dan %80'e	36 dakika	1 saat 30 dakika	3 saat 47 dakika	7 saat 24 dakika	24 saat
%15'dan %80'e	30 dakika	1 saat 15 dakika	3 saat 05 dakika	6 saat	24 saat

Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pillerin Yapısal Özellikleri

Günümüz teknolojisinde elektrikli araçlarda li-ion piller tercih edilir (Sayın & Yüksel, 2011; Özcan vd., 2021). Çünkü bu piller boyutlarına ve ağırlıklarına göre enerji yoğunluğu bakımından lityum demir polimer ve lityum titanat pillere göre daha avantajlıdır. Bu pillerin ağırlıkları depoladıkları enerjiye oranla daha düşüktür. Ancak bu pillerin ömürleri boyunca doldurma ve boşaltma sayıları diğer pillere göre daha azdır. Dolayısıyla gelecekte elektrikli araçların daha cazip olması açısından li-ion piller yerine daha uzun ömürlü pillerin geliştirilmesi gerekecektir.

Li-ion piller yapısal olarak 3 farklı şekilde üretilebilir (Battery university, 2019). Bunlar Şekil 3'de gösterildiği gibi silindirik, prizmatik ve kese şeklinde olmaktadır. Farklı otomobil üreticileri bu yapılardan kendi tasarımlarına uygun olanı kullanmaktadırlar. Tesla silindirik yapıdaki pilleri, Volkwagen, Bmw prizmatik pilleri, Chevrolet, Nissan, Renault ise kese yapısındaki pilleri kullanmayı tercih ederler. Bu yapıların kendi içerisinde avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Silindirik piller içlerinde en uygun maliyete sahip olandır. Hacimsel olarak değerlendirildiğinde verimleri en yüksek olan bu pillerdir. Ancak soğutulması zor bir yapıya sahiptir. Çünkü anot katot ve mebran sarmal bir yapıda iç içe bulunmaktadır. Prizmatik olan pillerin soğutulması daha kolaydır. Ancak düşük enerji yoğunluğu, düşük çevrim ömrü ve boyutlarının sınırlı olması gibi dezavantajlara sahiptir. Kese yapısındaki piller esnek bir modül tasarımına, yüksek kapasite seviyelerine geniş elde edilme yelpazesine sahiptir. Ancak mekanik olarak korunması biraz zordur. Ayrıca iyi bir basınç kontrolü gereklidir.

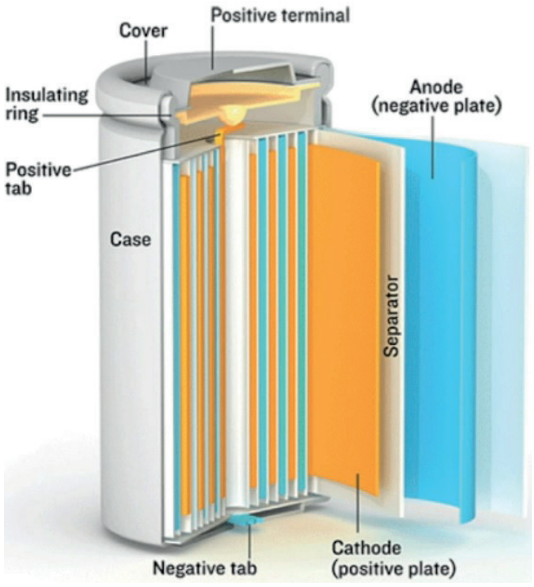
Şekil-3. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Lityum İyon Piller (A Silindirk, B Prizmatik, C Paket)



Önde gelen otomobil üreticileri avantaj ve dezavantaj değerlendirmesi yaptıklarında silindirik pillerin daha doğru bir seçim olduğunu düşünmektedirler. Özellikle bu pilleri tasarlamak ve üretmek için hali hazırda bulunan pil üreticilerinin bu işi üstlenmesi otomobil üreticilerine ciddi bir zaman ve maliyet kazancı sağlamaktadır.

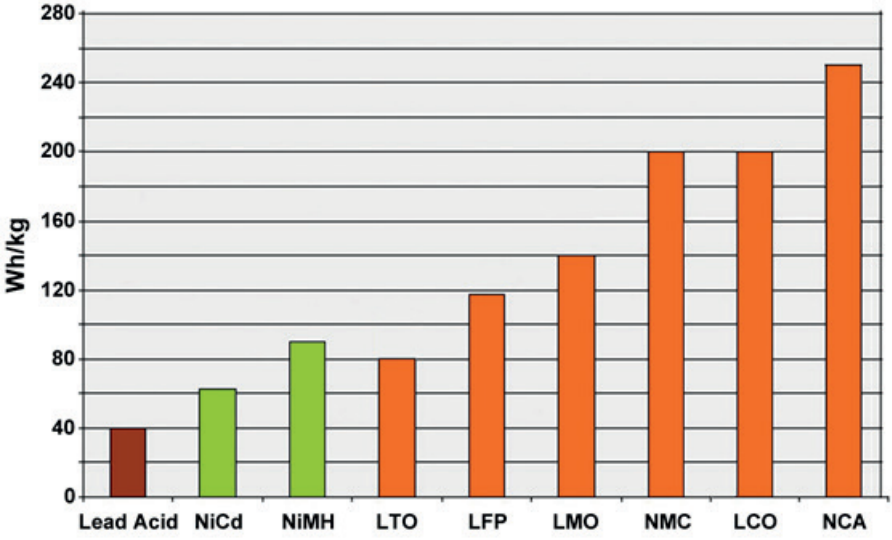
Şekil 4'de tipik bir silindirik yapıdaki pilin iç yapısı görülmektedir. Burada pozitif plaka ile negatif plaka arasına yerleştirilmiş bir seperatör iç içe sarılarak metal bir kasa içerisine yerleştirilmiştir. Pilin alt kısmında negatif plaka (Anot) üst kısmında ise pozitif plaka (katot) bulunur.

Şekil-4. Standart Bir Silindirik Lityum İyon Pilin İçyapısı



Katot plaka farklı pillerde farklı yapılarda olabilir. Bunlar Lityum kobalt Oksit ($LiCoO_2$) kısaca LCO, Lityum Manganez Oksit ($LiMn_2O_4$) kısaca LMO, Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit ($LiNiMnCoO_2$) kısaca NMC Lityum demir Fosfat($LiFePO_4$) kısaca LFP, Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit ($LiNiCoAlO_2$) kısaca NCA Lityum Titanat (Li_2TiO_3) kısaca LTO olabilir. Bu katotların her birisi farklı avantaj ve dezavantaja sahiptir. Şekil 4'de bu katotların çeşitli pillerin ağırlıklarına oranla depolayabilecekleri enerji karşılaştırılması yapılmıştır. Burada en düşük özgül enerji kurşun asit piller en yüksek özgül enerji ise NCA pillerde mevcuttur. (Battery university, 2021a)

Şekil-5. Çeşitli Pillerin Katot Malzemesine Göre Özgül Enerji Karşılaştırması



Bununla birlikte en uzun ömürlü piller LTO pilleridir. Yaklaşık şarj deşarj çevrimi 7000 defadır. Enerji yoğunlukları bakımından NCA en iyi olanıdır. Özgül güç bakımından ise LFP ve LMO piller daha üstündür. Ayrıca bu piller en iyi termal kararlılığa sahiptirler. Tablo 4'de çeşitli katot bileşenlerine ait li-ion pillerin avantaj ve dezavantajları görülmektedir. (Battery university, 2021b)

Tablo-4. Lityum İyon Pillerde Kullanılan Katot Malzemelerinin Özellikleri

Kimya	Lityum Kobalt Oksit	Lityum Manganez Oksit	Lityum Nikel Manganez Oksit	Lityum Demir Fosfat	Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit	Lityum Titanat Oksit
Kısa form	Li-kobalt	Li-mangan	NMC	Li-fosfat	Li-alüminyum	Li-titanate
Kısaltma	$LiCoO_2$ (LCO)	$LiMn_2O_4$ (LMO)	$LiNiMnCoO_2$ (NMC)	$LiFePO_4$ (LFP)	$LiNiCoAlO_2$ (NCA)	Li_2TiO_3 (LTO)
Nominal gerilim	3.60V	3,70 V (3,80 V)	3,60V (3,70V)	3,20 - 3,30V	3.60V	2.40V
Tam şarj	4.20V	4.20V	4,20V	3.65V	4.20V	2.85V
Tam deşarj	3.00V	3.00V	3.00V	2.50V	3.00V	1.80V
Minimum voltaj	2.50V	2.50V	2.50V	2.00V	2.50V	1,50V
Spesifik enerji	150–200Wh/kg	100–150Wh/kg	150–220Wh/kg	90–120Wh/kg	200-260Wh/kg	70–80 Wh/kg
Şarj oranı	0,7–1C (3 saat)	0,7–1C (3 saat)	0,7–1C (3 saat)	1C (3 saat)	1C	1C (maks. 5C)
Deşarj oranı	1C (1 saat)	1C, 10C mümkün	1–2C	1C (25C)	1C	10C mümkün
Döngü ömrü (ideal)	500–1000	300–700	1000–2000	1000–2000	500	3.000–7.000

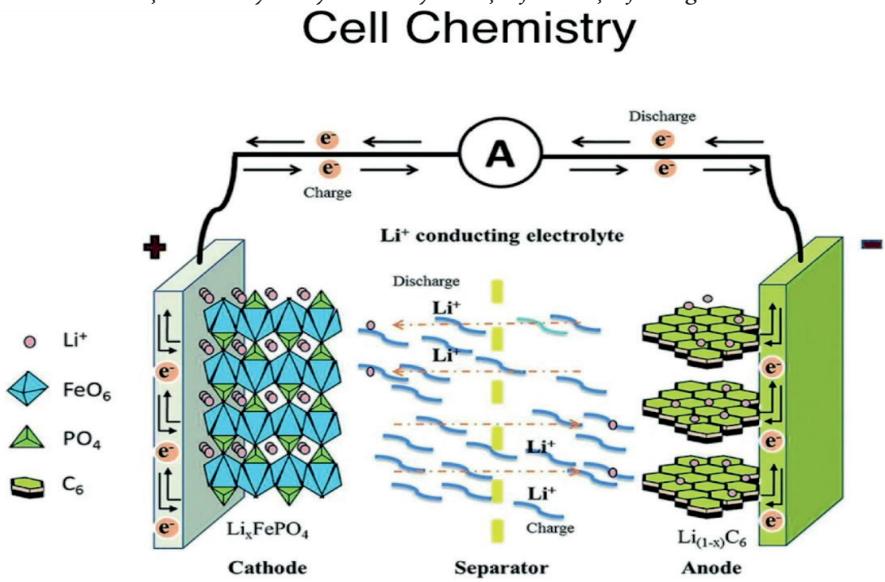
Termal kaçak	150°C (boşken daha yüksek)	250°C (boşken daha yüksek)	210°C(boşken daha yüksek)	270°C (tam şarjda güvenli)	150°C (boşken daha yüksek)	En güvenli Li-ion pillerden biri
Bakım	Kısmen şarjlı depolayın; tam şarj döngülerini önleyin, makul şarj ve deşarj akımları kullanın					
Paketleme	18650, prizmatik ve kese hücre	Prizmatik	18650, prizmatik ve kese hücre	26650, prizmatik	18650	Prizmatik
Tarih	1991 (Sony)	1996	2008	1996	1999	2008
Uygulamalar	Cep telefonları, tabletler, dizüstü bilgisayarlar, kameralar	Elektrikli aletler, tıbbi cihazlar, aktarma organları	E-bisikletler, tıbbi cihazlar, EV'ler, endüstriyel	Yüksek akımlar ve dayanıklılık ile sabit	Medikal, endüstriyel, EV (Tesla)	UPS, EV, güneş sokak aydınlatması
Yorumlar	Yüksek enerji, sınırlı güç. Pazar payı istikrar kazandı.	Yüksek güç, daha az kapasite; Li-kobalttan daha güvenli	Yüksek kapasite ve yüksek güç. Pazar payı artıyor.	Düz deşarj voltajı, yüksek güç, düşük kapasite, çok güvenli; yüksek kendi kendine deşarj.	Orta güçte en yüksek kapasite.	Uzun ömür, hızlı şarj, geniş sıcaklık aralığı ve güvenli. Düşük kapasite, pahalı.

Katot malzemesi tercih edilirken pillerin kullanıldıkları yerler de önem arz etmektedir. Anot plakalar ise grafit veya grafit ve silikon karışımından oluşur. Grafit, şarj edilmiş pillerin lityum iyonlarını kolay ve güvenli bir şekilde depolar. Gelecekte grafit yerine daha uzun ömürlü olan silikon ya da belirli oranlarda silikon ve grafit karışımı piller daha fazla önem kazanacaktır (Battery university, 2021).

Lityum İyon Bataryaların Şarj ve Deşarj İşlemler

Li-ion pillerin şarj ve deşarj döngüsü kullanım ömürlerine doğrudan etki etmektedir (Kılıç, 2019; Hançar & Kaymaz, 2021; Durmuş & Kaymaz, 2020). Buradaki en önemli konu şarj ve deşarj esnasında anot ve katot arasındaki elektrolitin davranışlarıdır. Çünkü lityum atomu çok rekaktiftir. Kolayca hava ve su ile tepkimeye girebilir. Kontrolsüz bir durum onları tehlikeli, patlayıcı ve yanıcı hale getirebilir. Elektrolit şarj esnasında lityum iyonlarının anota geçişini sağlarken bir elektronunu devre üzerinden geçirerek anotta bulunan grafite yönlendirir. Böylece grafit içerisinde lityum iyonları kararsız bir şekilde beklerken pil serbest elektronlar sayesinde dolu olur. Anot ve katot arsına bir alıcı bağlanırsa o zaman elektronlar alıcı üzerinden geçip katoda, lityum iyonları da elektrolit seperatör üzerinden geçip katoda ulaşır. Orada bulunan metal ve fosfat iyonları ile birleşerek kararlı yapıya geri dönerler. Şekil 6'da şarj ve deşarj sürecin nasıl işlediği ile ilgili bir durum gösterilmiştir. Bu tip piller uzun süre kullanılmayacaksa belirli bir şarj oaranına düşürülüp öyle saklanmalıdır. Uzun süre tam şarjlı olarak beklemeleri durumunda lityum iyonları seperatöre baskı yapar ve onların aşınmasını hızlandırır. Böyle bir durum pilin çalışma ömrünü ciddi manada azaltır.

Şekil 6. Lityum İyon Bataryanın Şarj Ve Deşarj Döngüsü



SONUÇ

Li-ion piller diğer pillere göre daha uzun ömürlüdürler. Ancak onlarında çalışması esnasında içyapısında olan değişimler sonsuz bir çalışmaya sahip olmadıklarını göstermektedir. Çeşitli incelemeler sonucunda şarj esnasında anota geçen lityum iyonları sebebi henüz açıklanamayan bir durumdan dolayı orada kalmaktadır. Deşarj esnasında geriye dönmemektedirler. Bundan dolayı elektron taşıyan lityum iyonları eksilmekte ve pilin kapasitesini zamana bağlı olarak düşürmektedir. Otomotiv üreticileri pillerin uzun ömürlü olması üzerine çalışmalarına devam etmektedirler. Bu aşamada pillerin uzun ömürlü olması ya da daha hafif olması arasında bir karar vermeleri gerekmektedir. Çünkü araştırmalara göre piller ya daha uzun ömürlü olmalı ya da daha hafif olmalıdır. Günümüz teknolojisinde elektrikli veya hibrid otomobillerde en uygun piller li-ion temelli olanlardır. Gelecekte bu durumun farklı pillerin gelişmesiyle değişeceği düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

Battery University (2019, Nisan 24). *Types of Battery Cells.* https://batteryuniversity.com/article/bu-301a-types-of-battery-cells

Battery University (2021a, Ekim 25). *Summary Table of Lithium-based Batteries.* https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries

Battery University (2021b, Ekim 22). *Types of Lithium-ion.* https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion

Çetin, M.S., Karakaya, B., Gençoğlu, M.T., (2021). Elektrikli Araçlar İçin Lityum İyon Bataryaların Modellenmesi. *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 33(2), 755-763.

Demirkan, T.M., Doğrusöz, M., (2021). Piezoelektrik malzemelerin li-ion batarya anotlarında katkı olarak kullanılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(4), 258-270.

Durmuş, F.S., Kaymaz, H., (2020). Elektrikli Araç Şarj Yöntemleri. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulama Dergisi,* 3(2), 123-139.

European Automobile Manufacturers' Association (n.d.). *What ıs wltp and how does ıt work?* Retrieved Temmuz 17, 2023 from https://www.wltpfacts.eu/what-is-wltp-how-will-it-work/

European Commission (n.d.). *European vehicle emissions standards – Euro 7 for cars, vans, lorries and buses*. European Union. Retrieved Haziran 15, 2023 from https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12313-European-vehicle-emissions-standards-Euro-7-for-cars-vans-lorries-and-buses_en

Güney, B., Küçüksarıyıldız, H., (2019). Taşıt emisyonlarının mikroyapı analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(3), 884-893.

Hançar, Y., Kaymaz, H., (2021). Elektrikli araç batarya yönetim sistemleri için hücre eşitleme yöntemleri. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulama Dergisi,* 4(1), 59-73.

Kılıç, E., (2019). DA-DA yükselten dönüştürücü ile elektrikli araç batarya şarj cihazı tasarımı. *Kahramanmaras Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences,* 22(4), 281-287.

Kmieć, M., Weber, M., Romijn, M., Matews, D., (2020). Application of automotive safety design methodologies to the development of Euro 7 emission control systems including on board monitoring. *Combustion Engines*, 188(1), 75-82.

Mercedes (n.d.). *Mercedes EQE.* Retrieved Mayıs 15, 2023 from https://www.mercedes-benz.com.tr/passengercars/models/saloon/eqe/overview.html

Morali, U., Erol, S., (2020). Electrochemical impedance analysis of 18650 lithium-ion and 6HR61 nickel-metal hydride rechargeable batteries. J*ournal of the faculty of engineering and architecture of gazi university*, 35(1), 297-309.

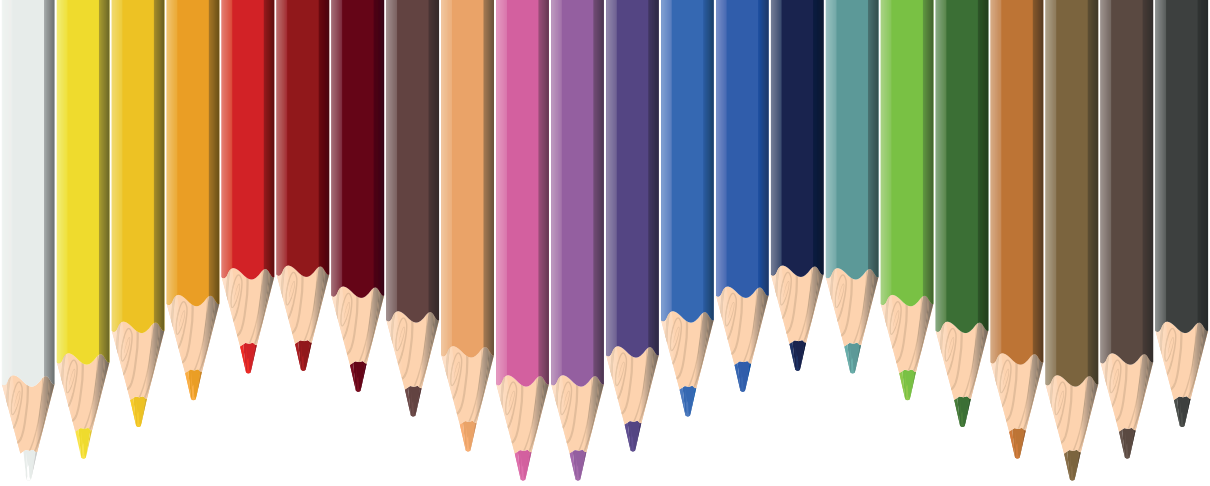
Mulholland, E., Miller, J., Bernard, Y., Lee, K., Rodríguez, F., (2022). The role of NOx emission reductions in Euro 7/VII vehicle emission standards to reduce adverse health impacts in the EU27 through 2050. *Transportation Engineering*, 9, 100133.

Özcan, Ö.F., Karadağ, T., Altuğ, Mehmet., Özgüven, Ö.F., (2021). Elektrikli araçlarda kullanılan pil kimyasallarının özellikleri ve üstün yönlerinin kıyaslanması üzerine bir derleme çalışması. *Gazi University Journal of Science Part a: engineering and innovation,* 8(2), 276-298.

Pavlovic, J., Ciuffo, B., Fontaras, G., Valverde, V., Marotta, A., (2018). How much difference in type-approval CO2 emissions from passenger cars in Europe can be expected from changing to the new test procedure (NEDC vs. WLTP)? *Transportation Research Part A*, 111, 136-141.

Renault (n.d.). *Reanult zoe*. Retrieved Mayıs 15, 2023 from https://www.renault.com.tr/elektrikli-araclar/yeni-zoe.html

Sayın, A.A., Yüksel, İ., (2011). Elektrikli renault fluence aracı, lityum-iyon bataryasının modellenmesi ve batarya yönetimi. *Makina Mühendisleri Odası 12. Otomotiv ve Üretim Teknolojileri Sempozyumu'nda sunulmuştur.* Bursa, Türkiye.



Bölüm 13

ZEMİN SIVILAŞMASI: TEHLİKELERİ, OLUŞUM MEKANİZMALARI VE MÜHENDİSLİK ÇÖZÜMLERİ

Aykut Özpolat[1]
H.Suha Aksoy[2]

1 Aykut Özpolat, Dr.Öğr. Üyesi, Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü,Orcid No: 0000-0003-4028-6261
2 H.Suha Aksoy, Doç.Dr., Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Orcid No: 0000-0003-0564-457X

Bu kitap bölümü, deprem sonrası zemin sıvılaşması durumunu anlamak, tanımlamak ve mühendislik açısından ele almak isteyen okuyucular için genel bir kaynak olarak tasarlanmıştır. Deprem sonrası zemin sıvılaşması, depremlerin etkileriyle başa çıkmak için mühendisler ve araştırmacılar için kritik bir konu haline gelmiştir. Bu çalışma, sıvılaşmanın mekanizmalarını, tanımlayıcı özelliklerini, sıvılaşma riski değerlendirmesini ve önleyici tedbirleri ele alarak okuyuculara özet bir anlayış sunmayı amaçlamaktadır.

1. Giriş

Deprem, dünyanın pek çok bölgesinde karşılaşılabilen doğal felaketlerden biridir ve insanlığın yaşadığı coğrafyalarda yüzyıllar boyunca büyük yıkımlara neden olmuştur. Depremler, yer kabuğunda gerilmelerin birikmesi ve serbest bırakılması sonucu meydana gelir ve genellikle binaların, köprülerin, altyapının ve hatta yaşamın üzerinde derin etkiler bırakır. Ancak deprem sonrası oluşan zararların etkileri sadece yer yüzeyindeki yapılarla sınırlı değildir. Depremler aynı zamanda zemini etkileyebilir ve bu etkiler arasında en dikkat çekici ve tehlikeli olanı zemin sıvılaşmasıdır. Zemin sıvılaşmasının etkileri Şekil 1'de görülmektedir.

Şekil 1. 1999 Türkiye Adapazarı ilinde meydana gelen depremin neden olduğu sıvılaşmanın etkileri (http://www.jeofizik.org.tr/resimler/ekler/d50601b7bc18501_ek.pdf)

Zemin sıvılaşması, deprem mühendisliği ve jeoloji alanlarında araştırmacılar, mühendisler ve planlamacılar için büyük bir problem olmuştur. Zemin sıvılaşması, granüler zeminlerin belirli koşullar altında deprem sırasında sıvı benzeri bir davranış sergilemesiyle karakterize edilmektedir. Sıvılaşma sonucu, zeminin taşıma kapasitesi ciddi şekilde düşerek ve meydana gelen

taşıma gücü kaybı sonucunda da yapıların çökmesine veya oturma problemlerine neden olabilmektedir. Depremin kendisi kadar, deprem sonrası meydana gelen zemin sıvılaşması da büyük hasara yol açmakta ve can kayıplarına neden olmaktadır (Terzaghi,1925).

Zemin sıvılaşmasının temel nedenlerini ve oluşum mekanizmasını anlayarak, bu duruma karşı koruyucu önlemler alınarak, inşaat mühendisleri, jeologlar ve diğer ilgili uzmanlar tarafından daha güvenli yapılar tasarlanabilir.

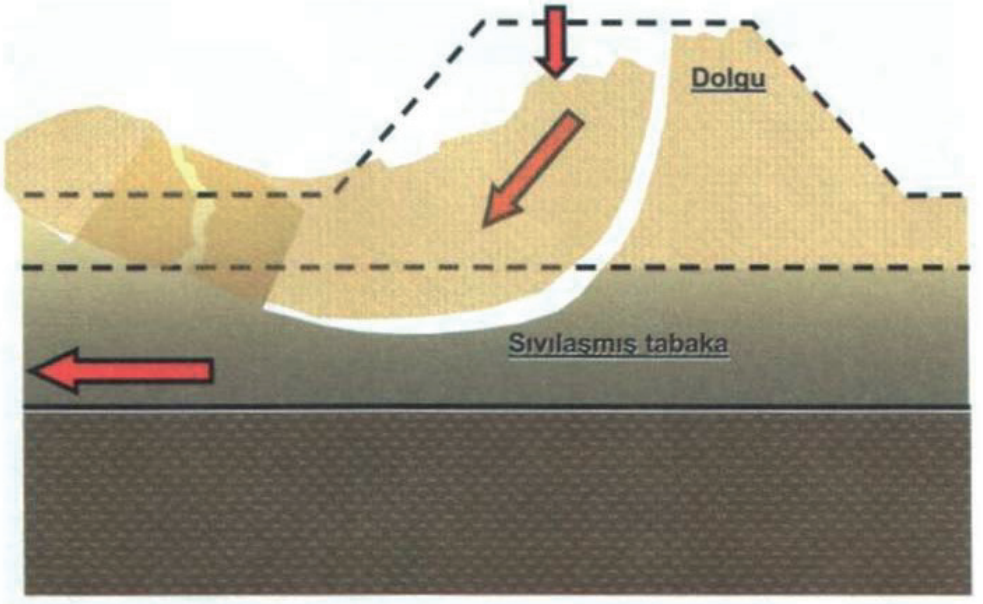
Bu kitap bölümü ile deprem sonrası zemin sıvılaşması olgusunu daha derinlemesine incelemesi ve bu sorunun anlaşılması, önlenmesi ve etkilerinin azaltılması için kullanılabilecek çeşitli yöntemleri ele almayı amaçlanmaktadır. Ayrıca, depremler sonucunda meydana gelen sıvılaşma örnekleri ve uygulamalarla zenginleştirilmiş bu çalışma, zemin sıvılaşması konusunu anlamak ve çözmek için gereken temel bilgileri sağlayacaktır. Deprem sonrası zemin sıvılaşması konusunu farklı yönleri ile incelenerek ve okuyuculara bu karmaşık konuyu daha iyi anlama ve çözme fırsatı sunulacaktır.

2. Depremlerin Zemin Üzerindeki Etkileri

Depremler, yer kabuğunda meydana gelen kırılma sonrasında veya volkanik faaliyetler nedeniyle kayaçların ani bir şekilde serbest bıraktığı enerji sonucu meydana gelmektedir. Bu enerji serbest bırakımı, çoğunlukla yer kabuğundaki plakaların sınır bölgelerinde yer alan fay hatları boyunca gerçekleşmekte ve bu plaka hareketleri depremin meydana gelmesine yol açmaktadır. Ancak depremin etkileri sadece yüzeyde görülen sarsıntılarla sınırlı değildir. Deprem dalgaları, yer yüzeyinden derinlere kadar yayılır ve zeminin altındaki ve üstündeki yapıları ve tabakaları etkileyebilmektedir (Castro, 1969). Deprem sonucunda zeminde meydana gelen etkiler aşağıdaki maddeler halinde sıralanabilirler;

1. Yüzey Kırıkları ve Faylar: Büyük depremler sırasında, yer yüzeyinde gözle görülecek kırıklar ve çatlaklar oluşturabilmektedir. Yer kabuğunda meydana gelen bu kırıklar, yer yüzeyini büyük ölçüde değiştirebilir ve arazide çöküntüler, yükseltiler, şev kaymaları oluşturabilir.

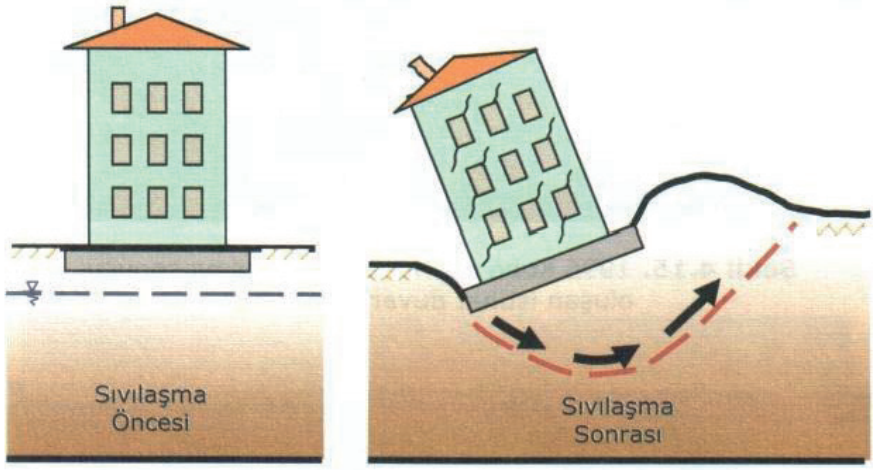
2. Toprak Kaymaları ve Heyelanlar: Depremler, eğimli arazilerde toprak kaymalarına ve heyelanlara neden olabilmektedir. Deprem sonrasında zeminde meydana gelen bu tür kaymalar, çevredeki yapıları etkilemekte, can kayıplarına ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır (Şekil2).



Şekil 2. Akma göçmesi (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)

3. Sıvılaşma: Depremler sırasında, yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu suya doygun granüler zeminlerde ve plastisite indisi düşük, ince malzeme oranı az olan kohezyonlu zeminlerde sıvılaşma durumu gerçekleşmektedir. Zemin sıvılaşması durumu zeminin taşıma kapasitesini kaybetmesine ve binalar, köprüler, barajlar vb. gibi yapıların çökmesine, yan yatmasına, farklı oturmalar oluşmasına neden olmaktadır (Seed ve Idriss, 1982). Sıvılaşmanın olası etkileri Şekil 3'te görülmektedir.

4. Yeraltı Su Seviyeleri: Depremler, yeraltı su seviyelerini etkileyebilmektedir. Deprem sonrasında yeraltı su seviyelerinde yükselme veya düşme durumları görülebilmektedir. Bu durum zemindeki efektif gerilmeleri, taşıma gücünü etkilemekte ve yapıların zarar görmesine neden olmaktadır (Youd, 1992).



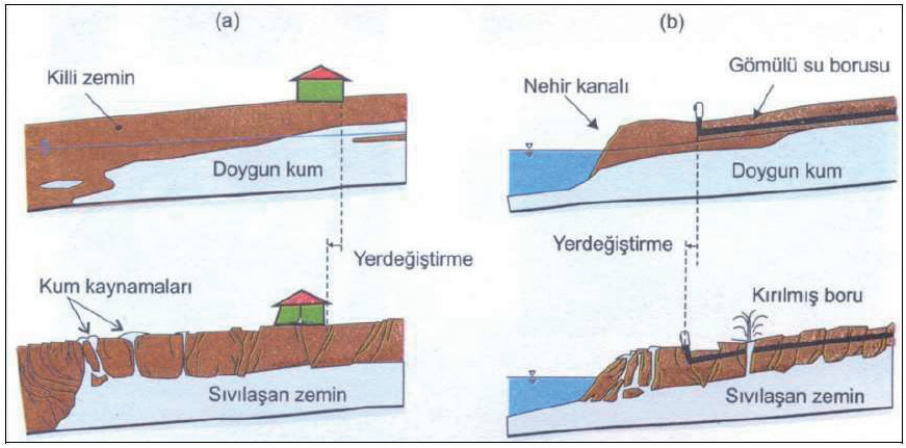
Şekil 3. Taşıma gücü kaybı yenilme biçimi (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)

Depremlerin zemin üzerindeki etkileri birçok faktöre bağlıdır(Özçep v.d., 2004). Bu faktörler:

- Depremin büyüklüğü ve derinliği: Depremin büyüklüğü ve derinliği, zemin üzerindeki etkilerini belirleyen önemli faktörlerdir. Daha büyük ve daha derin depremler genellikle daha büyük yüzey değişikliklerine yol açmaktır.

- Zemin tipi: Zeminin özellikleri, depremin yer yüzeyinde oluşturduğu etkileri büyük oranda belirlemektedir. Özellikle yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu gevşek, düşük sıkılıktaki granüler zeminler, sıvılaşma riskine daha açıktır.

- Yerel topografya: Topografya, depremin etkilerini arttıran başka bir faktördür. Eğimli arazilerde toprak kaymaları ve heyelanlar daha yaygın olarak meydana gelmektedir. Şekil 4'te eğimli yüzeyde meydana gelen sıvılaşma olayı görülebilir.



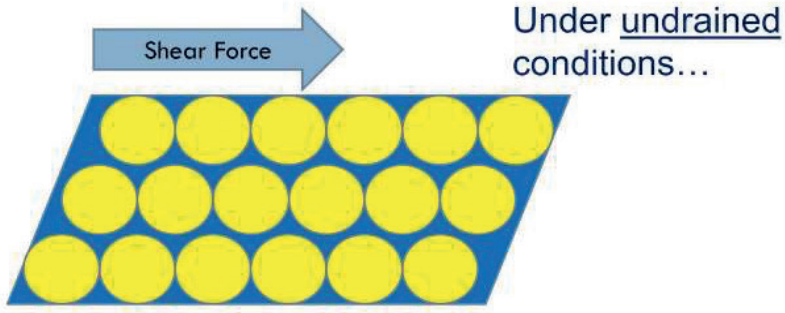
Şekil 4. (a) *Eğimli bir yamaçta,* **(b)** *serbest yüzeye doğru gelişen yanal yayılma (Rauch, 1987)*

3. Sıvılaşma

Zemin sıvılaşması, bir zeminin deprem sırasında suya doygun hale gelerek sıvı benzeri bir davranış sergilemesi durumunu ifade etmektedir. Bu durum, granüler (kumlu veya çakıllı) zeminlerde, zeminin içinde (tanecikleri arasında) oluşan boşluksuyu basınçları nedeniyle meydana gelir. Zemin sıvılaşması, deprem mühendisliği ve jeoloji alanlarında büyük bir öneme sahiptir, çünkü bu olayın sonucu olarak yapılar ve altyapı ciddi şekilde hasar görebilmektedir.

Zemin sıvılaşmasının temel nedenleri ve süreci şu şekildedir:

- Granüler zeminler: Zemin sıvılaşması, genellikle granüler zeminlerde meydana gelir. Bu tür zeminler, tanecikler arasındaki boşluklar nedeniyle suyun kolayca nüfuz edebildiği ve biriktiği zeminlerdir. Deprem sırasındaki ani sarsıntılar, toprağın içindeki suyu harekete geçirerek taneciklerin birbirinden ayrılmasına neden olur. Şekil 5'te de görüldüğü gibi tanecikler arasındaki suyun tahliye olamaması nedeniyle basınç artarak efektif gerilmenin düşmesine hatta sıfıra yakın olmasına neden olmaktadır. Bu durum, zeminin dayanıklılığını kaybetmesine ve sıvılaşmasına yol açar.

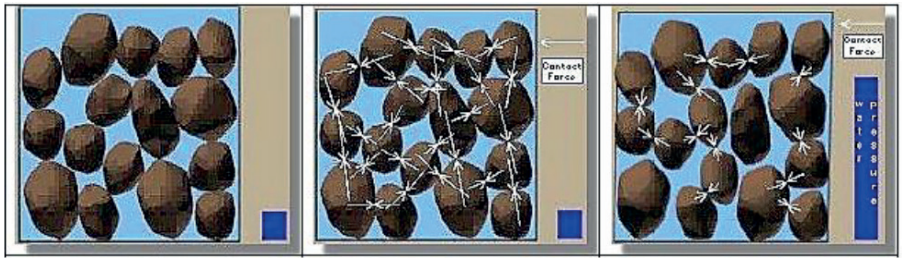


Şekil 5. Granül zeminlerdeki sıvılaşma olayı (Koçkar, 2022)

- Doğal su varlığı: Zemin sıvılaşması için bir diğer önemli faktör, zeminin doğal olarak yüksek su içeriğine sahip olmasıdır. Bu durum genellikle yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

- Deprem sarsıntısı: Zemin sıvılaşması, bir deprem sonucu ortaya çıkan titreşim dalgalarının zemin içerinde ilerlemesi sonucu ortaya çıkar. Deprem dalgaları, granüler zeminlerdeki tanecikleri sıkıştırır ve suyu bu taneciklerin arasına itmeye başlar. Böylece zemin taneleri arasındaki su titreşim etkisiyle drene olamaz ve sıkışarak boşluk suyu basıncında artış meydana getirir. Böylece zemin sıvılaşması oluşmaktadır.

- Sıvılaşma süreci: Deprem sırasında, zeminin içindeki su, tanecikler arasındaki boşlukları doldurur ve basınçlı bir şekilde bu boşlukları sıkıştırır. Boşluk suyu basıncındaki artış efektif gerilmeyi azaltır veya sıfıra yakın duruma getirebilir. Bu durum, zeminin taşıma kapasitesini azaltarak, zeminin sıvılaşmasını tetikler (Şekil 6).



Şekil 6. Zemin taneleri arasındaki bağlantı ve su basıncı ilişkisi (https://depts.washington.edu/liquefy/html/why/why1.html) (Anonymous, 2006a)

Zemin sıvılaşması sonucu, zeminin taşıma kapasitesi önemli ölçüde azalma meydan gelmektedir ve bu durum yapılara veya altyapıya ciddi zararlar verebilmektedir. Binalarda yan yatmalar ve yıkılmalar, köprülerde yıkılmalar veya akslarında kaymalar, sulama kanallarında problemler ve bu durumlara

benzer birçok olumsuz etki sıvılaşma sonucunda meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, deprem bölgelerinde inşa edilecek yapılarda veya mevcut yapıları güçlendirirken zemin sıvılaşmasını dikkate almak ve sıvılaşmayı önlemek büyük bir öneme sahiptir. Deprem sonrası zemin sıvılaşmasını önlemek veya etkilerini azaltmak için zemin iyileştirme teknikleri ve mühendislik çözümleri kullanılabilir (Bartlett ve Youd, 1992).

4. Zemin Davranışı ve Temel Kavramlar

Zemin davranışı, geoteknik mühendisliğin ana inceleme konusudur. Geoteknik mühendisliği, zeminin yükler altında nasıl bir davranış sergilediğini, zeminin taşıma kapasitesini, yükler altında deformasyon karakteristiklerini ve diğer özelliklerini inceleyen bir disiplindir. Geoteknik mühendisliğindeki temel kavramlar:

- Zemin: Zemin, doğada bulunan ve insanlar tarafından inşaat ve altyapı projelerinde kullanılan kil, silt, kum, çakıl, kaya gibi malzemeleri genel anlamda ifade eder. Zemin, granüler (taneli) veya kohezyonlu (yapışkan) olabilir ve bu farklılık jeolojik süreçler sonucu oluşmaktadır.

- Taşıma kapasitesi: Zeminin taşıma kapasitesi, bir yapının temeli tarafından zemine aktarılan yükün zemin tarafından taşınması olarak ifade edilebilir. Zeminin taşıma kapasitesi, zeminin mukavemet parametrelerine ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

- Deformasyon: Zeminin yüke maruz kaldığı zaman nasıl deforme olduğunu ifade eder. Zemine etki eden yüke bağlı olarak, zeminlerde oturma, şişme veya kayma gibi deformasyonlar oluşabilmektedir. Dış etmenlere bağlı olarak zeminde meydana gelen deformasyonlar, yapıların stabilitesini etkileyebilirler.

- Zeminin su içeriği: Zeminin su içeriği, zeminin granüler veya kohezyonlu yapıda olmasına bağlı olarak, zeminin mukavemetini ve sıvılaşma potansiyelini etkilemektedir.

- Zemin sınıflandırması: Zeminler, granülometrik yapılarına ve plastisitelerine vs. göre farklı sınıflandırmalara tabi tutulmaktadır. Bu sınıflandırmalar yardımıyla zemin cinsi tespit edilerek zeminin davranışını ve özelliklerini belirlenmesi için kullanılmaktadır.

- Zemin özgül ağırlığı: Zeminin özgül ağırlığı, zeminin yoğunluğunu ifade etmektedir. Daha yüksek özgül ağırlığa sahip zeminler, daha yüksek taşıma kapasitesine sahip olma eğilimindedir.

- Zemin mukavemet parametreleri: Zeminin taşıma kapasitesinin belirlenmesi için gerekli olan değerleri ifade etmektedir. Zemin mukavemet parametreleri, zemin türüne ve koşullarına bağlı olarak değişmektedir.

- Sıvılaşma: Suya doygun granüler zeminlerde veya düşük plastisiteli

kohezyonlu zeminlerde ani yüklemeler sebebiyle taşıma kapasitesini kaybederek sıvı benzeri bir davranış sergilemesi durumu olarak tanımlanabilir. Sıvılaşma, deprem sırasında granüler zeminlerde sıkça görülen bir olaydır.

- Konsolidasyon: Kohezyonlu zeminlerin yükler altında sıkıştırılması sonucu meydana gelen deformasyon sürecidir. Bu süreçte zeminin içinde bulunan suyun çıkması ve zemin danelerinin birbirlerine yakınlaşması sonucunda zeminin yoğunlaşması söz konusudur.

- Geoteknik mühendisliği: En genel ifadeyle zemin davranışı ve özellikleri ve taşıma kapasitesi ile ilgilenen bir mühendislik dalı olarak tanımlanabilir. Geoteknik mühendisleri, zeminin taşıma kapasitesini değerlendirir, temel tasarımı yapar ve altyapı projelerinin güvenliği için zemin davranışını analiz ederler.

Bu temel kavramlar, zemin davranışı ve geoteknik mühendislik çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. Zeminin özelliklerinin anlaşılması, yapıların güvenli bir şekilde tasarlanması ve inşa edilmesi için kritik bir öneme sahiptir.

5. Zemin - Sıvılaşma İlişkisi

Zemin türleri ve sıvılaşma arasındaki ilişki, zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerinin sıvılaşma olasılığını nasıl etkilediğini açıklar. Sıvılaşma, genellikle granüler zeminlerde meydana gelir ve bu zeminlerin belirli özelliklerine dayanır (Seed ve Peacock 1977, Das, 1993). İşte zemin türleri ve sıvılaşma ilişkisini açıklayan önemli faktörler:

- Granüler zeminler: Zemin türleri arasında kum gibi granüler zeminler, sıvılaşma olaylarının en yaygın görüldüğü zemin türleridir. Granüler zeminler, tanecikler arasındaki boşlukların genellikle büyük olduğu ve suyun kolayca nüfuz edebildiği zeminlerdir. Bu tür zeminler, sıvılaşma sürecine daha duyarlıdır.

- Kil ve silt zeminler: Kil ve silt gibi ince taneli zeminlerde plastisite indisi ve ince malzeme oranına bağlı olmak koşuluyla sıvılaşma riski daha düşüktür. Bu tür zeminler, tanecikler arasındaki boşlukların daha küçük olduğu ve suyun daha az nüfuz ettiği zeminlerdir. Bu nedenle, granüler zeminlere kıyasla sıvılaşma riski daha düşüktür.

- Doğal su seviyesi: Zeminin sıvılaşma potansiyeli, yeraltı su seviyesinin yakınlığına bağlıdır. Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu alanlarda, sıvılaşma riski daha yüksektir. Su seviyesi yüzeye daha yakınsa, deprem sırasında zeminde su basınçları daha yüksek seviyelere ulaşarak, sıvılaşma daha olası hale gelmektedir.

- Sıkılık: Zeminin sıkılığı, sıvılaşma potansiyelini etkileyen bir faktördür. Granüler zeminler ne kadar çok sıkıştırılabilir olursa, sıvılaşma ris-

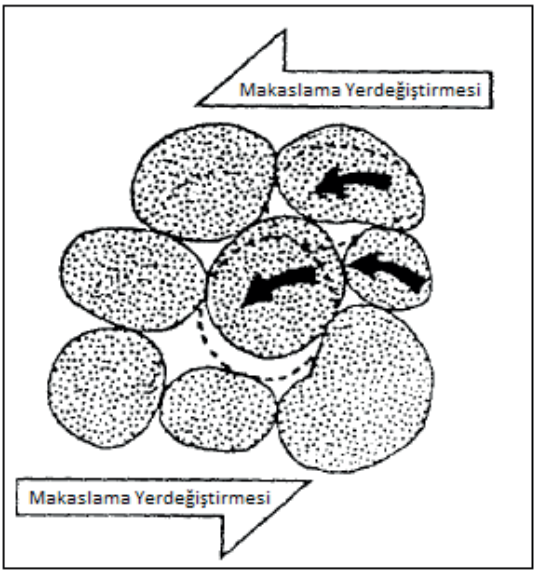
kini de o kadar çok artmaktadır. Bu durum zeminin tanecikleri arasındaki boşlukların fazla olası sebebiyle daha fazla su ile doldurabilmesi ve sıvılaşma derecesini artmasına sebep olmaktadır.

- Mineralojik bileşim: Zeminin mineralojik bileşimi de sıvılaşma üzerinde etkilidir. Özellikle kil minerali içeren zeminler, suyun emilimini daha iyi kontrol etmekte ve sıvılaşma riskini azaltmaktadır.

Sıvılaşma, genellikle büyük depremler sırasında suya doygun granüler zeminlerde meydana gelmektedir ve bu nedenle inşaat mühendisleri ve jeologlar, bina temelleri ve altyapı için uygun zemin türlerini seçerken sıvılaşma potansiyelini dikkate almalıdır. Depremin etkisi altında sıvılaşma yaşanabilecek bölgelerde, zemin iyileştirme teknikleri veya güçlendirme yöntemleri kullanılarak risk azaltılabilmektedir. Bu nedenle, zemin türleri ve sıvılaşma ilişkisini anlamak, güvenli ve dayanıklı inşaat projeleri için kritik öneme sahiptir.

5.1.Sıvılaşma Mekanizması ve evreleri

- Doygunluk: Zemin sıvılaşmasının birinci adımı, granüler zeminin su ile tamamen doygun hale gelmesidir. Doygunluk, zeminin boşlukları tamamen su ile dolu olduğunda gerçekleşir. Su, zeminin tanecikleri arasında serbestçe hareket edebilir hale gelir ve zeminin sıvılaşma sürecinin başlamasının temel şartıdır (Şekil 7).



Şekil 7. Sıvılaşmanın mekanizması (Youd, 1984)

- Sıvılaşma başlangıcı: Deprem dalgaları zeminin sıkışmasına ve gerilmesine neden olur. Bu gerilme, zemin içindeki suyu tanecikler arasındaki boşluklarda sıkıştırır ve suyun basınçlı hale gelmesine yol açar. Bu aşamada,

zemin henüz sıvılaşma noktasına gelmemiştir,

• Sıvılaşma öncesi: Deprem sırasında zemindeki titreşimler arttıkça, zeminin içindeki suyun daha fazla sıkışmasına ve suyun basınçlı hale gelmesine neden olur. Sıvılaşma mekanizması bu aşamada hız kazanır ve zemin sıvılaşma noktasına yaklaşır.

• Sıvılaşma durumu: Zemin, suyun basınçlı hale geldiği ve danelerin serbestçe hareket etmeye başladığı noktada tam olarak sıvılaşır. Bu aşamada, zeminin taşıma kapasitesi önemli ölçüde azalır ve bu durum binaların veya yapıların çökmesine, farklı oturmaların meydana gelmesine veya kaymasına neden olabilmektedir. Sıvılaşma süreci genellikle deprem dalgasının şiddeti ve süresine, zeminin yapısına bağlı olarak değişmektedir.

• Sıvılaşmanın etkileri: Zemin sıvılaşması sonucu, zeminin taşıma kapasitesinin azalması yapıların çökmesine, aşırı veya farklı oturmaların oluşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, sıvılaşma, depremlerin binalara ve altyapıya olan etkilerini önemli ölçüde artırmaktadır.

Zemin sıvılaşma mekanizmaları, suya doygun granüler zeminlerde deprem sırasında suyun rolünü ve bu süreçlerin nasıl işlediğini açıklamaktadır. Bu mekanizmaları anlamak, mühendislerin ve jeologların deprem sonrası zemin sıvılaşmasını değerlendirmelerine ve uygun önlemleri alarak yapılara ve altyapıya zarar verme riskini azaltmalarına yardımcı olmaktadır (Seed ve Peacock 1977, Das, 1993).

6. Sıvılaşma Kriterleri ve Ölçüm Yöntemleri

Sıvılaşma kriterleri ve ölçüm yöntemleri, sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerin deprem sırasında ne zaman ve nasıl sıvılaşabileceğini belirlemek için kullanılmaktadır. Bu kriterler ve yöntemler, tasarım mühendisleri tarafından zemin sıvılaşması potansiyelini değerlendirmek ve sıvılaşma sonucu oluşabilecek riskleri yönetmek için kullanılmaktadır. Sıvılaşma kriterleri ve ölçüm yöntemleri hakkında genel bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

Sıvılaşma Kriterleri:

• Sıvılaşma direnci: Sıvılaşma kriterlerinin temelinde, deprem dalgalarının oluşturduğu tekrarlayan kayma gerilmeleri karşısında zeminin nasıl bir davranış göstereceği vardır. Sıvılaşma direnci, zeminin tekrarlayan bu gerilmelere karşı dayanma kapasitesini ifade etmektedir. Sıvılaşma direnci, zeminin özgül ağırlığı, cinsi, tanecik boyutu ve kohezyon gibi faktörlere bağlı olarak hesaplanmaktadır.

• Konsolidasyon durumu: Zeminin konsolidasyon durumu da sıvılaşma potansiyelini etkileyen önemli bir faktördür. Eğer zemin, daha önce aşırı konsolide olmuşsa, plastisite indisine ve ince malzeme oranına bağlı olarak sıvılaşma potansiyeli daha düşük olmaktadır. Bu nedenle, zeminin konsoli-

dasyon durumu sıvılaşma kriterlerini değerlendirmede dikkate alınmalıdır.

3. Zemin Doğal Su İçeriği: Zeminin doğal su içeriği, sıvılaşma potansiyelini belirleyen kritik bir faktördür. Zemin cinsine bağlı olarak daha yüksek su içeriği, sıvılaşma riskini artırabilmektedir.

6.1. Sıvılaşma Ölçüm Yöntemleri

Zeminde meydana gelen oluşabilecek sıvılaşmanın tespit edilmesi için kullanılan başlıca yöntemler aşağıdaki şekilde sıralanabilirler (Seed ve Peacock 1977, Das, 1993, Liao ve Whitman, 1986);

- Standard penetrasyon testi (SPT): Bu test, zeminin mühendislik özelliklerini değerlendirmek için kullanılır ve sıvılaşma potansiyelini tahmin etmeye yardımcı olmaktadır. Sıvılaşma potansiyeli, SPT sonuçlarına dayalı denklemlerle tahmin edilebilmektedir.

- Ses dalga hızı ölçümü: Ses dalga hızı ölçümü, zeminin elastik özelliklerini değerlendirmek için kullanılır ve sıvılaşma potansiyelini tahmin etmede yardımcı olmaktadır. Zeminin ses dalga hızı, deprem dalgalarının yayılma hızını göstermekte ve bu ölçüm yöntemi ile elde dilen veriler zeminin sıvılaşma potansiyelini belirlemekte önemli bir gösterge olabilmektedir.

- Laboratuvar testleri: Zemin numunelerini bir takım laboratuvar testlerine tabi tutularak zeminin fiziksel ve mekanik özellikleri tespit edilebilmektedir. Bu testler arasında üç eksenli deney aleti ile yapılan deneyler, kesme mukavemeti testleri ve rölatif sıkılık testleri vs. bulunmaktadır. Bu testler, zeminin sıvılaşma potansiyelini daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirmeye yardımcı olmaktadır.

Sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek ve önlemek için kullanılan kriterler ve ölçüm yöntemleri, mühendislere deprem sonrası zemin sıvılaşmasına karşı uygun önlemler almak için önemli bir temel sağlamaktadır. Bu yöntemler, yapıların güvenliği ve dayanıklılığı için kritik öneme sahiptir.

7. Sıvılaşma Sınıflandırmaları ve Zemin Tiplerine göre Sınıflandırmalar

Sıvılaşma sınıflandırmaları, zeminlerin sıvılaşma potansiyelini ve şiddetini belirlemeye yönelik kullanılan sistemlerdir (Sönmez, 2003). Bu sınıflandırmalar, zeminlerin özelliklerine ve davranışlarına dayalı olarak sıvılaşma riskini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

7.1. Sıvılaşma Risk Sınıflandırması

- Düşük risk grubu: Sıvılaşma riskinin düşük olduğu zeminleri tanımlamaktadır. Genellikle yüksek sıkılıktaki zeminler ve aşırı konsolide olmuş zeminler düşük risk grubuna giren zemin türleridir. Kil ve silt gibi ince taneli zeminler bu kategoriye dahil edilebilir.

- Orta risk grubu: Orta risk kategorisi, sıvılaşma potansiyeli olan ancak orta seviyede risk taşıyan zeminleri tanımlamaktadır. Kum ve kilin karışımı ile oluşan zeminler, içerisinde bulunan kil oranına göre bu kategoriye dahil olabilirler. Kum ve kilin karışımından oluşan bu tür zeminlerde kil oranı arttıkça sıvılaşma riski azalmaktadır.

- Yüksek risk grubu: Bu grup, yüksek sıvılaşma potansiyeli taşıyan zeminleri ifade etmektedir. Özellikle suya doygun gevşek kum ve çakıl gibi granüler zeminler yüksek risk taşıyan zeminler olarak kabul edilmektedir.

7.2. Sıvılaşma Derecesi Sınıflandırması (Sönmez ve Gökçeoğlu, 2005):

- Hafif sıvılaşma: Bu sınıf, zeminde hafif sıvılaşma olaylarını tanımlamakta ve genellikle bu derecede meydana gelen sıvılaşma, yapısal hasarlara neden olmaz ve yüzeyde hafif çöküntüler meydana getirebilirmektedir.

- Orta derece sıvılaşma: Orta derece sıvılaşma, zeminde daha belirgin çöküntülere ve bina temellerinin kaymasına veya farklı oturmalara yol açabilmektedir. Bu durumda yapısal hasar riski artabilmektedir.

- Şiddetli sıvılaşma: Şiddetli sıvılaşma, zeminin ciddi şekilde sıvılaştığı durumları ifade etmektedir. Şiddetli sıvılaşmada, bina temellerinde ciddi şekilde kayma, batma, aşırı derecede farklı oturmalar gibi durumlar gözlemlenebilmektedir. Çoğunlukla ciddi yapısal hasarlar meydana getiren sıvılaşma seviyesidir.

7.3. **Zemin Türüne Göre Sınıflandırma:**

- Granüler zeminler: Granüler zeminler, suya doygunluk durumlarına göre genellikle sıvılaşma riski taşıyan zeminlerdir. Düşük sıkılıktaki kum zeminler, sıvılaşma potansiyeli yüksek olan zemin türlerine örnek olarak verilebilirler.

- İnce taneli zeminler: İnce taneli zeminler, kil ve silt gibi zeminlerdir. Bu tür zeminler genellikle daha az sıvılaşma potansiyeline sahiptir, ancak bu durum plastisite indisi, konsolidayon geçmişi, kil oranı vs. gibi zemin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

Sıvılaşma sınıflandırmaları ve zemin tiplerine göre sınıflandırma, deprem sonrası zemin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek ve riskleri yönetmek için kullanışlı araçlardır. Bu sınıflandırmalar, yapıların güvenliği ve dayanıklılığı için gerekli önlemlerin alınmasına yardımcı olabilir ve inşaat projelerinin planlanmasında kritik bir rol oynamaktadır.

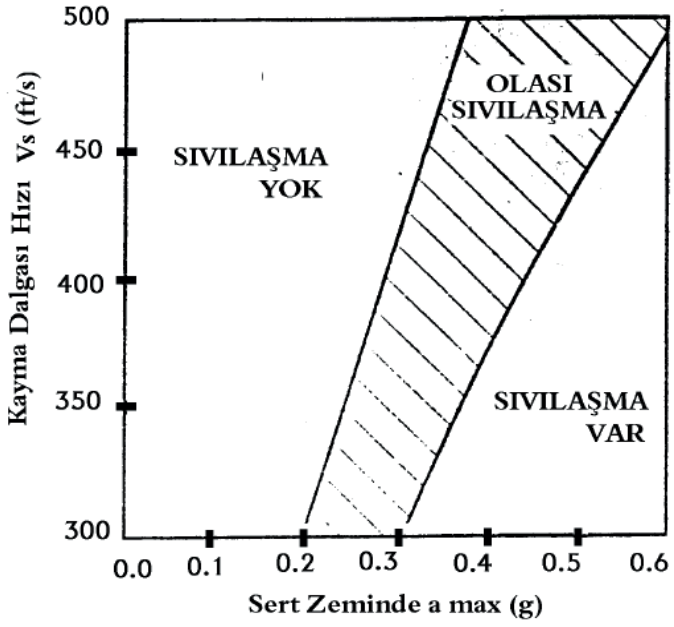
8. Sıvılaşma ve Deprem Büyüklüğü İlişkisi

Sıvılaşma ve deprem büyüklüğü arasında karmaşık ve çok faktörlü bir ilişki vardır. Sıvılaşma süreci, birçok faktörün etkileşimi sonucu meydana gelir ve depremin büyüklüğü de bu faktörlerden biridir. İşte sıvılaşma ile dep-

rem büyüklüğü arasındaki ilişkiyi anlatan bazı önemli noktalar:

Deprem büyüklüğü, depremin enerjisini ve sarsıntının şiddetini ifade etmektedir. Genel olarak deprem büyüklüğü arttıkça yer yüzeyinde daha büyük sarsıntılar oluşmakta ve daha fazla enerji açığa çıkmaktadır. Bu nedenle, büyük depremler daha geniş bir bölgede sıvılaşma riskini artırabilmektedir.

Sıvılaşma potansiyeli, zeminin özelliklerine, özellikle granüler zeminlerin türüne ve doygunluk durumuna bağlıdır. Zeminlerin sıvılaşma potansiyeli, yerel depremin büyüklüğü ile ilişkilidir. Ancak benzer büyüklükteki depremlerin mutlaka sıvılaşmaya sebep olma potansiyeli yoktur. Depremin meydana geldiği bölgedeki zemin özellikleri ve yeraltı su seviyeleri, deprem büyüklüğünün sıvılaşma üzerindeki etkilerini belirlemektedir. Depremin büyüklüğü arttıkça, zeminlerin sıvılaşma potansiyeli de artmaktadır. Ancak, diğer faktörler (örneğin, zemin türü, doygunluk durumu vb.) de bu potansiyeli belirlemektedir (Stokoe vd. 1988). Kayma dalgası hızıyla yer ivmesinin, yüksek sıkılıktaki zeminlerin sıvılaşması üzerindeki etkisi Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. Kayma dalgası hızı ve yer ivmesinin sıvılaşmaya etkisi (Stokoe vd. 1988)

Sonuç olarak, sıvılaşma ve deprem büyüklüğü arasında bir ilişki vardır, ancak bu ilişki çok karmaşıktır ve yerel zemin koşulları, depremin büyüklüğü ve diğer faktörlerle etkileşimlidir. Bu nedenle, deprem tehlikesi olan bölgelerde inşaat yaparken ve mevcut yapıları güçlendirirken, zemin etütleri ve deprem mühendisliği analizleri kullanılarak uygun önlemler alınmalıdır.

9. Sıvılaşma Riski Değerlendirmesi

Sıvılaşma potansiyelinin haritalanması, belirli bir bölgedeki zeminlerin deprem sırasında sıvılaşma riskini değerlendirmek ve bu riski azaltmak amacıyla kullanılan önemli bir mühendislik uygulamasıdır (Kavurmacı, 2017, Özaydın vd. 2005). Bölgesel olarak pratik bir şekilde zemin özelliklerini incelemek, deprem tehlikesini değerlendirmek ve yapıları sıvılaşma tehlikesine karşı korumak için kullanılırlar. Sıvılaşma potansiyelinin haritalanması için;

- Jeolojik araştırmalar: Bir bölgedeki sıvılaşma bölgelerini belirlemek için ilk adım, jeolojik araştırmalar yapmaktır. Bu araştırmalar, bölgedeki yeraltı su seviyelerini, zemin türlerini, zemin tabakalarının derinliğini ve yerel fay hatlarını içermelidir.

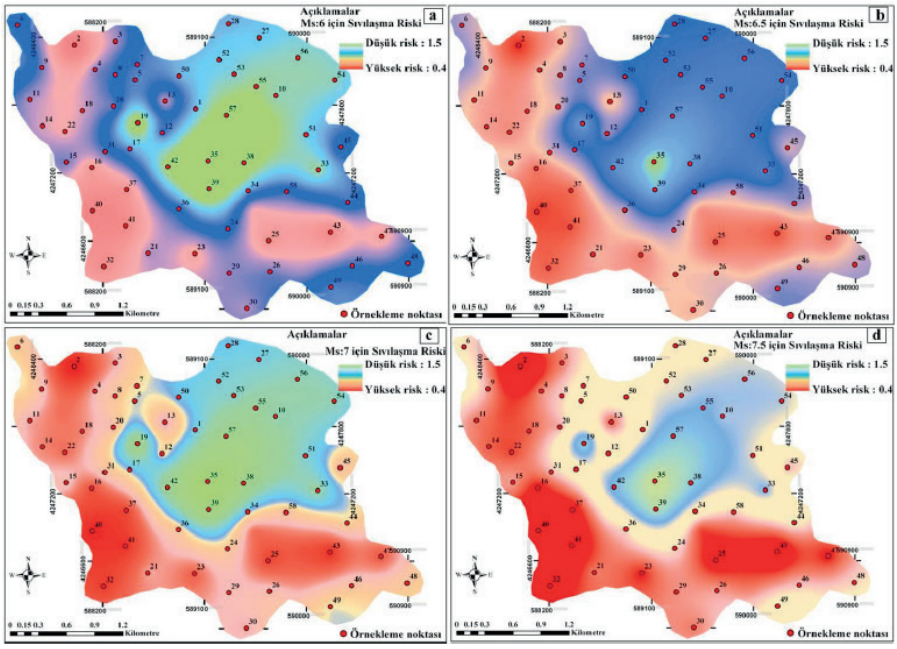
- Zemin etütleri: Sıvılaşma potansiyelini belirlemek için zemin etütleri temel yöntemlerden biridir. Zemin etütleri, yerel zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerini inceleyerek sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için yapılmaktadır. Bu etütler yardımıyla, zeminin granülometrisini (dane boyutu dağılımı), özgül ağırlığını, dane şeklini, doygunluğunu plastisite indisini ve diğer özelliklerini tespit edilebilmektedir. Bu etütler, zemin örneği alımı, laboratuvar testleri ve saha testleri gibi işlemleri içermelidir. Bu veriler kullanılarak haritalama işlemi yapılabilir.

- Deprem tehlikesinin değerlendirmesi: Bölgenin deprem tehlikesi, sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için kritik bir faktördür. Deprem tehlikesinin değerlendirilebilmesi için bölgedeki yerel fay hatlarının, bu fayların yaratacağı depremlerin büyüklüklerinin ve yerel deprem riskinin bilinmesi gerekmektedir. Ayrıca bölgedeki deprem tehlikesini değerlendirmek için yerel jeolojik veriler, fay hatları ve tarihsel deprem kayıtları kullanılmaktadır. Böylece bölgenin deprem tehlikesi belirlenir ve sıvılaşma potansiyelini etkileyen faktörlerden biri olan deprem etkileri tespit edilir. Deprem tehlikesi haritaları hazırlanarak, bölgedeki potansiyel deprem etkilerini tespit edilir ve sıvılaşma potansiyelini değerlendirmeye yardımcı olur. Bu araştırmadan elde edilen veriler kullanılarak sıvılaşma haritası oluşturulur.

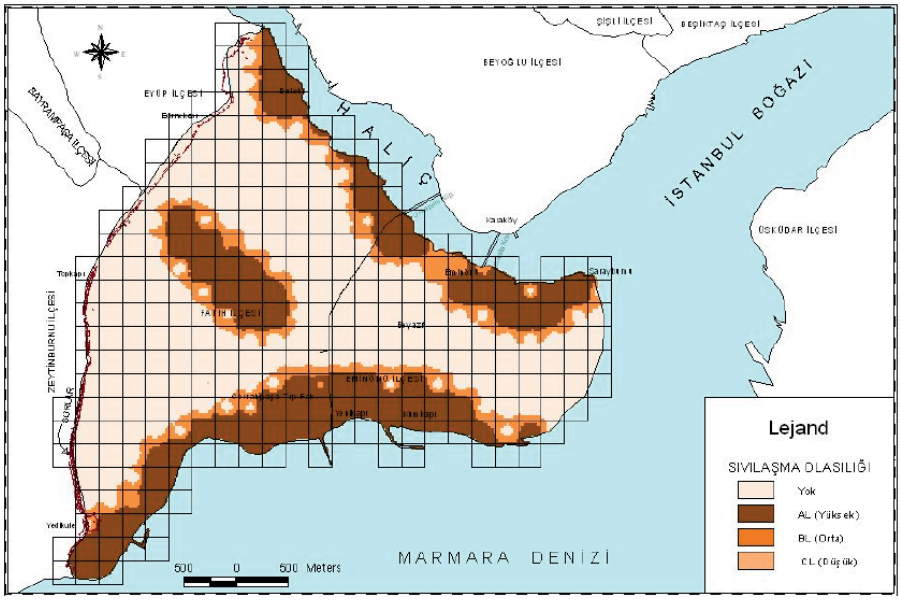
- Sıvılaşma direnci analizi: Zeminin sıvılaşma potansiyelini belirlemek için sıvılaşma direnci analizi yapılmaktadır. Bu analizler kullanılarak yapılan zemin sıvılaşma direncini hesaplamalarında, yeraltı su seviyelerini ve deprem yükünü dikkate alınmalıdır. Sıvılaşma direnci analizi sonuçlarından elde edilen veriler yardımıyla zeminin sıvılaşma potansiyeli belirlenir ve haritalamada kullanılırlar.

Bu adımlar yardımıyla elde edilen veriler kullanılarak Şekil 9 ve Şekil 10'da görüleceği gibi zeminlerin sıvılaşma potansiyelini gösteren haritalar oluşturulabilir. Sıvılaşma potansiyeli haritaları, incelenen bölgenin hangi kısımlarında daha yüksek sıvılaşma riskine sahip olduğunu gösterirler. Bu haritalar deprem bölgelerinde güvenli yapılar inşa etmek ve altyapıyı korumak için önemli bir rol oynarlar. Böylece tasarım aşamasında sıvılaşmaya karşı

farkındalık oluşturularak daha hızlı çözümler üretilebilir ve deprem sonrası zemin sıvılaşma sonucu oluşacak hasarların önüne geçilerek insanların hayatlarını ve mülklerini koruyabiliriz.



Şekil 9. Deprem büyüklüklerine göre sıvılaşma potansiyelinin haritalaması (Kavurmacı, 2017)



Şekil 10. Sıvılaşma tehlikesini gösteren mikro bölgeleme haritası (Özaydın v.d. 2005)

Yapıların inşa edileceği alanın sıvılaşma riski kontrolü bu haritalar yardımıyla yapılarak sıvılaşma potansiyeli yüksek bölgelerde yapı ve yapı temelleri güçlendirilir veya uygun tasarım önlemleri pratik bir şekilde alınabilir.

10. Zeminde Sıvılaşma Durumunun İzlenmesi ve Uyarı Sistemleri

- Yeraltı su seviyelerinin izlenmesi: Sıvılaşma potansiyeli yüksek bölgelerde yeraltı su seviyelerinin izlenmesi oldukça önemlidir. Zemindeki su seviyesinin ani yükselişi veya düşüşü tespit edilerek sıvılaşma riskinin değerlendirmesi yapılabilir.

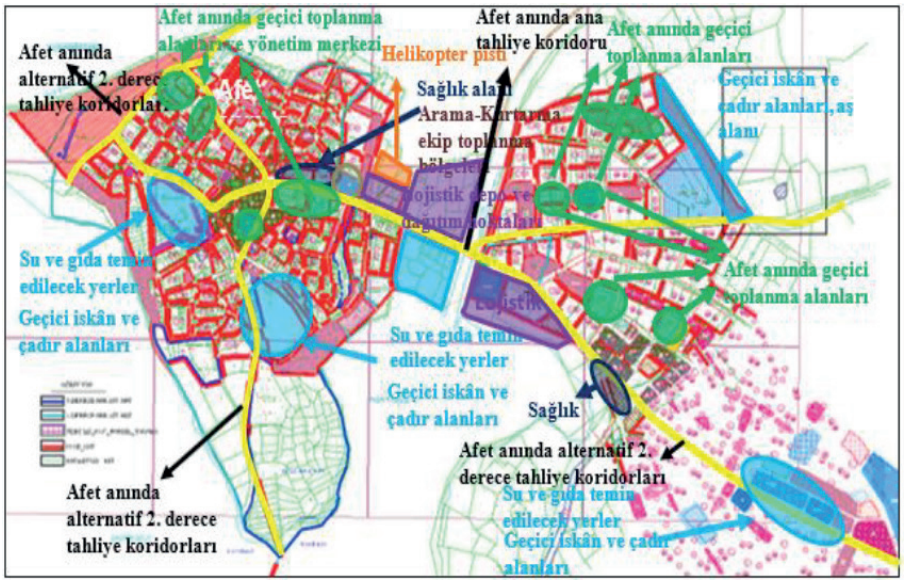
- Sismik izleme: Deprem aktivitesinin izlenmesi, depremlerin ne zaman ve ne kadar büyüklükte oluşabileceğinin tahmin edilmesine yardımcı olur.

- Yapısal izleme: Yüksek sıvılaşma riskine sahip bölgelerdeki yapılar, deprem sırasında veya sonrasında izlenerek değerlendirilebilirler. Böylece yapıların güçlendirilmesinin veya yeniden inşa edilmesinin gerekip gerekmediği tespit edilebilir.

- Hava koşulları izlemesi: Yağış miktarı ve hava koşulları, yeraltı su seviyesi etkilemektedir. Bu nedenle, yağışların izlenmesi ve su seviyesindeki ani değişikliklerin tespit edilmesini sağlayarak önlemler alınmasında oldukça önemlidir.

Sıvılaşma bölgelerinin belirlenmesi ve izlenmesi, deprem sonrası zemin sıvılaşması riskini en aza indirmek ve insanların ve yapıların güvenliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Bu süreçler, yapıların mühendislik tasarımını etkiler ve projelerinin planlanmasını şekillendirmeye yardımcı olmaktadır.

- Acil durum planları: Sıvılaşma riski yüksek bölgelerdeki yapılarda, acil durum planları oluşturulmalı ve sıvılaşma durumunda alınacak tedbirler belirlenmelidir (Şekil 11) (Karataş ve Kaya, 2022). Bu planlar, yaşam güvenliğini korumak ve mülkiyet kayıplarını en aza indirebilmek için büyük önem taşımaktadır. Sıvılaşma riski yüksek bölgelerde yaşayan topluluklar için acil durum hazırlığı ve eğitim, bilinçlendirme programları geliştirilmelidir. Yerel halka deprem anında nasıl davranılması gerektiği konusunda eğitim sağlanmalıdır.



Şekil 11. Edirne Enez ilçesi için depreme duyarlı öneri plan şeması (Karataş ve Kaya, 2022)

- Deprem uyarı sistemleri: Deprem uyarı sistemleri kullanılarak deprem anında sıvılaşma riski taşıyan bölgelerdeki insanlara erken uyarı sağlamalıdır. Böylece depremin etkilerinin nispeten azaltılması sağlanabilir.

11. Zeminde Sıvılaşmaya Karşı Mühendislik Çözümleri

Sıvılaşmayı önlemek amacıyla zemine uygulanan mühendislik çözümleri, sıvılaşma riskini azaltmak ve yapıların deprem sırasında güvenliğini sağlamak amacıyla kullanılan önemli tasarım ve inşaat yöntemleridir. Bu çözümler, yapıları sıvılaşma etkilerine karşı güçlendirmek veya korumak için kullanılmaktadır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2021, Alparslan, 2006, Yatman, 2006). Sıvılaşmayı önlemek veya etkilerini en aza indirmek amacıyla kullanılabilecek mühendislik çözümlerinden bazıları:

- Kazıklar: Bu yöntemde kazıklar, sıvılaşma potansiyeli bulunan zeminlerin altına kadar uzanarak, üst yapı yüklerini sıvılaşma beklenmeyen bölgeye aktarmaktadır. Bu yöntemle üst yapı yükleri zeminin daha sağlam bir tabakasına taşıtılarak, sıvılaşma sonucu meydana gelecek tahribatların önüne geçilebilmektedir.

- Zemin iyileştirme teknikleri: Vibroflotasyon, kum sıkıştırma kazıkları, vibrotijle sıkıştırma, kompaksiyon kazıkları, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu ve benzeri zemin iyileştirme teknikleri, granüler zeminleri sıkıştırarak sıvılaşma potansiyelini azaltmaktadır. Bu teknikle, zeminin yoğunluğu artırılarak, daneler arasındaki boşluklar azaltılmaktadır.

Böylece sıkı bir zemin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Arazinin durumu, zeminin türü ve ekonomik koşullar dikkate alınarak uygulanacak yöntem belirlenerek, zeminin sıvılaşmaya karşı direnci arttırılır.

- Zemin enjeksiyonu: Derin karıştırma, Jet enjeksiyonu, Permeasyon enjeksiyonu gibi tekniklerle granüler zeminlere enjeksiyon malzemesi enjekte edilmektedir. Bu yöntemler, zeminin boşluklarının azalmasını sağlayarak sıvılaşma riskini azaltmaktadır.

- Temel çevresinin duvarla çevrilmesi: Bu çözüm yönteminde, yapının oturacağı alanın çevresi palplanş perdelerle veya farklı duvar oluşturma metotları ile kapatılmaktadır. Bu duvarlar, deprem sırasında zeminin yer değiştirmesini sınırlayarak zemin hareketini kontrol altına almaktadır. Zemin hareketinin kontrol altına alınması sıvılaşma etkilerini azaltmaktadır.

- Drenaj sistemleri: Sıvılaşma potansiyeli yüksek bölgelerde inşaat sahasının koşullarına göre drenaj sistemleri kullanılabilmektedir. Bu sistemler vasıtasıyla, yeraltı su seviyesi kontrol altına alınarak sıvılaşma riski azaltılmaktadır.

- Geotekstiller: Sıvılaşmaya karşı kullanılan malzemeler arasında geotekstiller son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Geotekstiller, zemin stabilitesini artırmak, erozyonu önlemek ve drenajı iyileştirmek için kullanılmaktadır.

Zemin iyileştirme ve zemin stabilizasyon yöntemleri zeminin taşıma kapasitesini arttırmak için veya deprem sırasında daha kararlı hale getirmek amacıyla kullanılmaktadır. Sıvılaşmaya karşı uygulanacak bu yöntemler, zeminlerdeki sıvılaşma riskini azaltarak yapıların deprem sırasında daha güvenli olmasını sağlamaktadır. Bu çözümler, yerel zemin koşulları, ekonomik koşullar, yöntemlerin uygulanabilirliği ve deprem büyüklüğü göz önünde bulundurularak tasarlanmalıdır.

12. Tarihte Yaşanan Depremler ve Sıvılaşma Olayları

Tarihsel olarak kaydedilmiş depremler ve sıvılaşma olayları, mühendislik tasarımları açısından büyük öneme sahiptir. Bu olaylar, geçmişte yaşanan sıvılaşma olaylarının nedenlerini, etkilerini ve gelecekteki riskleri anlamamıza yardımcı olmaktadır. Tarihte yaşanan bazı deprem ve sıvılaşma olayları aşağıdaki gibidir.

- 1964 Alaska depremi (Büyük Alaska depremi): 27 Mart 1964 tarihinde Alaska'nın Prince William Sound bölgesinde meydana gelen bu deprem, tarihsel olarak kaydedilmiş en büyük depremlerden biriydi (M_w 9.2). Bu deprem sonucunda, sıvılaşma olayları, yapılarda, limanlarda ve kıyı bölgelerinde büyük hasar meydana gelmiştir.

Şekil 12. Alaska depreminde meydana gelen sıvılaşma sonucu köprüde oluşan hasar (Kramer, 1996).

- 1994 Northridge depremi: 17 Ocak 1994 tarihinde Kaliforniya'nın Northridge bölgesinde meydana gelen bu deprem (M_w 6.7), sıvılaşma olaylarına yol açmıştır. Deprem sırasında, Van Norman Göleti'nde ve Los Angeles Nehri'nde sıvılaşma olayları yaşanmış ve bu sıvılaşma olayları, yol hasarlarına ve gölet duvarının çökmesine neden olmuştur.

- 1995 Kobe depremi: 17 Ocak 1995 tarihinde Japonya'nın Kobe şehrinde gerçekleşen bu deprem (M_w 6.9), sıvılaşma ve yer kaymalarına yol açmıştır. Sıvılaşma, limanlarda ciddi hasara neden olmuştur.

- 1999 Gölcük depremi (İzmit depremi): 17 Ağustos 1999 tarihinde Türkiye'nin Marmara bölgesinde M_w 7.6 büyüklüğünde meydana gelen depremde, sıvılaşma olayları gözlemlenmiştir. Deprem sonucunda meydana gelen sıvılaşmalar Şekil 12'de görüldüğü gibi hasarların büyüklüğünü oldukça artırmıştır.

Şekil 12. Kocaeli depremi sonrası yanal yayılmaya bağlı sıvılaşma görüntüleri

- 2010 Haiti depremi: 12 Ocak 2010 tarihinde Haiti'de M_w 7.0 büyüklüğünde meydana gelen deprem Port-au-Prince şehrini fazlasıyla etkilemiştir. Deprem sonrasında meydana gelen sıvılaşma, Port-au-Prince şehrinde binaların yer değiştirmesine ve çökmesine neden olmuştur.

- 2011 Tohoku depremi ve tsunami, Japonya: 11 Mart 2011 tarihinde Japonya'nın Tohoku bölgesinde meydana gelen deprem (M_w 9.0), sıvılaşma olaylarına yol açmıştır (Şekil 13). Özellikle Tokyo'da bulunan Odaiba adasında deniz tarafında sıvılaşma yaşanmıştır.

Şekil 13. 2011 Japonya Tohoku depremi sonucunda meydana gelen sıvılaşma sonrası taşıma kapasitesi kaybı (Koçkar, 2022)

Tarih boyunca gerçekleşmiş olan bu depremler, sıvılaşmanın ne kadar tehlikeli olabileceğini göstermektedir. Bu tarihsel olaylar, sıvılaşma riskini anlamak ve gelecekteki deprem hazırlığı için önemli birer örnektir. Depremler ve sıvılaşma olayları, jeolojik ve zemin koşullarının yanı sıra yapıların tasarımı ve inşasıyla ilgili faktörleri de göstermektedir. Bu nedenle, bu tür olaylar, deprem mühendisliği ve sıvılaşma konularında çalışan uzmanlar için önemli bir bilgi kaynağıdır.

Sonuç

Bu kitap bölümü ile deprem mühendisliği ve zemin mekaniği alanında çalışan araştırmacılar ve öğrenciler için özet bir kaynak oluşturulması hedeflenmiştir. Deprem sonrası zemin sıvılaşması olayını anlamak ve bu tehlikeli olguya karşı etkili çözümler geliştirmek için gereken bilgi ve rehberliği sunmayı amaçlamıştır.

KAYNAKÇA

Alparslan, H., (2006). Sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerde iyileştirme yöntemlerine ait kriterlerin belirlenmesi, Doctoral dissertation, Sakarya Universitesi, Turkey.

Anonymous, (2006a). Why does liquefaction ocur? Explanation. On-line: http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/why/why1.html. Accessed at 08 August, 2006.

Bartlett, S. F., & Youd, T. L., (1992). Empirical prediction of lateral spread displacement. In Proceedings from the fourth Japan-US workshop on earthquake resistant design of lifeline facilities and countermeasures for soil liquefaction (pp. 351-65).

Castro, G. (1969). Liquefaction of sands, Harvard Soil Mechanics Series, No.87 Harvard University, Cambridge, Massachusetts.

Das, B. M., (1993). Principles of soil Dynmics, Boston, USA.

http://www.jeofizik.org.tr/resimler/ekler/d50601b7bc18501_ek.pdf.

Karataş, N., & Kaya, M. A., (2022). Deprem Riskinin Kentsel Planlama Sürecine Etkisi: İpsala, Keşan Ve Enez İlçeleri (Edirne) Örneği, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 654-679.

Kavurmacı, M., (2017). Coğrafi bilgi sistemi (CBS) kullanılarak sıvılaşma riskinin değerlendirilmesi: Aksaray örneği. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(3), 304-312.

Koçkar M. K., (2022). Sıvılaşma Ve Yanal Yayılmanın Mekansal Planlama Açısından Değerlendirilmesi Ve Alınacak Önlemler. Yer Bilimsel Etüd Dairesi Başkanlığı Eğitim Seminerleri Serisi-2 (21 Şubat 2022), Ankara, Türkiye.

Kramer, S. L., (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Liao, S.S.C., Whitman, R.V., (1986). Overburden correction factors for SPT in sand, Journal of Geotecnical Engineering, ASCE, USA.

Mollamahmutoğlu, M., Babuçcu, F. (2006). Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri, Gazi kitapevi, Ankara.

Mollamahmutoğlu, M., Babuçcu, F., (2021). Zeminlerde sıvılaşma analiz ve iyileştirme yöntemleri, Akademisyen Kitabevi.

Özaydın K, İnce GÇ, Yıldırım M., (2005). Tarihi Yarımada'nın (İstanbul), Jeolojik-Geoteknik Yapısı ve Sismik Mikro bölgelemesi, 3. İstanbul ve Deprem Sempozyumu, 9-10 Haziran 2005, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul Şubesi, Sayfa No: 181-211, İstanbul.

Özçep, F., Aşçı, M., Karabulut, S., Alpaslan, N., Yas, T., (2004). Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Farklı Yöntemlerle Değerlendirilmesi, Uygulamalı Yerbilimleri, Cilt:3, Sayı:2, Sayfa: 11-22.

Rauch, A. F., (1987). An Empirical Method for Prediciting Surface Displacements Due to Liquefaction- Induced Lateral Spreading in Earthquakes. Ph.D. Thesis, Virginia Tech., 253 p.

Seed, H. B., Idriss, I.M. (1982). Ground Motion and Soil Liquefaction during Earthquakes, Monograph Series, Earthquake Engineering Reserch Institute, University of California,Berkeley,California.

Seed, H.B. and Peacock, W.H., (1977). Test procedures for measuring soil liquefaction characteristics, ASCE.

Sonmez, H., (2003). Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol, Turkey). Environmental Geology, 44, 862-871.

Sonmez, H., Gokceoglu, C., (2005). A liquefaction severity index suggested for engineering practice. Environmental Geology, 48, 81-91.

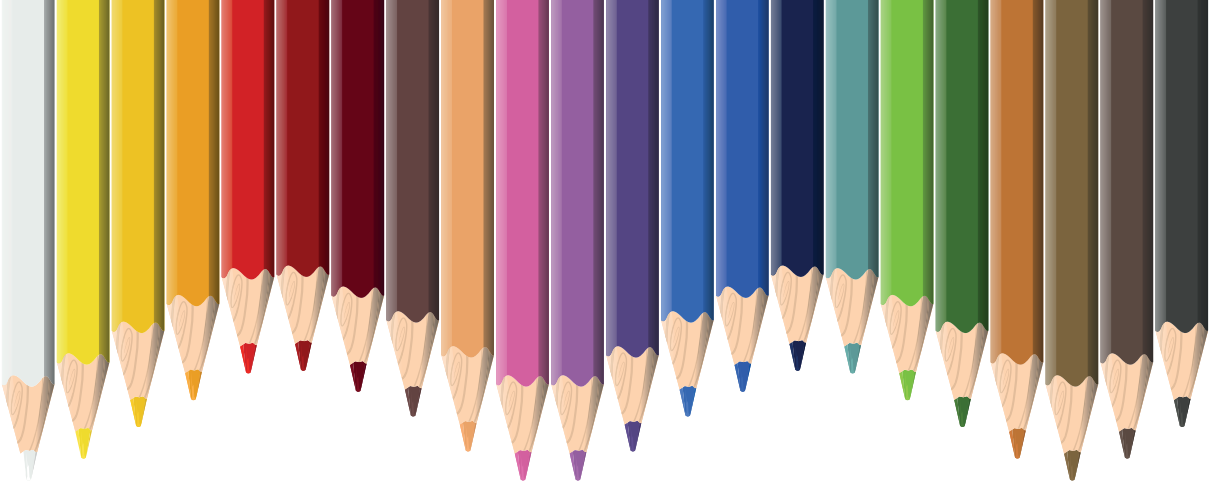
Stokoe, K.H., Roeset, J.M., Bierschwalle, J.G., Aouad, M., (1988). Liquefaction potantial of sands from shear wave velocity, Proceedings, 9nd World Conference on Earthquake, Vol.13 pp213-218.

Terzaghi, K. (1925). Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage. Vienna, Deuticke.

Yatman, Z. Ö., (2006). Sıvılaşma sonucu oluşan zemin yetersizliklerinin irdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.

Youd, T.L., (1992). Liquefaction, ground failure, and consequent damage during the 22 April 1991 Costa Rika Earthquake. Proceedings of the NSF/UCR US.Costa Rica Workshop on the Costa Rika Earthquakes of 1990-1991, April 2 – 4, 1992, Effects on Soils and Structures, Oakland, California, ERI Publication, No: 93-A, 73-75.

Youd. T. L., (1984). Gieologie Effect-Liquefactionon and Associated Ground Failure. Proeeedings. Gieologie and Hydrologic Hazards Training Program Open File Report. Geological Survey. Menlo Park. California. pp. 210-232.



Bölüm 14

NİKEL-KOBALT KOMPOZİT ATIĞININ DUVAR KAROSU SIR REÇETELERİNDE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Yiğit BALBAĞ [1]

Hale YILDIZAY [2]

Eda TAŞÇI [3]

1 Yiğit BALBAĞ, Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisi, BİEN Seramik, 1.Organize sanayii, Bilecik, TÜRKİYE, ybalbag@gmail.com, ORCID: 0009-0007-7997-1158

2 Dr.Öğr. Üyesi. Hale YILDIZAY, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Güzel Sanatlar Meslek Yüksek Okulu, Çini sanatı ve Tasarımı Bölümü, Germiyan Kampüs, 43100 Kütahya, TÜRKİYE, hale.yildizay@dpu.edu.tr, Orcid no: 0000-0002-3896-9912

3 Prof. Dr., Eda TAŞÇI, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Merkez Kampüs, 43100 Kütahya, TÜRKİYE, eda.tasci@dpu.edu.tr, Orcid no: 0000-0003-3346-8833

Endüstriyel Atıkların Duvar Karosu Mat Sır Reçetelerinde Renklendirici Pigment Olarak Kullanımı (Yüksek Lisans Tezinden Düzenlenmiştir.)

Yazar: Yiğit BALBAĞ

ORTAK DANIŞMAN: Dr.Öğr. Üyesi. Hale YILDIZAY

Danışman: PROF. DR. Eda TAŞÇI

Yer Bilgisi: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 10530240 Referans Nolu Tez.

Endüstriyelleşmenin artmasıyla sanayinin gelişmesi ve artan nüfusa paralel olarak, doğal kaynakların tükenmesi sonucunda yeni hammadde ihtiyacı da her geçen gün artmaktadır. Seramik sektöründe sırlı yüzeylerde renk tasarımı aşamalarında renk verici hammaddelerin sağlanması ihtiyacında artış vardır. Doğal hammadde rezervlerinin sınırlı olması, miktarı artmakta olan katı atıkların alternatif hammadde olarak değerlendirilmesini gündeme getirmektedir. Bu atıklar, demir-çelik fabrikalarındaki yüksek fırın cürufları ve kullanılmış kil yanığı atıkları; alüminyum fabrikası alünit, boksit ve nefelin çamuru atıkları; kurşun, bakır ve çinko fabrikalarında yer alan cüruflar ve kekler; maden zenginleştirme tesislerinde ortaya çıkan silikat bakımından zengin toprak atıkları ve sözü edilen tüm bu endüstri kuruluşlarına ait tozlar ve küllerdir. Yüksek oranda SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, PbO, TiO_2, K_2O, Na_2O, CuO ve ZnO içeren atıklar, seramik sır ve çamurlarında renk ve teknik açıdan seramik endüstrisinde kullanılabilirlikleri araştırılmaktadır.

Seramik kaplama malzemelerinin üretimi ve tüketimi esas itibariyle inşaat sektöründeki gelişmelere paralel olarak ilerlemektedir. İç mekan dekorasyonunun önemli bir parçası olan duvar karosu seramikleri zamana bağlı yıpranma, kırılma ve değiştirme gibi normal nedenler dışında, estetik anlayışa ve modanın değişimine paralel olarak seramik kaplama malzemeleri üretimi ve tüketimi etkilemektedir (Aydın D. 2011).

Seramik sektöründe renklendiricilerin üretimi, uygulamaları, kullanım alanları ve son üründeki görünümü büyük önem taşımaktadır. Seramikte kullanılan renklendiricilerin etkisi, kullanılan hammaddelerin içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca renklendiricilerin üretim süreci ve seramiğin üretim şekli bunu etkileyen bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Seramik sırlarının rengini karakterize etmek için çeşitli renk sistemleri geliştirilmiştir, ancak günümüzde en yaygın olarak kullanılan CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) sistemidir (Eppler, 2000). CIE ölçümüyle renk algısı deneysel gözlemlere dayanır. Renk ölçülürken ışık kaynağı, izleyici ve yüzey her zaman dikkate alınır (Kayacı vd, 2008; Eppler, 2000). Seramiklerde sıklıkla renk veren tuzlar, oksitler ve bunları içeren bileşikler veya pigmentler kullanılır. Renklendiricilerin kendine has renkleri vardır ancak üretim süreci, pişirme koşulları, parçacık boyutu, renklendiricinin kullanıldığı sırın uygulama kalınlığı gibi faktörlere bağlı olarak farklı renkler de elde edilebilmektedir. Farklı oksitler ve pigment formlarının seramik sırları üzerinde farklı etkileri vardır (Cooper, 2011)

Sır oluşumunda içerdiği hammadde reçete özelliğine bağlı olarak, cam faz içerisine gömülmüş kristal yapıları içermesinden dolayı ve ergimiş sırın soğuma sırasındaki sır taneciklerinin ufalmasıyla sahip olunan bu kristal yapılar kırılma ve yayılmaya uğrarlar. Böylelikle sırlanmış karoların yüzeyinde mat bir görünüm oluşur. Mat özellikli bir sır elde etmek için üretilen mat frit reçetelerinde albit, borik asit, boraks, mermer, çinko oksit, zirkon, potasyum

nitrat, baryum karbonat, kuvars ve alümina gibi hammaddeler kullanılmaktadır (Arcasoy, 1983; Taçyıldız, 2018).

Nikel-kobalt kompozitleri, hem nikel (Ni) hem de kobalt (Co) metallerinin birleştirildiği malzemelerdir. Bu kompozitler, farklı oranlarda nikel ve kobaltın bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Nikel-kobalt kompozitlerinin özellikleri, nikel ve kobalt oranına, üretim süreçlerine ve kullanıldığı uygulamalara bağlı olarak değişebilmektedir. Bu kompozitlerin birçok endüstri için önemli uygulamaları vardır ve genellikle mühendislik ve malzeme bilimi alanlarında kullanılmaktadır. Nikel-kobalt kompozitleri, endüstrilerde farklı amaçlar içinde kullanılmaktadır. Nikel ve kobalt, ferromanyetik özelliklere sahip metallerdir, yani mıknatıslandırılabilirler. Bu nedenle nikel-kobalt kompozitleri, manyetik uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanır. Nikel ve kobalt, yüksek sıcaklıklarda mekanik dayanıklılıklarını koruyabilen özelliklere sahiptir. Bu nedenle, bu kompozitler yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilmektedir. Özellikle endüstriyel fırınlarda ve motor parçalarında kullanılabilmektedirler. Nikel, mükemmel korozyon direncine sahip bir metaldir. Nikel-kobalt kompozitleri, nikelin korozyon direncini artırmak amacıyla kullanılabilir. Özellikle kimyasal işlemlerde ve denizcilik uygulamalarında bu özellik önemlidir. Hem nikel hem de kobalt iyi elektriksel iletkenlerdir. Bu kompozitler, özellikle elektrik kontakları ve elektronik bileşenleri gibi elektriksel uygulamalar için kullanılabilirler. Nikel-kobalt kompozitleri, manyetik depolama cihazlarında kullanılır. Örneğin, sabit disk sürücülerinde manyetik kayıt medyası olarak kullanılabilirler. Kimya endüstrisinde, nikel-kobalt kompozitleri katalizörler olarak kullanılabilir. Kimyasal reaksiyonları hızlandırmak ve belirli ürünleri üretmek için katalizörler tercih edilmektedir. Nikel-kobalt kompozitleri bazen tıbbi cihazlarda, özellikle implantların yapımında kullanılır.

Türkiye'de nikel ve kobalt kompozit üretimi 2007 yılından beri Zorlu Holding'in işlettiği Meta Nikel Kobalt Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş.'de gerçekleşmektedir. Bu işletmede nikel ve kobaltla birlikte laterittik nikel yatağından kompozit bir ürün olarak elde edilmektedir. Nikel ve kobaltça zengin bir içeriğe sahip bu ürünün ülkemizde pazarı bulunmamaktadır. Bu yüzden ihraç edilmektedir. Nikel ve kobalt kompozit üretim oldukça karmaşık ve zor bir süreçtir. Üretim esnasında ürünle yüklü bir cevher atığı çıkmaktadır. Ortaya çıkartılan bu atığın günlük yaklaşık 500 ton olduğu bilinmektedir (Ağaçayak, T., 2008; MTA Nikel,2023; Nikel, 2022; DPT-ÖİK- 640, 2022).

Bu çalışma kapsamında elde edilecek reçete optimizasyonu çalışmalarında endüstriyel bir katı atık olan Ni Co kompozit atığının iki farklı mat sır reçetesine farklı oranda ilavesi ile elde edilen reçete kompozisyonunun kimyasal dayanım etkisi araştırılmıştır. Atık olarak ilave edilen hammaddenin mat sır reçetesindeki kimyasal dayanımı üzerindeki etkisi optimum oranları ve süreç parametrelerinin belirlenmesi çalışmanın amaçlarından biridir. En-

düstriyel bünye ve sır reçeteleri ve pişirim ortamında yapılan sır denemelerinde mat sır sınıfında yer alan atık hammadde etkili sır reçetelerinin kimyasal dayanım etkileri incelenerek sonuçlar incelenmiştir. Kullanılan atık işletmede iki farklı duvar karosu mat sırının içerisine ağırlıkça % 0, 5, 10, 15 ve 20 oranında ilave edilerek homojen bir şekilde karıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan atık ilaveli mat sırlar bünyeler üzerine kampana (slayt) çekme yöntemi ile uygulanmış ve işletme fırınında 1075°C'de 35 dak. pişirilmiştir. Sır içine ilave edildiği orana bağlı olarak atık çeşidine göre değişen renk tonları elde edilmiştir. Duvar karosu mat sırlarında L* a* b* renk analizleri yapılmış ve hazırlanan sır reçeteleri kimyasal dayanım testine tabi tutularak kimyasal dayanım özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca sırlar SEM ve EDX analizi yapılarak sır içerisindeki farklılıklara değinilmiştir.

MALZEME VE YÖNTEM

4.3.1 Malzemelerin hazırlanması ve analizler

Bu çalışmada Meta Nikel Kobalt Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasından elde edilen Ni-Co kompozit katı atığı, kullanılmıştır (Şekil 2.1).

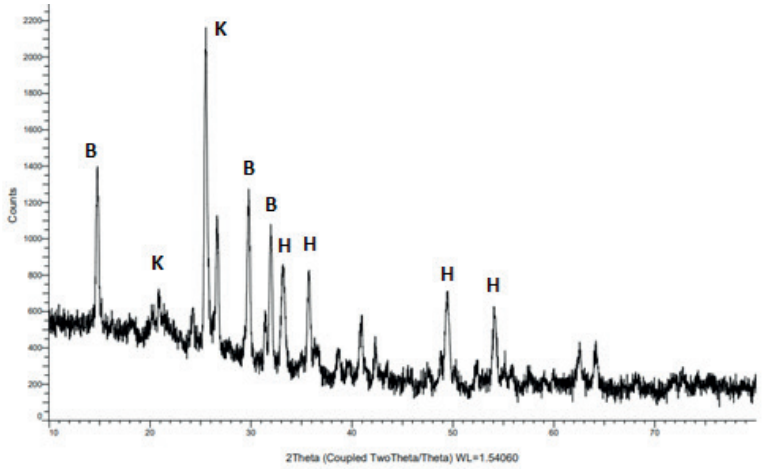
Tablo 1'de kullanılan atıkların kimyasal analizleri verilmiştir. Atıkların kimyasal analizi (XRF) (Spectro X-Lab 2000) marka model XRF cihazı ile yapılmıştır.

Tablo 1. *Çalışmada kullanılan atıkların kimyasal analiz sonuçları.*

	Ni-Co Kompozit Atığı
MgO	6,58
Al_2O_3	2,75
SiO_2	16.52
P_2O_5	0,023
SO_3	26,20
MnO	0,21
K_2O	0,079
CaO	12,80
Fe_2O_3	17,50
TiO_2	0,074
ZrO_2	-
Cr_2O_3	1,000
Co_3O_4	0,126
BaO	-
ZnO	-
NiO	0,155
PbO	-
CuO	-
Loi	15,98
Toplam	99,99

Çalışmada kullanılan Ni-Co Kompozit katı atığının, pirit külü katı atığı ve uçucu kül katı atığının görseli Şekil 1'de ve XRD analizleri Şekil 2'te verilmiştir.

Şekil 1. *Ni-Co Kompozit Katı Atığı Görseli*



Şekil 2. *Ni-Co Kompozit Katı Atığı XRD Analizi*

Şekil 2'de verilen atık hammadde XRD analizlerine göre Ni-Co Kompozit katı atığında B: bassanit, K: kuvars ve H: hematit fazlarına rastlanmıştır. Çalışmada segeri belli standart iki farklı mat sır reçetesi içerisine %5-20 aralığında ilave edilen atık karışımı ile hazırlanan sır reçetesinin viskozite ve elek bakiye ölçüm aralığı TSE EN standartları içerisinde yer almaktadır.

Bu amaç doğrultusunda planlanan deneysel çalışmalarda, temin edilen atıkların kimyasal ve mineralojik özellikleri incelenmiştir. Hazırlanan atık ilaveli mat sırlar, 1150°C'de ilk pişirimi yapılmış olan duvar karosu bünyelerine uygulanmıştır. Uygulama öncesi işletmede hazırlanan litre ağırlığı 1810 gr/lt ve viskozitesi 25 sn. olan engop uygulanmıştır.

Atıklar ağırlıkça % 0, 5, 10, 15 ve 20 oranında işletmede bulunan iki farklı mat duvar karosu sırı içerisine ilave edilerek homojen olacak şekilde jet değirmende 10 dakika karıştırılmıştır. Atık ilavesiyle hazırlanan sırların litre ağırlığı 1830 gr/lt viskozitesi 25 sn. olacak şekilde ayarlanarak kampana (slayt) çekme yöntemiyle 1175°C'ta bisküvi olarak pişirilmiş duvar karoları bünyeleri üzerine uygulanmıştır. Sırlı duvar karoları daha sonra endüstriyel fırın ortamında 1075°C'de 35 dakika pişirilmiştir.

Tablo 2. *Atık karışım ilaveli mat duvar karosu sır reçetelerinin kodları.*

Hammadde	**% Bileşim**				
Mat Sır- 1	**0**	**5**	**10**	**15**	**20**
	100	95	90	85	80
CMC	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
STPP	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Atık	0	5	10	15	20
Mat Sır-2	**0**	**5**	**10**	**15**	**20**
	100	95	90	85	80
CMC	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
STPP	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Atık	0	5	10	15	20

Seramik sektöründe birbirinden farklı sır bileşimleri bulunmaktadır. Bu sırlar bileşimlerini oluşturan oksitlerin yüzdelerine göre değil, hesaplanan mol oranlarına göre tanımlanırlar. Bu tanımlamaya sırın seger formülasyonu adı verilmektedir. Bu formülasyonun hesabı sır içerisinde yer alan bazik oksitlerin (tüm alkaliler, toprak alkaliler ve diğer bazik oksitler) mol oranlarının toplamları 1'e eşit olacak şekilde hesaplanır. Bir sırın segerini hesaplayabilmek için, içerisinde bulunan bütün oksitlerin mol oranları bilinmek zorundadır (Arcasoy, 1983). Çalışmada kullanılan duvar karosu Mat Sır-1 ve Mat Sır-2 kodlu mat sırların arasındaki en büyük fark Mat Sır-1 kodlu mat sırın içerisinde opaklık özelliğinin olmasıdır. Bu sır yüzeye daha pürüzsüz ve satenimsi bir görüntü kazandırmaktadır. Mat Sır-1 ve Mat Sır-2 kodlu mat sırların seger analizleri hesaplamaları Tablo 3 ve 4'te verilmiştir.

Tablo 3. *Kullanılan Mat Sır-1 Kodlu duvar karosu Mat Sırının Seger Analizi*

Seger Analizi				
Bazik oksitler		**Amfoter oksitler**	**Asidik oksitler**	
0.05	ZnO			
0.02	MgO	0.076 Al_2O_3	1.22 SiO_2	Mat Sır-1
0.01	K_2O			
0.92	CaO			

Tablo 4. *Kullanılan Mat Sır-2 Kodlu duvar karosu Mat Sırının Seger Analizi*

Seger Analizi				
Bazik oksitler		**Amfoter oksitler**	**Asidik oksitler**	
0.086	Na_2O			
0.086	MgO	0.109 Al_2O_3	1.18 SiO_2	
0,05	ZrO_2			Mat Sır-2
0.03	K_2O			
0.714	CaO			

Atıklar numunelerine X-ışını floresansı (XRF) (Spectro X-Lab 2000) ile kimyasal analizi yapılmıştır. Ayrıca hazırlanan atık ilaveli duvar karosu mat sır denemelerinin renk dağılımları PCE instruments colorimeter cihazında PCE-CSM2 model L*a*b* cihazında ölçülerek renk parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca hazırlanan duvar karolarının sır yüzeylerine NANO SEM 650 ile SEM ve EDX çalışması yapılmıştır.

Kimyasal maddelere dayanım testleri

Çalışılan farklı sır reçetelerinde pişme sonrasındaki oksitlerin, renklendirici oksitlerin çözünme etkisini incelemek için kimyasal dayanım testleri yapılmaktadır. Yapılan bu kimyasal dayanım testleri sonucunda sırlı yüzeyler TSE 10545'e göre gruplandırılmaktadır.

Çalışmada üretilen mat sırlı duvar karoları bazı kimyasalların etkisine maruz bırakılarak sonuçta oluşan hasarlar incelenmeye tabi tutulmuştur. Uygulanan kimyasalların etkisi incelenerek bilgileri düzenlenmiştir. Kimyasalların uygulandığı duvar karolarının üzerine yapılan analizler sınıflandırılmıştır.

Hazırlanan duvar karoları üzerine kimyasal analiz için laktik asit, sitrik asit, potasyum hidroksit ve hidroklorik asit kimyasalları uygulanmıştır.

1. % 5 (v/v) olacak şekilde Laktik asit çözeltisi hazırlanır.
2. 100 g/l olacak şekilde Sitrik asit çözeltisi hazırlanır.
3. 30 g/l olacak şekilde potasyum hidroksit çözeltisi, hazırlanmıştır.
4. Hidroklorik asit çözeltisi %3 (v/v), yoğunlaştırılmış hidroklorik asitten (1,19 g/ml) hazırlanmıştır.

Şekil 3. *Laboratuvarda Uygulanan Kimyasal Maddelere Dayanım Testleri*

Çalışmada öncelikle, plastik bir silindir parça konulmuş ve bu silindirik parçanın kenarlarına yaklaşık 3 mm olacak şekilde sızdırmazlık malzemesiyle kaplanmıştır. Hazırlanan kimyasal çözelti yaklaşık 2 cm doldurulmuştur. Kimyasallara dayanımın saptanması için, çözeltiler numunelerin üzerinde 24 saat bırakılmıştır.. Sadece KOH dayanımı için, duvar karosu bu çözeltiyle 96 saat boyunca temas halinde bırakılmıştır. Deney esnasında çözeltinin seviyesi kontrolü için günde bir kez deney düzeneği hafifçe sallanarak kontrol edilmiştir. Gerektiğinde deney çözeltisi değiştirilmiştir. Kimyasallar uygulanan yüzeyden kaldırılırken sızdırmazlık maddesi uygun çözücü ile sırlı yüzeyden temizlenmiştir tamamen uzaklaşıncaya kadar, uygun çözücü ile duvar karosu sırlı yüzeyi temizlenmiştir. Atık ilaveli mat sırlı duvar karolarının kimyasal dayanım analiz sonuçları değerlendirilirken,

A sınıflandırması: görünür herhangi etki yok,

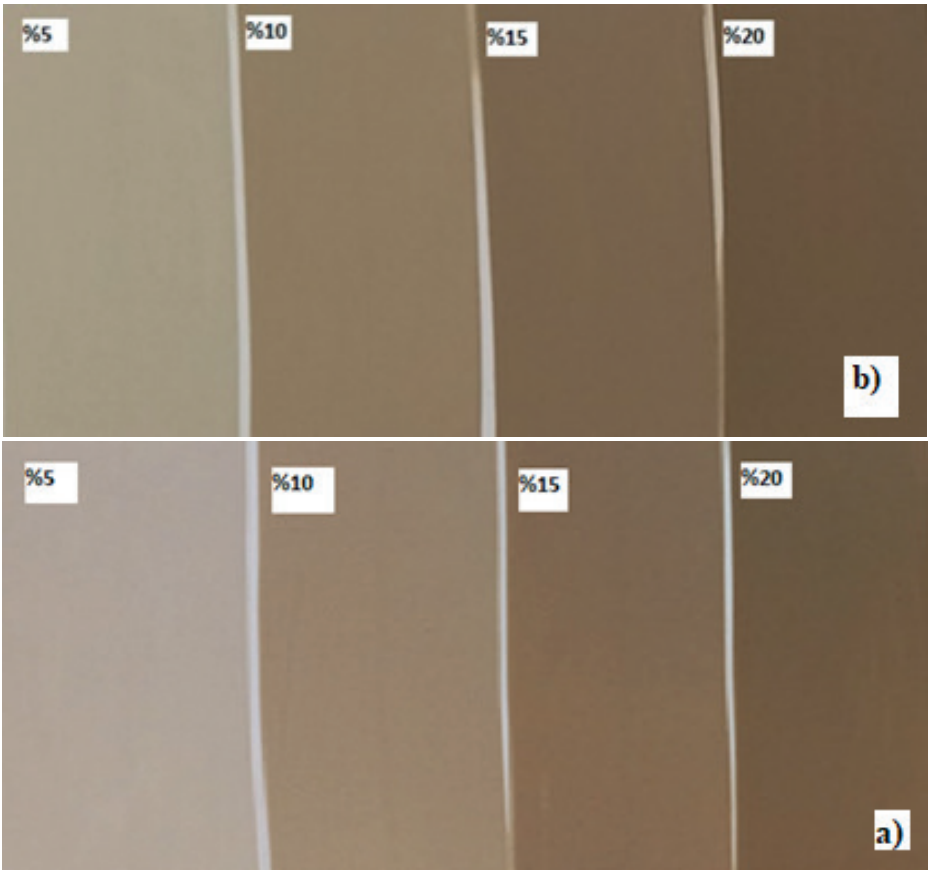
B sınıflandırması: fark edilebilir değişim,

C sınıflandırması: başlangıç yüzey görünümünde tamamen veya kısmen değişiklik gibi etmenlere bakılarak sınıflandırma yapılmaktadır.

Üretimde kalite sınıflarına sonuçlara göre karar verilmektedir. Bu şekilde kalite sınıflandırılması A birinci, B ikinci ve C üçüncü kalite olarak belirlenmektedir. Yüzeyde herhangi bir değişiklik ve deformasyon görülmemişse 1. kalite, sırlı yüzeyde değişiklik ve bulanıklık var ise 2. kalite ve sırlı yüzeyde aşınma var ise 3. kalite olarak gruplandırılmaktadır.

DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI

Ni-Co kompozit atığı ilave edilmiş Mat Sır-1 kodlu duvar karosu mat sır numunelerinin görseli Şekil 4 a ve b'de Ni-Co Kompozit atığı ilave edilmiş Mat Sır-1 kodlu duvar karosu mat sır numunelerinin L*a*b* sonuçları Tablo 5'te verilmektedir.

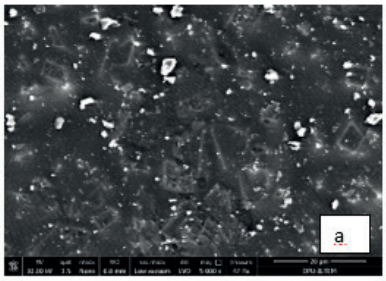


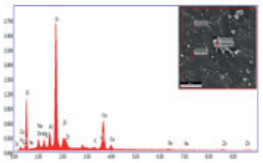
Şekil 4. a. *Ni-Co Kompozit Atığı İlave Edilmiş mat sır 1 Kodlu Duvar Karosu Mat Sır Numunelerinin Görseli* **b.** *Ni-Co kompozit atığı ilave edilmiş mat sır 2 kodlu duvar karosu mat sır numunelerinin görseli*

Tablo 5: *Ni-Co Kompozit atığı ilave edilmiş Mat Sır-1 kodlu duvar karosu mat sır numunelerinin L*a*b* sonuçları*

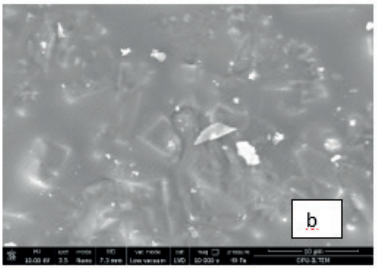
	Atık Oranı (%)	L*	a*	b*
Mat Sır-1	Std.	92,37	0,08	1,43
	5	76,3	1,25	16,12
	10	65,74	3,66	23,3
	15	57,18	5,32	25,34
	20	51,31	5,99	25,83
Mat Sır-2	Atık Oranı (%)	L*	a*	b*
	Std.	91,94	0,07	2,06
	5	74,62	1,65	18,29
	10	64,1	3,67	22,58
	15	56,61	4,93	24,46
	20	50,79	5,97	25,84

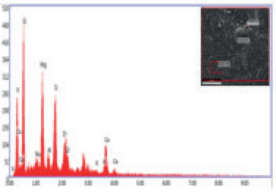
Tablo 5'te verilen sonuçlara göre Ni-Co kompozit atığı oranı yüzdesel olarak arttıkça renk farklılıkları artmaktadır. Standart sırın L* değeri (92,37), a* değeri (0,08) ve b değeri (1,43) pozitif olarak ölçülmüştür. L* değeri sonuçlarına göre artan Ni-Co kompozit atığı oranına göre sırasıyla L* değerlerinde bir azalma gerçekleşmektedir. Buda rengin siyah değerine yaklaştığını yani koyulaştığını ifade etmektedir. Pozitif olduğunda kırmızılığı ifade eden a* değerinde de tüm numunelerde pozitif bir sayı elde edildiği görülmektedir. Ni-Co kompozit atığı ilavesiyle a* değeri en düşük (1,25) olarak görülmüştür. a* değerinde pozitif olduğunda kırmızılığın arttığı görülmektedir. Ni-Co kompozit atığı ilavesi yapılan sırda bu değerin azaldığı ve kırmızılığın azaldığı görülmektedir. Pozitif olduğunda sarılığı ifade eden b* değerinin, en yüksek değerde (25,83) olduğu belirlenmiştir. b* değeri pozitif olduğunda sarılık değerinin arttığı görülmektedir. Ni-Co kompozit atığı ilavesiyle sarılık değerinin artan Ni-Co kompozit atığı miktarıyla artığı görülmektedir. Böylelikle renk farklılıkları ortaya çıkmaktadır.





Element	Weight %
Zn O	2.26
Na_2O	0.00
MgO	1.67
Al_2O_3	4.75
SiO_2	51.77
ZrO_2	6.98
K_2O	1.17
CaO	31.42

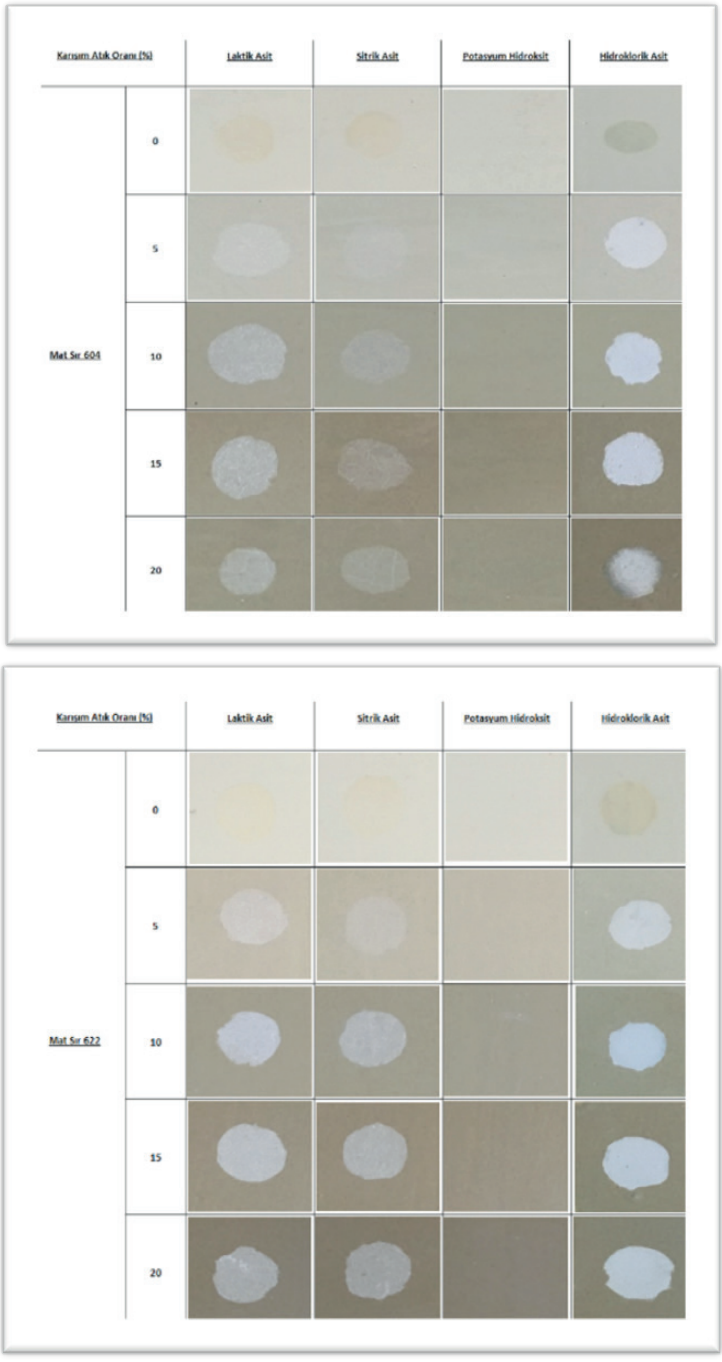




Element	Weight %
Na_2O	2.71
Mg O	21.89
Al_2O_3	3.48
SiO_2	30.15
ZrO_2	9.64
K_2O	2.59
CaO	29.53

Şekil 5: a.*Ni-Co Kompozit Atığı İlave Edilmiş Mat Sır 1 Kodlu Duvar Karosu Mat Sırın Farklı Bölgelerinden Alınan SEM –EDX Analizleri* **b.***Ni-Co Kompozit atığı ilave edilmiş mat sır 2 kodlu duvar karosu mat sırın farklı bölgelerinden alınan SEM –EDX analizleri*

Şekil 6: *Ni-Co Kompozit Katı Atığı İlave Edilmiş Mat Sır 1 ve Mat Sır 2 Kodlu Duvar Karosu Mat Sır Numunelerinin Kimyasal Dayanım Görselleri*



Tablo 6: *Ni-Co Kompozit Katı Atığı İlave Edilmiş Mat Sır 1 Mat Sır-2 Duvar Karosu Numunelerinin Kimyasal Dayanım Sonuçları*

Seramik Karolar Kimyasal Dayanıklılık Tayini (TS EN ISO 10545-13)					
	Atık Oranı (%)	Laktik Asit	Sitrik Asit	Potasyum Hidroksit	Hidroklorik Asit
Mat Sır 1	0	C	C	A	C
	5	C	B	A	C
	10	C	C	A	C
	15	C	C	A	C
	20	C	C	A	C

Seramik Karolar Kimyasal Dayanıklılık Tayini (TS EN ISO 10545-13)					
	Atık Oranı (%)	Laktik Asit	Sitrik Asit	Potasyum Hidroksit	Hidroklorik Asit
Mat Sır 2	0	C	C	A	C
	5	C	C	A	C
	10	C	C	A	C
	15	C	C	A	C
	20	C	C	A	C

GENEL SONUÇLAR

Çalışmada kullanılan Ni-Co kompozit atıklarının tane boyutları küçüktür bu nedenle depolanması zordur. Atıkların doğa olayları yoluyla çevreye dağılması hava, toprak ve suların kirliliğini meydana getirmektedir. Bu çalışmada kullanılan katı atık malzemelerin kimyasal özellikleri incelendiğinde atık malzemelerde oransal olarak farklı oksitlerin varlığı görülmektedir. Atık hammaddelerin yapısı içerisinde bulunan geçiş elementlerinin seramik sektöründeki etkileri seramik prosesin farklı süreçlerinde farklı araştırmacılar tarafından değerlendirilmiştir. Yapılan bu çalışmada ise endüstriyel mat sır reçetelerindeki renklenme etkisi, sır içerisinde kullanıldığındaki kimyasal dayanım etkileri 2 farklı mat sır reçetesi içerisinde ve farklı sektörlerin katı atıklarının herhangi bir ön işleme tabi tutulmaksızın sır reçetesi içerisine farklı oranlardaki ilavesi sonucundaki etkileri incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak değerlendirilmiş ve en iyi sonuç elde edilen katı atık ilaveli reçetelerin %5 katı atığı içeriğine sahip sırlar olduğu görülmüştür ve bu sırlara analizler uygulanmıştır. Ayrıca sırların karakterizasyonları yapılarak kimyasal dayanım sonuçları ile sonuçlar incelenmiştir.

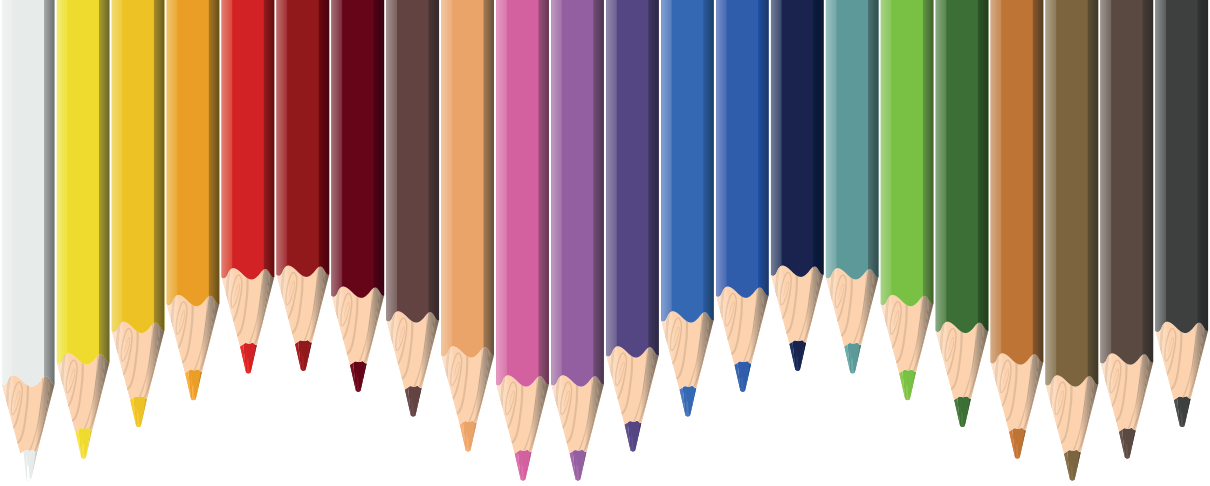
Ni Co kompozit atığı reçete içerisindeki artan oranları iki farklı mat sır için benzer şekilde L*'de düşüş, a* ve b* değerinde artış göstermiştir. Tüm katkı oranlarında düzgün sırlı yüzeyler elde edilmiştir. Elde edilen en iyi yüzey olan %5 katkılı sır reçetelerinin SEM analizleri de incelendiğinde atık hammaddenin sır içerisinde homojen dağıldığını, renk etkinliğinin vererek hammaddenin varlığı sır reçetelerinde belirlenmiştir.

Ni-Co kompozit üretim katı atığının duvar karosu mat sır reçetelerine ilavesiyle endüstriyel pişirim ortamında pişirilerek elde edilen sırların farklı büyütmelerde sağlanan SEM görüntüleri incelendiğinde genel olarak şunlar söylenebilir;

%5 atık katkılı sırlarda yapılan EDX analizlerinde kristal yapıların ağırlıklı bir şekilde Al, Si, Na, Ca, ve K elementlerini içerdiği görülmüştür. Ayrıca farklı duvar karosu mat sır reçeteleri içerisindeki aynı atık oranı SEM fotoları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde kullanılan atıkta Fe elementi içeriği oldukça yüksek olmasına rağmen Fe elementinin ortaya çıkmadığı görülmüştür. Bu durum Fe elementinin duvar karosu mat sırı içerisinde çözündüğü ve yapı içerisinde hapsolduğunu söylenebilir. Ni-Co kompozit atıkları endüstriyel seramik sır uygulamalarında farklı sıcaklıklar koşullarında kullanılabilecek alternatif bir renklendirici olabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

1. Ağaçayak, T., (2008). Karaçam (Eskişehir) Lateritik *nikel cevherinin fiziksel ve kimyasal yöntemlerle zenginleştirilme*si (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
2. Arcasoy, A. (1983). Seramik Teknolojisi. Marmara Üniversitesi Yayın No:457, Güzel Sanatlar Fakültesi Yayın No:2, Eskişehir.
3. Aydın D. (2011). Kaplama Malzemesi Olarak Seramik Üretiminin Bölgesel Dağılımına Etki Eden Parametrelerin Araştırılması, Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
4. DPT-ÖİK- 640, (2022, 12 Ağustos). Erişim Adresi: https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/08/Sekizinci-Bes-Yillik-Kalkinma-Plani-Madencilik-OIK-Raporu-MetalMadenlerAltKomisyon-Diger-Metal-Madenler-Calisma-Grubu-Raporu.pdf
5. Emmanuel Cooper, (Çeviren Zeliha Mete), 2011. Karakalem Yayınevi, Seramik sır reçeteleri el kitabı, s. 208.
6. Eppler, R.A., (2000). Glazes and Glass Coatings, Am. Ceram. Soc., Westerville, 130-135.
7. Kayacı, K., Küçüker, A.S. Köstebekçi, Uzun, N. M., Kara A. 2008, "Mermer Kesim ve Sır Atıklarının Porselen Karo Bünyelerinde Kullanımı",VII. Seramik kongresi, s.220, Kolektif, Afyonkarahisar.
8. MTA Nikel (2023, Eylül 27). Erişim Adresi: https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/nikel).
9. Nikel, (2022, 14. Eylül). Erişim Adresi: https://www.metanikel.com.tr/
10. Taçyıldız, E. (2018). Seramik sırrının sırrı (1. Basım). İstanbul: Hayalperest Yayınevi.



Bölüm 15

KAOLİN VE METAKAOLİN ESASLI GEOPOLİMERLERİN MORFOLOJİK VE MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU

Ceyda BİLGİÇ[1] , Şafak BİLGİÇ[2]

1 Doç. Dr., Kimya Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, Orcid No: 0000-0002-9572-3863
2 Dr.Öğr.Üyesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, Orcid No: 0000-0002-9336-7762

1. GİRİŞ

Kaolinit, beyaz hidratlı alüminyum silikat kristalli bir mineraldir. İnce tanecikli ve plaka benzeri bir görünüme sahip yumuşak bir tozdur. Milyonlarca yıl boyunca granit kayaların hidrotermal ayrışması ile oluşmuştur (Aderemi, 2004). Kaolinit, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ kimyasal formülü ile alüminyum ve silikon oksitlerden oluşan bir kil mineralidir; ayrıca hem oktahedral hem de tetrahedral katmanlarda izomorf sübstitüentler olarak veya ekstra çerçeve fazları olarak bazı demir, titanyum veya manganez safsızlıkları içerir. Bir hammadde kaynağı olarak kaolin rezervlerinin bolluğu ve bulunabilirliği ve nispeten düşük maliyeti, gelecekte de kullanılmaya devam edilmesini garanti etmektedir ve dünya rezervlerinin çoğu Türkiye'de bulunmaktadır. Kaolinit, silikon tetrahedral tabakaların ve alüminyum oktahedral tabakaların üst üste binmesiyle oluşan dioktahedral 1:1 fillosilikattır. Bitişik tabakalar van der Waals kuvvetleri ve hidrojen bağları ile birbirine bağlıdır. Bu ara tabaka, grafting reaksiyonları için kullanılabilecek interlameller aluminol gruplarına (Al-OH) erişimin kısıtlanmasına neden olur. Kaolinitteki en reaktif fonksiyonel gruplar, iyon değişim süreçlerinin yanı sıra birçok kimyasal reaksiyonda yer alabilen hidroksil gruplarıdır (Alkan vd., 2008).

Metakaolin, betonda reaktif olan amorf bir alüminosilikat oluşturmak için Kaolin kilinin dikkatle kontrol edilen koşullar altında kalsinasyonuyla üretilir (Kakali vd., 2001). Kaolinit kil mineralleri adsorbe ettikleri suyun çoğunu 100-200 °C'de kaybederler. 500-800 °C arasında kaolinit, dehidroksilizasyon yoluyla su kaybederek kalsine olur. Kaolinin metakaoline dehidroksilizasyonu, kimyasal olarak bağlı hidroksil iyonlarını uzaklaştırmak için gereken büyük miktarda enerji nedeniyle endotermik bir süreçtir. Bu sıcaklık aralığının üzerinde kaolinit, kristal yapısında iki boyutlu bir düzen ile metakaoline dönüşür. Metakaolinin geopolimer sentezinde hammadde olarak kullanımına ilişkin birçok fayda rapor edilmiştir. Bunlar arasında efloresansın (çiçeklenmenin) (kalsiyum hidroksit atmosferdeki karbondioksit ile reaksiyona girdiğinde oluşan beyazımsı pus) azaltılması, basınç ve eğilme dayanımlarının arttırılması veya yükseltilmesi, klorür ve diğer geçirgenliklere karşı hafifletilmesi, asit saldırısına karşı direncin arttırılması ve geopolimerin dayanıklılığı yer almaktadır. Metakaolinin büyük oranda SiO_2 ve Al_2O_3 içerdiği bilinmektedir (Bellotto vd., 1995; Fernandez vd., 2011; Snellings vd., 2012). Birçok bilim insanı başlangıç malzemesi olarak metakaolin kullanarak geopolimer sentezlemiştir.

Kirschner ve Harmuth (2004) metakaolin bazlı geopolimer sentezinde iki yöntem kullanmışlardır. İlk yöntemde, sodyum hidroksit ve su camı karıştırılmış ve karışımın soğumasına izin verilmeden metakaolin eklenmiştir. Daha sonra ortam sıcaklığında kürleme yapılmıştır. İkinci karışımda ise metakaolin eklenmeden önce sodyum hidroksit ve su camı soğutulmuştur. Tüm karışım 60 °C ve üzeri bir sıcaklıkta kürlenmiştir. Sentezlenen metakaolin

bazlı geopolimerler üzerinde basınç dayanımı ve su emme özelliği belirlenmiştir (Kirschner ve Harmuth, 2004).

Kirschner ve Harmuth, (2004) şu sonucu bulmuşlardır: "Ortam sıcaklığında işleme, priz başlangıcının gecikmesi nedeniyle mümkün olmayabilir. Isıl işlem gecikmeyi önleyebilir ve hızlı bir mukavemet gelişimi sağlayabilir." 75°C' de 4 saat boyunca kürleme tatmin edici özelliklerle sonuçlanmıştır ve oluşan geopolimer herhangi bir özel ikincil işleme ihtiyaç duymamaktadır. Sentezlenen geopolimerin 60°C, 75°C ve 90°C'de 2 ve 4 saatlik ısıl işlem sonrası, sırasıyla 7 ve 28 gün sonraki testlere kadar ortam koşullarında ve su altında depolanarak basınç dayanımları belirlenmiştir (Kirschner ve Harmuth, 2004). Ferone ve arkadaşları, aktive edici çözeltinin bileşimini SiO_2/Na_2O oranı açısından değiştirerek elde ettikleri dört geopolimer formülasyonunu kullanarak metakaolin esaslı geopolimerik harç sentezlemişlerdir (Ferone vd., 2013).

Geopolimerlerin bileşimleri, Al/Na oranının 1'de sabit olmasını sağlayacak şekilde formüle edilmiş, negatif yüklü tetrahedral alüminyum merkezlerinin tam yük dengelemesini sağlamak için yeterli alkali sağlanmıştır. Molar SiO_2 /Na_2O oranı (r) 0, 0,67, 1,34 ve 1,67 ve molar H_2O/Na_2O oranı 10,5 olan sodyum silikat çözeltileri, 10 M NaOH çözeltisi (r = 0) kullanılarak, 1 numaralı olan sodyum silikat çözeltisine 15 M NaOH çözeltisi eklenerek (No. 1 (r = 0, 67)) veya 1 ve 2 numaralı olanlar, katı sodyum hidroksitin sodyum silikat çözeltisi içinde çözülmesi ile (No. 1 or No. 2 (sırasıyla r = 1,34 ve r = 1,67)) hazırlanmıştır. Bunun sonucunda nominal kimyasal bileşimi $Na_2O{\cdot}(SiO_2)z{\cdot}Al_2O_3{\cdot}10{,}5H_2O$ olan toplam dört farklı numune bileşimi elde edilmiştir; burada z; 2,15, 2,80, 3,50 ve 3,80'dir. Dört karışım Si/Al oranlarına göre sırasıyla 1,07, 1,40, 1,75 ve 1,90 olarak kodlanmıştır (Ferone vd., 2013).

Deneyin sonucu, metakaolin bazlı geopolimerlerin ortam sıcaklığında kürlenmesinin malzemede büzülmeye yol açabileceğini göstermiştir. Bu sorun, geopolimer karışımının Si/Al oranı ile arttığı tespit edilen numunenin buharlaşabilir su miktarı ile ilgilidir. Si/Al oranına göre değişimi; ağırlıkça yüzde (W) parametresidir. Buharlaşabilir su yüzdesinin Si/Al oranı ile doğrusal olarak arttığı açıktır. Daha yüksek Si/Al oranları ile karakterize edilen numunelerin daha yüksek buharlaşabilir su yüzdesi, kurutma büzülmesine karşı daha yüksek duyarlılıklarını açıklamaktadır. Daha sonra, ortadeğerdeki bir Si/Al oranının mekanik performanslar ve büzülme sorunları arasında en iyi olduğu sonucuna varılmıştır (Ferone vd., 2013).

Gougazeh (2013), metakaolinin alkali aktivasyonu ile sentezlenen geopolimerlerin basınç dayanımı üzerinde kimyasal ve mineralojik bileşimlerin etkisini araştırmak için Ürdün metakaolini, Metastar 501 metakaolin, Fluka metakaolin ve kuvars ile karışık Fluka metakaolin olmak üzere dört metakaolin malzeme üzerinde çalışmıştır. Elde edilen geopolimer çimentolar 25°C' de

24 ila 672 saat arasında yaşlandırılmıştır. İkincil fazın (kuvars) metakaolinin geopolimerizasyon reaksiyonu üzerindeki etkisi de dört metakaolin karşılaştırılarak araştırılmıştır. Yazar, kullanılan konsantrasyonda kuvarsın geopolimerizasyon reaksiyonunu engellemediğini bildirmiştir. Diğer yandan, Ürdün metakaolini ve Fluka metakaolininin kuvarsla karıştırılması durumunda, geopolimer ürünler, diğer iki metakaolinle (Fluka ve Metastar 501 Metakaolinler) karşılaştırıldığında büyük ve kararlı basınç dayanımına sahip olduklarını gösteren kohezif ve nispeten sert bir katı oluşturur (Gougazeh, 2013).

2. KAOLİN VE METAKAOLİN ESASLI GEOPOLİMERLERİN MORFOLOJİK VE MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU

Mikroyapısal analiz, geopolimer gelişiminin zaman içinde izlenmesini sağlar. Geopolimerlerin mukavemeti, yapının yoğunluğu ve gözenekliliği ile yakından ilişkilidir. Genel olarak, düşük gözeneklilik, yüksek yoğunluk ve ince taneli mikro yapı, yüksek mukavemetli geopolimerlere katkıda bulunur. X-Işını Kırınımı (XRD), Taramalı Elektron Mikroskobu SEM, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve termogravimetri (TG) gibi analitik teknikler geopolimerlerin mikroyapısal özelliklerini açıklığa kavuşturmak için kullanılmıştır.

2.1. X-ışını kırınımı (XRD)

X-ışını kırınımı ve TG testleri, hammaddelerin kalsinasyonu sırasında yapısal değişiklikleri tespit etmek için çok yararlıdır. Kaolin bazlı killerin XRD desenindeki karakteristik pikler kaolinit, kuvars, mullit ve illite karşılık gelmektedir. 500-800 °C'de kalsinasyondan sonra, genişlemiş XRD pikleri gözlenir. Kuvars kristalleri genellikle kalsine kil içinde kalır, ancak kaolin kristalleri amorf bir alüminosilikat fazına tamamen parçalanabilir. XRD analizi ve TG'nin birleştirilmesi sürecin optimize edilmesini sağlar. Zuhua ve arkadaşları (2009) kalsine kaolin üzerinde yaptıkları TG testlerinde 700, 800 ve 900 °C'deki kütle kaybının 600 °C'deki kütle kaybına göre sırasıyla %0,9, 1,9 ve 2,3 olduğunu bildirmişlerdir (Zuhua vd., 2009). Bu kütle kaybının yapısal suyun buharlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir; ısıtılmış kaolindeki mevcut hidroksil birimleri alkali ortamdaki aktivitesi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğundan, optimize edilmiş bir kalsinasyonun amorf bir XRD deseninden ve TG testleri ile tespit edilen maksimum kütle kaybından belirlenebileceği sonucuna varılmıştır. XRD, alkali aktivasyon adımındaki mikroyapısal değişiklikler için yararlı bilgiler sağlayamaz: Genellikle reaksiyona girmiş ve girmemiş killerin XRD desenleri arasında önemli bir fark yoktur çünkü çoğu değişiklik malzemenin amorf fazlarında gerçekleşir ve reaksiyon ürünlerinde kristal faz yoktur (Lee vd., 2002; Lee vd., 2003). Bununla birlikte, FTIR ve MAS-NMR analizleri geopolimerizasyon sırasındaki moleküler değişiklikler hakkında çok faydalı veriler sağlayabilir. Alümino-silikatların alkali aktivasyonu sırasındaki önemli bir moleküler değişiklik, Si-

O-Si ve Al-O-Si asimetrik gerilme (950-1200 cm^{-1}) için kızılötesi bandın daha düşük dalga sayılarına kaymasıdır. Alümino-silikatların alkali çözeltide çözünmesinin yapı içindeki köprü oluşturmayan oksijen atomlarının (NBOs) sayısını artırdığı gösterilmiştir (Zirl vd., 1992; Onorato vd., 1985). Bu durum SiO_4 ve AlO_4 birimlerinin izole olmasına neden olur ve böylece Si-O ve Al-O bantlarının daha düşük moleküler titreşimi gözlenir. Burada Na katyonları, Al-O-Si bantlarının oluşumu veya NBO'ların uzaklaştırılmasıyla oluşan negatif yükleri dengeler. ^{29}Si ve ^{27}Al MAS-NMR aracılığıyla, geopolimerizasyon mekanizmaları ve moleküler düzenlemelerdeki ilerleme ve değişiklikler takip edilebilir. Reaksiyon devam ettikçe, metakaolindeki Al (IV,V,VI) koordinasyonu son üründe neredeyse tamamen IV'e dönüşür (Singh vd., 2005).

Hammaddenin XRD deseni, kaolinin karakteristik pikleri olan d_{100} 12,34° ve d_{200} 24,64° ile katmanlı bir yapıya sahip olan kaolinitinkine karşılık gelir (Zhao vd., 2004). Bununla birlikte, illit, muskovit ve halloysit gibi küçük safsızlıklar da ortaya çıkar. Kaolinit, gevşek bir şekilde paketlenmiş küçük, iyi biçimlendirilmiş altıgen plakalardan oluşan yassı morfolojisi ve altıgen hatlarıyla tanınabilir. XRD desenleri, üç boyutlu düzensiz bir çerçeve yapısına sahip hidratlanmamış bir silikat cam olan obsidiyenin tamamen amorf karakterini göstermektedir. Metakaolin amorf bir malzemedir ve en yüksek kırınım pikleri metakaolin içindeki kristalin faz olan kuvarsın (SiO_2) varlığına karşılık gelmektedir.

Geopolimerler X-ışını kırınımına (XRD) göre tamamen amorftur. Tipik olarak, yaklaşık 2θ' da 27 ile 30° derecelerde dağınık bir halo pikine sahiptirler (Davidovits, 1991; Lecomte vd., 2003; Lizcano vd., 2012; Zhang vd., 2005). Geniş dağınık pik, geopolimer matrisindeki birincil bağlayıcı fazı oluşturan ve geopolimerlerin mukavemetine katkıda bulunan amorf alüminosilikatlara karşılık gelmektedir. Bu dağınık halo pikinin açısı Si/Al oranına bağlıdır. Artan Si/Al oranı tümseklik derecesini düşürür (Lizcano vd., 2012). Ayrıca, Wang ve arkadaşları tarafından metakaolin reaksiyon ürünü geopolimerler için, 2θ'da 18° ile 25° arasında yayılan halo pikleri gözlemlenmiştir (Wang vd., 2005). Alkalileştirmeden sonra kuvars fazının büyük ölçüde reaktif olmadığı bulunmuştur. Ancak kaolinde bulunan safsızlıkların (tamamlanmamış kalsinasyondan dolayı) yoğunluğu azalır (Yao vd., 2009). Geopolimerlerin XRD desenlerinde, geopolimerlerin amorf fazı ile birlikte zeolitlerden kaynaklanan kristal fazların büyümesi yaygın olarak görülebilir (Davidovits, 2008; Zibouche vd., 2009).

Başlangıç durumunda sertleşmiş geopolimer hamur (GP), termal işleme maruz bırakılmış geopolimer hamur (EGP) ve seramik hamur (grog) (CG) içindeki metakaolin (MK) karakteristiği XRD analizi kullanılarak incelenmiştir. MK'nin ana bileşimleri monoklinik illit, hekzagonal kuvars, anortik kaolinit ve ortorombik mullittir (Kovářík vd., 2017). Bunların yanında az miktarda tetragonal anataz ve rutil de bulunmuştur. MK'nın XRD desenin-

de de geniş bir pik tespit edilmiştir. Öte yandan, GP numunesinde geniş bir dağınık pik gözlenmiştir. Pikler 20° ile 31° arasında değişmektedir ve geopolimerin birincil fazının oluştuğu amorf alüminosilikatlarla yakından ilişkilidir (Zhang vd., 2005). Bununla birlikte, MK ve GP'nin karşılaştırıldığında; geopolimerizasyon sürecinden sonra çok yüksek miktarda kaolinit ve illit fazlarının azaldığını ortaya çıkmıştır. İllit ve kaolinitin aksine, kuvars ve mullit fazlarının aktif olmadığı görüldü. Geopolimer 1000 °C'de işlem gördükten sonra faz bileşiminde hafif değişiklikler gözlenmiştir. Kaolinit fazı gösterildiği gibi tamamen ayrışmıştır. Kuvars miktarı önemli ölçüde azalırken, illit, mullit, anataz ve rutil içeriklerinde neredeyse hiç değişiklik kaydedilmemiştir. He ve diğerlerinin (2011) bulgularıyla tutarsız olarak, Kovárík ve diğerleri (2017) tarafından elde edilen sonuçlar; 1000 °C'de ısıl işlem sırasında tespit edilebilir miktarda kalsilit veya lösit kristal fazının olmadığını göstermiştir (He vd., 2011; Kovárík vd., 2017). Bulgulardaki çelişkinin temel sebebinin kullanılan numunelerdeki farklı kimyasal içerikleri olduğu öngörülmüştür.

2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Wang ve arkadaşları (2005) tarafından elde edilen SEM görüntüleri, metakaolin geopolimerlerinin kompakt olmadığını ve geopolimerizasyon reaksiyonundan sonra katmanlı yapısını koruduğunu göstermektedir (Wang vd., 2005). Bu da Davidovits'in (2008); reaksiyonun geopolimerlerin yüzeyinde meydana geldiği yönündeki ifadesini doğrulamaktadır (Davidovits vd., 2008).

Metakaolin geopolimerlerinin zaman içindeki mikroyapı gelişimi, gevşek tempolu metakaolin parçacıklarının yüzeyinde sünger benzeri geopolimer küresel birimlerin çökelmesini, yoğunlaşmasını ve boşlukların içinde ve dışında yoğun geopolimer matrisinin sürekli oluşumunu gözlemlemiştir. SEM görüntüleri, metakaolin bazlı geopolimerin homojen ve yoğun mikro yapısının, yerini mikro çatlaklara ve hatta reaksiyona girmemiş metakaolin parçacıklarına sahip bir yapıya bıraktığını göstermektedir (Zhang vd., 2005; Sun vd., 2004).

Asidik (GPS) ve alkali (GPWP) metakaolin bazlı geopolimerlerinin mikro yapısı Tchakouté ve Rüscher tarafından araştırıldı (Tchakouté ve Rüscher, 2017). Geopolimer çimentoların morfolojisi 120, 250 ve 5000 büyütmelerde görüntülenmiştir. GPWP numunelerinde büyük kılcal gözenekler ve hava kabarcıkları gözlenirken, GPS yüzeyinde çok sayıda mikro çatlak görülmüştür. Çözünme ve polikondenzasyon süreci boyunca, geopolimer çimento hamurunda sıkışan hava kabarcıkları, büyük kılcal gözeneklere atfedilmiştir. GPWP numunelerinde gözlemlenen büyük gözeneklerin varlığından dolayı, fosfat bazlı geopolimer çimentolarla karşılaştırıldığında alkali bazlı geopolimer çimentolar için daha düşük basınç dayanımı kaydedilmiştir. 5000 büyütmedeki mikrograf analizi için, alüminyum fosfatın ($AlPO_4$) varlığını göstermiş ve daha sonra XRD ve FTIR testleri ile doğrulanmıştır. Berlinit

olarak da bilinen alüminyum fosfat, geopolimerizasyon sürecinde oluşan kuvars ile eşyapısal bir mineraldir. Berlinitin, asidik bir ortamda metakaolini dealuminate etme kabiliyeti nedeniyle ortam sıcaklığında bile hızlı bir şekilde reaksiyona girdiği bilinmektedir. Ayrıca, depolimerize sertleştirici olarak kullanılan fosforik asit ve nano silis dumanı sonucunda her iki geopolimer çimento için de homojen ve yoğun yapılar gözlenmiştir. GPS numunelerinin mikrograf analizlerinde birçok çatlak tespit edilmiş ve numunelerin basınç dayanımı testlerinden başarısız olma nedeni, bu çatlaklara bağlanmıştır. Daha yüksek büyütmelerde, hem GPS hem de GPWP'den etkin bağlanma fark edilmiştir. Yoğun ve kompakt matrisler, hem alkali hem de asit bazlı geopolimer çimentoların geopolimerizasyon sürecinde iyi bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir.

2.3. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

Geopolimerlerin FTIR spektrumları genellikle düzensiz geopolimer yapısının özelliği olan 900-1300 cm^{-1} bölgesinde geniş bir bantla karakterize edilir. Metakaolin bazlı bir geopolimer çalışmasında 1300-900 cm^{-1} bölgesinde gözlenen en yüksek absorbans piki Si-O-T bağlarının asimetrik gerilme titreşimine atfedilir. 1169 ve 1063 cm^{-1}'de yer alan bantlar metakaolinin asimetrik gerilme modunu gösterir ve bu pikler tüm spektrumlarda mevcuttur. 995 cm^{-1}'deki yüksek frekans bandı geopolimer yapının dörtyüzlüleri arasındaki oksijen bağlarının asimetrik titreşimine karşılık gelir (Rovnanik, 2010).

Farklı katı/sıvı oranlarına sahip metakaolin bazlı geopolimerlerle ilgili bir başka çalışmada, FTIR spektrumlarındaki ana bantlar 958 ve 967 cm^{-1} arasında gözlenmiştir. Tüm geopolimer numunelerinde bulunan 660 cm^{-1}'deki bant zeolit yapısıyla ilişkilidir. 3300 cm^{-1}'de konumlanan FTIR bandı OH gerilme titreşimini temsil etmektedir. 1645 cm^{-1} 'deki diğer absorpsiyon piki ise geopolimer çerçevenin yüzeyinde adsorbe edilen zayıf H_2O bağları nedeniyle H_2O bükülmesine atfedilmiştir (Liew vd., 2012). Kaolinit ve uçucu kül bazlı geopolimerin FTIR spektrumları, 539 cm^{-1} civarında yer alan piklerin Si-O-Al bağlarıyla ilişkili olduğunu göstermektedir (Van Jaarsveld vd., 2002; Stubican ve Roy, 1961). 1009 ve 1033 cm^{-1}'de bulunan FTIR karakteristik titreşimleri, Al-O ve Si-O bağlarının asimetrik gerilmesinden kaynaklanmaktadır (Van Jaarsveld vd., 2002; Flanigan vd., 1971). Dörtyüzlüler arasındaki bağların asimetrik gerilmesine karşılık gelen bir başka karakteristik pik 1087 cm^{-1}'de tespit edilmiştir (Van Jaarsveld vd., 2002).

Asit (GPS) ve alkali bazlı (GPWP) geopolimerlerin FTIR analizleri literatürde tartışılmaktaktadır (Tchakouté ve Rüscher, 2017). Her iki geopolimer numunesi için FTIR analizinde yaklaşık 449 ve 460 cm^{-1}'de kaydedilen bantlar, Si-O-Si düzlem içi titreşimi için atfedilir. MK'nin FTIR analizi, 546 cm^{-1}'deki bandın geopolimerizasyon işleminden sonra yaklaşık 530 ve 536 cm^{-1}'de daha düşük bir dalga sayısına doğru sapması nedeniyle S-O-Al VI'ya atfedildiğini

göstermiştir. Asit bazlı geopolimer için kaydedilen daha düşük dalga sayısına doğru kaymanın, SiO_4 'ün PO_4 ile tam olarak yer değiştirmemesinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir (Louati vd., 2014). Öte yandan, geopolimerizasyon sürecinden sonra alüminyumun 6-katlı koordinasyonda yeniden düzenlenmesi alkali bazlı geopolimer numunesinin kaymasına neden olmuş olabilir. Bantın 590 cm^{-1}'de oluşması alüminyumun yeniden düzenlenmesinden kaynaklanıyor olabilir. Çalışmaya göre, GPWP numunesi için 592 cm^{-1}'de kaydedilen absorpsiyon bandı AlO_6 titreşimlerine ve berlinit oluşumuna atfedilmiştir (Taylor, 1990). GPS için Si-O-Si ve Si-O-P titreşim modlarının gerilmesi sırasıyla 666 cm^{-1} ve 799 cm^{-1} 'deki bandlarına karşılık gelmektedir.

GPWP numunesi için, kuvars varlığından tahmin edilen Si–O–Si'ye atfedilen bant 673 cm^{-1}'de kaydedilmiştir. Gao ve arkadaşları (2014) temel geopolimer yapısının silikon alüminatlar ve alkali çözelti arasındaki reaksiyondan sonra oluştuğunu ve GPWP numunesi için absorpsiyon bandının FTIR analizinde tespit edildiği gibi yaklaşık 712 cm^{-1} 'de bulunduğunu tartışmıştır. Si-O-Al IV'ün absorpsiyon bandı, yüksek oranda çapraz bağlanan geopolimer çerçevenin oluşumuyla ilişkili olabilir (Gao vd., 2014). Bu durum, test sonuçlarından kaydedilen daha yüksek mukavemet ve yüksek yoğunluklu matrisler ile doğrulanmıştır. Si-OH ve P-O'nun bükülme titreşimi, sırasıyla 865 cm^{-1} ve 925 cm^{-1} 'deki bandlara atfedilir (Louati vd., 2014).

FTIR spektrumlarında, MK'den 1076 cm^{-1} 'de kaydedilen absorpsiyon bandı, GPS spektrumunda 1088 cm^{-1} 'ye kaymıştır. Öte yandan, GPWP numunesi için absorpsiyon bandı daha düşük bir dalga sayısı olan 1019 cm^{-1}'ye kaymıştır. Dalga sayısının değişmesi, orijinal MK'den farklı materyallerin oluşumunu göstermektedir.

Hem asit hem de alkali ortamlar, geopolimerizasyon sürecinde malzemelerin depolimerizasyonunu ve polikondensasyonunu mümkün kılmıştır. Dalga sayısının kayması, hem asidik hem de alkali ortamlar için geopolimer numunelerinin zincirinde Si-O-Si-O-Al-O ve Si-O-Si-O-P-O oluşumuna işaret etmiştir. Yaklaşık 1647 cm^{-1} ve 3420 cm^{-1}'de gözlenen geniş bantlar H-O-H ve O-H bağının uzama ve deformasyon titreşim modlarıyla ilişkilidir. Bununla birlikte, alkali bazlı geopolimerin analizinde yaklaşık 1440 cm^{-1}'de bir absorpsiyon bandı kaydedilmiştir. Bu bandın varlığı, atmosferdeki CO_2 ile reaksiyona giren nano silis dumanındaki sodyum iyonlarının varlığı nedeniyle karbonat gruplarının C-O'suna atfedilmiştir.

2.4. Termogravimetrik Analiz

Sıcaklık değişimlerine karşı ağırlık kaybı, termogravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel termogravimetrik analiz (DTGA) ile ölçülür. Numunelerin termal kararlılığı hakkında bilgi elde edilir. TGA, TA (Termal Analiz) enstrümanları kullanılarak gerçekleştirilir ve analiz belli bir akış hızında azot kullanılarak yapılır. Alkali ile aktive edilmiş atık katalizör-metakaolin

bazlı geopolimerlerle ilgili çalışmaya göre geopolimerlerin termal davranışı dört ardışık aşamaya ayrılabilir (Cheng vd., 2015). Bu aşamalar şunlardır;

(i) Serbest suyun dispersiyonu

(ii) Geopolimer bileşenlerinin ayrışması

(iii) Zeolitiklerin dehidroksilasyonu

(iv) Kütle kaybının stabilizasyonu (kararlılığı)

Metakaolin ısıl işlemden sonra elde edildiğinden, serbest suyun uzaklaştırılması olan ilk aşamadaki ağırlık kaybının düşük miktarlarda kalması beklenir. Kaolinin kalsinasyonu sırasında serbest suyun büyük bir kısmı kaybolur. Kil bazlı geopolimer numuneleri üzerinde yapılan TGA çalışmaları, artan Si/Al molar oranının daha yüksek ağırlık kayıplarına neden olduğunu ortaya koymuştur. Ağırlık kayıplarının çoğu yapısal suyun buharlaşması ve karbonatlı malzemelerin ayrışmasıyla ilgilidir.

Kovárík ve arkadaşları (2017), saf geopolimerin sıcaklıkların 1000 °C'ye kadar yükseltilmesiyle kararlı termal davranış gösterdiğini bildirmiştir (Kovářík vd., 2017). Ortam sıcaklığından 250 °C'ye kadarlık artışta, ağırlıkta keskin bir azalma gözlenmemiştir. Önceki çalışmalarda olduğu gibi, numunelerdeki ağırlık kaybı, sıkıca absorplanan ve küçük gözeneklere hapsedilen serbest suyun buharlaşmasından kaynaklanmıştır (Bell vd., 2009). 200 °C'den 800 °C'ye kadar olan sürekli ağırlık kaybı hidroksil grubunun yoğunlaşması ile ilişkilendirilmiştir; benzer bulgular Duan ve diğerleri (2016) tarafından da rapor edilmiştir. Sıcaklık 800 °C'den 1000 °C'ye yükseldikçe, ağırlık kaybı oranı azalmış ve neredeyse durmuştur (Duan vd., 2016).

Termal analizin ilk çalışması, geopolimerdeki ağırlık kaybına asıl katkının su moleküllerinin kaybından kaynaklandığını kanıtlamıştır. İkinci çalışma aynı numune üzerinde 1000 °C'ye kadar yapılmıştır. Aynı numune 400 °C'ye kadar test edildiğinde % 0,3'lük küçük bir ağırlık kaybı kaydedilmiştir. Çevreden absorplanan yüzey suyu kaybı, ikinci çalışmadaki ağırlık azalmasının ana nedenidir. Isı tüketimi 76 J/g olan eğri, serbest suyun sürekli buharlaşmasına karşılık gelmektedir ve bu da elde edilen TGA verileriyle uyumludur. 200°C ila 800°C arasındaki geniş ekzotermik pikin oluşumuna, geopolimerdeki serbest hidroksil gruplarının (silanol veya aluminol grubu) yoğunlaşması da katkıda bulunmuştur. Alüminosilikat ağı iki hidroksil grubunun reaksiyonundan oluşmuştur (Duxson vd., 2005). 800 °C ila 1000 °C sıcaklık aralıklarında, kristalleşme veya faz geçişleri olmayan kararlı bölgede, kayda değer bir ısı etkisi rapor edilmemiştir (He ve ark., 2011).

3. SONUÇLAR

Dünya çapında katlanarak artan inşaat sektöründe kullanılmak üzere, Geopolimer beton, çimento ihtiyacı etkinliğini incelemek ve analiz etmek

için birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Geopolimer betonun çevresel faydalar açısından sunduğu büyük avantaj ve potansiyel ile, ağırlıklı olarak geri dönüştürülmüş malzemelerden oluşan bir bağlayıcı olarak kullanılması, önceki araştırmaların ayrıntılı bir çalışmasının yapılması için motivasyon olmuştur. Geopolimerik malzemeler çevresel iyileştirme zorluklarına değerli çözümler sunabilir. Bu çözümlerin altyapı bakım maliyetlerinin düşük olması ve mevcut endüstriyel atık su arıtma tesislerinin ölçeklenebilirlik ihtiyaçlarıyla ilgili olması muhtemeldir. (i) Erişilebilir ve oldukça bol miktarda bulunan hammaddelerden sentezleme ve (ii) düşük veya sıfır sera gazı emisyonu ile oda sıcaklığı yaklaşımları kullanılarak üretim imkanı, geopolimeri daha temiz üretim ve yeşil teknolojiler için uygun bir malzeme haline getirmiştir. Bu aynı zamanda inşaat, yüzey mühendisliği ve sağlık hizmetleri de dahil olmak üzere ortak endüstrilerde 'yeşil teknoloji' fırsatları sunmaktadır. Bu malzemenin kataliz uygulamaları ve enerji üretimi için ileri düzeyde kullanımı, özellikle atık arıtma ve su iyileştirmeye odaklanan endüstrilere fayda sağlayacaktır.

Geopolimerlerin yapısının anlaşılması, istenen özelliklere sahip geopolimerlerin tasarlanması için kritik öneme sahiptir. Yapı ve fiziksel özellikler arasında kurulan ilişkiler, ürün özelliklerini kontrol etmek için önemli olacaktır. Geopolimerik onarım malzemeleri çimento bazlı onarım malzemelerine göre daha iyi onarım özelliklerine sahiptir. Geopolimerik onarım malzemeleri çimento onarımına göre daha iyi aşınma direnci özelliği göstermektedir. Sentezlenen geopolimerlerin amorf veya kristal fazını araştırmak için X-Işını Kırınımı (XRD) ölçümleri yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çelik cürufunun alkali aktif reaksiyona katılmak için neredeyse tamamen emildiği ve amorf alümino-silikat geopolimer matrisine immobilize olduğu gösterilmiştir. Geopolimerlerin titreşimsel parmak izlerini anlamak için Fourier Dönüşümlü Kızılötesi spektroskopisi (FTIR) kullanılmış, yüzey mikro yapılarını çözmek için sentezlenen geopolimerler üzerinde SEM görüntüleri gerçekleştirilmiştir. Ham killer ve elde edilen geopolimerler farklı analiz (TGA-DTA) teknikleri ile karakterize edilmiştir. Malzemelerin termal bozunması ve kararlılığı, çeşitli ısıtma hızlarında termogravimetrik analiz (TGA) ve toplam termogravimetrik analiz (DTG) ile incelenmiştir. TGA analizine göre, serbest su molekülünün buharlaşması numunede ağırlık kaybına neden olan ana faktördür. Geopolimer, uygun fiyatlı olması ve gerçek taşa dönüşen doğal bir malzeme olması nedeniyle oldukça tercih edilmektedir. Yangına, böceklere, çürümeye karşı iyi bir direnç göstermiştir ve kurşun geçirmezdir; böylece yüzyıllarca dayanabilir.

Teşekkür

Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenen bir projenin (2018-15054) parçasıdır.

KAYNAKÇA

Aderemi, B. O. (2004), Preliminary Studies on Synthesis of Zeolites from Local Clay, *Nigerian Journal of Scientific Research*, *4*(2), 7-12.

Alkan, M., Kalay, B., Doğan, M., Demirbaş, O. (2008), Removal of copper ions from aqueous solutions by kaolinite and batch design, *Journal of Hazardous Materials*, 153(1-2), 867-876.

Bell, J. L., Driemeyer, P. E., Kriven, W. M. (2009), Formation of ceramics from metakaolin-based geopolymers: Part I—Cs-based geopolymer, *Journal of the American Ceramic Society*, *92*(1), 1-8.

Bell, J.L., Driemeyer, P.E., Kriven, W.M. (2009), Formation of ceramics from metakaolinbased geopolymers. Part II: K-based geopolymer, *Journal of the American Ceramic Society*, 92, 607-615.

Bellotto, M., Gualtieri, A., Artioli, G., Clark, S. M. (1995), Kinetic study of the kaolinite-mullite reaction sequence. Part I: kaolinite dehydroxylation, *Physics and chemistry of minerals*, *22*(4), 207-217.

Casal, B., Merino, J., Serratosa, J.M., Ruiz-Hitzky, E., (2001), Sepiolite-based materials for the photo- and thermal-stabilization of pesticides, *Applied Clay Science*, 18, 245-254.

Cheng, H., Lin, K.L., Cui, R., Hwang, C.L., Chang, Y.M., Cheng, T.W. (2015), The effects of SiO_2/Na_2O molar ratio on the characteristics of alkali-activated waste catalyst-metakaolin based geopolymers, *Construction and Building Materials,* 95, 710-720.

Davidovits, J. (1991), Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8), 1633-1656.

Davidovits, J. (2008), Geopolymer Chemistry and Applications, 2nd edition., Ch. 8, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France, 145-192 pp.

Duan P., Yan C., Zhou W., Luo W. (2016), Fresh properties, mechanical strength and microstructure of fly ash geopolymer paste reinforced with sawdust, *Construction and Building Materials,* 111, 600-610.

Duxson, P., Lukey, G. C., Separovic, F., Van Deventer, J. S. J. (2005), Effect of alkali cations on aluminum incorporation in geopolymeric gels, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *44*(4), 832-839.

Fernandez, R., Martirena, F., Scrivener, K. L. (2011), The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite, *Cement and concrete research*, *41*(1), 113-122.

Ferone, C., Colangelo, F., Roviello, G., Asprone, D., Menna, C., Balsamo, A., Prota, A., Cioffi R., Manfredi, G. (2013), Application-oriented chemical optimization of a metakaolin based geopolymer, *Materials*, *6*(5), 1920-1939.

Flanigan, E. M., Khatami, H., Szymanski, H.A. (1971), Molecular Sieve Zeolites, *Ad-*

vances in Chemistry Series, American Chemical Society, Washington, DC, 101, 201-229.

Gao K., Lin K.L., Wang D.Y., Hwang C.L., Shiu H.S., Chang Y.M., Cheng T.W. (2014), Effects SiO_2/Na_2O molar ratio on mechanical properties and the microstructure of nano-SiO_2 metakaolin-based geopolymers, *Construction and Building Materials,* 53, 503-510.

Gougazeh, M. (2013), Geopolymers from Jordanian Metakaolin: Influence of Chemical and Mineralogical Compositions on the Development of Mechanical Properties, *Jordan Journal of Civil Engineering,*7 (2), 236-257.

He P., Jia D., Wang M., Zhou Y. (2011), Thermal evolution and crystallization kinetics of potassium-based geopolymer, *Ceramics International*, 37 (1), 59-63.

Kakali, G., Perraki, T. H., Tsivilis, S., Badogiannis, E. (2001), Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity, *Applied clay science*, *20*(1-2), 73-80.

Kirschner, A., Harmuth, H. (2004), Investigation of geopolymer binders with respect to their application for building materials, *Ceramics-silikaty*, *48*(3), 117-120.

Kovářík, T., Rieger, D., Kadlec, J., Křenek, T., Kullová, L., Pola, M., Říha, J. (2017), Thermomechanical properties of particle-reinforced geopolymer composite with various aggregate gradation of fine ceramic filler, *Construction and Building Materials*, *143*, 599-606.

Lecomte I., Liegeois M., Rulmont A., Cloots R. (2003), Synthesis and characterization of new inorganic polymeric composites based on kaolin or white clay and on ground-granulated blast furnace slag, *Journal of Materials Science,* 18(11), 2571-2579.

Lee, W. K. W., Van Deventer, J. S. J. (2002), Structural reorganisation of class F fly ash in alkaline silicate solutions, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *211*(1), 49-66.

Lee, W.K.W., Van Deventer, J.S.J. (2003), Use of infrared spectroscopy to study geopolymerization of heterogeneous amorphous aluminosilicates, *Langmuir* , 19, 8726-8734.

Liew, Y. M., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Bnhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., Ruzaidi, C.M., Heah, C.Y. (2012), Optimization of Solids-to-Liquid and Alkali Activator Ratios of Calcined Kaolin Geopolymeric Powder, *Construction and Building Materials*, 37, 440-451.

Lizcano M., Kim H.S., Basu S., Radovic M. (2012), Mechanical properties of sodium and potassium activated metakaolin-based geopolymers, *Journal of Materials Science*, 47, 2607-2616.

Louati, S., Hajjaji, W., Baklouti, S., Samet, B. (2014), Structure and properties of new eco-material obtained by phosphoric acid attack of natural Tunisian clay, *Applied clay science*, *101*, 60-67.

Onorato, P. I., Alexander, M. N., Struck, C. W., Tasker, G. W., Uhlmann, D. R. (1985),

Bridging and nonbridging oxygen atoms in alkali aluminosilicate glasses, *Journal of the American Ceramic Society*, *68*(6), C-148-C150.

Rovnanik P. (2010), Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer, *Construction and Building Materials*, 24(7), 1176–1183.

Singh, P. S., Trigg, M., Burgar, I., Bastow, T. (2005), Geopolymer formation processes at room temperature studied by 29Si and 27Al MAS-NMR, *Materials Science and Engineering: A*, *396*(1-2), 392-402.

Snellings, R., Mertens, G., Elsen, J. (2012), Supplementary cementitious materials, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, *74*(1), 211-278.

Stubican, V., Roy, R. (1961), Isomorphous Substitution and Infrared Spectra of Lattice Layer Silicates, *American Mineralogist*, 46, 32-51.

Sun W., Zhang W., Lin W., Liu Z.Y. (2004), In situ monitoring of the hydration process of K-PS geopolymer cement with ESEM, *Cement and Concrete Research*, 34, 935-940.

van Jaarsveld, J. G. S., van Deventer, J. S. J., Lukey, G.C. (2002), The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash- and Kaolinite-Based Geopolymers, *Chemical Engineering Journal*, 89(1-3), 63-73.

Wang H., Li H., Yan F. (2005), Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 268 (1-3), 1-6.

Taylor, W. R. (1990), Application of infrared spectroscopy to studies of silicate glass structure: Examples from the melilite glasses and the systems Na2O-SiO2 and Na2O-Al2O3-SiO2, *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Earth and Planetary Sciences*, *99*(1), 99-117.

Tchakouté, H. K., Rüscher, C. H. (2017), Mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer cements from sodium waterglass and phosphoric acid solution as hardeners: A comparative study, *Applied Clay Science*, *140*, 81-87.

Yao X., Zhang Z., Zhu H., Chen Y. (2009), Geopolymerization process of alkali-metakaolinite characterized by isothermal calorimetry, *Thermochimica Acta*, 493, 49-54.

Zhang Y.S., Sun W., Li Z.J. (2005), Hydration process of potassium polysialate (K-PS-DS) geopolymer cement, *Advances in Cement Research*, 17(1), 23-28.

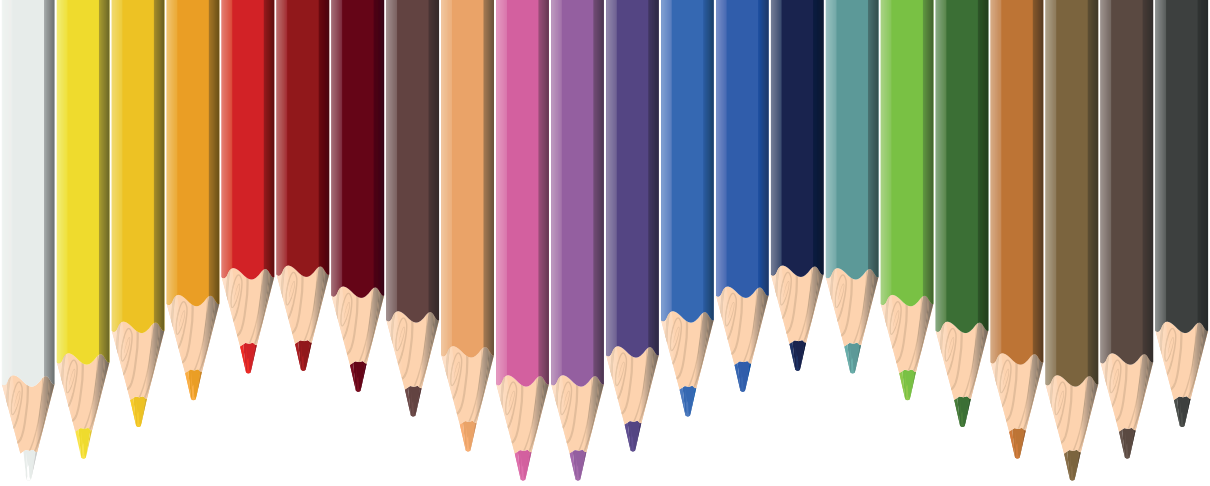
Zhao, H., Deng, Y., Harsh, J.B., Flury, M., Boyle, J.S., (2004), Alteration of kaolinite to cancrinite and sodalite by simulated Hanford tank waste and its impact on cesium retention, *Clays and Clay Minerals*, 52 (1), 1-13.

Zibouche, F., Kerdjoudj, H., d'Espinose de Lacaillerie, J.B., Van Damme, H.L., (2009), Geopolymers from Algerian metakaolin. Influence of secondary minerals, *Applied Clay Science*, 43(3-4), 453-458.

Zirl, D. M., Garofalini, S. H. (1992), Structure of sodium aluminosilicate glass surfaces,

Journal of the American Ceramic Society, *75*(9), 2353-2362.

Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z., Yue, C. (2009), Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer, *Applied clay science*, *43*(2), 218-223.



Bölüm 16

DURSUNBEY (BALIKESİR) BÖLGESİNDEKİ SİLİSLİ SÜSTAŞLARINDA GÖZLENEN FARKLI DOKUSAL ÖZELLİKLER[1]

Meltem GÜRBÜZ [2]

1 Bu çalışma 2007 yılında tamamlanmış Doktora tezinden üretilmiştir.

2 Dr. Öğr. Üyesi Meltem GÜRBÜZ / ORCID ID: 0000-0003-2501-0697 / Adres: Mersin Üniversitesi Takı Teknolojisi ve Tasarımı Yüksekokulu / Tel: 0 536 495 92 78 / E-posta: mgurbuz@mersin.edu.tr

GİRİŞ

Süstaşları nadirlik, renk, doku, cila alma, dayanıklılık, işlenebilirlik vb., gibi özellikleri nedeniyle yarıdeğerli/değerli taşlar olarak mücevher ve aksesuar sektöründe yoğun talebe sahiptir (Başıbüyük vd., 2020; Kaydu Akbudak vd., 2020; Candan vd., 2022). Aynı zamanda çok eski tarihlerden günümüze kadar insanoğlu süstaşlarını (kalsedon, obsidyen, ametist, korund vb.) işlevsel objeler (kesici aletler, ezgi taşı, ağırşak vb.), savaş ve av aletleri (ok ucu, balta, bıçak vb.) gibi yaşamsal ihtiyaçların yanında sanatsal (mozaik, takı, mühür vb.) alanlarda da kullanmışlardır (Kaydu Akbudak vd., 2017; Ekincioğlu vd., 2018). Silisli süstaşları, günümüzde de doğada yaygın olarak bulunmasından, dayanıklılık, renk çeşitliliği ve albenilerinden dolayı insanların ilgisini çekmektedirler (Başıbüyük vd., 2020).

Çalışmanın konusunu oluşturan ve silisli süstaşlarından olan ametist-kuvars ve kalsedonlu damarlar Balıkesir-Dursunbey-Güğü köyü civarında bulunan, volkanik kayaçlar içindeki kırıklarda ve boşluklarda yer almaktadırlar.

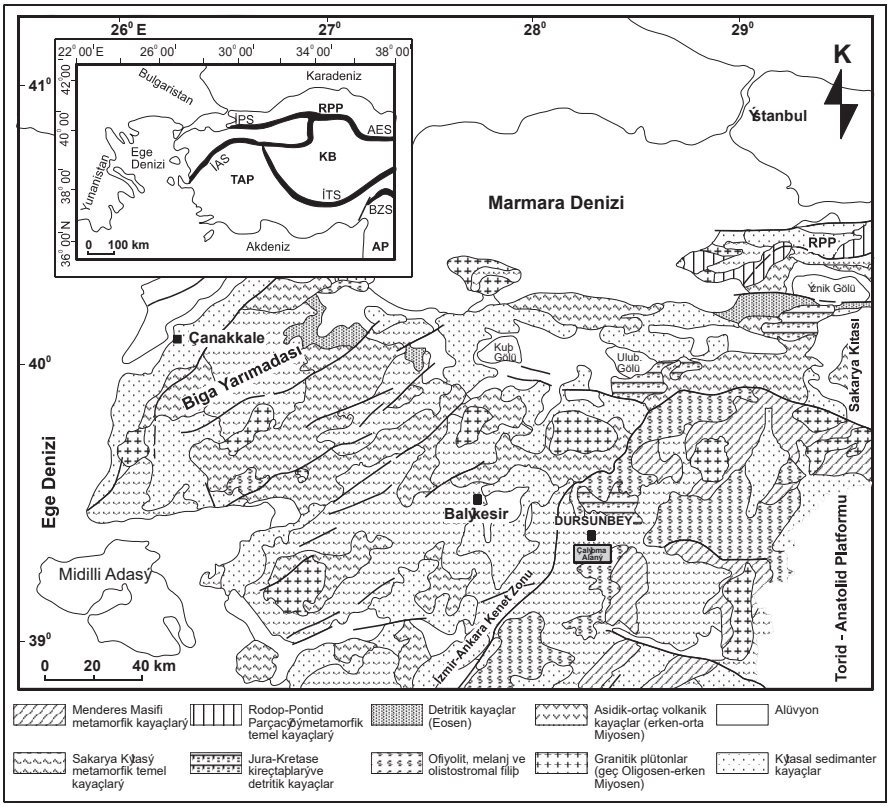
Batı Anadolu'daki gelişen volkanizmanın konumsal ve karakteristik olarak incelendiğinde Anadolu-Ege bölgesi Afrika -Avrasya levhalarının çarpışan ve yaklaşan sisteminin bir parçasını oluşturarak Eosen'den itibaren yitim zonunun güneye ve güneybatıya göçü şeklinde açıklanır. Geç Kretase çarpışma olayından sonra gelişen sıkışmalı ve gerilmeli tektonik süreçler, ana mikro levha etkileşimlerinin bir sonucu olarak gelişmiştir. Farklı petrojenetik eğilimi olan ürünlerin varlığı ile karakterize olan yaygın magmatizma üstteki levha içinde çarpışma kenarı boyunca gelişmiştir. (Innocenti et al. 2005).

Bu bölgede yer alan volkanikler, Geç Eosen-Orta Miyosen ve Kuvaterner yaşlı orojenik ürünler dışında levha içi karakterli olan alkali lavları da içerir (Yılmaz et al. 2001). Geç Miyosen'de başlayan ve günümüz de rastlanan alkali lavlar bölgede meydana gelen tektonik rejimler nedeni ile jeokimyasal farklılıkları olan magmatik faaliyetleri işaret ederler. Ege –Batı Anadolu volkanik kuşağı Trakya Rodop Masifinden güneye doğru Batı Anadolu ile Orta - Güney Egeye kadar Üst Eosen'den günümüze kadar farklı yaşlar bulundurur (Fytikas et al. 1984).

Bu bölgede yer alan üç farklı magmatik faaliyet evresinin ilk evresi Geç Eosen'de başlayıp orojenik bir karakter sunan volkanik ve plütonik kayaçlarla temsil edilir. Yüksek K'lu kalkalkalin hatta şoşonitlere kadar değişkenlik gösteren ve baskın biçimde andezit ve dasitler çok yaygın olduğu bazalt ve bazaltik andezitlere ise daha ender olarak rastlandığı bir petrojenez yapıdadırlar. Bu arada Oligosen yaşlı Rodop Masifi riyolitler ile Orta Ege Denizi ve Batı Anadolu da Erken Miyosen yaşlı ignimbiritik örtü ile karakteristiktir. Volkanizma, K_2O içeriğinde ve yayılan ürünlerindeki hacminde bir azalış göstererek Rodop-Trakya dan güneye doğru göç ederken Batı Anadolu'da ise tersine K_2O içeriğinde bir artış gözlenebilir (Yanev et al. 1998). Geç Miyosen-Erken Pliyosen arası ile sınırlı olan ikinci volkanik evre sodik veya potasik eğilimli orta derecede alkalin kayaçların çıkışı ile temsil olunur. Üçüncü evre ise iki ayrı magmatik topluluk ile Pliyosen ve Kuvaterner'de gelişir.

Bayramiç mağmatizması gelişiminin yer aldığı çalışmadasında Genç (1998), Batı Anadolu'da Oligosen - Orta Miyosen de magmatik aktivite yaygın olduğu ve intrüzif -ekstrüzif kayaçların zaman ve mekan açıdan birbirleri ile ilişkilisini belirtmiştir (Şekil 1). Bu alanda magmatik aktivitenin Kuzey-Güney sıkışma rejimi altında litosferik manto kökenli bir magmadan türemeye başlayan Alt Volkanik Topluluk(AVT) ve Evciler graniti ile başladığı Üst Volkanik Toplulukla (ÜVT) ile sona erdiğini ileten yazar, Oligosen - Erken Miyosen sırasında kıta kabuğu tarafından kirletildiğini ve çarpışma sonrasında tektonik rejim altında oluştuğuna dikkat çekerek, magmatizmanın son ürünlerinin ise K-G yönlü gerilme rejimi altında oluşan Geç Miyosen Pliyosen yaşlı bazaltik lavlar olduğuna değinmiştir.

Sıkışmalı tektonik rejim ile ilişkili volkanitler kalkalkalin karakterli iken gerilme rejimi ile bağlantılı olanların alkalin karakterli olduğunu belirten . Savaşcın and Güleç, 1990 gerilme ile ilişkili volkanitlerin bazılarının da kalkalkalin karakterde olduğunu belirterek bu durum da Batı Anadolu'da her yerde sıkışmalıdan gerilmeli tektonik geçişin aynı olmadığı sonucuna varmışlardır. Dolayısı ile yersel olarak de olsa gerilmeli rejimin başlamasından sonra da kalkalkali volkanizmanın hala devam ettiği söylenebilir.

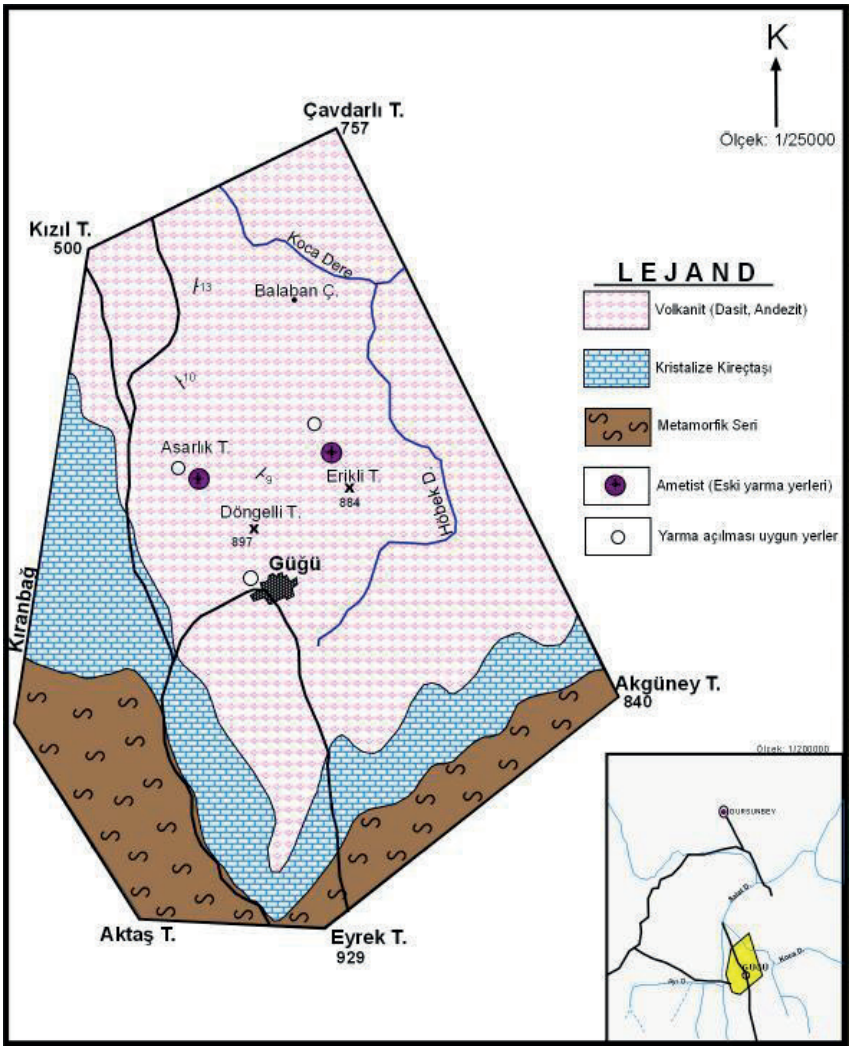


Şekil 1. Batı Anadolu - kuzeybatı Anadolu Neojen volkanik kayaları ile granitik Plütonların jeolojik haritası. (Bingöl 1976, Genç 1998)

AMETİST OLUŞUMLARI

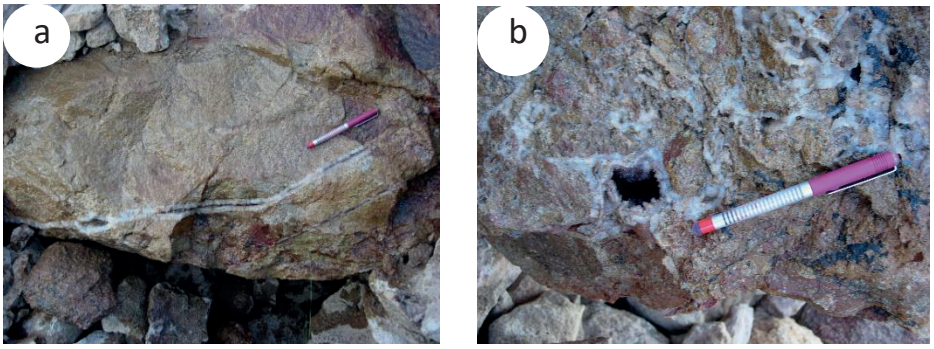
Balıkesir- Dursunbey'de gözlemlenen ametist oluşumları ve yer yer saydam iri kuvars kristalleri dasitik tüfler içinde bulunduğunu ilk Dağ (1978) tarafından hazırlanan raporda belirtilmiştir (Şekil 2).

Her yerde aynı kalitede olmayan ametist kristalleri enine, boyuna ve verevine gelişen çatlaklarda içinde genişliği bazen 9 cm'ye kadar çıkan damarlar da oluşmuştur. Düzgün kristalleşme göstermeyen açık renkte, düşük kalitelideki ametistlerin Güğü köyünün KB'sında rastlanırken iyi kalite ametistler Asarlık Tepe civarında görülmektedir. Ametist içeren damarlar volkanizma sırasında magmanın en son evresi olan silisli tüfler içindeki çatlaklara sokulmuştur.



Şekil 2. Güğü köyü civarı jeolji haritası (Dağ, (1978)'den alınmıştır).

İnceleme alanında ametistler, Dursunbey ilçesi Güğü köyünün civarında Asarlık tepe ve Erikli tepe eteklerinde. yer yer kalınlıkları 50 cm olan kırık ve çatlaklar yada çizgisel düzensiz durumdaki damar ve damarcıklar içinde bulunmaktadır (Şekil.3. a ve b).



Şekil 3 . Asarlık Tepenin eteklerinde ki volkanik kayaç içinde a) ince düzgün çizgisel

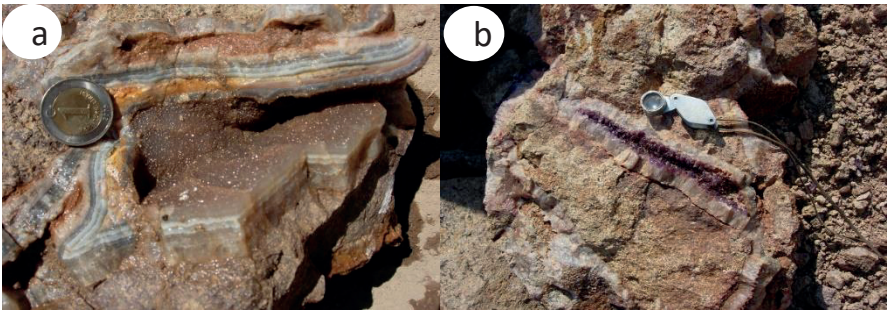
b) ağ şeklinde gelişmiş ametistli kuvars damarı

Şekil 4. de görüldüğü gibi volkanik kayaçlar içinde yer yer oluşan boşluklarda da ametistlere rastlanırken GB'ya doğru 66-85 derece arasında değişen eğim yönleri olan ve K 35-75 B doğrultulu çatlak ve kırıklar içinde kristalleşmeler mevcuttur. Bazen 90° 'lik dik eğim açıları sunan kırık ve çatlak sistemleri bazende grift şekilde de geliştiği gözlemlenmiştir.

Şekil 4. Asarlık Tepe'nin hemen altındaki küçük ocakdaki volkanik kayacın içindeki boşluklarda gelişen ametist kristalleri

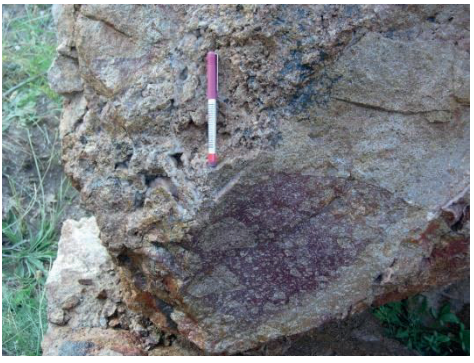
Kayaçta kırıklara ilk gelen çözeltilerin ardaşık bantlar şeklinde ve gri-bej renk tonlarında olan kalsedonlar şeklinde geliştiği ve boşluklarda onların üzerine kuvars ve ametist kristallerinin büyüdüğü gözlemlenmektedir (Şekil 5a). Bazı damarlarda ametistlerin tarak yapısında olduğu saptanmıştır(Şekil 5b). Asarlık ve Erikli Tepe civarlarında bej renkli breşik volkanik ana kayaç içinde ince damer şeklinde beyaz silisleşmenin ametist ile sonlanmış olduğu belirlenmiş (Şekil 6).

Düzensiz olarak silisli çözeltilerin kırılmış,breşleşmiş volkanik kayaç içinde kırıklarda ametist oluşurken bir yandan da kırılmış volkanik kayaç demirli (mor renkli) silisli çözeltilerle doldurulmuştur (Şekil 7).



Şekil 5. Asarlık Tepe de a)damarın dış zonunda kalsedon bantlar içe doğru ise ametist kristallerinden oluşan dolgu b) tarak yapısındaki ametist kristalleri

Şekil 6. Asarlık Tepe büyük ocak içinde Volkanik kayaç içinde şeffaf kuvars damarları



Şekil 7. Volkanik kayacın kırılmış yüzeyinde gelişen demirli (mor renkli) silisleşmeler

DOKUSAL ÖZELLİKLER

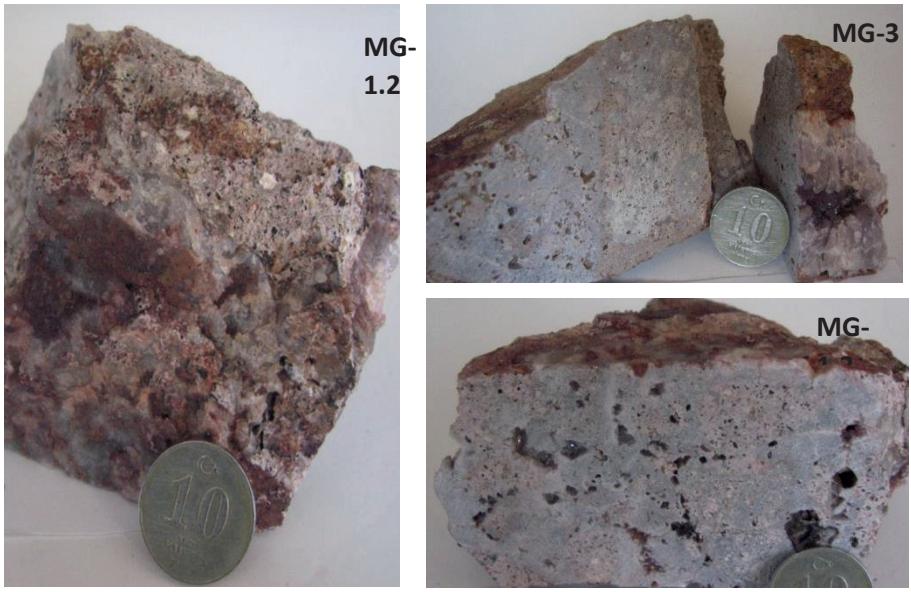
İnceleme alanında farklı doku özelliği gösteren silişleşme yapıları gözlemlenmiştir. Batı Anadolu'da açık boşluk dolgusu ve binik doku şeklinde tanımlanan iki ana doku grubu ayırtlanmıştır Birincil büyüme dokusu olarak açık boşluk dolgusu başlangıç damar dolgusunu temsil ederken, önceden oluşmuş kuvars üzerinde daha sonra gelişen binik dokuların ise çözünme, deformasyon, hidrotermal breşleşme ve yeniden kristallenme şeklindedir. Epitermal oluşumda gözlenen damar dokuları kuvars, kalsedon, opal ve ametist türlerinde silisleşme olabileceği ve gruplandırma olmadığından söz etmektedir (Oygür (2001). .

Çalışma alanından alınan el örneklerinin doku özelliklerine göre sınıflandırılmasında Oygür (2001)'in tanımlamaları esas alınarak , Gümüş (1998)'de verilen türkçe adlamalar ve ek olarak original ingilizce doku adları kullanılmıştır.

Açık Boşluk Dolgusu Dokular (Open Space Fillings):

Kovuk - Boşluk dolgusu (Cavity or vug fillings)

Kovuk veya boşluklar ilksel veya tektonizma sırasında gelişebileceği gibi erime boşlukları şeklinde de kayaçların içinde olabilmektedir. Kayaçta çeşitli nedenlerle gelişen bu boşluklar çözeltilerle tamamen dolmaktadır. Kuvars-ametist oluşumlarının gözlendiği Güğü köyü civarında yer yer irili ufaklı kovuklar saptanmıştır. Bunların tektonizma esnasında parçalanma ile geliştiği ve ve içlerinde silis kristalleşmeleri olduğu (Şekil 8) genişlediği bazı yerlerde daha iri kristalleşmeler olduğu gözlenmiştir (Bakınız 5a).

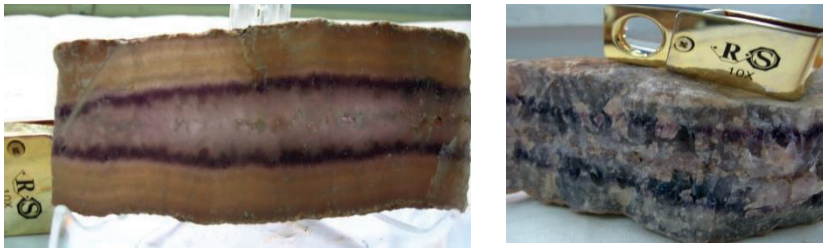


Şekil 8. İnceleme alanında yan kayaç içerisinde gelişen boşluk dokuları

Tarak Dokusu (Comb Texture)

Güğü köyü Asarlık ve Erikli tepe oluşumlarında rastlanılan kristalleşmeler, bazen simetrik (karşılıklı) bazen de asimetrik (tek taraflı) olarak boşluğa veya damara dik gelişme sunmaktadır. Simetrik olarak gelişen kristalleşmeler tarak dokuları olarak damarlarda görülmektedir (Şekil 9). Bazı volkanik kayaçtaki boşluklar (open spaces) doğrudan doğruya tarak dokusu veren kuvars ve ametist kristalleri ile dolu iken bazı yerlerde ise farklı renk tonlarında bantlı kalsedonik akıntılar üzerinde büyüyen kristaller ile doludur (Şekil 10). Öncelikle şeffaf kuvarsla başlayan daha sonra mor, eflatun renkli kristallerin büyüme zonları ile devam eden ve en son evrede tekrarlayan şeffaf kuvars oluşum kuralının yer yer bozulması ve bazı damarlarda eflatun - mor renkli kuvarsların hakim olması renklenmeye neden olan element dağılımlarının her zaman tek düzelikte olmadığına e işaret etmektedir.

Şekil 9. Simetrik kuvars büyümeleri - tarak dokusu



Şekil 10. Kalsedonla başlayan koyu renkli ametistle devam edip son evrede açık renkli kristalli olan tarak dokusu

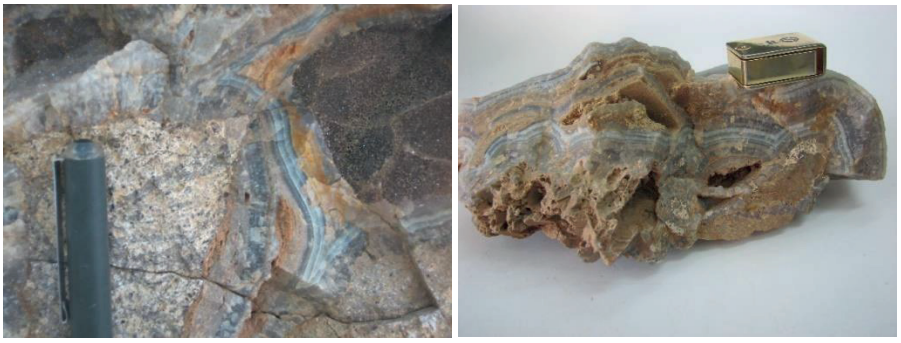
Bantlı Dokular

Çalışma alanında da yollu, kolloform ve kokart şeklinde üç tip bantlı doku belirlenmiştir.

Kabuk Şekilli Yollu doku (crustiform texture): birbirinin üzerinde gelişmiş ve damar duvarına paralel uzanan ardışık bantlar Şekil 11 de gözlenmektedir. Eğer kayaç içerisinde ağsal damar sistemleri varsa bu yollu dokularda ağ sistemine paralel büyümeler gelişir (Şekil 12). Bir kaç mm ile bir kaç cm arasında değişen bant kalınlığının yer yer 8-10 cm'ye kadar çıktığı gözlemlenmiştir. Bej-kirli sarı- gri renkli yollu dokular bazen kırmızımsı renkler de görülmekyedir. Farklı renkteki bantlar, çözeltideki elementlerin genelde hidrotermal akışkanın dönemsel kaynamasıyla

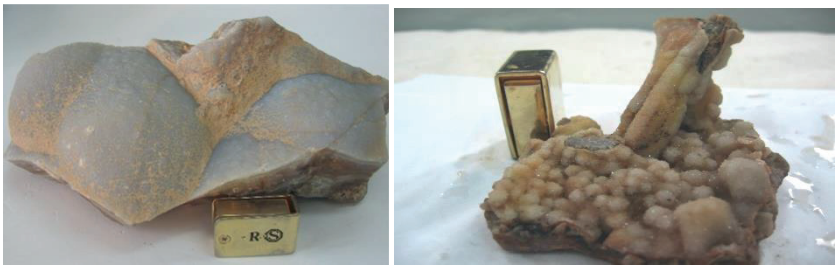
ilişkilendirilen değişken yoğunlaşmalarını ve çökelme sırasındaki akışkan koşullarını yansıtmaktadır (Morrison et al. 1990,1995).

Şekil 11. Kayaç boşluk duvarına paralel gelişmiş yollu kalsedonik dokular



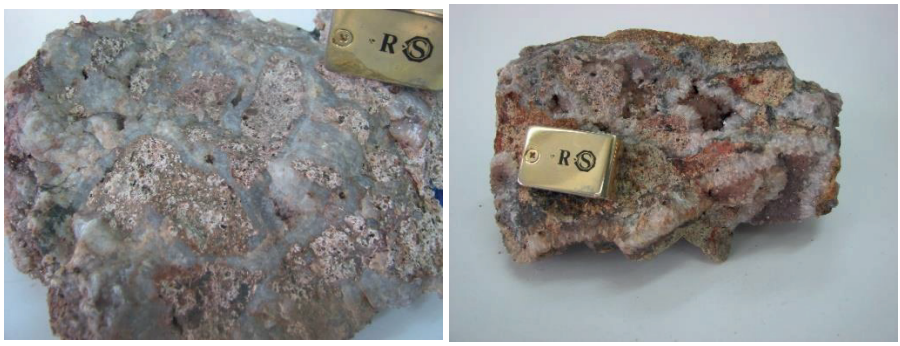
Şekil 12. Ağ sistemine paralel gelişmiş yollu dokular

Kolloform doku (colloform texture): Bantlı botriyoidal (küresel biçimli) kalsedonik ve mikro kristalli kuvars örnekleri genelde çeşitli boyutlardaki kıvrım veya böbreğimsi şekillerde olan ve yollu dokularla ilişkilendirilen renkleri mavi- grimsi tonlar da kolloform doku sunar (Şekil 13). Oygür (2001)'e göre bu dokularga özgün silika jellerinde kuvvetli yüzeysel gerilimler sebep olmaktadır. .



Şekil 13. Kolloform dokular

Kokart dokusu (Cockade texture): Konsantrik bantlardan oluşan ve inceleme alanı damarlarında sıkça izlen bu dokular ana kayaç parçalarının veya erken evrede oluşmuş kuvars parçalarının etrafını sarmaktadır(Şekil 14.).



Şekil 14. Kokart doku

Binik Dokular:

Ornatma - hidrotermal breş oluşumları olarak adlandırılan bu dokular silisleşme sırasında gerçekleşen olayları ve kristallenme evrelerini ortaya koymaktadır. .

Ornatım Dokusu

Bazı minerallerin çözünmesini ve yerine silisin geçmesini sağlayan değişken termodinamik koşullar içi boş silis odacıkları gibi farklı yapılar açığa çıkartır. Çalışma alanında ornatım dokusuna benzer farklı dokular görülmektedir (Şekil 15.).

Şekil 15. Ornatım dokuları

Çentikli kuvars, Silika içerisindeki karbonatın kalıp biçiminde çözünmesinden sonra ornatım sürecinde oluşan bu dokular Güğü'daki ametist-kuvars damarlarında bolca görülmektedir (Şekil 16).

Şekil 16. Çentikli dokular

Yapraklı kuvars, inceleme alanında tipik olarak bulunan bu dokunun damar içerisinde yükselen hidrotermal akışkanın kaynaması sonucunda oluşabileceği Oygür (2001) tarafından belirtilmektedir. White ve diğ., 1989' e göre de yapraklı dokunun ornatım süreci sırasında çözünen kalsitin hücre duvarlarının silika ile dolmasıyla oluşmaktadır (Şekil 17).

Şekil 17. Yapraklı kuvars

İnceleme alnında diğerlerinden farklı olarak kalsedonik bantların ortasında ornatılmış bir parçanın varlığı gibi bazı değişik dokulara da rastlanmaktadır(Şekil 18). Damarın içinde ve ortasında ornatılmış parçanın olması bu olayın damar oluşumu döneminden daha sonra geliştiğine işaret etmektedir.

Şekil 18. Kalsedonik bantlar arasındaki ornatılmış bir parça

.

Bazı kesimlerinde geometrik formlarda kabuksal büyümelere rastlanması tam bir anlam verilememekle birlikte, sıvı + gaz fazında gelen silisli çözeltinin böyle bir dokuya sebebiyet verebileceği düşünülmektedir (Şekil 19.).

Şekil 19. Kabuksal büyümeler.

İçi boş olan kabuk şeklinde büyümeler de ender rastlanan bir diğer oluşumdur(Şekil 20). Bu oluşumunda gazlı silis jelinin kayaç üzerinde silis kabuk oluşturduğu şeklinde yorumlanabilir.

Şekil 20. İçi boş kabuk şeklindeki büyümeler.

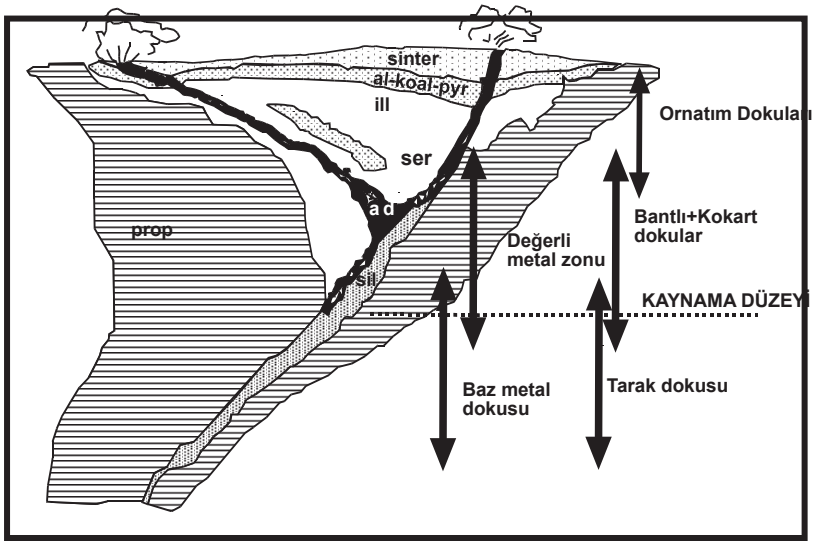
Çalışma alanında kuvars-ametist damarlarından alınan el örneklerinde üst üste kristalleşmeler şeklinde izlenen mikro-iri kuvars-ametist kristal oluşumlarının, iç içe hatta bazen birbirini izleyen geçişler şeklindedir. Bu tip oluşumların doğurduğu hem açık boşluk dolgusu hem de binik şeklinde dokular ve ayrıca gözlenen ornatma dokuları ortama farklı dönemlerde silis geldiğini kanıtlayan en önemli bulgulardır.

Şekil 21. Mikro ve iri kristal kuvarsın bir arada bulunduran üst üste büyümeler.

Damarlarında gözlene bu dokular, Buchanan (1981) tarafından epitermal damar sistemi üzerine genelleştirilerek verilmiştir (Şekil 22). Buna göre damarın en derin kesimlerinde kaynama seviyesinin altında, tarak dokulu kuvars çoğunlukta iken kaynama seviyesinin hemen üzerinde, bantlı dokular ile mikrokristalin kuvarslı dokular daha baskındır. Sığ derinliklerde ise masif veya hafif bantlı kalsedon görülürken bu bölgede, karbonat ile ornatmalı kalsedon veya mikrokristalin kuvars da bulunur. Bantlı dokuların

egemen olduğu bölgede epitermal damarın altın-gümüş bakımından zengin kesimi, yer alır. Bazende damarın tarak dokusuyla temsil edilen daha derin kısımlarında metal içeriği bulunur. Ayrıca epitermal sistemlerde altın ve gümüş gibi değerli metal içeren bölgenin kaynamanın olduğu sıcaklıklar ile 200-250°C civarındaki kısımlarda gerçekleştiği de belirtilmektedir.

Çalışma bölgesinde genelde bantlı ve kokart dokular ile tarak dokuları bulunurken daha az oran da ornatım dokularına rastlanması silis içeren damarların çoğunluğunun değerli metal zonu civarında ve biraz üstündeki derinliklerde olduğunu göstermektedir.



Şekil 22. Kuvars dokularının epitermal damar sisteminde düşey zonlanmasını gösteren genelleştirilmiş model al: alünit, kaol: kaolinit, pyr: pirit, ill: illit, ser:serisit, ad: adülarya, prop: propilit, sil: silika. (Buchanan,1981; Oygür 2001'den)

SONUÇ

Çalışma alanı olan Balıkesir-Dursunbey Güğü köyü civarında gözlenen önce bantlaşmalar şeklinde kalsedon daha sonra ametist büyümeleri ve son olarak da kuvars oluşumları şeklinde olan ve farklı doku özelliği

gösteren silisleşmeler riyoritler içinde olduğu belirlenmiştir. Riyolitlerinde silişmesine yol açan bu silis oluşumları kırık hatlarına ve boşluklara damarlar şeklinde girmişlerdir.

Silisleşmelerde yapılan saha gözlemleri ile birincil dokular olarak açık boşluk dolgusu kovuk dokusu, tarak dokusu ve bantlı dokular şeklinde sınıflandırılmışlardır. Daha sonra gelişen ikincil silisleşmeler kayaçlarda ve damarlarda deformasyon, çözünme, hidrotermal breşleşme ve yeniden kristalleşme sonucu ornatım dokularını ve yapraksı dokuları oluşturmuştur. Genellikle iç içe, bazen de birbirini izleyen evreler şeklinde hem açık boşluk dolgusu dokuların hem de binik dokuların olduğu görülmüştür. Gözlenen doku çeşitliliği ile birlikte üst üste kristalleşmeler, mikro ve iri kristal kuvars-ametist birliktelikleri ve ornatma dokuları, ortama farklı zamanlarda ve koşullarda silis geldiğine işaret eder.

Ayrıca bölgedeki ametistli damarlarda boşluk dolgularında çoğunlukla tarak dokuları ile bantlı ve kokart dokuların görülmesi buna karşın ornatım dokularına daha az olarak rastlanması bu damarların oluşum derinliğinin epitermal sistemlerin yaklaşık 500 m derinliğindeki kaynamanın meydana geldiği değerli metal zonu civarında ve biraz üstünde olduğuna işaret etmektedir.

KAYNAKLAR

BAŞIBÜYÜK, Z., KAYDU AKBUDAK, İ., & GÜRBÜZ, M. 2020. Minera-logical, geochemical and gemological investigation of Artova Ch-chalcedonies, Tokat–Turkey. Gospodarka surowcami mine-ralnymi, Vol 36, Issue 1, Pp 77–92.

BAŞIBÜYÜK, Z., GÜRBÜZ, M., & KAYDU AKBUDAK, İ., 2023. Surpri-se eggs, the miracle of nature: almus agates (Tokat–Turkïye). Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Vol 39, Issue 1, Pp. 5–22.

BİNGÖL, E., 1976. Batı Anadolu'nun Jeoteknik Evrimi. M.T.A. Enst Dergisi Sayı: 86, s. 14-17. Ankara.

CANDAN, E. O., KAYDU AKBUDAK, İ., BAŞIBÜYÜK, Z., & EKİNCİOĞ-LU, G. 2022. Tokat Nebiköy Kalsedonlarının Mineralojik-Petrografik ve Gemolojik İncelemesi. Türkiye Jeoloji Bülteni, 65(3), 287-296.

DAĞ, F., 1978. Balıkesir-Dursunbey-Guğu köyü Amatist Ön Etüt. Raporu No: 6392, Ankara.

EKİNCİOĞLU, G., BAŞIBÜYÜK, Z., GÖLBAŞ, A., & KAYDU AKBUDAK, İ. (2018). Geçmişten Günümüze Doğaltaş Mozaik Sanatı ve Geleceğe Aktarılması. International Journal Of Interdisciplinary And Intercultural Art, 3(4), 81-91.

FOURNİER, R. O., 1985. The behaviour of silica in hydothermal solutions. Geology and Geochemistry of Epithermal Systems, B. R. Berger ve P. M. Bethke (ed.), Reviews in Economic Geology, 2, 45-51.

FYTİKAS , M., INNOCENTİ, F., MANETTİ, P., MAZZUOLİ, R., PECCERİLLO, A.AND VİLLARİ, L., 1984. Tertiary to Quaternary evolution of volcanism in the Aegean region. In: Dixon, J.E., Robertson. A.H.F.(Eds), The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean. Geol. Soc. London, Spec. Publ. London, pp.687-699

GENÇ, Ş,C., 1998. Evolution of the Bayramiç Magmatic Complex, Nothwestern Anatolia.Jorynal of Volcanology and Geothermal Research 85, pp. 233-249.

GÜMÜŞ,A., 1998. İç olaylara Bağlı Maden Yatakları. Bilim ofset. İzmir 482 s.

INNOCENTİ, F., AGOSTİNİ, A., G. Dİ VİNCENZO, C. DOGLİONİ, P. MANETTİ, M.Y. SAVASCİN, S. TONARİNİ, 2005, Neogene and Quaternary volcnism in Western anatolia: magma sources and geodynamic evolution, Marine Geology, Special Issue-Eastern Mediterranean 221, 397 – 421.

KAYDU AKBUDAK, İ., BAŞİBÜYÜK, Z., & EKİNCİOĞLU, G., 2020. Mineralogical-Petrographical Investigation and Usability as the Gemstone of the North Anatolian Kammererite, Tokat, Turkey. In Mineralogy-Significance and Applications (p. 65). IntechO-pen.

KAYDU AKBUDAK, İ., GÖLBAŞ, A., & BAŞIBÜYÜK, Z., 2017. Kırşehir Müzesi Envanterinde Bulunan Yüzüklerin Arkeogemolojik Ve Jeoarkeolojik İncelemesi. Journal of International Social Rese-arch, 10(52).

MORRISON, G., GUOYI, D. VE JAIRETH, S., 1990. Textrual Zoning in Epihermal Quartz Veins. Epithtermal Gold Deposits in Quesland, Amira Project P247, James Cook Univ., 19s.

MORRISON, G., GUOYI, D. VE JAIRETH, S., 1995. Quartz textures in epithermal veins, Queensland - classification, origin, and implication. Economic Geology 90(6):1841-1856. DOI:10.2113/gsecongeo.90.6.1841

OYGÜR, V., 1997. Bir Epitermal Cevherleşmenin Anatomisi: Mumcu (Balıkesir-Sındırgı), İç-Batı Anadolu. MTA Dergisi Sayı 119, Sayfa 63-73.

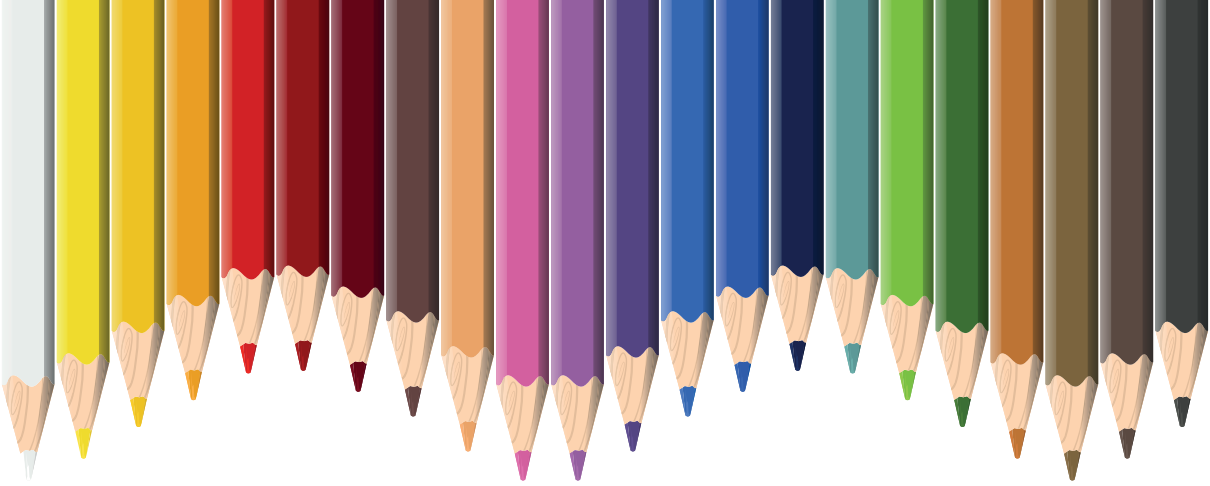
_____,2001. Batı Anadolu'dan Örneklerle Epitermal Kuvars Damarlarında Görülen Dokuların Maden Aramacılığındaki Önemi . Türkiye Jeoloji Bülteni C. 44, S ayı 2, sayfa 65-74.

SAVAŞÇIN, M.Y., 1990, Magmatic activities of Cenezoic compresional and extentional tectonic regimes in Western Anatolia. IESCA-90 Proceedings (edit. Savaşçın and Eronat) Vol.2, 420-434.

_____, M.Y. and Gülec, N., 1990, The relationship between magmatic and tectonic activities in western Turkey. In: M.Y.Savaşçın, and H.Eronat (Editors) IESCA-90, Proceedings, Vol.2, 300-313.

YANEV, Y., INNOCENTİ, F., MANETTİ, P., AND SERRİ, G.,. 1998. Upper Eocene-Oligocene collision-related volcanisn in Eastern Rhodopes(Bulgaria)-Western Trace(Greece): petrogenetic affinity and geodynamic significance. Acta Vulcanol. 10 (2), 279-291

YILMAZ, Y, GENÇ, S.C., KARACİK, Z., AND ALTUNKAYNAK,S. 2001. Two contrasting magmatic associations of NW Anatolia and their tectonic significance. J. Geodyn. 31, 243-271.



Bölüm 17

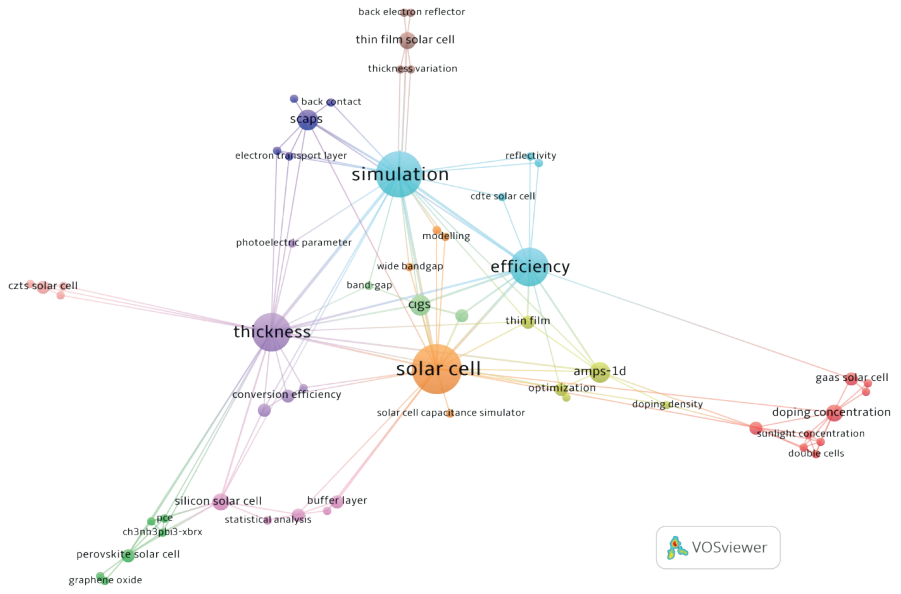
ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİNDE KATMAN KALINLIKLARININ GÜÇ DÖNÜŞÜM VERİMLİLİĞİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mehmet Fatih GÖZÜKIZIL [1]

1 Dr. Öğretim Üyesi Mehmet Fatih GÖZÜKIZIL, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Söğüt Meslek Yüksekokulu, Moda Tasarımı Bölümü, fatih.gozukizil@bilecik.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1719-959X.

Giriş

Sürdürülebilir ve temiz enerji kaynakları arayışında (Ay & Pamuk, 2023), (Gündüz & Bicil, 2022), çeşitli yapılar ve teknolojilerle geliştirilen güneş hücreleri üretilmektedir (Makalesi et al., 2020), (Fatih Gözükızıl & Birelli, 2023). Güneş hücreleri katmanlarını oluşturan malzemenin yapısal, fotovoltaik özelliklerini kullanarak ışığı elektrik enerjisine çevirir (R. Sun, Yang, Wang, & Ma, 2022). İnorganik güneş hücreleri, Perovskite güneş hücreleri, silikon tabanlı güneş hücreleri ve organik güneş hücreleri gibi farklı tiplerde güneş hücresi yapıları bulunmaktadır (Ahmad, Alshahrani, Balobaid, & Khan, 2023), (Kundu et al., 2023), (Kang, Lee, Kim, & Kang, 2024). Genellikle organik güneş hücreleri ışık emici katman (aktif katman), elektron taşıyıcı katman ve hole taşıyıcı katman olmak üzere yapıları üç temel katmandan oluşur (Tan et al., 2023), (Noori, 2023). Organik güneş hücrelerinde, anot olarak ITO (İndiyum Kalay Oksit) üzerine P3HT:PCBM (Poli(3-heksiltiyofen):[6,6]-fenil-C61-bütyrik asit metil ester) aktif katman, ardından PEDOT:PSS (Polietilen Dioxitotiyofen-Polistiren Sülfonat) hole taşıma katmanı ve son olarak Al (alüminyum) katot kullanılır (Islam, Abrar, Hassan, & Adnan, 2019), (Moorthy & Srivastava, 2022). Aktif katman, güneş ışığını alarak elektron/hole çiftlerini oluşturan temel bileşendir. Elektron ve hole taşıma katmanları, bu çiftlerin ayrılmasını ve elektrik akımının iletilmesini sağlar. Anot ve katot elektrotlar, üretilen elektrik akımını toplar ve dış devreye aktarır (Zhu, 2021).



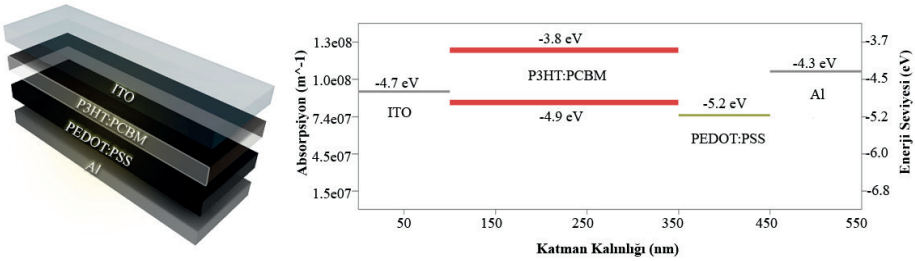
Şekil 1 *Güneş Hücre Simülasyonlarında Katman Kalınlığı Bibliyometrik Ağ Haritası (VOSviewer)*

Web of Science veri tabanında güneş hücreleri simülasyonunda katman kalınları ile ilgili son on yılda toplam 1612 yayın yapıldığı belirlendi. Yayınlarda kullanılan anahtar kelimeler derlenerek VOSviewer programında şekil 1 de gösterilen bibliyometrik ağ haritası oluşturuldu. Yapılan yayınların ağ haritası incelenerek, anlamsız ve tekrar eden kelimeler çıkarıldığında 57 faklı anahtar kelimenin birleri ile bağlantılı olarak kullanıldığı tespit edildi. Kullanılan anahtar kelimeler, kendi aralarında 11 farklı küme oluşturdu. Kümelerdeki kelimeler kullanıma sayılarına göre boyutlandırılarak renklendirildi. Yayınların anahtar kelime ağ haritasına göre Perovskite güneş hücreleri, silikon güneş hücreleri organik güneş hücreleri ve ince film güneş hücrelerinin daha fazla araştırıldığı gözlemlendi. Modellenen güneş hücrelerinin simülasyonlarında kalınlığın optimum olarak belirlenmeye çalışıldığı ayrıca katman kalınlıklarının ve yapılarının fotovoltaik parametrelere, güç dönüşüm verimliliğine (PCE) etkisinin incelendiği görülmektedir. Son on yılda yapılan 34 yayında ise GPVDM (General Purpose Photovoltaic Device Model) programı kullanılarak belirlenen güneş hücrelerinin simülasyonları yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında ITO/ P3HT:PCBM/ PEDOT:PSS/ Al katmanlarından oluşan organik güneş hücrelerinin GPVDM yazılımı ile simülasyonları yapılmıştır. Güneş hücrelerinin yapısındaki katmanların kalınlıkların güç dönüşüm verimliliğine etkisi incelenmiştir.

Materyal Metot

Temel olarak organik güneş hücrelerinde katman yerleşimi anot katman, aktif katman, hole taşıma katmanı ve katot katmandan oluşur. Bu çalışma kapsamına simülasyonu yapılan organik güneş hücresinin kat yerleşimi ITO/ P3HT:PCBM/ PEDOT:PSS/ Al şeklinde belirlenmiştir. Organik hücre üretiminde ilk olarak ITO katmanı esnek veya rijit tercih edilen farklı altlıklar üzerine ince kaplanır (Chi, Qu, Wang, & Wang, 2014), (Yao, Chen, Chen, Li, & Wang, 2011), (Kaçuş, Biber, & Aydoğan, 2020), (Yakuphanoglu & Anand, 2010). P3HT (polimerler) ve PCBM (fullerenler) faklı kaplama yöntemleri ile ITO tabakasının üzerine homojen olarak biriktirilir. PEDOT:PSS katmanı, genellikle P3HT:PCBM tabakasının üzerine genellikle daldırarak, SILAR, döndürerek, püskürtme gibi ince film kaplama yöntemleri ile uygulanır (Huang, Hu, Zhang, Chen, & Zhu, 2015), (Yenel & Yenel, 2022), (Cha, Jin, Kim, Park, & Kim, 2022). Son katman olan Al tabakası, organik güneş hücresinin katodunu oluşturarak elektronların dış devreye aktarılmasını sağlamak amacıyla, altlıkların yüzeyinde biriktirilirler.



Şekil 2 *Organik güneş hücresi katman yerleşim planı ve katman enerji seviyeleri*

Organik güneş hücrelerinde katman yerleşimi ve enerji seviyeleri şekil 1 de gösterilmektedir. Güneş hücreleri için oluşturulan katmanların enerji seviyeleri, çalışma koşullarına, aktif katmanların yapılarına, elektron taşıma kapasitelerine bağlı olarak, güneş hücresinin verimliliğini optimize etmek amacıyla belirlenmektedir. Hücrelere katmanlarının enerji seviyeleri arasındaki farklılıklar güneş ışının etkisi ile uyarılan elektronların elektrik akımı oluşturmalarını sağlayacaktır. ITO katmanı, hücrenin anot bağlantısını sağlayan, şeffaf, düşük dirençli iletken bir tabakadır. P3HT:PCBM katmanı, , elektron boşluk çiftini oluşturan, güneş ışığını absorbe eden, fotovoltaik aktif tabakadır. PEDOT:PSS katmanı, enerji seviyeleri elektron taşıma kapasitesine göre belirlenen, elektronların boşluklara taşınması için tasarlanmış iletken tabakadır.(Fen et al., 2022) Al katmanı, katot hücreni bağlantısını sağlayan, elektronların dış devreye aktararak, devre döngüsünü tamamlayan tabakadır. (L. Sun, Chen, Sun, & Zheng, 2023)

Organik güneş hücrelerin fotovoltaik performansı, yapıdaki katmaların kalınlıklarından doğrudan etkilenmektedir. Hücre katmanlarının kalınlıkları, güneş ışıklarının absorbe edilme miktarını, elektron taşıyıcının hareket kabiliyetini, kullanılan malzeme maliyetini verimli hale getirmek için optimum olarak belirlenmelidir. Katman kalınlıklarının optimum belirlenmesi hem organik güneş hücrelerinin verimli olarak geliştirilmesini hem de ticari kullanılabilirliğin artırmasını sağlayacaktır. Bu çalışma kapsamında belirlenen ITO/ P3HT:PCBM/ PEDOT:PSS/ Al katmanlı organik güneş hücrelerinde katman kalınlıklarının, Güç Dönüşüm Verimliliğinin yüzde olarak değişimine dolayısıyla hücrenin güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürme yeteneği üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Organik Güneş Hücresi Simülasyonu

Organik güneş hücresi simülasyonları GPVDM programı ile yapıldı. Hücreyi oluşturan katmanların her biri için faklı kalınlıklarında J-V (Akım-Gerilim) grafiklerinin oluşturuldu. J-V grafiklerinden elde edilen çeşitli kalınlıklardaki katmanların güneş hücresinin akım ve gerilim özelliklerine

nasıl etkileri incelendi. Simülasyon sonuçlarından V_{OC} (açık devre gerilimi), J_{SC} (kısa devre akımı) ve FF (doluluk oranı) değerleri elde edildi.(Al-Ahmad et al., 2022) Bu değeler ile aşağıda verilen denklem kullanılarak PCE (Güç Dönüşüm Verimliliği) değerleri hesaplandı.(Gu, Guo, Hemour, & Wu, 2020) (Salim, Nekovei, & Jeyakumar, 2020)

$$PCE(\%) = \frac{P_{max}\ (V_{oc} I_{sc} FF)}{P_{gelen}} . 100\%$$

PCE : *Güç Dönüşüm Verimliliği(%)*

P_{max} : *Güneş hücresinin maksimum güç çıkışı (Watt)*

P_{gelen} : *Gelen Işık Gücü (W/m²)*

V_{oc} : *Açık devre gerilimi(Volt)*

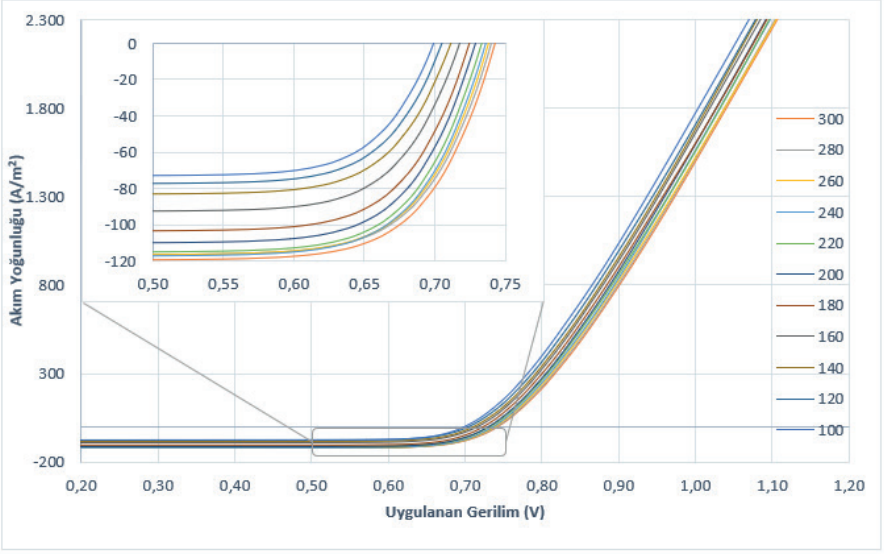
I_{sc} : *Kısa devre akımı(Amper)*

FF : *Doluluk Oranı(a.u.)*

Katman kalınlıklarına göre bulunan fotovoltaik parametrelere göre hesaplanan PCE değerleri gile katman kalınlıklarının güneş verimliliğine etkileri incelendi. P3HT:PCBM aktif katmanı için, 100 nm ile 300 nm arasında değişen 20 nm'lik artışlarla katman kalınlıkları belirlendi. PEDOT:PSS delik taşıyıcı katmanı için ise 20 nm ile 200 nm arasında 25 nm'lik artışlarla katman kalınlıkları belirlendi. ITO anot katmanı ve Al katot katmanı için ise 50 nm ile 200 nm arasında 25 nm'lik artışlarla katman kalınlıkları belirlendi. Her hücre katmanı için belirlenen kalınlıklarda ayrı ayrı Akım-Gerilim grafikleri çizildi ve fotovoltaik parametreleri bulundu. Her katman için grafikleri ve fotovoltaik parametre tabloları karşılaştırmalı olarak verildi.

Şekil 3'de farklı kalınlıklardaki P3HT:PCBM katmanı için Akım-Gerilim değerler grafiği yer almaktadır. 100 nm ile 300 nm arasındaki her 20 nm'lik artışta açık devre gerilimine karşılık alınan metrekaredeki akım değeri, akım yoğunluğu olarak değerlendirilmiştir. Yani bu kısımda farklı boyutlarda seçilen P3HT:PCBM katmanından elde edilen açık devre gerilim ve akım yoğunlukları karşılaştırılarak organik güneş hücrelerine ait optimum P3HT:PCBM katman kalınlığın tespit edilmesi hedeflenmiştir. Farklı kalınlıklarla simüle edilen her bir katman farklı renkte gösterilmiştir. 300 nm genişliğe sahip en kalın katman turuncu renkle gösterilmiştir. Bu katmanın yaklaşık -119.71 A/m^2 akım yoğunluğu ve 0.74 V açık devre gerilimi açısından en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. Verimlilik bakımından değerlendirildiğinde ise yine yaklaşık %7,19 ile en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. Sonuç olarak P3HT:PCBM katman kalınlıklarının organik güneş hücresi üzerindeki verimliliğinde kalınlığın artması ile birlikte

güç dönüşüm değerlerinin bariz bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Fakat katman kalınlığı olarak 100 nm altına inildikçe ve 300 nm üstüne çıkıldıkça güç dönüşüm değerlerinin ihmal edilebilir farklılıklarda olmasından yani oransal olarak çok küçük değişiklikler tespit edildiğinde çalışma içerisinde bu değerlere yer verilmemiştir.



Şekil 3 *P3HT:PCBM aktif katman kalınlığına göre akım-gerilim grafiği*

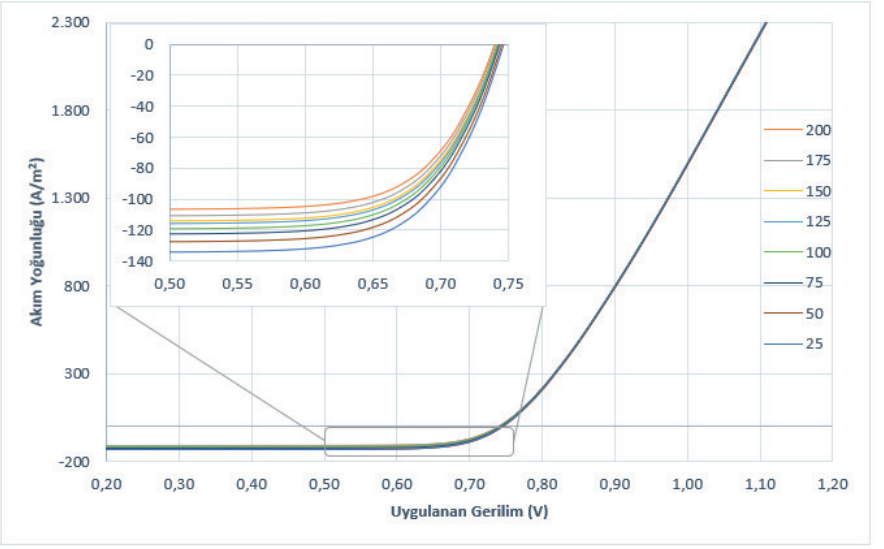
Kalınlık, doluluk oranı, güç dönüşüm verimliliği, açık devre akım yoğunluğu ve açık devre gerilimi fotovoltaik hücrelerin elektrik üretim kapasitesini belirleyen önemli ölçütltür, Güneş pili performansını 100-300 nm aralığındaki farklı P3HT:PCBM kalınlıklarında ve farklı parametrelerle ilişkilendirdiğimiz veriler Tablo 1'de gösterilmiştir. Hücre kalınlığının artmasıyla birlikte, güç dönüşüm verimliliği genellikle olumlu bir eğilim göstermektedir. Bu durum, belirli bir kalınlık aralığında malzeme enerji dönüşüm verimliliğinin arttığını ve dolayısıyla fotovoltaik olarak kalitesinin de iyileştiğini göstermektedir. Ancak, hücre kalınlığındaki aşırı artışın, bir doygunluk noktasına ulaşarak bu artışın azaldığını gösterdiği dikkat çekicidir. Bu durum, belirli bir kalınlık seviyesinin üzerine çıkmanın, daha fazla kalınlık eklemenin performans artışına önemli bir katkı yapmadığına ve her ne kadar ihmal edilebilir sevilerde olsa bile maliyet artışına işaret eder. Doluluk oranı, genellikle istikrarlı bir seyir izlemekte ve hücre kalınlığı arttıkça belirgin bir değişim göstermemektedir. Bu durum, doldurma faktörünün belirli bir kalınlık aralığında nispeten sabit kaldığını ve bu özellikteki malzemenin genel olarak tutarlı bir performansa sahip olduğunu göstermektedir. Açık devre gerilimi ve akım yoğunluğu ise hücre kalınlığındaki artışla birlikte

genellikle artmaktadır. Bu durum, kalınlığın hücrenin ışık toplama ve enerji dönüşüm kapasitesini artırdığını göstermektedir. Ancak, tablodaki verilerde görülen bu artışın belirli bir noktadan sonra doygunluğa ulaştığı da tespit edildi. Bu noktadan sonraki kalınlık artışlarının ekstra verimlilik sağlamada sınırlı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 1 *P3HT:PCBM Aktif Katman Kalınlığının Fotovoltaik Parametrelere Etkisi*

Katman Kalınlığı (nm)	F.F.(a.u)	PCE(%)	J_{sc} (A/m²)	V_{oc} (V)
100	0,8198	4,2235	-73,7241	0,6988
120	0,8206	4,4806	-77,5786	0,7038
140	0,8195	4,8505	-83,4324	0,7094
160	0,8155	5,4197	-92,7067	0,7169
180	0,8140	6,0982	-103,6032	0,7231
200	0,8147	6,5355	-110,2942	0,7273
220	0,8139	6,8544	-115,1548	0,7313
240	0,8126	7,0254	-117,6474	0,7348
260	0,8114	6,9985	-116,9656	0,7374
280	0,8100	7,0219	-117,1252	0,7401
300	**0,8095**	**7,1916**	**-119,7093**	**0,7421**

Şekil 4'de PEDOT:PSS katmanına ait 25-200 nm aralığında değişen kalınlıklara ait akım yoğunluğu ve açık devre gerilim değerleri yer almaktadır. Tablo 2'de ise yine kalınlık, doluluk oranı, güç dönüşüm verimliliği, açık devre akım yoğunluğu ve açık devre gerilimi değerleri bulunmaktadır. Bu katmanda P3HT:PCBM katmanına zıt olacak şekilde, seçilen farklı katman kalınlıklarından en düşüğü olan 25 nm'lik katmanın en yüksek güç dönüşüm verimliliğine sahip olduğu gözlemlendi. Bu katman Şekil 4'de koyu mavi renkle gösterilmiştir. Yaklaşık 0,75 V açık gerilim değerine karşılık -135,01 A/m² akım yoğunluğu elde edildi.

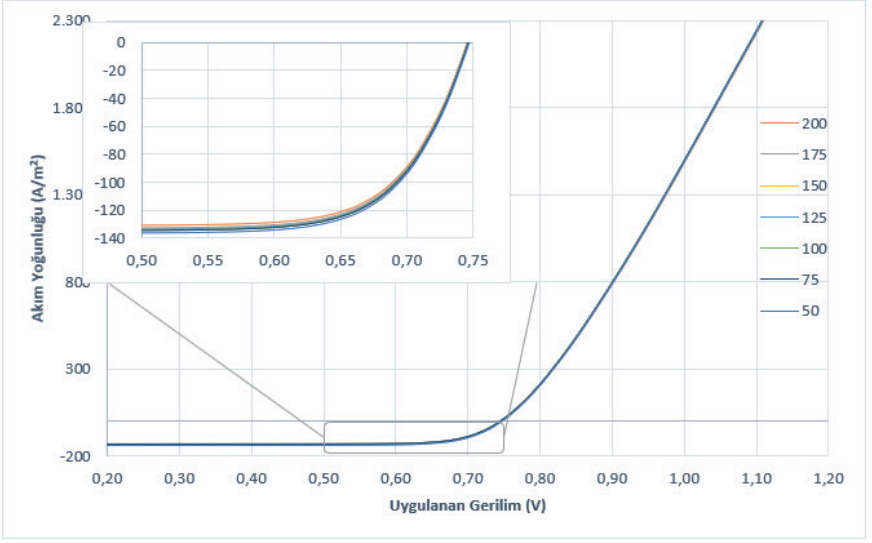


Şekil 4 *PEDOT:PSS Boşluk Taşıyıcı Katman Kalınlığına Göre Akım-Gerilim Grafiği*

Tablo 2 *PEDOT:PSS Boşluk Taşıyıcı Katman Kalınlığının Fotovoltaik Parametrelere Etkisi*

Katman Kalınlığı (nm)	F.F.(a.u)	PCE(%)	J_{sc} (A/m²)	V_{oc} (V)
25	**0,8084**	**8,1309**	**-135,0116**	**0,7450**
50	0,8083	7,7172	-128,3637	0,7438
75	0,8090	7,3884	-122,9674	0,7427
100	0,8095	7,1916	-119,7093	0,7421
125	0,8100	7,0025	-116,5844	0,7415
150	0,8102	6,8748	-114,4930	0,7411
175	0,8106	6,6871	-111,4050	0,7405
200	0,8113	6,4244	-107,0936	0,7394

Şekil 5'de ITO katmanına ait 50-200 nm aralığında her 25 nm'de değişen kalınlıklara ait akım yoğunluğu ve açık devre gerilim değerleri yer almaktadır. Burada koyu mavi ile gösterilen ve en düşük katman kalınlığı olan 50 nm'de 0,75 V açık gerilim değerine karşılık yaklaşık -136,37 A/m² akım yoğunluğu elde edildi. Tablo 3 incelendiğinde ise doluluk oranları tüm katmanların neredeyse aynı değerleri aldığı görülmektedir. Güç dönüşüm verimliliği, açık devre akım yoğunluğu ve açık devre geriliminin en yüksek değerlerine, 50 nm ITO katman kalınlığında ulaşılmıştır.



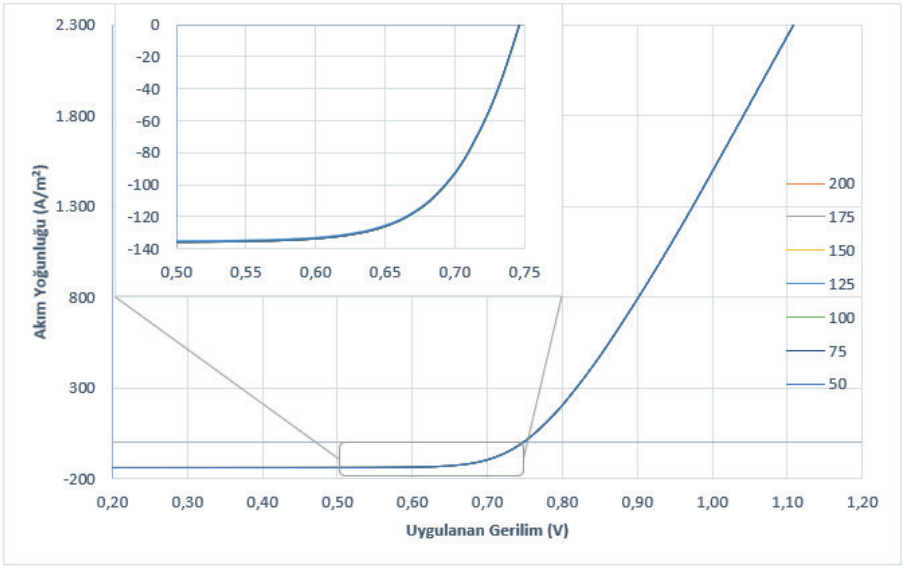
Şekil 5 *ITO Anot Katman Kalınlığına Göre Akım-Gerilim Grafiği*

Tablo 3 *ITO Anot Katman Kalınlığının Fotovoltaik Parametrelere Etkisi*

Katman Kalınlığı (nm)	F.F.(a.u)	PCE(%)	J_{sc} (A/m²)	V_{oc} (V)
50	**0,8083**	**8,2149**	**-136,3663**	**0,7453**
75	0,8084	8,1197	-134,8307	0,7450
100	0,8084	8,1309	-135,0116	0,7450
125	0,8083	8,0877	-134,3214	0,7449
150	0,8083	8,0609	-133,9021	0,7448
175	0,8084	8,0076	-133,0317	0,7446
200	0,8084	7,9099	-131,4513	0,7443

Şekil 6'da Al katmanına ait 50-200 nm aralığında her 25 nm'de değişen kalınlıklara ait akım yoğunluğu ve açık devre gerilim değerleri yer almaktadır. Tablo 4'de kalınlık, doluluk oranı, güç dönüşüm verimliliği, açık devre akım yoğunluğu ve açık devre gerilimi değerleri incelendiğinde güç dönüşüm verimliliklerinin birbirlerine çok yakın değerler aldığı görülmektedir. Burada açık gri renk ile gösterilen 175 nm kalınlığına sahip olan Al katmanının en yüksek güç dönüşüm verimliliğine sahip olduğu; bu kalınlığın altında ve üstündeki tüm katman kalınlıklarında daha düşük değerler aldığı gözlemlendi. 175 nm katman kalınlığının yaklaşık 0.81 doluluk oranı, 0,75 V açık gerilim değeri ve -136.63 A/m^2 akım yoğunluğu değerleri ile en yüksek verimliliğe sahip olduğu tespit edildi. Fakat tüm bu parametre

değerlerinin Al katmanındaki tüm kalınlık karşılaştırmalarına bakıldığında birbirlerine yakın değerler aldığı belirlenmiştir. Buradan hareketle Al katman kalınlığının organik güneş pili verimliliğine diğer ITO, P3HT:PCBM, PEDOT:PSS katmanları kadar etki etmediği yorumunu yapabiliriz.



Şekil 6 *Al Katot Katman Kalığına Göre Akım-Gerilim Grafiği*

Tablo 4 *Al Katot Katman Kalınlığının Fotovoltaik Parametrelere Etkisi*

Katman Kalınlığı (nm)	F.F.(a.u)	PCE(%)	Jsc (A/m²)	V_{oc} (V)
50	0,8083	8,2236	-136,5149	0,7453
75	0,8083	8,2254	-136,5396	0,7453
100	0,8083	8,2149	-136,3663	0,7453
125	0,8083	8,1570	-135,4305	0,7451
150	0,8083	8,2108	-136,2989	0,7453
175	**0,8083**	**8,2307**	**-136,6288**	**0,7453**
200	0,8083	8,2254	-136,5407	0,7453

Sonuç olarak bu analizler, güneş pili performansını belirleyen temel faktörler arasındaki karmaşık ilişkileri ortaya koymakta ve hücre kalınlığının en ideal seviyede tutulması gerektiğini vurgulamaktadır. İdeal performans için de belirli bir kalınlık aralığının dikkatlice değerlendirilmesi ve seçilmesi gerekmektedir. Çalışmada organik güneş hücresine ait her katmanın kalınlıklarındaki değişime bağlı olarak doluluk oranı, güç dönüşüm verimliliği, açık devre akım yoğunluğu ve açık devre gerilimi parametrelerinde küçük ve büyük değişiklikler gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar da güneş hücresi verimliliği hakkında yorum

yapmamıza olanak sağlamıştır. Burada aralıklar seçilirken literatürdeki çalışmalardan faydalanılmış ve katman kalınlıklarının başlangıç seçimleri bu doğrultuda yapılmıştır. Çalışma içerisinde seçilen katman kalınlıklarının daha altında ve üstündeki güç dönüşüm verimliliğine ait değerlerde çok fazla oranlarda değişiklik olmadığı da tespit edilmiştir. Bu sebeple belirli bir seviyenin üzerine çıkmanın getireceği ek faydanın da sınırlı olabileceği anlaşılmaktadır.

Sonuç

Bu çalışmada, ITO/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Al katmanlarından oluşan organik güneş hücrelerinin GPVDM simülasyon yazılımı yardımıyla güneş hücrelerinin katman kalınlıklarının güç dönüşüm verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Yapılan simülasyonlar, özellikle P3HT:PCBM katmanının kalınlığının güç dönüşüm verimliliği üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermiştir. 100-300 nm arasında P3HT:PCBM katman kalınlıkların artması, güç dönüşüm değerlerinde bariz bir artışa neden olmuştur. Katman kalınlıklarının artmasıyla birlikte genel olarak güç dönüşüm verimliliğinin arttığı ancak belirli bir noktadan sonra doygunluğa ulaşıldığı görülmüştür. Bu katmanda en yüksek verimliliğe 300 nm kalınlığında ulaşılmıştır. PEDOT:PSS katmanında 25 nm'lik katmanın en yüksek güç dönüşüm verimliliğine sahip olduğu gözlemlendi. Aynı katmanın en yüksek açık gerilim değeri ve akım yoğunluğuna sahip olduğu belirlenmiştir. ITO katmanındaki optimum katman kalınlığı 50 nm olarak elde edildi. Güç dönüşüm verimliliği, açık devre akım yoğunluğu ve açık devre geriliminin en yüksek değerlerine yine bu katmandan elde edilmiştir. Al katmanında ise doluluk oranı ve açık devre gerilimleri tüm katmanlarda hemen hemen aynı değerleri alırken; 175 nm katman kalınlığında en yüksek güç dönüşüm verimliliğine ve akım yoğunluğuna sahip olduğu gözlemlenmiştir. Fakat tüm bu parametre değerlerinin Al katmanındaki tüm kalınlık karşılaştırmalarına bakıldığında birbirlerine yakın değerler aldığı belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ITO, PEDOT:PSS ve Al katmanlarının kalınlıklarının güç dönüşüm verimliliği üzerinde etkisi olduğu ancak bu etkinin P3HT:PCBM katmanındaki kadar belirgin olmadığı tespit edilmiştir.

Çalışma, organik güneş hücrelerinde her katmanın kalınlığının dikkatlice seçilmesi gerektiğini ancak belirli bir kalınlık aralığının ideal performansı sağlayabileceğini vurgulamaktadır. Ayrıca, malzeme maliyeti, enerji dönüşüm verimliliği ve ticari kullanılabilirlik gibi faktörlerin dikkate alınarak katman kalınlıklarının belirlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu simülasyon sonuçlarının, organik güneş hücrelerinin tasarımında ve geliştirilmesinde önemli bir rehberlik sağlayacağı düşünülmektedir. Optimum katman kalınlıklarının belirlenmesi; tasarruflu, sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarına yönelik daha etkili güneş hücreleri geliştirmek için önemlidir.

KAYNAKÇA

Ahmad, V., Alshahrani, T., Balobaid, A. S., & Khan, F. (2023). Photovoltaic cell parameter analysis of CsPb1−xZnxIBr2-based all-inorganic perovskite solar cells for low-temperature processed flexible devices. *Optik*, 288, 171216. Retrieved from https://doi.org/10.1016/J.IJLEO.2023.171216

Al-Ahmad, A., Vaughan, B., Holdsworth, J., Belcher, W., Zhou, X., & Dastoor, P. (2022). The Role of the Electron Transport Layer in the Degradation of Organic Photovoltaic Cells. *Coatings 2022, Vol. 12, Page 1071*, 12(8), 1071. Retrieved from https://doi.org/10.3390/COATINGS12081071

Ay, E., & Pamuk, N. (2023). Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Farabi Yerleşkesindeki Elektrik Enerjisi İhtiyacının Güneş Enerjisi Santralleri Kurularak Elde Edilmesi ve Ekonomik Analizi. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 6(3), 173–184. Retrieved from https://doi.org/10.34248/BSENGINEERING.1271586

Cha, J., Jin, H., Kim, M. K., Park, J. H., & Kim, M. (2022). Evaporation-controlled spray deposition process achieving ultrasmooth photoactive layer for efficient organic solar cells. *Surfaces and Interfaces*, 28, 101669. Retrieved from https://doi.org/10.1016/J.SURFIN.2021.101669

Chi, D., Qu, S., Wang, Z., & Wang, J. (2014). High efficiency P3HT:PCBM solar cells with an inserted PCBM layer. *Journal of Materials Chemistry C*, 2(22), 4383–4387. Retrieved 4 December 2023 from https://doi.org/10.1039/C4TC00003J

Fatih Gözükızıl, M., & Birelli, A. (2023). Al, Cu Katkılı, Katkısız TiO2 İnce Film Biriktirme ve Katkılamanın Film Özelliklerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 1–1. Retrieved 4 December 2023 from https://doi.org/10.2339/POLITEKNIK.1208648

Fen, G. Ü., Dergisi, F., Etkisi, P., Candan, İ., Özen, Y., & Kınacı, B. (2022). Boşluk Taşıma Katmanının (HTL) Ters Çevrilmiş Organik Güneş Hücre Parametrelerine Etkisi. *Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi*, 3(2), 123–132.

Gu, X., Guo, L., Hemour, S., & Wu, K. (2020). Optimum Temperatures for Enhanced Power Conversion Efficiency (PCE) of Zero-Bias Diode-Based Rectifiers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 68(9), 4040–4053. Retrieved from https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.2992024

Gündüz, N. K., & Bicil, İ. (2022). Yenilenebilir Enerji Yatırımlarını Belirleyen Faktörler Ve Gelir Gruplarına Göre Seçilmiş Ülkelerin Analizi. *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 7(13), 1–28. Retrieved from https://doi.org/10.54831/VANYYUIIBFD.1052486

Huang, L., Hu, Z., Zhang, K., Chen, P., & Zhu, Y. (2015). Dip-coating of poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) anodes for efficient polymer solar cells. *Thin Solid Films*, 578, 161–166. Retrieved from https://doi.org/10.1016/J.TSF.2015.02.010

Islam, R., Abrar, M. M., Hassan, F., & Adnan, S. (2019). Layer thickness effect on

power conversion efficiency of a P3HT:PCBM based organicsolar cell. *1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology 2019, ICASERT 2019*. Retrieved from https://doi.org/10.1109/ICASERT.2019.8934453

Kaçuş, H., Biber, M., & Aydoğan, Ş. (2020). Role of the Au and Ag nanoparticles on organic solar cells based on P3HT:PCBM active layer. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 126(10). Retrieved from https://doi.org/10.1007/S00339-020-03992-7

Kang, D., Lee, H.-S., Kim, D., & Kang, Y. (2024). Investigation of sub-stoichiometric MoOx hole-selective contacts for rear junction passivating contact silicon solar cells. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 9(1), 100647. Retrieved from https://doi.org/10.1016/J.JSAMD.2023.100647

Kundu, C. S., Adhikary, A., Ahsan, M. S., Rahaman, A., Hossain, M. B., Raha, A. D., … Ahmed, F. (2023). Design and analysis of performance parameters for achieving high efficient ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al organic solar cell. *Journal of Optics (India)*, 1, 1–12. Retrieved 27 October 2023 from https://doi.org/10.1007/S12596-023-01230-W/TABLES/10

Makalesi, A., Yurtdaş, S., Can, M., Karaman, M., Tozlu, C., Sistemleri Mühendisliği Bölümü, E., … Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, T. (2020). Polimerik Güneş Hücrelerinde Ag Nanopartikül Katkılı TiO2 Tampon Tabakasının Kendiliğinden Organize Olan Tek Tabaka Moleküller (SAM) ile Modifiye Edilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 1058–1071. Retrieved 4 December 2023 from https://dergipark.org.tr/tr/pub/dubited/issue/49725/631235

Moorthy, V. M., & Srivastava, V. M. (2022). Device Modelling and Optimization of Nanomaterial-Based Planar Heterojunction Solar Cell (by Varying the Device Dimensions and Material Parameters). *Nanomaterials 2022, Vol. 12, Page 3031*, 12(17), 3031. Retrieved 4 December 2023 from https://doi.org/10.3390/NANO12173031

Noori, D. A. (2023). Heterojunction Active Layer MAPbI3 /CsPbI3 Design for High-Performance Perovskite Solar Cells: A Computational Analysis Achieving 20.5% Efficiency. Retrieved 4 December 2023 from https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-3554092/V1

Salim, M. B., Nekovei, R., & Jeyakumar, R. (2020). Organic tandem solar cells with 18.6% efficiency. *Solar Energy*, 198, 160–166. Retrieved from https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2020.01.042

Sun, L., Chen, Y., Sun, M., & Zheng, Y. (2023). Organic Solar Cells: Physical Principle and Recent Advances. *Chemistry – An Asian Journal*, 18(5), e202300006. Retrieved from https://doi.org/10.1002/ASIA.202300006

Sun, R., Yang, C. L., Wang, M. S., & Ma, X. G. (2022). Two-dimensional Sc2CCl2/SiS2 van der Waals heterostructure with high solar power conversion efficiency. *Applied Surface Science*, 591, 153232. Retrieved from https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2022.153232

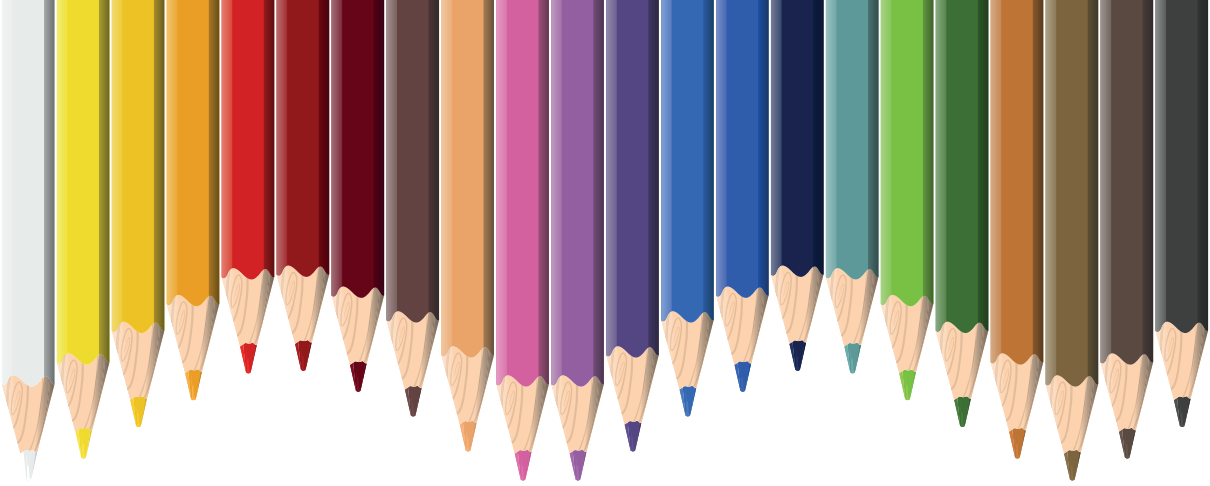
Tan, J., Li, H., Sun, P. Y., Li, G., Zhao, Y., & Yu, H. (2023). ZnO&GeSe composite electron transport layer for organic solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*. Retrieved 4 December 2023 from https://doi.org/10.1039/D3TA05900F

Yakuphanoglu, F., & Anand, R. S. (2010). Charge transport properties of an organic solar cell. *Synthetic Metals*, 160(21–22), 2250–2254. Retrieved from https://doi.org/10.1016/J.SYNTHMET.2010.08.015

Yao, K., Chen, L., Chen, Y., Li, F., & Wang, P. (2011). Influence of water-soluble polythiophene as an interfacial layer on the P3HT/PCBM bulk heterojunction organic photovoltaics. *Journal of Materials Chemistry*, 21(36), 13780–13784. Retrieved from https://doi.org/10.1039/C1JM12016F

Yenel, E., & Yenel, E. (2022). The Effect of Coating Parameter of Active Layer on Performance of Polymer Solar Cells. *Celal Bayar University Journal of Science*, 18(1), 85–89. Retrieved 4 December 2023 from https://doi.org/10.18466/CBAYARFBE.992952

Zhu, X. (2021). Developing an Analytical Model for Charge Transport in Organic Solar Cells through Simulation of Photocurrent. Retrieved 4 December 2023 from https://ida.mtholyoke.edu/handle/10166/6318



Bölüm 18

YÜKSEK MANEVRA KABİLİYETİNE SAHİP İNSANSIZ HAVA ARACI ÜRETİMİNDE ÖNEMLİ PARAMETRELER

Ahmet Aziz Bilgin[1], Ömer Melih Sevici[2], Halit Arat[3]

1 Öğrenci, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, ahmetazizbilginn@gmail.com, Orcid:0009-0004-9387-5291

2 Öğrenci, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, melihsevicii@gmail.com, Orcid:0009-0001-7315-0419

3 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, halit.arat@dpu.edu.tr, Orcid:0000-0002-6634-2535

GİRİŞ

İnsansız hava aracı (İHA), içinde pilot ve yolcu olmayan gerekli bilgi işlem birimleri, sensörler, otomatik kontrol ve iletişim sistemleriyle donatılmış ve verilen görevleri otonom olarak yerine getirebilen bir hava aracıdır (Caska ve Gayretli, 2015; Sevici, Bilgin ve Serttaş, 2023). Günümüzde teknolojinin hızla ilerlemesiyle birlikte, insansız hava araçları (İHA'lar) önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek manevra kabiliyetine sahip İHA'lar, birçok sektörde kullanılarak görevleri daha etkin ve verimli bir şekilde yerine getirebilmektedir. İHA'lar günümüzde askeri, gözetleme, arazi keşfi, yangınla mücadele, taşımacılık gibi alanlarda kullanılmaktadır (Can ve Kahveci, 2017; Özdemir ve Çaşka, 2022). İHA'lar uydu haberleşme platformu ile yüksek hıza ve düşük gecikmeli haberleşme kabiliyetine sahiptir. Yardımcı bir altyapı olarak, kullanıcıların güvenli ve güvenilir bilgi iletimini gerçekleştirmesi için olanak sağlamaktadırlar (Demirbaş ve diğerleri, 2021). Teknolojinin imkan verdiği ölçülerde pilotların kullandığı uçaklarda sınırlı bir şekilde gerçekleştirilen zorlu operasyon ve manevralar insansız hava araçlarında daha kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bununla birlikte, olası savaş durumu senaryolarında mürettebatsız olmaları sayesinde, görev sırasında yaralanma ve can kaybı riski taşımamaktadır. Bu doğrultuda, iki ülkeye ait savaş uçaklarının it dalaşı yaptığı senaryolarda savaş uçaklarına karşı insansız sistemlerin kullanılmasının yaygınlaştırılması planlanmaktadır. İt dalaşında, her savaş uçağının rakibini yok etmesi ve rakibinin yok etmesini önlemesi üzerine manevra yapması olarak tanımlanmaktadır (Olsder ve Breakwell, 1974). Air Combat Evolution (ACE) programının bir parçası olarak gerçekleştirilen uçuş simülatörü ortamında yapay zeka tarafından kumadan edilen bir F-16, it dalaşlarında son derece deneyimli bir F-16 pilotunu 5–0 gibi bir skorla yenmiştir. Bununla birlikte, 2024'te bir yapay zeka sistemi ile bir insan pilot arasında gerçek uçaklarla bir düello düzenlenmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir (Jordan, 2021). Bu çalışmalar gelecekte pilotlu savaş uçaklarının zorlandığı veya çok tehlikeli görevlerde insansız hava araçlarının kullanılacağının açık bir göstergesidir.

Bu çalışmada üretimi hedeflenen yüksek manevra kabiliyetine sahip sabit kanat İHA'nın, hedefleri makine öğrenimi destekli bilgisayarlı görgü metoduyla tespit edip PID (Proportional Integral Derivative) ve EKF (The extended Kalman filter) algoritmalarıyla takip etmesi amaçlanmaktadır. İHA'nın, rakip İHA'ları yüksek doğrulukla tespit edebilmesi için sunucudan aldığı verileri stratejik yorumlayabilecek güçlü bir algoritmaya ek olarak yüksek çözünürlüklü hızlı bir kamera ile derin öğrenmeye dayalı nesne tespit edebilme özelliğine sahip olması gerekmektedir. Nesne tespitinde hız ve doğruluk, hedef takibinin kararlılığı ile doğru orantılıdır (Florio, 2016). Donanımda üretilecek hızlı ve kararlı (sürekli kontrol) yazılım çıktılarının, gecikme olmadan mekanik hareketlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Dolayısıyla İHA meka-

niğinde; stabil uçuşla beraber, tepki süresi düşük servo motor, arkadan motor ve diğer kuyruk türlerine göre daha az indüklenmiş ve parazitik sürükleme üreten V kuyruk ile hızlı ve yüksek manevralı bir uçuş performansının elde edilmesi hedeflenmektedir. Yüksek irtifa uzun dayanıklılık (HALE) ve orta irtifa uzun dayanıklılık (MALE) İHA'ları, erişilemeyen bölgelerin uzaktan algılama ve havadan incelenmesi için kullanılmaktadır. HALE veya MALE İHA'lar aerodinamik avantajları nedeniyle yüksek açıklık oranına (Aspect ratio) sahip olması gerekmektedir (Bras, Warwick ve Suleman, 2022). Savaş uçaklarında ise düşük açıklık oranı (yaklaşık 2/3) olarak görülmektedir. Bir miktar denge pahasına olsa da yüksek derecede manevra kabiliyetinin korumak için düşük açıklık oranı kullanılmaktadır (Jackson, 1999). Geometrik olarak kanat profili ve planform geometrileri ana kanadı tanımlayan terimler olup aerodinamik açıdan verimli bir kanat açıklık oranı, kamburluk oranı ve sivrilme oranı (uç veterin kök vetere oranı) gibi parametrelere bağlıdır (Güzelbey, Eraslan ve Doğru, 2019). Genel olarak sivriltme, sürtünmede bir azalmaya (özellikle yüksek hız) ve taşımada artışa neden olmakta bu da manevra için istenilen bir durumdur (Guide, y.y.).

Yüksek manevra kabiliyetine sahip İHA'lar, karmaşık ortamlarda dahi kolaylıkla manevra yapabilir, hızlı hareket edebilir ve hassas kontrol sağlayabilir. Bir İHA, müsabaka sırasında olası gecikmelere karşı en az 20 dakikalık bir uçuş süresine sahip olmalıdır. Görevin otonom olarak gerçekleştirilebilmesi için ise bir otopilot destekli uçuş kontrol sistemi gereklidir. Bu çalışmada, yüksek manevra kabiliyetine sahip İHA'ların geliştirilerek en iyi tasarım yapılarak en ideal savaşan İHA'nın üretilmesi gerçekleştirilmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, arama kurtarma operasyonlarında veya yangın söndürme çalışmaları, güvenlik ve istihbarat alanında da etkin bir şekilde kullanılarak, kritik bölgelerin izlenmesi ve bilgi toplanması gibi çeşitli sektörlerde fayda sağlaması amaçlanan yüksek manevra kabiliyetine sahip İHA'ların tasarımı ve imalatı gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada kullanılan ileri teknoloji unsurları; güçlü motorlar, aerodinamik tasarım, akıllı sensörler ve yüksek hassasiyetli kontrol sistemleri gibi özellikleri içermektedir.

Görev İsterleri ve Araç Gereksinimleri

Otonom için istenen performans düzeyine ulaşabilmesinde kontrol sistemi, yüksek doğruluk sağlayan sensörlerden oluşan bir ataletsel ölçüm birimi ve küresel konumlama birimine, kontrol döngüsünün kesintisiz olabilmesi için yüksek frekanslı bir işlemci birimine, kararlı kontrol algoritmalarına ve doğru bilgilerle tahmin yapabilen filtreleme mekanizmalarına ihtiyaç duymaktadır.

Ataletsel ölçüm birimi, İHA'nın konumunu, hızını ve ivmesini ölçmek

için yüksek doğruluk sunan sensörler içermektedir. Küresel konumlama birimi ise İHA'nın hassas bir şekilde konumunu belirleyebilmesi için GPS gibi sistemleri kullanır. Yüksek frekanslı işlemci birimi ise kontrol sisteminin sürekli çalışmasını sağlamak için gereklidir. Bu birim, sensör verilerini işler, kontrol algoritmalarını yürütür ve zamanında yanıt ve karar verme yeteneği sunar. Kararlı kontrol algoritmaları, İHA'nın davranışını yönlendiren algoritmalardır. Bu algoritmalar, sensörlerden gelen verileri kullanarak bilgiyi işler ve uygun kontrol komutlarını üreterek istenen uçuş yolunu ve stabiliteyi sağlar.

Tahmin edici filtreleme mekanizmaları ise güvenilir otonom uçuş için İHA'nın durumunu ve çevresel koşulları doğru bir şekilde tahmin etmek önemlidir. Tahmin edici filtreler, sensör verilerini analiz ederek gelecekteki durumları ve parametreleri tahmin eder, böylece kontrol sistemi değişiklikleri önceden tahmin edebilir ve İHA'nın uçuş yolunu buna göre ayarlayabilir. Bu bileşenleri entegre ederek, İHA'nın kontrol sistemi yarışmalar sırasında istenen otonomi seviyesine ulaşabilir ve doğru ve stabil bir uçuş performansı sağlayabilir.

İHA ve yer istasyonu arasında kullanılan RC Kumanda & Video Telemetri ve RF Telemetri sistemleri, güvenli ve güvenilir bir kablosuz iletişim sağlamak için çeşitli şifreleme metotlarına ihtiyaç duymaktadır. Bu sistemlerin, müsabaka alanının boyutlarına bağlı olarak yeterli iletişim menziline (örneğin 500 metre), yasal düzenlemelere uygun anten güç çıkışına ve frekanslara sahip olması önemlidir. İHA ve yer istasyonu arasındaki iletişim güvenliği ve performansı sağlamak için bu özelliklerin sağlanması gerekmektedir.

Alt Sistemlerin Seçim Kriterleri ve Sistem Uyumlulukları

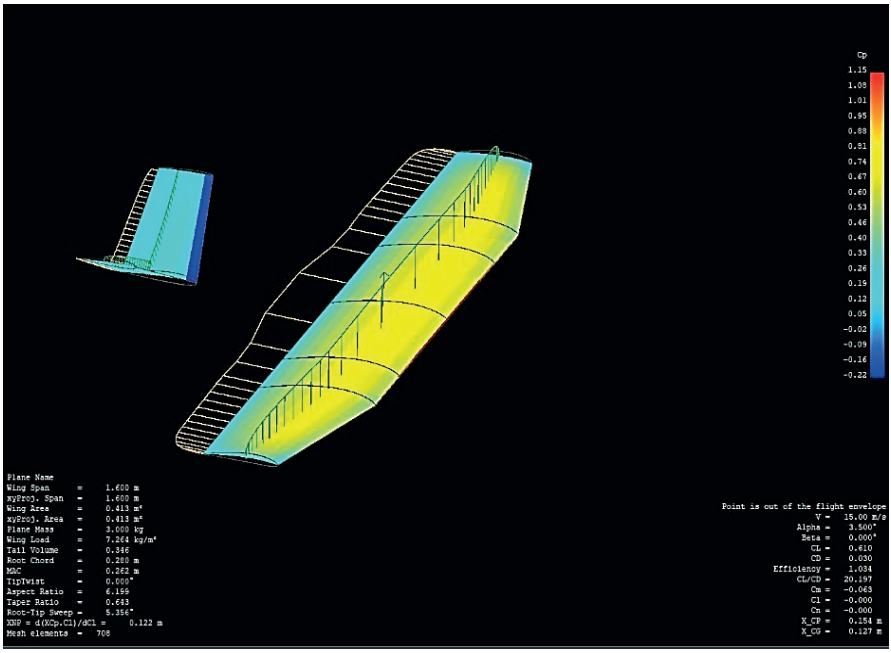
İHA Uçuş Kontrol Sistemi'nin uçuş performansı hedeflerden kaçmak ve hedeflere kitlenebilmek için büyük önem taşımaktadır. Mekaniksel tasarımın sağladığı avantaj ile rakip İHA'ların kitlenebilmesi mümkün değildir dolayısıyla kriter rakip hedeflere kitlenebilmektir. Bunun için tercih edilecek kontrol kartının; manevra ve kaçışlar için hızlı hareket, belirli süre diliminde kilitlenme için yüksek kararlılıkta uçuş, yer istasyonu ile sağlıklı ve yüksek hızlı iletişim ve otonom uçuş desteği gibi kabiliyetlere sahip olması gerekmektedir. Tüm bu ihtiyaçlar dikkate alınarak uçuş kontrolcüsü olarak Pixhawk Orange Cube tercih edilmiştir. Ayrıca uçuş mekaniğinde kullanılacak servo kontrolleri için PWM sinyal üretebilmektedir. U-Blox M8P GPS modülü ile 3 farklı uydu ile iletişime geçerek 2.5m sapma hassasiyetinde konumlama sağlayan, 8Hz güncelleme frekansına sahip ve 9 eksenli hareket takibi yapabilen Here3 GPS tercih edilmiştir. Gelişmiş pusula, jiroskop, ivmeölçer gibi yerleşik sensörlere sahip olan GPS, işlemleri, yüksek hızda işlem gücüne sahip STM32F302 işlemcisi ile Gerçek Zamanlı İşletim Sistemi (RTOS) Chibios üzerinde gerçekleştirmektedir. Tüm bu özelliklerine ek olarak desteklediği

CAN protokolü ile yüksek veri hızında iletim sağlaması ve gürültü engelleyici özellikleri tercih edilmesindeki önemli teknik özellikleri olmuştur. İHA'nın görev esnasında anlık irtifa bilgisinin alınabilmesi için 0.1-40m mesafeye kadar 100Hz ölçüm hızında, ToF prensibi kullanarak ölçüm yapabilen DE-LIDAR TF02-Pro Lidar Sensörü kullanılmıştır. Anlık görüntü için 1920x1080 Full HD çözünürlüklü, 4K24FPS değerinde görüntü yakalayabilen SJCAM SJ5000x Elite Aksiyon Kamerası kullanılmıştır. SJ5000X, kararlı yapıdaki IM078 görüntü işlemcisi ve 12.4MP CMOS Sony görüntü sensörü sayesinde hızlı ve yüksek hassasiyetli görüntü işleme hızı imkanı sunmaktadır. 70-170 derece ayarlanabilir geniş açılı lens seçeneği ile saha içerisinde büyük görüş alanı sunabilecek olması, hareket esnasında dahili jiraskobu ile stabil görüntüler sunması (aksiyon kamera avantajı) ve hareket tespit özelliği ile görev esnasında avantaj sağlayacak olması tercih edilmesindeki sebeplerdir. Uzun mesafeli görüntü aktarımı için SIYI MK15 Kumanda-Video Telemetri tercih edilmiştir. Bu komponent, RC kumanda, video telemetri ve telemetri özelliklerini bir arada sunmaktadır. MK15 Receiver ise uyumlu ve verimli iletişim için kumanda alıcısı olarak kullanılacaktır. MK15 Kumanda, gecikmesiz ve güçlü bir aktarım için kompakt bir tasarıma sahiptir. Görüntü aktarımı için ise Elgato HD60S+ görüntü yakalayıcı kullanılmıştır. Bu cihaz, HDMI ve USB arayüz desteği sunarak anlık görüntüyü işlenebilir formata dönüştürebilme özelliğine sahiptir. HD60S+, yüksek kaliteli ve gecikmesiz yayın yapabilme kabiliyetiyle tercih edilmiştir.

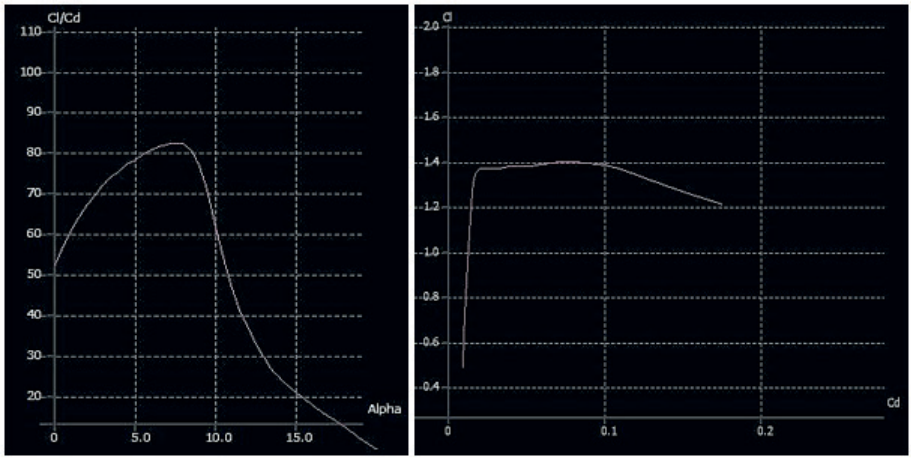
İHA'nın hareketlerini sağlamak için 2 kg/cm torka sahip, 180 derece dönme kabiliyetli 5 adet MG90S Servo Motor kullanılmıştır. Bu servo motorlar, Pixhawk Orange Cube ile bağlantılı olarak kanatlar ve kuyruk üzerinde konumlandırılarak İHA'nın seyrini belirleyecektir. Servo motorların yüksek tork, geniş dönüş açısı ve hızlı reaksiyon kabiliyetleri tercih edilmiştir. Bu bileşenler ve cihazlar, İHA'nın görüntü aktarımı, iletişim ve hareket kontrolü gibi önemli fonksiyonlarını başarılı bir şekilde yerine getirebilmesi için seçilmiştir.

Aerodinamik

Yüksek manevra kabiliyetine sahip olan İHA, arkadan itiş motor konfigürasyonuna sahiptir. Arkadan itiş konfigürasyonu kullanılacağı için diğer kuyruk türlerine göre daha az indüklenmiş ve parazitik sürükleme üreten V kuyruk tercih edilerek gerekli itki miktarının düşürülmesi ve manevra kabiliyetinin artışı sağlanmıştır. Ayrıca İHA, flap kullanarak düşük hızlarda iniş yapabilmektedir. İHA'nın sabit hızda uçabilmesi için etkiyen kuvvetlerin dengesi önemlidir. İHA üzerine etkiyen kuvvetlere bakıldığı zaman Thrust=Drag ve Lift=Weight olması gerekmektedir. Xflr5 (Drela, 2019) programında seçimi yapılan NACA 4412 airfoil, Reynolds sayısı ve uygun Mach hızına göre analizler yapılarak katsayılar elde edilmiştir. Kanat geometrisi güç katsayısının (Cp) ve lift (Cl) ve drag (Cd) katsayılarının hücum açısına göre değişimi sırasıyla Şekil 1 ve 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Kanat geometrisi güç katsayısının (Cp) hücum açısına göre değişimi



Şekil 2. Lift (Cl) ve drag (Cd) katsayılarının hücum açısına göre değişimi

Elde edilen katsayılar sonucunda 1,62 N Sürükleme, 0,02N İndüklenmiş sürükleme değerleri elde edilmiştir. Fakat gövde yapısı, gövde dışında bulunan Gps, anten gibi drag oluşturacak unsurlar göz önüne bulundurulmuş ayrıca yüksek manevra kabiliyeti dikkate alınarak motor seçimi yapılmıştır. Ecalc üzerinden kullanılacak olan Sunnysky x3520 520 KV motor ve 13x8 inç pervane göz önünde bulundurularak hesaplamaları yapılmıştır.

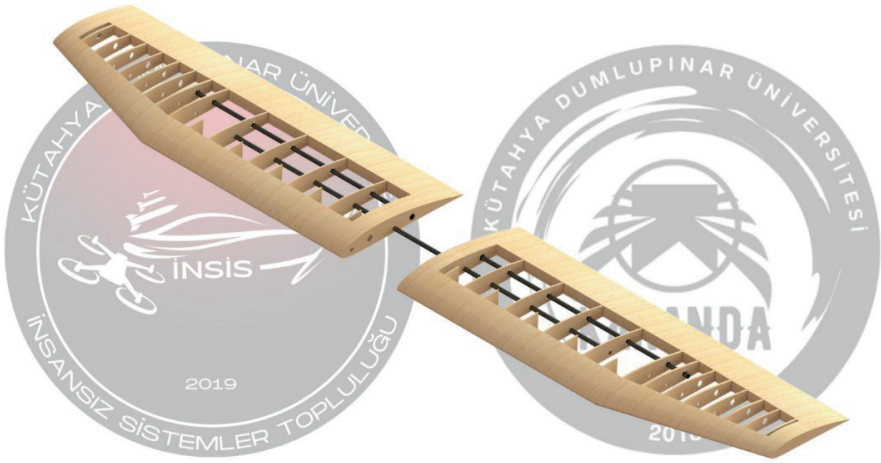
Yarışma isterleri doğrultusunda istenilen uçuş süresine ulaşabilmek için 8000mAh Lipo ile uçuş testleri yapılmış ve seyir hızı için %40 gaz çubuğu konumunda 15 amper akım ile İHA'nın seyir uçuşu yapabildiği gözlemlenmiştir. Diğer komponentlerin toplamda çektiği ortalama 7 amper değeri ile uçuş süresi;

Uçuş Süresi=[Pil Kapasitesi (Ah) /(Motor Amperi + Diğer Komponentlerin Amperi)] (1)

eşitliği yardımıyla 24 dakika olarak bulunmuştur.

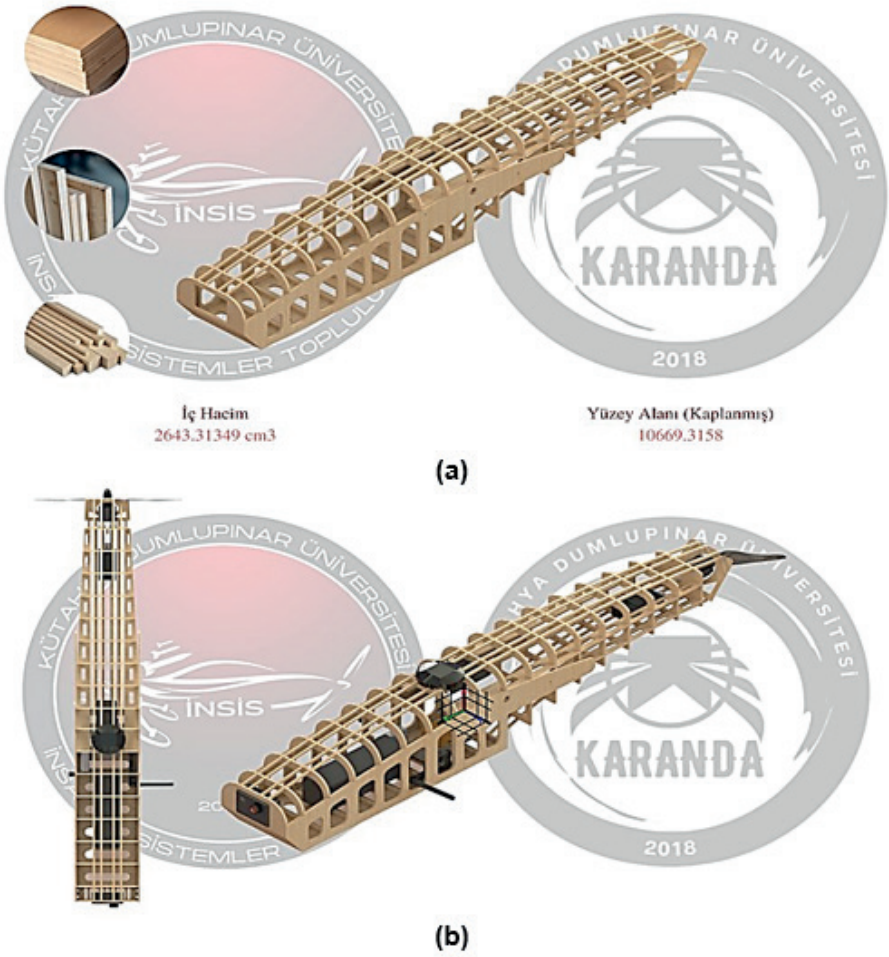
Mekanik Tasarım

Balsa, model uçak yapımında tercih edilen bir malzemedir. Bunun nedenlerinden ilki balsa ahşabı oldukça hafif bir malzeme olmasıdır. Bu hafiflik, model uçağın ağırlığını azaltır ve daha iyi uçuş performansı sağlar. Aynı zamanda, hafif bir yapıya sahip olmak, model uçağın daha kolay yükselmesini, manevra yapmasını ve kontrol edilmesini sağlamaktadır. İkinci olarak, balsa ahşabı kolaylıkla işlenebilir olmasıdır; kesilebilir, şekillendirilebilir ve zımparalanabilir. Bu özellik, model uçak yapımında tasarımcılara büyük bir esneklik sağlamaktadır, bununla birlikte detaylı ve karmaşık yapıların inşasını da mümkün kılmaktadır. Ayrıca, balsa ahşabı kendi ağırlığına göre oldukça dayanıklıdır. Yeterli kalınlıkta kullanıldığında, darbelere, titreşimlere ve diğer dış etkenlere karşı dayanıklı olabilir. Bu özellik, model uçağın uzun ömürlü olmasını ve daha fazla uçuş deneyimi sunmasını sağlar. Balsa ahşabının düzgün bir yüzeyi vardır ve kolayca boyanabilir veya kaplanabilir. Bu, model uçağın estetik açıdan daha çekici olmasını sağlar. Ayrıca, boyama veya kaplama işlemi, ahşabı çevresel faktörlere karşı korur ve daha uzun süre dayanmasını sağlar. Son olarak, balsa ahşabının hafifliği, model uçağın uçuş performansını olumlu yönde etkiler. Hafif bir yapı, daha iyi hızlanma, daha uzun süre havada kalma ve daha hassas manevra yapma gibi avantajlar sağlar. Tüm bu nedenlerle, balsa model uçak yapımında tercih edilen bir malzemedir. Hafiflik, işlenebilirlik, dayanıklılık, yüzey kalitesi ve uçuş performansı gibi avantajları, model uçağın başarılı bir şekilde tasarlanması ve uçurulması için önemlidir. Bu doğrultuda 3mm ve 4mm et kalınlığına sahip balsadan üretimi planlanan aracın tasarımları Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterildiği gibi Solidworks programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. İHA kanat tasarımı.

Hava aracı tasarımına başlarken öncelikle yarışma isterleri göz önünde bulundurularak kullanılacak elektronik komponentler belirlenmiş daha sonra araç içerisine yerleştirilecek bileşenlerin boyutları ve ağırlıkları listelenerek, montaj kolaylığı ve ağırlık merkezi dengelemelerine olanak sağlayabilecek aerodinamik gövde yapısı tasarımları ile devam edilmiştir. Hafiflik ve mukavemet değerleri göz önünde bulundurularak kullanılması planlanan 4 mm kontrplak ve 4mm balsa malzemeler için uygun biçimde koza geçmeli gövde yapısı tasarımları yapılmıştır. Noktaları belirlenmiş ve yapı içerisine üretim esnasında güçlendirmeler yapılmıştır.

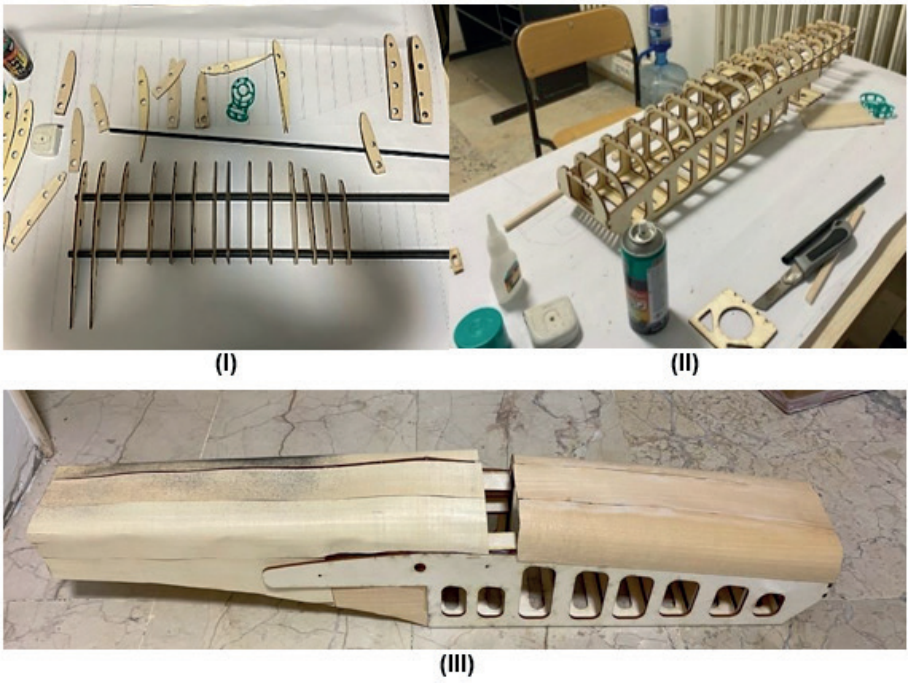


Şekil 4. İHA (a) gövde tasarımı ve (b) komponent yerleşimleri.

Üç boyutlu tasarım tamamlandıktan sonra İHA bileşenleri program üzerinde yapılan tasarım üzerine yerleştirilmiş ve ağırlık merkezi kontrolleri yapılmıştır. Elektronik bileşenlerin dağılımları yapıldıktan sonra elektronik kablolama ve ulaşım kolaylığı için kapak kesimleri yapılmıştır. Yapılan gövde tasarımı üzerine kuyruk bağlantısı için gövde üstüne montajı planlanan kuyruk tutucu bileşeni program üzerinden çizilerek PLA baskıya hazır hale getirilmiştir. Kanat yapısının montajı için tasarım üzerinde yatay ağırlık merkezine denk gelen noktaya, gövde içerisinden 12mm karbon boru ve 3 mm cıvata delikleri açılmıştır. Seçilen ve hesapları yapılan kanat profil koordinatları programa aktarılmış ve hesaplanan ölçülerde çizilmiştir. Çizimi gerçekleşen kanatlar üretim için dilimlenerek ağırlık hesapları yapılmıştır.

Yapısal Entegrasyon ve İmalat

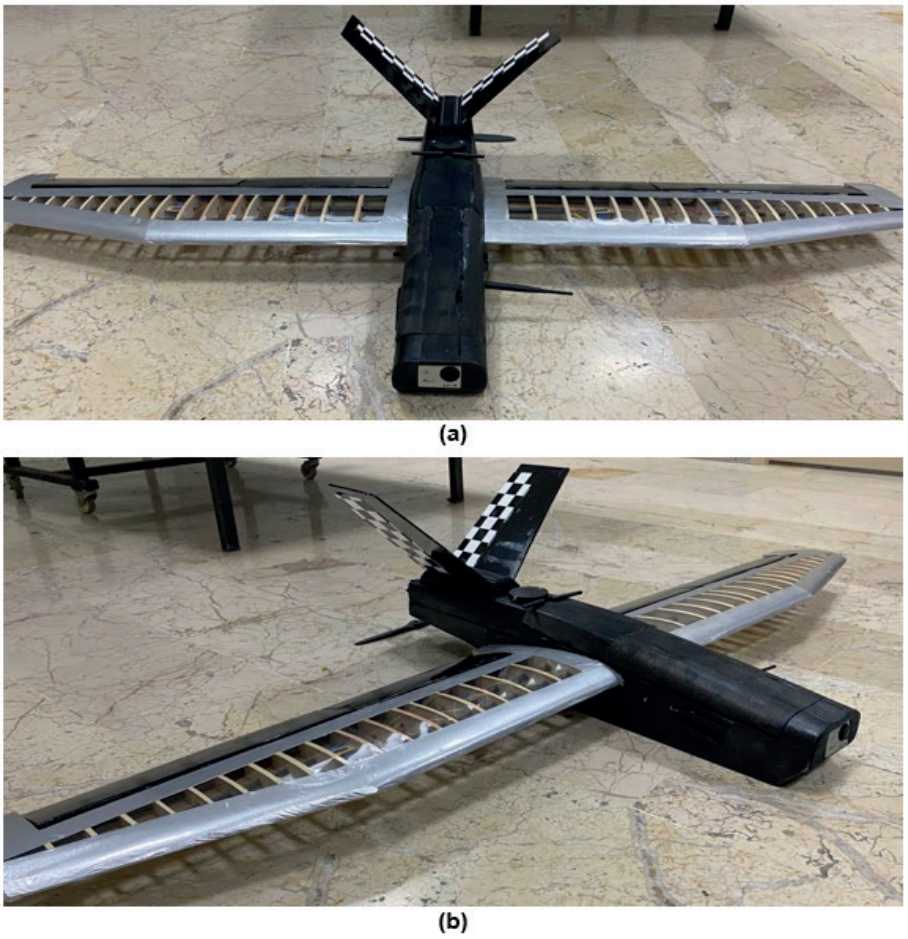
Solidworks programı üzerinden tasarlanan gövde, kanat ve kuyruk parçalarının yan görünüşleri dxf formatına dönüştürülüp lazer kesim yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Parçaların üretim aşamasında dayanım gerektiren kısımlar için 4mm kontrplak, diğer kısımlar için 3mm balsa kullanılmıştır. Kanat üretimi için elde edilen parçalar (Şekil 5), şablon üzerine koyulmuş mukavemetin arttırılması amacıyla içlerinden 12mm ve 8mm karbon borular geçirilmiş ve hızlı yapıştırıcı ile bir araya getirilmiştir. Gövde üretimi için ise lazer ile kesilen parçalar hızlı yapıştırıcı ile yapıştırılmış daha sonra 1,5 mm balsa plakaların yüzey alanı kullanılarak kanadın kaplaması yapılmıştır. İHA iniş takımına sahip olmadığı için gövde alt kısmının iniş sırasında maruz kalabileceği yüklere, darbelere dayanabilmesi gerekmektedir. Gövde alt kısmının dayanımını arttırmak için kontrplak malzeme kullanılarak gerekli tedbir alınmış ve uçuş testleri sırasında herhangi bir problemle karşılaşılmamıştır.



Şekil 5. İHA gövde imalat aşamaları.

Üretimi tamamlanan kanat ve gövde 0.5mm balsa ile kaplanmıştır. Kaplanan gövde üzerine elektronik montajın yapılabilmesi için kapak kesimi gerçekleştirilmiş ve kapak-gövde bağlantısı neodyum mıknatıs yardımıyla yapılmıştır. 4mm kontrplaktan üretilen kuyruk, gövde üzerinde belirlenen açı ile sabit kalabilmesi için parça katmanlı imalat yöntemi kullanılarak PLA malzemesinden 3D Printer yardımı ile kuyruk tutucu üretilmiştir. Kuyruk tutucu ve kuyruk hızlı yapıştırıcı ile monte edilerek gövdeye sabitlenmiştir. Üretimleri

tamamlanan gövde, kanat ve kuyruk parçaları kaplama filmi ile kapılanılarak dayanımı arttırılmıştır. Kanat, gövde üzerine bir adet 12mm karbon boru, 6 adet perçin somun ve 6 adet m3 vida kullanılarak montajlanmıştır. Hareket yüzeyleri montajında plastik kelepçe, servo hareketi için ise clevis, pushrod ve yeke kullanılmıştır. Üretimi tamamlanılan İHA uçuşa hazır hale gelmiştir. İHA'nın önden ve perspektif görünüşleri Şekil 6'da verilmiştir.



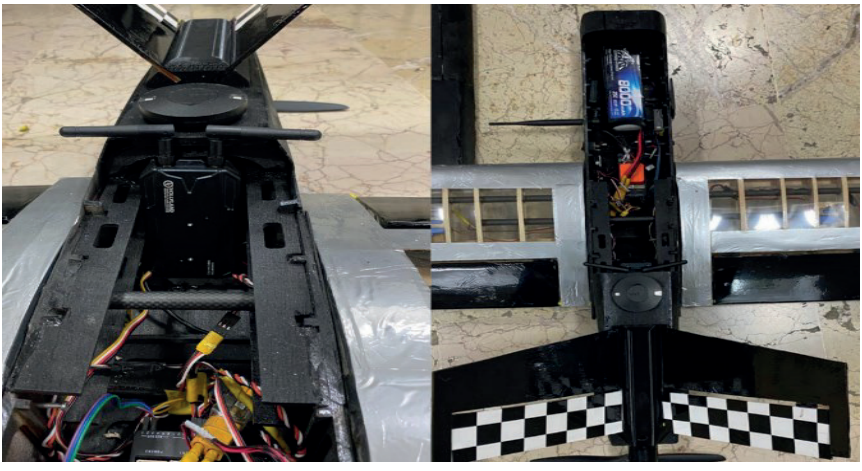
Şekil 6. Kaplaması tamamlanmış İHA'nın (a) önden ve (b) perspektif görünüşleri.

Mekanik Entegrasyon ve Komponentlerin Montajı

Aracın merkezinde bulunacak olan uçuş kontrol kartı koza yapı içerisinde merkezi noktaya düz bir şekilde çift taraflı bant yardımı ile montajlanmıştır. Anahtar ve switch düğmeleri gövde yan parçaları üzerinde açılan yuvalara oturtulmuştur. Telemetri ve alıcı antenleri gövde yanlarından açılan deliklerden dışarıya çıkartılmış ve gövde içerisinde kalan kısımları iç hacimde kalan yan kenarlara çift taraflı bant ile destekli bir şekilde yerleştirilmiştir.

Şekil 7. Gövde-kamera montajı.

Araç üzerinde kullanılacak olan kamera gövde burun kısmında kesilmiş olan yuvaya baskısı alınmış olan PLA parça ile sabitlenmiştir (Şekil 7). GPS kuyruk önünde, gövde dışında kalan düz alan üzerine çift taraflı bant ile yönü dikkatle hizalanarak yapıştırılmıştır. Gövde içerisinde kapağın başladığı noktada antenleri dışarı gelecek şekilde video telemetri dik bir şekilde arkasına balsa çita konularak GPS önüne montajlanmıştır. Motor gövdeden kuyruğun sonuna kadar örülmüş olan düz kontrplak plaka üzerine 4 adet M3 vida ile sabitlenmiştir. ESC, motor bağlantısı yapıldıktan sonra çift taraflı bant ile montajlanmıştır (Şekil 8). Elektronik kablolama ve montaj bittikten sonra lityum polimer batarya ağırlık merkezine göre buruna yakın noktalarda ufak oynamalara yaparak 2 adet plastik kelepçe ve çift taraflı bant ile gövde içerisine sabitlenmiştir.



Şekil 8. Gövde-motor montajı.

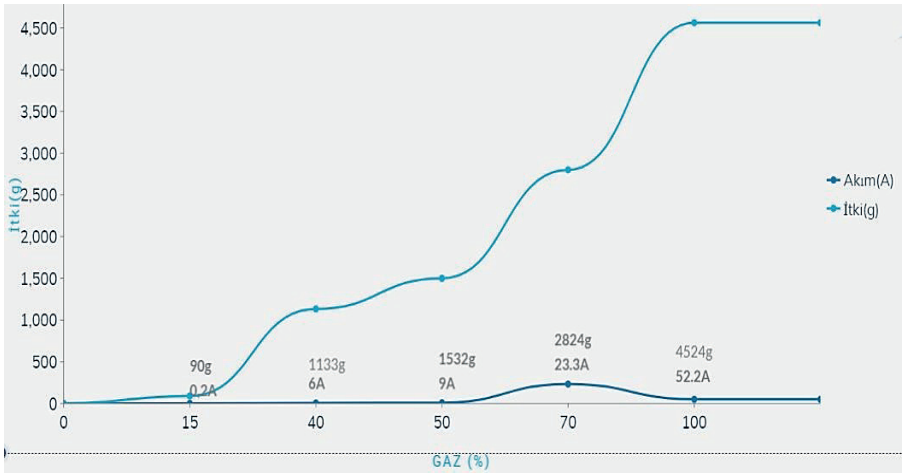
TEST VE SİMÜLASYON

İtki Testi

İHA'da kullanılan ''SunnySky x3520 520 KV'' fırçasız motor ile statik itki testi yapılmıştır. Şekil 9'da gösterilen test düzeneği ekip tarafından tasarlanmış ve üretilmiştir. Test düzeneğinde, ampermetre ve dijital tartı kullanılarak yere paralel konumlandırılan motorun ters takılan pervane ile itkisi ölçülebilmektedir.

Şekil 9. İtki test düzeneği.

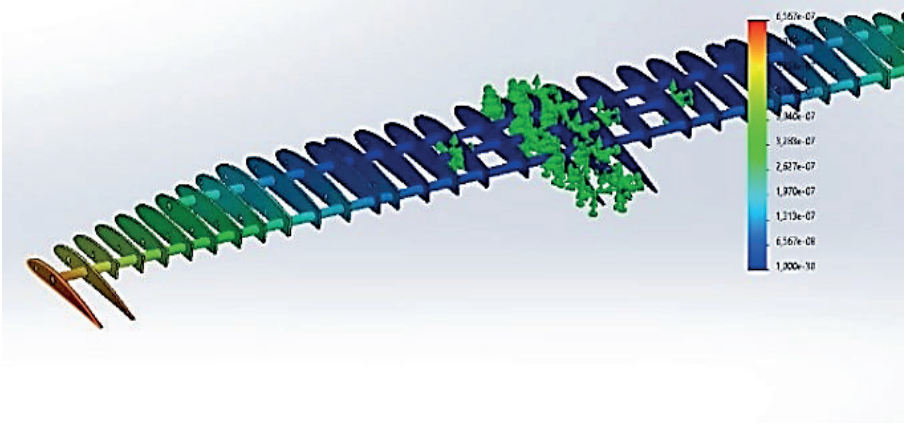
5s 8000mAh Lipo ve 13x8 Pervane kullanılarak farklı gaz çubuğu pozisyonlarına göre testler yapılmıştır. Yapılan testler ile maksimum itki kuvveti, akım, sıcaklık gibi değerler elde edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda seyir uçuşu için gerekli olan itki ihtiyacının %40 gaz ile sağlandığı ölçülmüştür. Test sonuçları Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. İtki test sonuçları.

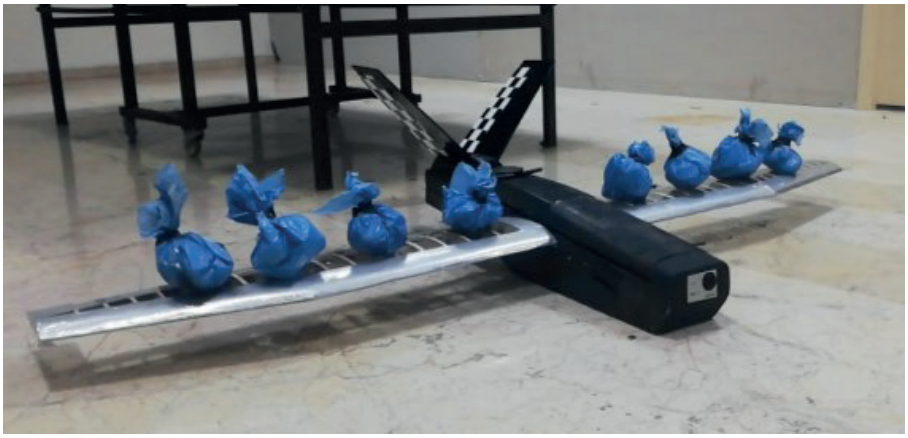
Kanat Simülasyonu ve Testi

İcra edilecek görevler yüksek manevra içermektedir. Manevralar baz alındığında kanatların dayanabileceği maksimum kuvvetleri belirlemek önemlidir. Solidworks programı simülasyon eklentisi kullanılarak statik analiz (Şekil 11) gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler 1G ve 2G olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Yapılan analiz sonuçlarına göre kanatlarda 24mm elastik deformasyon gözlemlenmektedir.



Şekil 11. Kanat simülasyon sonuçları.

Yapılan kanat testlerinde sadece rip ve karbon boru ile analiz yapılmıştır. Ayrıca, Şekil 12'de gösterildiği gibi kanat 8 alana ayrılarak kanat yükleme testi yapılmış ve 19 mm elastik deformasyon gözlemlenmiştir. Elde edilen verilerin sınır değerleri arasında kaldığı görülmüştür.



Şekil 12. Kanat yükleme testi.

GÜVENLİK

Gerçekleştirilen çalışmalarda uçuş anında, uçuş öncesinde veya sonrasında birçok tehlike ortaya çıkabilmektedir. Bu sebeple oluşabilecek risklerin önceden tespit edilerek önlemler alınması gerekmektedir. İmalatın gerçekleştiği atölye içerisinde, uçuş sahasında veya herhangi bir konumda farklı tehlikelerle karşılaşmamak için ekibimizce tespit edilmiş riskler ve bu riskleri önlemek için alınmış bazı güvenlik tedbirleri aşağıda listelenmiştir.

- Ani bir güç veya akım probleminde veya kaza esnasında elektronik komponentlerden kaynaklı oluşabilecek herhangi bir yangın ihtimaline karşı çalışma ortamında yangın söndürücü tüp bulundurulması.

- Çalışma ortamında LiPo bataryaların alabileceği bir darbe sonucu veya pilin aşırı ısınması sonucu ortaya çıkarabileceği yangın veya patlamalar için koruyucu LiPo pil çantasının bulundurulması.

- Mekanik işlemler gerçekleştirilirken kullanılan teçhizatlardan kaynaklanabilecek yaralanmalara karşı koruyucu eldiven kullanılması.

- Mekanik işlemler gerçekleştirilirken kullanılan malzemelerden çıkan zehirli toz, gaz vb. kimyasalların göz veya solunum yolu gibi önemli noktalara temas etmemesi için koruyucu iş gözlüğü ve maske kullanılması.

- Oluşabilecek herhangi bir yaralanmaya veya kazaya karşı çalışma ortamında daima acil ilk yardım çantası bulundurulması ve bu çanta içerisindeki malzemelerin güncelliklerinin kontrol edilmesi.

- İHA üzerindeki bataryanın tükenmesi sonucu oluşabilecek kazaların önceden önlenebilmesi için bataryaya seviye ölçer takılması.

- Ani akım değişiklikleri sonucu komponentlerin zarar görmemesi ve yangın çıkma ihtimalinin önlenmesi için akım kesici sigortalar kullanılması.

- Komponentlerin İHA üzerinden kopması, bağlantısının çıkması vb. durumlarda oluşabilecek risklerin önlenmesi için her komponent ve mekanik parçanın bağlantılarının kontrolünün yapılması, sabitleme için bant, yapıştırıcı, plastik kelepçe, bant gibi malzemelerin kullanılması.

- Lehimlenen komponentlerin kısa devre vb. durumlardan dolayı zarar görmesinin önlenmesi için kablo, konektör gibi açık parçaların makaron ve elektrik bantları ile izole edilmesi.

- İHA'nın tüm testlerinin pervaneler takılmadan yapılması ve en son uçuşa hazır olunduğunda pervanelerin takılması.

- Her uçuş öncesi ihmal edilen bir madde olmaması için kontrol listesinin hazırlanması ve İHA bağlantılarının kontrolünün sağlanması.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Günümüzde teknolojinin hızla ilerlemesiyle birlikte, İHA'lar önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek manevra kabiliyetine sahip İHA'lar, birçok sektörde kullanılarak görevleri daha etkin ve verimli bir şekilde yerine getirebilmektedir. Bu projede, yüksek manevra kabiliyetine sahip İHA'ların geliştirilerek en iyi tasarıma sahip İHA'nın üretilmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın temel amacı, İHA'ları daha etkili ve işlevsel hale getirerek çeşitli görevleri başarıyla yerine getirmesini sağlamaktır. Yüksek manevra kabiliyetine sahip İHA'lar, karmaşık ortamlarda dahi kolaylıkla manevra yapabilir, hızlı hareket edebilir ve hassas kontrol sağlayabilir. Bu çalışmada; güçlü motorlar, aerodinamik tasarım, akıllı sensörler ve yüksek hassasiyetli kontrol sistemleri gibi özellikleri içeren kullanılan teknoloji unsurları kullanılarak İHA tasarımı ve üretimindeki önemli parametreler incelenmiştir.

Bu çalışmayla, yüksek manevra kabiliyetine sahip İHA'ların tasarımı ve üretimi literatüre kazandırılarak çeşitli sektörler için fayda sağlaması amaçlanmıştır. Örneğin, arama kurtarma operasyonlarında veya yangın söndürme çalışmalarında insanların yerine geçerek görevleri yerine getirebilirler. Aynı şekilde, güvenlik ve istihbarat alanında da etkin bir şekilde kullanılarak, kritik bölgelerin izlenmesi ve bilgi toplanması sağlanabilmektedir. Önerilen bu çalışmada düşük açıklık oranı, yüksek sivrilme oranı ve yüksek manevra kabiliyetine sahip sabit kanat İHA tasarımı gerçekleştirilerek üretilmiştir. Ayrıca İHA takip algoritmaları oluşturulmuş ve full otonom bir şekilde rakip İHA takibi sağlanmıştır. Ayrıca üretilecek olan insansız hava aracının gövde tasarımları elektronik komponentlerin optimum şekilde yerleştirilebileceği ergonomik tasarımlar üzerine de çalışmalar yürütülmüştür

Gerçekleştirilen çalışmalarda uçuş anında, uçuş öncesinde veya sonrasında birçok tehlike ortaya çıkabilmektedir. Bu sebeple oluşabilecek risklerin önceden tespit edilerek önlemler alınması gerekmektedir. İmalatın gerçekleştiği atölye içerisinde, uçuş sahasında veya herhangi bir konumda farklı teh-

likelerle karşılaşmamak için tespit edilmiş riskler ve bu riskleri önlemek için alınması gereken güvenlik tedbirleri vurgulanmıştır.

Sonuç olarak, yüksek manevra kabiliyetine sahip İHA çalışması, teknoloji ve mühendislik alanındaki araştırmacılara ve bu alanda çalışan öğrencilere bir rehber olacaktır. Bu çalışmanın çeşitli sektörlerde işlerin daha etkin ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesine yardımcı olması hedeflenmiştir. Yüksek manevra kabiliyetine sahip İHA'lar gelecekte daha da önemli bir rol oynayacak ve insanların hayatını kolaylaştıracaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2023-06 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

Bras, M., Warwick, S. ve Suleman, A. (2022). Aeroelastic evaluation of a flexible high aspect ratio wing UAV: Numerical simulation and experimental flight validation. *Aerospace Science and Technology*, *122*. doi:10.1016/j.ast.2022.107400

Can, N. ve Kahveci, M. (2017). İnsansız Hava Araçları: Tarihçesi, Tanımı, Dünyada Ve Türkiye Deki Yasal Durumu. *Selcuk University Journal of Engineering ,Science and Technology*, *5*(4). doi:10.15317/scitech.2017.109

Caska, S. ve Gayretli, A. (2015). An algorithm for collaborative patrolling systems with unmanned air vehicles and unmanned ground vehicles. *RAST 2015 - Proceedings of 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies* içinde . doi:10.1109/RAST.2015.7208425

Demirbaş, A. M., İnan, B., Damyanlı, E. C., Karaman, O., Nurten, M. C., Gönül, E., … Karpat, F. (2021). Kargo Taşıma İçin İnsansız Hava Aracı. *Mühendis ve Makina Güncel*, (Ocak), 29–37. www.mmo.org.tr adresinden erişildi.

Drela, M. (2019). XFLR5. http://www.xflr5.tech/xflr5.htm adresinden erişildi.

Florio, F. De. (2016). *Airworthiness: An introduction to aircraft certification and operation*. *Airworthiness - An Introduction to Aircraft Certification and Operations (3rd Edition)*.

Guide, A. (y.y.). Effect of Wing Planform - Aerodynamics of Flight. 5 Aralık 2022 tarihinde https://www.aircraftsystemstech.com/2017/07/effect-of-wing-planform.html adresinden erişildi.

Güzelbey, İ. H., Eraslan, Y. ve Doğru, M. H. (2019). Effects of Taper Ratio on Aircraft Wing Aerodynamic Parameters: A Comperative Study. *European Mechanical Science*, *3*(1). doi:10.26701/ems.487516

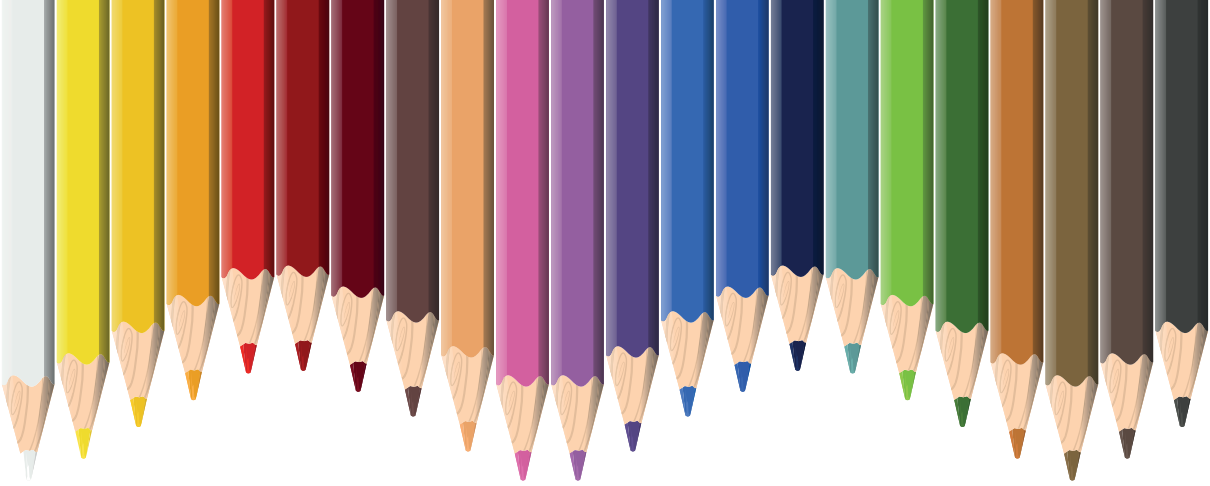
Jackson, P. (1999). Aerodynamics of Low Aspect-Ratio Wings. 5 Aralık 2022 tarihinde https://aerodyn.org/larw/ adresinden erişildi.

Jordan, J. (2021). The future of unmanned combat aerial vehicles: An analysis using the Three Horizons framework. *Futures*, *134*. doi:10.1016/j.futures.2021.102848

Olsder, G. J. ve Breakwell, J. V. (1974). Role determination in an aerial dogfight. *International Journal of Game Theory*, *3*(1). doi:10.1007/BF01766218

Özdemir, İ. ve Çaşka, S. (2022). Calculation Of The Optimum Number Of Unmanned Air Vehicles Required For Surveillance Missions. *Academic Platform Journal of Engineering and Smart Systems*, *10*(2). doi:10.21541/apjess.1113053

Sevici, Ö. M., Bilgin, A. A. ve Serttaş, S. (2023). Kurye ve Kargo Amaçlı Dikey İniş Kalkış Yapabilen İnsansız Hava Aracı Tasarımı ve Üretimi. *Journal of Scientific Reports-C*, (004), 1–13.



Bölüm 19

EKLEMELİ İMALAT İLE İMAL EDİLMİŞ METAL ALAŞIMLARDA LAZER PARLATMA İŞLEMİ VE PRENSİPLERİ

Tolgahan ERMERGEN[1]

1 Dr. Tolgahan ERMERGEN, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü. ORCID ID: 0000-0001-6831-1268

Tez Çalışması: Tolgahan ERMERGEN, Eklemeli İmalat ile İmal Edilmiş Ti-6Al-4V Malzemesinin Yüzey Kalitesinin İyileştirilmesinde Lazer Parlatma Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, 2023. Danışman: Doç. Dr. Fatih TAYLAN

1. Eklemeli İmalatın Tanımı ile Avantaj ve Dezavantajları

Eklemeli İmalat (Eİ) yöntemleri, özellikle talaşlı imalat gibi geleneksel yöntemler ile imalat süreci zor ya da mümkün olmayan karmaşık geometrili parçaların üretimini sağlayan bir yaklaşımdır. 3 boyutlu baskı, hızlı prototipleme veya katmanlı imalat olarak da bilinen bu yöntem, 3 boyutlu grafik verilerini kullanarak katmanlar halinde malzeme birleştirme sürecini içerir (Frazier, 2014).

Eİ yöntemleri, nihai geometriye ulaşmak için malzeme ekleyerek ilerler, bu da metal, plastik, kompozit ve seramik gibi farklı malzeme gruplarından imalatları mümkün kılar. Bu malzemeler toz, ergiyik, filament veya sac formunda olabilir (Bourell vd., 2017; Dzogbewu, 2020). ASTM'nin 2012'deki çalışması sonucunda, Eİ yöntemleri metal, seramik, kompozit, plastik gibi yaygın mühendislik malzemelerine ek olarak alçı, kum, mum ve kâğıt gibi ek malzemelerin kullanımını da içeren bir sınıflandırmaya tabi tutulmuştur ([ASTMF], 2023).

Son yıllarda, Eİ yöntemleri özellikle uzay-havacılık, medikal, otomotiv ve kalıpçılık gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Pereira vd., 2019). Ancak, bu yöntemlerin geleneksel yöntemlere kıyasla yüksek yüzey pürüzlülüğü, ısıl artık gerilme, yüksek maliyet ve malzeme kısıtlamaları gibi dezavantajları bulunmaktadır (Kumbhar ve Mulay, 2016; Mehahed vd., 2016; Padasak, 2022). Bu dezavantajları aşmak için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Örneğin, artık gerilmeyi azaltmak için imalat sonrası gerilim giderme tavlaması veya laser shock peening gibi işlemler uygulanabilir. Ayrıca, imalat öncesi topoloji çalışmaları ile destek yapılarının optimizasyonu gibi yöntemler de kullanılmaktadır (Wang ve Chou, 2019; Cheng vd., 2019).

Eİ ile üretilen parçaların yüzey kalitesinin geleneksel yöntemlere kıyasla düşük olması, özellikle metal parçaların yorulma dayanımını etkileyebilir. Bu durum, özellikle uzay-havacılık ve türbin uygulamaları gibi alanlarda önemli bir mekanik özelliktir (Ippolito vd., 1995; Abuaf vd., 1998). Yorulma dayanımı, parlak yüzeylerde aranan bir kriter olup, pürüzlü yüzeylerin aşınma hızını artırarak kullanım ömrünü azaltabilir (Melchels vd., 2012; Zadpoor ve Malda, 2017).

Eklemeli İmalat ile imal edilmiş metal parçaların yüzey kalitesini arttırmak amacıyla günümüzde kullanılan modern yöntemlerden en yaygını lazer parlatma (LP) işlemidir. Geleneksel talaş kaldırmaya dayalı parlatma işlemlerinin aksine, lazer parlatma işleminde herhangi bir kuvvet uygulaması gerekmez. Bu yöntemde, lazer ışınları iş parçasının yüzeyine gönderildiğinde, yüzeyde meydana gelen ergime-katılaşma sonucunda parçanın yüzey kalitesi artar (Ma vd., 2017). Yeterli enerji yoğunluğuna sahip lazer ışını, parça yüzeyi ile temas ettiğinde, yüzeydeki tepecikler ergiyerek çekme kuvvetleri ve yer çekiminin etkisiyle akma eğilimi gösterir, bu da yüzeydeki çukurları doldurur. Nihayetinde gerçekleşen soğuma sürecinin ardından çukurları dolduran ergiyik havuzları çatlak ve gözeneklerden arındırılmış bir şekilde katılaşır. Bu süreç sayesinde morfolojik süreksizlikler azaltılarak iş parçasının yüzey kalitesi arttırılır.

Katmanların üst üste eklenerek parçaların oluşturulduğu Eİ yöntemleri geleneksel yöntemlere kıyasla bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu avantajları şu şekilde sıralanabilir:

1. Eklemeli İmalat yöntemleri, karmaşık geometrili tasarımların ekonomik bir şekilde üretilmesine olanak tanır. Özellikle petek iç yapılı tasarımlar (Ergene ve Yalçın, 2022) veya içerisinde kanallar bulunan karmaşık dizaynlar (Gibson vd., 2015) gibi örnekler, Eİ yöntemleri ile başarıyla imal edilebilir. Bu yöntemler, nete yakın şekil (near-net shape) parçaların üretimini mümkün kılar (Yadroitsev vd., 2009). Özellikle, geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük maliyetle karmaşık şekillere sahip modeller elde etmek mümkündür (Caputo vd., 2018).

2. Eİ yöntemleri, aynı yapı içinde farklı malzemelerin kullanılmasına izin verirken, konvansiyonel yöntemler tek bir malzeme ile sınırlıdır. Bu özellik, farklı malzemelerin bir araya getirilmesini ve karmaşık tasarımların yapılmasını sağlar (Bandyopadhyay ve Heer, 2018). Çeşitli araştırmalar, Eİ yöntemlerinin farklı malzemeleri başarılı bir şekilde birleştirebildiğini göstermektedir. Örneğin, Das vd. (2010) Ti-6Al-4V metal alaşımı ile SiC seramik alaşımını birleştirerek yüksek mekanik performansa sahip seramik kaplamalı Ti alaşımları üretebilmiştir. Carroll vd. (2016), 304L paslanmaz çelik ile Inconel 625 alaşımını aynı parça içinde kullanarak lokal olarak farklı mekanik

özelliklere sahip geçişli bir parça imal etmiştir. Zhang ve Bandyopadhyay (2018) tarafından yapılan çalışmada, Ti-6Al-4V titanyum ve Al2O3 seramik alaşımları arasında geçişli bir yapı oluşturularak parça üzerinde farklı sertlik değerleri elde edilmiştir. Melzer vd. (2021), 316L paslanmaz çelik ve Inconel 718 kullanarak geçişli malzeme yapısını oluşturmuştur. Eİ yöntemleri aynı zamanda kompozit ve polimer malzemelerin aynı yapı içinde kullanılmasına da olanak tanır. Örneğin, Billah vd. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, polikarbonat (PC) ile karbon fiber (CF) beraber kullanılarak sadece PC'den imal edilen numunelere kıyasla %7 daha fazla dayanım elde edilmiştir.

3. Geleneksel imalat yöntemlerinde, tezgâh operatörünün kalifiye olması nihai ürün kalitesini etkiler. Ancak eklemeli imalat sürecinde tezgâh operatörlüğüne ihtiyaç olmadığı için, kalifiye iş gücü talebi ortadan kalkar. Bu da demektir ki, 3B tasarım yapabilen herkes, eklemeli imalatla parça üretimine katkıda bulunabilir (Berman, 2012).

4. Konvansiyonel yöntemlerde malzemeden malzeme eksiltme prensibiyle çalışılması atık malzeme oluşumuna yol açar, ancak eklemeli imalat yöntemlerinde bu sorun ortadan kalkar. Bu özellik, eklemeli imalatı çevre dostu bir teknoloji haline getirir (Berman, 2012). Ayrıca son yıllarda, eklemeli imalatta atık termoplastik (Di ve Yang, 2022) ve biyomalzemelerin (Romani vd., 2023) ham madde olarak kullanılabilmesi, atık yönetimi açısından eklemeli imalatı daha değerli kılmaktadır.

5. Eklemeli imalat yöntemlerinde, parçanın boyut hassasiyeti operatörün yeteneklerinden bağımsız olarak mikron seviyesinde kontrol edilebilir. Bu, katman kalınlığı ve lazer parametreleri gibi faktörlerin yazılım üzerinden simülasyon yapılarak boyut hassasiyetinin kontrol altında tutulmasını sağlar. Bu kontrol süreci, konvansiyonel yöntemlerdeki kalite kontrol sürecine kıyasla daha hızlı gerçekleşir (du Plessis vd., 2018).

Eklemeli imalat, konvansiyonel yöntemlere göre birçok avantaja sahip olsa da bazı kısıtlayıcı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar şu şekildedir:

1. Eklemeli İmalat teknolojisi, kişiye ve özel ihtiyaçlara yönelik düşük hacimli üretimlerde ekonomik olabilir. Ancak, özellikle karmaşık geometriye sahip olmayan parçaların seri üretimi konusunda, konvansiyonel yöntemlere kıyasla hem daha yavaş hem de daha maliyetli olabilir (Gao vd., 2015; Shang ve Sun, 2020).

2. Metal eklemeli imalat süreçlerinde, kullanılan malzemenin ısı altında oksijenle temasını engellemek ve yüzeyde oksit tabakası oluşumunu önlemek amacıyla imalat atmosferi kontrollü kapalı haznelerde gerçekleştirilir. Bu kapalı haznenin boyutu ve içindeki imalat tablasının boyutları, imal edilecek parçanın maksimum boyutlarını belirler. Bu bağlamda, metal eklemeli imalatla üretilen parçaların boyutları, kapalı hazne ve imalat tablasının boyutlarına bağlı olarak sınırlanabilir (Lehmann vd., 2021).

3. Metal eklemeli imalat, metal tozlarının lazerle ergitilip sinterlenip soğuyup katılaşması prensibine dayanır (Lane vd., 2016). Bu süreçte, parça içinde ani genleşme ve büzülmeler meydana gelir. Eğer iç gerilmeler malzemenin akma dayanımını aşarsa, parçada çatlaklar ve burulmalar gibi plastik deformasyonlar oluşabilir (Robinson vd., 2018). Bu nedenle, parçalar genellikle imalat sonrası gerilim giderme tavlaması veya bilyeli dövme gibi ikincil işlemlere tabi tutulur. İmalat sırasında oluşan iç gerilmelerin büyük bir kısmı ikincil işlemlerle giderilebilir, ancak tamamen ortadan kaldırılması mümkün değildir (Kayacan vd., 2019).

4. Eklemeli İmalat ile üretilen metal parçalardaki yüzey kalitesi, özellikle yüzey pürüzlülüğünün istenmediği durumlarda önemli bir kısıtlama olabilir. Eİ süreçlerinde yaşanabilen bazı olumsuzluklar nedeniyle metal parçaların yüzey kalitesi istenen seviyede elde edilemeyebilir. Örneğin, medikal alanda kullanılacak Eİ numunelerin yüzeyi genellikle hücre tutunmasını desteklemek amacıyla pürüzlü istenir (Melchels vd., 2012; Zadpoor ve Malda, 2017). Ancak, genel olarak imal edilen metal parçaların yüzey kalitesi, yorulma dayanımını artırmak için pürüzsüz olması tercih edilir (Gockel vd., 2019).

2. Lazer Parlatmanın Tanımı ve Prensipleri

Lazer parlatma, lazerin enerji kaynağı olarak kullanıldığı ısıl tabanlı bir yüzey iyileştirme işlemidir. Yüksek mukavemetli seramikler, süper alaşımlar ve performans polimerleri gibi yeni nesil malzemelerin kullanımının artmasıyla birlikte, lazer gibi alternatif çözümlerin değeri artmaktadır (Chryssolouris vd., 1998; Ikesue ve Aung, 2008).

Geleneksel yüzey parlatma işlemleri, genellikle mekanik veya elektrokimyasal olmalarına rağmen birden fazla işlem basamağı içerdikleri için uzun süreler ve yüksek maliyetler gerektirebilir. Bu yöntemler, operatörün becerisine bağlı olarak her seferinde farklı sonuçlara yol açabilir (Krishnan ve Fang, 2019). Bu nedenlerden dolayı, lazer parlatma yöntemi hem araştırmacılar hem de firmalar tarafından tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir.

Lazer parlatmanın temel prensibi, lazer ışınlarıyla yüzeyin tekrar ergitilip katılaştırılmasına dayanmaktadır (Temmler vd., 2011). Mekanik kuvvetlerin olmadığı bu yöntemde, parça yüzeyi kontrollü bir ergitme-katılaştırma süreci ile iyileştirilir (Ma vd., 2017). Lazer parlatma öncelikle metal yüzeylerde kullanılmakla birlikte, artık neredeyse tüm malzeme türlerinde uygulanabilmektedir. Metaller dışında, plastikler, elmaslar ve mikro-optik malzemeler de lazer parlatma ile işlenebilmektedir (Zhihao vd., 2018).
Lazer parlatma işleminde üç ana parametre belirleyici rol oynamaktadır (Lamikiz vd., 2007):

- İşlenecek parçanın malzemesi,
- İşlenmemiş parçanın yüzey kalitesi,
- Lazerin enerji yoğunluğu.

Kumstel ve Kirsch (2013) yaptıkları çalışmada, işlenecek malzeme türünün işlem sonrası elde edilen nihai yüzey kalitesini etkilediğini belirtmiştir. Çalışmalarında, başlangıç yüzey kalitesi R_a=1.0 µm olan Ti-6Al-4V ve Inconel 718 alaşımları, aynı parametreler kullanılarak işlendikten sonra sırasıyla R_a=0.16 µm ve R_a=0.11 µm yüzey pürüzlülük değerlerine ulaşmıştır.

Malzeme türünün yanı sıra başlangıç yüzey topografisi ve enerji yoğunluğu da elde edilen nihai yüzey kalitesini etkiler. Yapılan birçok çalışma (Lamikiz vd., 2007; Dadbakhsh vd., 2010; Ukar vd., 2010; Chow vd., 2012; Marimuthu vd., 2015) başlangıç yüzey kalitesinin ve işlem sırasındaki enerji yoğunluğunun

ergiyik havuzu büyük ölçüde etkilediğini göstermiştir. Örneğin, Lamikiz vd. (2007) çalışmasında, 600 W ile 1 200 W lazer gücü ile işlenen LaserForm ST-100 paslanmaz çeliğinde (diğer işlem parametreleri sabit tutulmuştur) meydana gelen yüzey kalitesi iyileşmesi 600 W için %74.8, 1 200 W için %82.7'dir. Benzer şekilde, Ukar vd. (2010) deneyleri sırasında DIN 1.2379 takım çeliğini farklı enerji yoğunluklarında işleyerek 1 000 ile 1 500 J/cm^2 enerji yoğunluğu aralığında en iyi sonuçları aldıklarını raporlamıştır.

Lazer parlatma yöntemi geniş bir malzeme yelpazesine uygulanabilir. Ancak, parçaların yüzeysel özelliklerine bağlı olarak farklı türde işlemlere tabi tutulur. Bu nedenle, lazer parlatma işlemi genellikle mikro ve makro boyutlarda olmak üzere iki ana türde uygulanır: Makro ve mikro parlatma.

Makro parlatma, sürekli lazer ışımasıyla daha büyük ergime alanları oluşturmak için kullanılır. Bu yöntemde, 200-300 W güç kaynağıyla 20-200 µm derinliğe sahip ergiyik havuzlar oluşturulabilir (Temmler vd., 2012; Pong-Ryol vd., 2015). Ergitilecek bölgenin derinliği başlangıç yüzey kalitesine ve işlem parametrelerine bağlı olarak ayarlanmalıdır, aksi takdirde sağlıklı bir yüzey iyileştirme işlemi engellenebilir.

Makro parlatma için lazer hızı, malzemenin başlangıç yüzey topografisine ve mekanik özelliklerine bağlı olarak genellikle 50 ile 100 sn/cm^2 arasında kabul edilir (Nüsser vd., 2011; Rosa vd., 2015). Elde edilen yüzey kalitesi, başlangıç yüzey kalitesi, malzeme türü ve homojenite gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir (Kiedrowski, 2009). Makro parlatma genellikle kaba yüzeylerin işlenmesinde kullanılırken, mikro parlatma daha pürüzsüz yüzeylerin iyileştirilmesinde tercih edilir. Willenborg (2011) tarafından yapılan bir çalışmada farklı başlangıç yüzey pürüzlülüklerine sahip takım çelikleri (1.2343, 1.2344, 1.2316, 1.2365 ve 1.3344) ile Ti-6Al-4V alaşımları makro ve mikro boyutlarda işlenmiştir. Her iki yöntem incelendiğinde, makro parlatmanın daha kaliteli yüzeyler oluşturmak için mikro parlatmadan önce uygulandığı ve mikro parlatmanın kaba yüzeylerin makro olarak işlenmesinin ardından parçaya nihai sonucu kazandıracak ince ve hassas bir işlem olduğu düşünülebilir.

Daha iyi yüzey kalitesine sahip parçaların lazerle parlatılmasında mikro boyutta lazer parlatma yöntemi kullanılır. Bu parlatma yönteminde, ergitme makro parlatmadan farklı olarak, aralıklı (atımlı) lazer ışıması kullanılarak

sağlanır. 2-5 sn/cm^2 arasındaki tarama hızlarıyla yapılan mikro parlatma, makro parlatmaya kıyasla daha hızlı gerçekleşir (Willenborg, 2011); ergiyik havuzun derinliği ise 0.5 ile 5 µm arasında değişir (Temmler vd., 2012).

Mikro parlatma, başlangıç yüzey kalitesi yüksek parçaların işlenmesine olanak tanıdığı için, öncesinde taşlama, frezeleme ya da tornalama işlemleri ile yüzeyleri iyileştirilmiş parçaların daha ileri düzeyde işlenmesini mümkün kılar (Kim vd., 2004; Perry vd., 2009a; Perry vd., 2009b; Krishnan ve Fang, 2019).

Makro ile mikro parlatma arasındaki en büyük fark lazer ışınının frekansı, dolayısıyla parça yüzeyinde oluşan enerji yoğunluğudur (Pong-Ryol vd., 2015). Makro yüzeylerin iyileştirilmesi için daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip sürekli lazer ışıması kullanılırken, mikro yüzeyler için daha az enerji yoğunluklu aralıklı lazer ışıması tercih edilir (Pong-Ryol vd., 2015). Kullanılan lazer türünün farklılığından ötürü makro parlatmada kesintisiz bir ergiyik havuz formasyonu söz konusu olurken, mikro parlatmada ergiyik havuzları iki lazer ışıması arasındaki sürede katılaşır, dolayısıyla bir sonraki lazer ışıması ile meydana gelen ergiyik havuz, katılaşan ergiyik havuzunun yanında oluşarak kesikli bir görüntü meydana getirir (Temmler vd., 2012). Bu bağlamda, mikro parlatma için en önemli parametreler ışın aralık süresi ve ışıma yoğunluğudur (Obeidi vd., 2022).

Sürekli lazer ışıması, makro parlatma işleminde tercih edilen lazer türüdür. Bu lazer türünde yapılan parlatma işlemlerinde sürekli ve kesintisiz bir lazer uygulaması olduğu için oluşan ergiyik havuzu sabit ve kesintisiz bir dikiş gibi gözükmektedir. Sürekli lazerin oluşturduğu enerji yoğunluğu, ışın çapı, lazer gücü ve tarama hızı gibi faktörlere bağlıdır. Makro parlatmada düşük işlem hızları nedeniyle, sürekli lazer ile işlenmiş yüzeylerin mikro parlatmaya kıyasla daha yüksek enerji yoğunluklarına sahip olduğu gözlemlenir. Bu durum, sürekli lazer ile işlenen yüzeylerin ısıdan etkilenen bölgelerinin mikro parlatmaya oranla daha büyük olduğunu ve oluşan ergiyik havuzların daha derin olduğunu gösterir (Bordatchev vd., 2014; Pong-Ryol vd., 2015). Sürekli lazerler, yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle Nikel, Titanyum ve Kobalt gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin işlenmesini mümkün kılar. Ancak sürekli bir ışıma sağladığı için, özel durumlar ve geometriler için kesikli ışımanın gerektiği durumlarda aralıklı lazer ışıması daha tercih edilebilir hale gelmektedir (Mishra ve Yadava, 2015).

Aralıklı (atımlı) lazer ışımaları, mikro boyutta yapılan parlatma işlemleri için kullanılan bir lazer türüdür. Bu ışımada meydana gelen kesikli lazer ışınları, ergiyik havuzlar oluşturur ve bu havuzlar hızlıca soğuyarak katılaşırlar. Aralıklı lazerle yapılan parlatmada ergiyik havuzun oluşumu incelendiğinde, sürekli lazerle yapılan işlemlerden farklı olarak stabil ve kesintisiz bir dikiş oluşmadığı gözlemlenir. Tam tersine, birbirine binmiş kesikli formasyonların oluştuğu görülür. Bu durumun temel nedeni, aralıklı lazer ışımasının neden olduğu anlık ergime ve katılaşma rejimleridir (Dos Santos Solheid vd., 2018).

Daha önce belirtildiği gibi, lazer parlatma işlemi, parça yüzeyinin sürekli veya aralıklı lazer ışıması kullanılarak ince bir katman halinde ergitilmesine dayanmaktadır. Işıma sonucu oluşan ergiyik havuzlar, yüzeydeki çukurcuklara doğru akarak, parçanın nihai yüzey kalitesini arttırır. Bu sürecin başarılı bir şekilde gerçekleşebilmesi için yüzeydeki çıkıntıların ergiyebilecek sıcaklıklara kadar ısıtılması gereklidir. Ancak, ısıtmanın optimum değerlerin üstüne çıkması, çukurcukların aşırı ergime formasyonuna yol açabilir, bu da yüzey kalitesinin bozulmasına neden olabilir. Çeşitli çalışmalar (Tokarev vd., 1995; Shao vd., 2005; Nowak vd., 2006; Lamikiz vd., 2007; Dadbakhsh vd., 2010; Ukar vd., 2010; Chow vd., 2012; Marimuthu vd., 2015; Ma vd., 2017) işlem parametrelerinin, enerji yoğunluğu, tarama hızı, ışın çapı, lazer frekansı ve ışın aralık süresi gibi faktörlerin optimize edilmesinin sağlıklı bir yüzey iyileştirme işlemi için önemli olduğunu göstermektedir.

Genel olarak incelendiğinde, lazer parlatma işleminin sonuçları üç ana parametre grubuna bağlıdır:

- İş parçasının metalurjik özellikleri: Başlangıç yüzey kalitesi, homojenite, termal ve optik özellikler
- Lazerle alakalı parametreler: Lazer gücü, ışın çapı, ışın aralık süresi, enerji yoğunluğu ve fokal offset mesafesi
- Tarama ile alakalı parametreler: Tarama hızı, ışın örtüşme sayısı ve oranı.

2.1. Enerji yoğunluğu

Parlatma işleminin temel prensibi, enerji yoğunluğunun doğru bir şekilde ayarlanmasıdır (Lamikiz vd., 2007; Temmler vd., 2012). Enerji yoğunluğu

(ED), temel olarak malzeme üzerindeki belli bir alana birim zamanda aktarılan lazer gücüdür. Literatürde farklı ED eşitlikleri yer almaktadır. Bu denklemler arasında en yaygın kullanılanların başında Lamikiz vd. (2007)'nin çalışmasında yer alan ve Denklem 1'de verilen eşitliktir.

$$ED = \frac{6000.P}{D.V_f} \quad J/cm^2 \tag{1}$$

Bu eşitlikte;
P: lazer gücünü (W),
D: ışın çapını (mm)
V_f: tarama hızını (mm/sn) ifade etmektedir.

Enerji yoğunluğunun hesaplanması noktasında yaygın olarak kullanılan eşitliklerden bir diğeri ise Jaritngam vd. (2020) tarafından ifade edilen ve Denklem 2'de verilen eşitliktir.

$$ED = \frac{N_{so} \text{ x } P}{V \text{ x } d} \quad J/cm^2 \tag{2}$$

Bu eşitlikte;
P: lazer gücünü (W)
V: tarama hızını (mm/sn)
d: ışın çapını (mm)
N_{so}: ışın örtüşmesinden ötürü oluşan yeniden ısıtma sayısını ifade etmektedir.

N_{so} terimi Denklem 3'te açıklanmıştır. Bu eşitlikteki *ceil* ifadesi tavan fonksiyonunu ifade etmektedir.

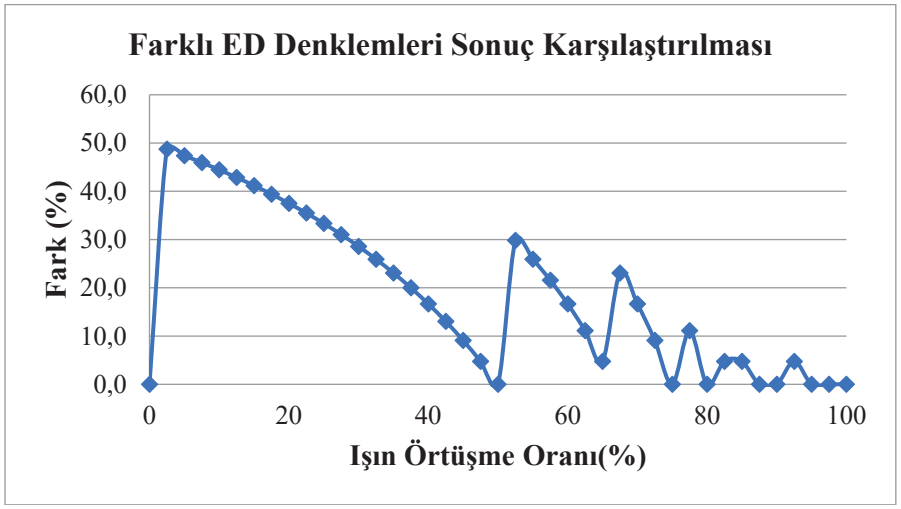
$$N_{so} = \text{ceil}\left(\frac{100}{100 - \%S_o}\right) \tag{3}$$

Denklem 3'te yer alan $\%S_o$ terimi ışın örtüşme oranını ifade etmektedir. Bu ifadenin matematiksel gösterimi ise Denklem 4'te verilmiştir.

$$\%S_o = 100 \text{ x } \frac{d - s}{d} \quad (4)$$

Bu eşitlikte *d* ışın çapını, *s* ise tarama aralığını ifade etmektedir.

Literatürdeki ED formülü çeşitliliği sebebiyle hangi formülün daha geçerli olduğunu anlamak hususunda Ermergen ve Taylan (2024) tarafından bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, eklemeli imalat ile imal edilmiş Ti-6Al-4V titanyum alaşımları çeşitli lazer gücü, tarama hızı ve ışın örtüşme oranlarında işlenmiştir. Lazer parlatma işlemi neticesinde malzeme üzerine etkiyen ED değerleri Denklem 1 ve Denklem 2'de verilen eşitlikler kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma neticesinde Şekil 1'de verilen grafik oluşturulmuştur.



Şekil 1. Farklı ED Denklemlerinin Sonuçlarının Yüzdesel Farkları

Şekil 1'de görüldüğü üzere, ışın örtüşme oranının %0 olduğu durumda iki eşitlik arasındaki sonuç farkı %50 civarındadır. %50 ışın örtüşme oranına kadar azalarak yok olan bu fark, %51 ışın örtüşme oranında tekrar belirmekte, ardından tekrar azalarak grafiğe topun yerde sekmesi gibi bir davranış sergiletmektedir. Yazar tarafından *bounce effect* olarak adlandırılan bu davranış hususunda, %80 ışın örtüşme oranında sonuç farkı %10'un altına inerek kabul edilebilir düzeye gelmektedir. İdeal kabul edilen %90 ışın örtüşme oranında ise sonuçlar arasındaki fark %0 olmaktadır.

Yüksek kaliteli yüzeylerin elde edilmesi için, enerji yoğunluğunun sürekli olarak izlenmesi son derece önemlidir (Pong-Ryol vd., 2015). Çünkü enerji yoğunluğundaki dalgalanmalar veya uyumsuzluklar, istenmeyen erime biçimlerinin oluşumuna neden olabilir. Enerji yoğunluğu ve lazerin nüfuziyet derinliğine bağlı olarak, parça yüzeyinde iki farklı ergime formasyonu meydana gelir: a) Yüzeysel ergime (Surface Shallow Melting - SSM), b) Aşırı ergime (Surface Over Melting - SOM) (Ramos vd., 2002; Lamikiz vd., 2006; Lamikiz vd., 2007; Mohajerani vd., 2017).

SSM ergime formasyonunda, enerji yoğunluğu, parça yüzeyinde ince bir katmanı ergitecek düzeydedir. Bu ergime formasyonunda, yüzeydeki çıkıntılar ergiyerek yüzey gerilmesi ve yerçekimi kuvvetinin etkisiyle çukurlara doğru akar. Bu süreç, yüzey üzerindeki çıkıntı-çukurluk mesafesini azaltarak nihai yüzey kalitesini artırır. SSM formasyonunda, ergimiş havuzunun kalınlığı, çıkıntı-çukurluk mesafesinden daha düşüktür

Eğer ergiyik havuz, yüzeydeki çukurlardan daha derin bir seviyeye ulaşarak büyürse, SOM olarak adlandırılan aşırı ergime formasyonu oluşur. Bu durumda, ergiyik havuzunun kalınlığı, çıkıntı-çukurluk mesafesinden daha büyük olduğundan, parlatma işlemi sırasında tüm metal yüzeyi, ergiyik havuza dahil olarak erir.

2.2. Işın çapı ve örtüşme oranı

Işın çapı, lazerin çıkış noktasındaki çapı olarak tanımlanmaktadır. Lazer çapının boyutu ile alakalı yapılan çalışmalarda (Lamikiz vd., 2007; Temmler vd., 2012; Pfefferkorn vd., 2014; Chang vd., 2016), ışın çapının numune yüzeyine aktarılan enerji yoğunluğu ile doğrudan alakalı olduğu belirtilmiştir. Işın çapındaki artış, lazerin malzemeye uygulanan etki alanını genişletse de bu durum birim alanda meydana gelen enerji yoğunluğunun daha küçük çaplara kıyasla düşük olmasından kaynaklı bir yetersiz ergime sonucuna yol açabilir. Bu nedenle, lazer çapının belirli optimum değerlerin dışında olması istenen bir durum değildir. Aynı şekilde, lazer çapı belirli bir aralıktan daha küçükse, birim alandaki enerji yoğunluğu artar ve bu durum yüzeyde yanmalara sebep olabilir.

Lazer sinterleme ve lazer parlatma işlemlerinde, sinterlenen bölgelerin ve parlak yüzeylerin oluşturulması, lazer ışınının paralel bir şekilde hareket

etmesi ve birbirine bir miktar örtüşme yapması esasına dayanır. Bu örtüşme miktarı, işlenen yüzeylerin kalitesini belirleyen kritik bir faktördür. Lazer parlatma sürecinde, talaşlı imalattan farklı olarak, çok az veya çok fazla örtüşmenin olması istenmez. Zira bu durum, SOM formasyonunu ortaya çıkararak parçanın yüzey kalitesini olumsuz etkileyebilir (Hafiz vd., 2012). %0 örtüşme oranı, iki lazer taraması arasında hiçbir örtüşme olmadığını ifade ederken, %100 örtüşme oranı ise lazerin bir önceki taramasıyla aynı yerden tekrar geçtiği anlamına gelmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde (Hafiz vd., 2012; Pong-Ryol vd., 2015; Ermergen ve Taylan; 2024) ışın örtüşme oranının %90 civarında olması ideal bir durum olarak değerlendirilmektedir.

2.3. Lazer tarama hızı

Lazerle ilgili parametrelerin yanı sıra, tarama hızı da parlatma işlemi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Mikro parlatmada, tarama hızı birim mesafedeki ışın atım sayısını temsil ederken, makro parlatma için lazerin yataydaki hızını (mm/sn) ifade etmektedir. Denklem 1 ve 2'ye göz atıldığında, tarama hızının, enerji yoğunluğunu doğrudan etkilediği görülmektedir. Gerçekten de tarama hızının optimum değerlerin dışında olduğu durumlarda istenmeyen yüzey profilleri oluşabilir. Guo vd. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı başlangıç yüzey kalitelerine sahip AISI 01 takım çelikleri çeşitli tarama hızlarıyla işlenmiştir. Sonuç olarak, çok yüksek veya düşük tarama hızlarının yüzeydeki pürüzlülükleri artırarak yüzey kalitesini bozduğu tespit edilmiştir.

Başka bir benzer çalışmada (Rosa vd., 2016), tarama hızının eklemeli imalat ile imal edilmiş metal yüzeyleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. En ideal yüzey kalitesinin belli bir tarama hızı aralığında elde edildiği, tarama hızlarının söz konusu bu optimum değerlerden daha düşük ya da yüksek olması durumunda yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür.

2.4. Yüzey morfolojisi

Lazer parlatma, yüzey kalitesini arttıran bir işlem olduğu için, işlem sonrasında parça yüzeyinin morfolojisinde değişiklikler beklenmektedir. Bu değişiklikler, yüzey pürüzlülüğünün yanı sıra tane yapısının ve yüzey sertliğinin de lazer parlatma sonucunda gözlenen etkiler arasında yer alır.

Yüzey kalitesindeki değişikliklerin yanı sıra, lazer parlatma işleminin bir sonucu olarak yüzey morfolojisinde de belirgin değişiklikler meydana gelir. Ma vd. (2017) tarafından belirtildiğine göre, lazerle maruz kalan malzemeler, faz değişikliklerine uğramaktadır. Normal şartlarda, eklemeli imalat ile üretilmiş Ti-6Al-4V numuneler α+β fazlarına sahipken, lazer parlatma işlemine maruz bırakılan aynı numunelerde bir martenzitik α fazı oluştuğu gözlenmiştir. Bu değişiklik, lazerin temas ettiği bölgenin ani ısınması ve soğumasından kaynaklanmaktadır. Bu faz değişikliklerinin en belirgin sonuçlarından biri yüzey sertliğindeki artıştır. Ma vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, lazer parlatmaya tabi tutulan Ti-6Al-4V alaşımlarında %32'lik bir sertlik artışı bildirilmiştir. Bu bulgu, Yung vd. (2018)'nin CoCr alaşımında %8'lik, Zhihao vd. (2018)'un Inconel 718 alaşımında %27'lik, Temmler vd. (2020)'un H11 takım çeliğinde %10'luk ve Xu vd. (2021)'nin ise TiAl alaşımında %8'lik bir sertlik artışını desteklemektedir.

3. Lazer Parlatmanın Avantaj ve Dezavantajları

Eklemeli imalatla üretilen metal parçalarda yüzey iyileştirme süreçlerine olan ihtiyaç, son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Yüzey pürüzlülüğünü giderme konusunda birçok yöntem bulunmasına rağmen, karmaşık geometrilere sahip parçaların hassas bir şekilde işlenebilmesine olanak tanıyan lazer parlatma yöntemi giderek daha popüler hale gelmektedir. Lazer parlatma yönteminin kendine özgü avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlar genel olarak şu şekilde sıralanabilir:

- Parçanın belirli bir bölgesinin işlenebilmesine olanak tanıma
- Daha hızlı işleme imkânı sağlama
- Geleneksel taşlama yöntemlerine tabi tutulmuş parçaların daha ileri düzeyde işlenebilmesi
- Herhangi bir talaş veya kimyasal atık oluşmaması sebebiyle çevre dostu olması
- Mekanik kuvvet gerektirmemesi
- Kaplanmış yüzeylerin işlenmesine olanak tanıma
- Geleneksel yöntemlerle işlenemeyecek kadar karmaşık geometrilere sahip parçaların işlenebilmesi

Ancak, lazer parlatma yöntemi bazı dezavantajlar da içermektedir. Yüksek ilk yatırım maliyetleri ve pahalı bakım süreçleri, bu yöntemin endüstride

uygulanabilirliğini sınırlayabilir. Ayrıca, hassas bir parametre kontrolü gerekliliği, yanlış enerji yoğunlukları, tarama hızları veya aralık süreleri gibi hataların yüzey kalitesini olumsuz etkileme riskini taşır. Lazer parlatma, bir parçanın yüzeyini tekrar eritme ve yeniden katılaştırma prensibine dayanan bir ısıl işlemdir. Yanlış ergime ve katılaşma süreçleri, yüzey kalitesini bozabilir ve mekanik özellikleri olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, bu hatalı ergime ve katılaşmanın, malzeme yüzeyinde ek gerilmelere neden olarak parçanın nihayetinde zarar görmesine yol açabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

Abuaf, N., Bunker, R. S., & Lee, C. P. (1998). Effects of surface roughness on heat transfer and aerodynamic performance of turbine airfoils. *Journal of Turbomachinery, 120*(3), 522–529. https://doi.org/10.1115/1.2841749

ASTM (2023, June, 16). *Committeee F42 on additive manufacturing technologies.* https://www.astm.org/get-involved/technical-committees/ committee-f42/subcommittee-f42

Bandyopadhyay, A., & Heer, B. (2018). Additive manufacturing of multi-material structures. Materials *Science and Engineering: R: Reports, 129*, 1–16. https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.04.001

Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons, 55*(2), 155–162. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003

Billah, K. M. M., Coronel, J. L., Chavez, L., Lin, Y., & Espalin, D. (2021). Additive manufacturing of multimaterial and multifunctional structures via ultrasonic embedding of continuous carbon fiber. *Composites Part C: Open Access, 5*, 100149. https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100149

Bordatchev, E. V., Hafiz, A. M. K., & Tutunea-Fatan, O. R. (2014). Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 73*(1–4), 35–52. https://doi.org/10.1007/s00170-014-5761-3

Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., & Clare, A. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals, 66*(2), 659–681. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009

Caputo, M. P., Berkowitz, A. E., Armstrong, A., Müllner, P., & Solomon, C. V. (2018). 4D printing of net shape parts made from Ni-Mn-Ga magnetic shape-memory alloys. *Additive Manufacturing, 21*, 579–588. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.028

Carroll, B. E., Otis, R. A., Borgonia, J. P., Suh, J., Dillon, R. P., Shapiro, A. A., Hofmann, D. C., Liu, Z.-K., & Beese, A. M. (2016). Functionally graded material of 304L stainless steel and inconel 625 fabricated by directed energy deposition: Characterization and thermodynamic modeling. *Acta Materialia, 108*, 46–54. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.02.019

Chang, C.-S., Chung, C.-K., & Lin, J.-F. (2016). Surface quality, microstructure, mechanical properties and tribological results of the SKD 61 tool steel with prior heat treatment affected by the deposited energy of continuous wave laser micro-polishing. *Journal of Materials Processing Technology, 234*, 177–194. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.03.024

Cheng, L., Liang, X., Bai, J., Chen, Q., Lemon, J., & To, A. (2019). On utilizing topology optimization to design support structure to prevent residual stress induced build failure in laser powder bed metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing, 27*, 290–304. https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.001

Chryssolouris, G., Anifantis, N., & Karagiannis, S. (1997). Laser assisted machining: An overview. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, 119*(4B), 766–769. https://doi.org/10.1115/1.2836822

Chow, M. T. C., Bordatchev, E. V., & Knopf, G. K. (2013). Experimental study on the effect of varying focal offset distance on laser micropolished surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67*(9–12), 2607–2617. https://doi.org/10.1007/s00170-012-4677-z

Dadbakhsh, S., Hao, L., & Kong, C. Y. (2010). Surface finish improvement of LMD samples using laser polishing. *Virtual and Physical Prototyping, 5*(4), 215–221. https://doi.org/10.1080/17452759.2010.528180

Das, M., Balla, V. K., Basu, D., Bose, S., & Bandyopadhyay, A. (2010). Laser processing of SiC-particle-reinforced coating on titanium. *Scripta Materialia, 63*(4), 438–441. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.04.044

Di, L., & Yang, Y. (2022). Towards closed-loop material flow in additive manufacturing: Recyclability analysis of thermoplastic waste. *Journal of*

Cleaner Production, 362, 132427. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132427

Dos Santos Solheid, J., Jürgen Seifert, H., & Pfleging, W. (2018). Laser surface modification and polishing of additive manufactured metallic parts. *Procedia CIRP, 74*, 280–284. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.111

Du Plessis, A., Sperling, P., Beerlink, A., Du Preez, W. B., & Le Roux, S. G. (2018). Standard method for microCT-based additive manufacturing quality control 4: Metal powder analysis. *MethodsX, 5*, 1336–1345. https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.10.021

Dzogbewu, T. C. (2020). Additive manufacturing of TiAl-based alloys. *Manufacturing Review, 7*, 35. https://doi.org/10.1051/mfreview/2020032

Ergene, B., & Yalçin, B. (2022). Eriyik yığma modelleme (Eym) ile üretilen çeşitli hücresel yapıların mekanik performanslarının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 38*(1), 201–218. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.945650

Ermergen, T., & Taylan, F. (2024). Investigation of DOE model analyses for open atmosphere laser polishing of additively manufactured Ti-6Al-4V samples by using ANOVA. *Optics & Laser Technology, 168*, 109832. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109832

Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance, 23*(6), 1917–1928. https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z

Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design, 69*, 65–89. https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001

Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Springer.

Gockel, J., Sheridan, L., Koerper, B., & Whip, B. (2019). The influence of additive manufacturing processing parameters on surface roughness and fatigue life. *International Journal of Fatigue, 124*, 380–388. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.03.025

Guo, W., Hua, M., Tse, P. W.-T., & Mok, A. C. K. (2012). Process parameters selection for laser polishing DF2 (Aisi o1) by Nd:YAG pulsed laser using orthogonal design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 59*(9–12), 1009–1023. https://doi.org/10.1007/s00170-011-3558-1

Hafiz, A. M. K., Bordatchev, E. V., & Tutunea-Fatan, R. O. (2012). Influence of overlap between the laser beam tracks on surface quality in laser polishing of AISI H13 tool steel. *Journal of Manufacturing Processes, 14*(4), 425–434. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2012.09.004

Ikesue, A., & Aung, Y. L. (2008). Ceramic laser materials. *Nature Photonics, 2*(12), 721–727. https://doi.org/10.1038/nphoton.2008.243

Ippolito, R., Iuliano, L., & Gatto, A. (1995). Benchmarking of rapid prototyping techniques in terms of dimensional accuracy and surface finish. *CIRP Annals, 44*(1), 157–160. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62296-3

Jaritngam, P., Tangwarodomnukun, V., Qi, H., & Dumkum, C. (2020). Surface and subsurface characteristics of laser polished Ti6Al4V titanium alloy. *Optics & Laser Technology, 126*, 106102. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106102

Kayacan, M. Y., Özsoy, K., Duman, B., Yilmaz, N., & Kayacan, M. C. (2019). A study on elimination of failures resulting from layering and internal stresses in Powder Bed Fusion (Pbf) additive manufacturing. *Materials and Manufacturing Processes, 34*(13), 1467–1475. https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1655151

Kiedrowski, T. (2009). *Oberflächenstrukturbildung beim laserstrahlpolieren von Stahlwerkstoffen*. RWTH Aachen University.

Kim, Y.-G., Ryu, J.-K., Kim, D.-J., Kim, H.-J., Lee, S., Cha, B. H., Cha, H., & Kim, C.-J. (2004). Microroughness reduction of tungsten films by laser polishing technology with a line beam. *Japanese Journal of Applied Physics, 43*(4R), 1315. https://doi.org/10.1143/JJAP.43.1315

Krishnan, A., & Fang, F. (2019). Review on mechanism and process of surface polishing using lasers. *Frontiers of Mechanical Engineering, 14*(3), 299–319. https://doi.org/10.1007/s11465-019-0535-0

Kumbhar, N. N., & Mulay, A. V. (2018). Post processing methods used to improve surface finish of products which are manufactured by additive manufacturing technologies: A review. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 99*(4), 481–487. https://doi.org/10.1007/s40032-016-0340-z

Kumstel, J., & Kirsch, B. (2013). Polishing titanium- and nickel-based alloys using cw-laser radiation. *Physics Procedia, 41*, 362–371. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.089

Lamikiz, A., Sánchez, J. A., López De Lacalle, L. N., Del Pozo, D., & Etayo, J. M. (2006). Surface roughness improvement using laser-polishing techniques. *Materials Science Forum, 526*, 217–222. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.526.217

Lamikiz, A., Sánchez, J. A., López De Lacalle, L. N., & Arana, J. L. (2007). Laser polishing of parts built up by selective laser sintering. *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47*(12–13), 2040–2050. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.01.013

Lane, B., Whitenton, E., & Moylan, S. (2016). *Multiple sensor detection of process phenomena in laser powder bed fusion* (J. N. Zalameda & P. Bison, Eds.; p. 986104). https://doi.org/10.1117/12.2224390

Lehmann, T., Rose, D., Ranjbar, E., Ghasri-Khouzani, M., Tavakoli, M., Henein, H., Wolfe, T., & Jawad Qureshi, A. (2022). Large-scale metal additive manufacturing: A holistic review of the state of the art and challenges. *International Materials Reviews, 67*(4), 410–459. https://doi.org/10.1080/09506608.2021.1971427

Ma, C. P., Guan, Y. C., & Zhou, W. (2017). Laser polishing of additive manufactured Ti alloys. *Optics and Lasers in Engineering, 93*, 171–177. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.02.005

Marimuthu, S., Triantaphyllou, A., Antar, M., Wimpenny, D., Morton, H., & Beard, M. (2015). Laser polishing of selective laser melted components. *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 95*, 97–104. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.05.002

Megahed, M., Mindt, H.-W., N'Dri, N., Duan, H., & Desmaison, O. (2016). Metal additive-manufacturing process and residual stress modeling. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation, 5*(1), 61–93. https://doi.org/10.1186/s40192-016-0047-2

Melchels, F. P. W., Domingos, M. A. N., Klein, T. J., Malda, J., Bartolo, P. J., & Hutmacher, D. W. (2012). Additive manufacturing of tissues and organs. Progress in Polymer Science, 37(8), 1079–1104. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007

Melzer, D., Džugan, J., Koukolíková, M., Rzepa, S., & Vavřík, J. (2021). Structural integrity and mechanical properties of the functionally graded material based on 316L/IN718 processed by DED technology. *Materials Science and Engineering: A*, 811, 141038. https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141038

Mishra, S., & Yadava, V. (2015). Laser beam micromachining (Lbmm) – a review. *Optics and Lasers in Engineering, 73*, 89–122. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2015.03.017

Mohajerani, S., Miller, J. D., Tutunea-Fatan, O. R., & Bordatchev, E. V. (2017). Thermo-physical modelling of track width during laser polishing of h13 tool

steel. *Procedia Manufacturing, 10*, 708–719. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.026

Nowak, K. M., Baker, H. J., & Hall, D. R. (2006). Efficient laser polishing of silica micro-optic components. *Applied Optics, 45*(1), 162. https://doi.org/10.1364/AO.45.000162

Nüsser, C., Wehrmann, I., & Willenborg, E. (2011). Influence of intensity distribution and pulse duration on laser micro polishing. *Physics Procedia, 12*, 462–471. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.057

Obeidi, M. A., Mussatto, A., Dogu, M. N., Sreenilayam, S. P., McCarthy, E., Ahad, I. U., Keaveney, S., & Brabazon, D. (2022). Laser surface polishing of Ti-6Al-4V parts manufactured by laser powder bed fusion. *Surface and Coatings Technology, 434*, 128179. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128179

Pasadak (2022). *Advantages & disadvantages of additive manufacturing.* (2022, October 5). https://www.alphaprecisionpm.com/blog/top-10-advantages-and-disadvantages-of-using-additive-manufacturing

Pereira, T., Kennedy, J. V., & Potgieter, J. (2019). A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. *Procedia Manufacturing, 30*, 11–18. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.003

Perry, T. L., Werschmoeller, D., Li, X., Pfefferkorn, F. E., & Duffie, N. A. (2009a). Pulsed laser polishing of micro-milled Ti6Al4V samples. *Journal of Manufacturing Processes, 11*(2), 74–81. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2009.10.001

Perry, T. L., Werschmoeller, D., Duffie, N. A., Li, X., & Pfefferkorn, F. E. (2009b). Examination of selective pulsed laser micropolishing on microfabricated nickel samples using spatial frequency analysis. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, 131*(2), 021002. https://doi.org/10.1115/1.3075874

Pfefferkorn, F. E., Duffie, N. A., Morrow, J. D., & Wang, Q. (2014). Effect of beam diameter on pulsed laser polishing of S7 tool steel. *CIRP Annals, 63*(1), 237–240. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.055

Pong-Ryol, J., Tae-Sok, J., Nam-Chol, K., Xing, F., & kum-Hyok, J. (2016). Laser micro-polishing for metallic surface using UV nano-second pulse laser and CW laser. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 85*(9–12), 2367–2375. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7992-3

Ramos, J. A., Bourell, D. L., & Beaman, J. J. (2002). Surface over-melt during laser polishing of indirect-sls metal parts. *MRS Proceedings, 758*, LL1.9. https://doi.org/10.1557/PROC-758-LL1.9

Robinson, J., Ashton, I., Fox, P., Jones, E., & Sutcliffe, C. (2018). Determination of the effect of scan strategy on residual stress in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing, 23*, 13–24. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.07.001

Romani, A., Suriano, R., & Levi, M. (2023). Biomass waste materials through extrusion-based additive manufacturing: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production, 386*, 135779. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135779

Rosa, B., Mognol, P., & Hascoët, J. (2015). Laser polishing of additive laser manufacturing surfaces. *Journal of Laser Applications, 27*(S2), S29102. https://doi.org/10.2351/1.4906385

Shang, G., & Sun, C. (2020). Effect of 3d printing technology on 3c product manufacturing. World *Journal of Engineering and Technology, 08*(04), 712–719. https://doi.org/10.4236/wjet.2020.84051

Shao, T. M., Hua, M., Tam, H. Y., & Cheung, E. H. M. (2005). An approach to modelling of laser polishing of metals. *Surface and Coatings Technology, 197*(1), 77–84. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.01.010

Temmler, A., Willenborg, E., & Wissenbach, K. (2011). Design surfaces by laser remelting. *Physics Procedia, 12*, 419–430. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.053

Temmler, A., Willenborg, E., & Wissenbach, K. (2012). *Laser polishing* (G. Hennig, X. Xu, B. Gu, & Y. Nakata, Eds.; p. 82430W). https://doi.org/10.1117/12.906001

Temmler, A., Liu, D., Preußner, J., Oeser, S., Luo, J., Poprawe, R., & Schleifenbaum, J. H. (2020). Influence of laser polishing on surface roughness and microstructural properties of the remelted surface boundary layer of tool steel H11. *Materials & Design, 192*, 108689. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108689

Tokarev, V. N., Wilson, J. I. B., Jubber, M. G., John, P., & Milne, D. K. (1995). Modelling of self-limiting laser ablation of rough surfaces: Application to the polishing of diamond films. *Diamond and Related Materials, 4*(3), 169–176. https://doi.org/10.1016/0925-9635(94)00241-X

Ukar, E., Lamikiz, A., López De Lacalle, L. N., Del Pozo, D., & Arana, J. L. (2010). Laser polishing of tool steel with CO2 laser and high-power diode laser. *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 50*(1), 115–125. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.09.003

Wang, W. J., Yung, K. C., Choy, H. S., Xiao, T. Y., & Cai, Z. X. (2018). Effects of laser polishing on surface microstructure and corrosion resistance of additive manufactured CoCr alloys. *Applied Surface Science, 443*, 167–175. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.02.246

Willenborg, E. (2010). Polishing with Laser Radiation. *Material Science*, 196–203

Xu, Z., Ouyang, W., Liu, Y., Jiao, J., Liu, Y., & Zhang, W. (2021). Effects of laser polishing on surface morphology and mechanical properties of additive manufactured TiAl components. *Journal of Manufacturing Processes, 65*, 51–59. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.014

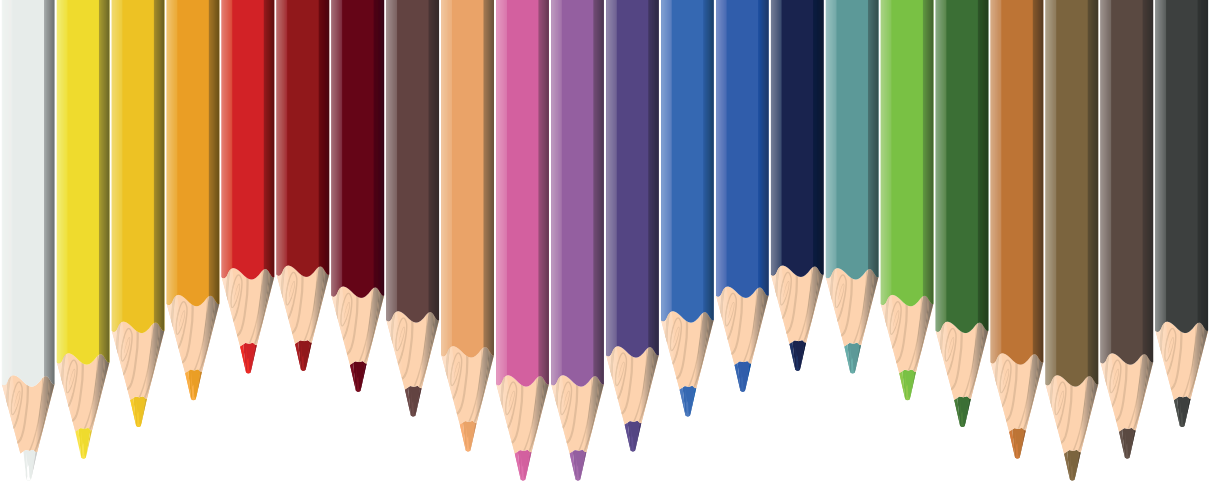
Yadroitsev, I., Shishkovsky, I., Bertrand, P., & Smurov, I. (2009). Manufacturing of fine-structured 3D porous filter elements by selective laser melting. *Applied Surface Science, 255*(10), 5523–5527. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.07.154

Yung, K. C., Xiao, T. Y., Choy, H. S., Wang, W. J., & Cai, Z. X. (2018). Laser polishing of additive manufactured CoCr alloy components with complex surface geometry. *Journal of Materials Processing Technology, 262*, 53–64. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.06.019

Zadpoor, A. A., & Malda, J. (2017). Additive manufacturing of biomaterials, tissues, and organs. *Annals of Biomedical Engineering, 45*(1), 1–11. https://doi.org/10.1007/s10439-016-1719-y

Zhang, Y., & Bandyopadhyay, A. (2018). Direct fabrication of compositionally graded Ti-Al2O3 multi-material structures using Laser Engineered Net Shaping. *Additive Manufacturing, 21*, 104–111. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.001

Zhihao, F., Libin, L., Longfei, C., & Yingchun, G. (2018). Laser polishing of additive manufactured superalloy. *Procedia CIRP, 71*, 150–154. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.088



Bölüm 20

GELECEĞİN ENERJİ KAYNAĞI: GÜNEŞ ENERJİSİ, GÜNEŞ ENERJİSİ UYGULAMALARI, FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİ VE ARICILIKTA KULLANIMI

Sinem KILIÇKAP IŞIK[1]

1 Arş. Gör. Dr. Sinem KILIÇKAP IŞIK. "Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Termodinamik ve Isı Tekniği A.B.D." ve "Bingöl Üniversitesi, Pilot Üniversite Koordinasyon Merkez Birimi (PİKOM)" sinemisik@bingol.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-1044-5092

GİRİŞ

Dünyamız, iklim değişikliği, fosil kaynakların tükenmekte olması ve enerji güvenliği sorunları gibi ciddi zorluklarla yüzleşmektedir. Bu sorunlarla baş etmenin en etkili yolu, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, iklim değişikliğinin önlenmesi, hava kirliliği ve fosil yakıt kullanımının azaltılması, istihdamın artırılması, daha sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanılması, dışa olan enerji bağımlılığının azaltılması ve ülke ekonomisine katkı sağlaması gibi birçok avantajı beraberinde getirir (Kılıç, 2015; Işık ve Yavuz, 2022-a; Işık and Yavuz, 2022-b; Işık and Yavuz, 2022-c; Yamaç and Koca, 2023).

Güneş enerjisi, bu yenilenebilir kaynaklardan biri olarak, elektrik üretiminden elektrikli araçların şarj edilmesine, su ısıtma sistemlerinden evlerin ısıtılmasına, telekomünikasyon sistemlerinden denizcilik ve uzay teknolojilerine, arıcılık uygulamalarına, tarımsal uygulamalardan gıda kurutma ve temiz su damıtma sistemlerine kadar pek çok alanda kullanılabilmektedir (Vijayakumar et al., 2005). Güneş enerjisinin kullanılması, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak çevresel etkileri en aza indirir ve sürdürülebilir enerji uygulamalarının daha geniş bir şekilde benimsenmesini sağlar.

ARICILIKTA YENİLENEBİLİR ENERJİ KULLANIMI

Başta bal arıları olmak üzere arılar, tarımın ve ekosistemin devamlılığını sağlayan canlılardır. Arıların sağlığını korumak ve enerji ihtiyaçlarını karşılamak bu döngünün devamlılığı için oldukça önemlidir. Enerji, arılar ve arı yetiştiricileri için vazgeçilmez bir unsurdur. Arıcılık ekipmanlarının çalıştırılabilmesinde, özellikle zorlu kış şartlarında ve kovanların sabit bir sıcaklıkta tutulabilmesinde, arıcıların yaşamlarını sürdürebilmelerinde, arıcıların yaşam koşullarının iyileştirilebilmesinde, bal sağım dönemlerinde ve modern arıcılık yapılabilmesinde oldukça önemli bir faktördür (Kırbaş, 2021). Arıcılıkla uğraşan yetiştiriciler için gerekli olan enerji ihtiyaçlarının, güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmasını ve bu enerjinin faz değişim malzemeleri ile depolanarak ihtiyaç anında kullanılabilmesini sağlamak, sürdürülebilir enerji üretimini ve dolayısıyla sürdürülebilir arıcılık faaliyetlerini destekleyecektir. Özellikle arıcılık ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonuyla çevre ve

ekonomiye önemli katkılarda bulunulabilir. Bu iki sektörün bir araya getirilmesi, sürdürülebilir arıcılığın gelişimine önemli katkılar sağlanacaktır. Yükseköğretim Kurulu (YÖK) tarafından Bölgesel Kalkınma Odaklı Misyon Farklılaşması ve İhtisaslaşması Programı kapsamında "Tarım ve Havza Bazlı Kalkınma" alanında Pilot Üniversite olarak seçilen Bingöl Üniversitesi arıcılığın sürdürülebilirliği ve enerji ihtiyaçlarının karşılanmasına yönelik çalışmalar yürütmektedir.

TERMAL ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMİ

Mevcut enerjinin daha verimli bir şekilde kullanımına olanak sağlayan enerji depolama sistemleri, son yıllarda hızla artan bir ilgiye sahiptir. Artan enerji tüketimini azaltmanın bir yolu yenilenebilir enerji kullanımını sağlamak iken diğer yolu mevcut enerjiyi depolamaktır. Enerji depolama yöntemleri içinde uzun süredir üzerinde durulan ve en fazla ilgi gören termal enerji depolama (TES) yöntemidir (Demirbaş, 2006; Farid et al., 2004; Sharma et al., 2009). Termal enerji depolama (TES) yöntemi bir malzemenin soğutulması, ısıtılması, eritilmesi, katılaştırılması veya buharlaştırılması yoluyla kazanılan enerjinin ısı olarak geri kullanılabilmesi işlemidir (Dinçer and Rosen, 2021). Sıcak veya soğuk enerjiyi depolamak için kullanılan bir tekniktir (Kalidasan et al., 2022). Üretilen veya sahip olunan enerjinin kullanımında arz-talep ve yer-zaman arasındaki uyumsuzluğu giderebilmesi, termal enerji depolama yönteminin en üstün avantajıdır. Ayrıca, diğer enerji depolama sistemlerine kıyasla enerji depolanırken farklı formlara dönüştürülmeden (termal↔termal) depolandığından çok daha basit sistem tasarımına sahiptirler (Piper et al., 2022).

TES teknolojileri;

i) Duyulur ısıl enerji depolama
ii) Gizli ısıl enerji depolama
iii) Termokimyasal enerji depolama olmak üzere üç sınıfa ayrılırlar.

Gizli ısı depolama yöntemi, duyulur ısı depolama yöntemine kıyasla daha yüksek enerji depolama yoğunluğu ve neredeyse sabit sıcaklıkta çalışma fırsatı sunduğu için daha geniş kullanım alanı bularak termal enerji depolamada en çok tercih edilen yöntem olmaktadır (Pielichowska and

Pielichowski, 2014). Diğer taraftan, yüksek tekrarlanabilirlik (döngüsellik) ve kararlılığı sebebiyle de termokimyasal yöntemlerden daha üstündür.

Depolanan ısı miktarı, ortamın özgül ısısına, sıcaklık değişimine, erime ısısına bağlı olarak değişmektedir. Duyulur ısı ve gizli ısı yöntemiyle depolanan ısı miktarı aşağıda verilen eşitlikler ile belirlenir (Lane, 1983; Sharma et al., 2009; Pielichowska and Pielichowski, 2014).

Duyulur ısı depolama yönteminde depolanan ısı miktarı (Khan et al., 2016; Yang et al., 2020);

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dT = mC_{ap}(T_f - T_i) \qquad \text{(Eşitlik 1)}$$

Gizli ısı depolama yönteminde faz değişim maddesinin ısınma, erime ve katılaşma durumları dikkate alınarak depoladığı ısı miktarı Denklem 2'de verildiği gibidir;

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_p dT + ma_m \Delta H_m + \int_{T_m}^{T_f} mC_p dT \qquad \text{(Eşitlik 2)}$$

(Q: Depolanan ısı miktarı (J); m: Kütle (kg); a_m: Erime fraksiyonu; ΔH_m: Birim kütle başına erime ısısı (J/kg); T_i: İlk sıcaklık (°C); T_f: Son sıcaklık (°C); T_m: Erime sıcaklığı (°C); C_p: Sabit basınç altında özgül ısı (J/kgK); C_{ap}: Sabit basınç altında T_i ve T_f arasındaki ortalama özgül ısı (J/kgK))

Gizli Isı Depolamada Kullanılan Faz Değişim Malzemeleri

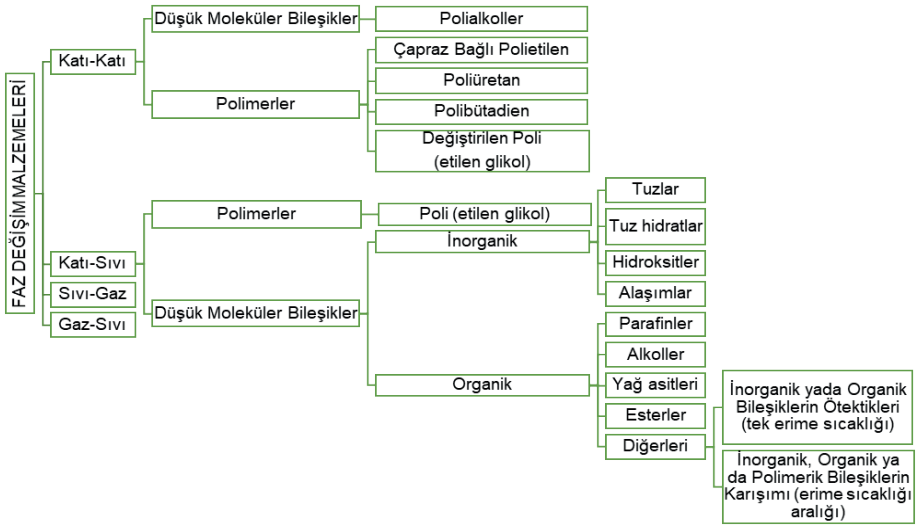
Bir malzeme katıdan sıvıya, sıvıdan gaza veya tam tersi bir faz değişikliğine uğradığında açığa çıkan/emilen enerji, gizli ısı depolaması olarak adlandırılır. Yüksek enerji depolama yoğunluğu sağlayan gizli ısı depolaması, sabit bir sıcaklıkta veya küçük bir sıcaklık değişim aralığında enerji depolama kapasitesine sahiptir (Dutil et al., 2011; Jebasingh and Arasu, 2020). Gizli ısı depolama işleminde, enerjiyi soğurarak depolayabilen ve sonrasında salabilen malzemelere faz değişim malzemeleri (FDM) denir. FDM'ler gizli ısı depolama sisteminin temel bileşenleridir (Sharma et al., 2009). FDM'ler, faz değişimi meydana geldikçe ısıtma sırasında enerjiyi depolar ve daha sonra soğutma sırasında depoladıkları enerjiyi serbest bırakırlar (Mondal, 2008; Al-Jethelah et al., 2018). Küçük hacme ve birim depolama kapasitesi başına düşük ağırlığa sahip olan FDM'ler, erime ve katılaşma sırasında büyük miktarlarda

enerjiyi gizli ısı olarak depolama veya salma kabiliyeti ile yüksek bir füzyon entalpisine sahiptirler (El-Dessouky and Al-Juwayhel,1997; Pielichowska and Pielichowski, 2014; Wu et al., 2020). Faz değişim malzemeleri yaygın olarak tuz hidratlar, parafinler, yağ asitleri, organik ve inorganik olmayan bileşiklerin ötektik karışımları ve polimerler gibi çeşitli malzemelerden oluşurlar. FDM'ler faz değişiminin gerçekleştiği sıcaklık aralığına bağlı olarak 3 ana gruba ayrılırlar (Pielichowska and Pielichowski, 2014; Lin et al., 2018). Bunlar:

1. Düşük sıcaklıklı FDM'ler; Faz geçiş sıcaklığı 15 °C'nin altında olan FDM'lerdir. Genellikle iklimlendirme uygulamalarında ve gıda endüstrisinde kullanılırlar.
2. Orta sıcaklıklı FDM'ler; 15-90 °C aralığında faz geçiş sıcaklığına sahip en fazla tercih edilen FDM'lerdir. Bina tasarımında, güneş enerjisi, medikal, tekstil, elektronik ve enerji tasarrufu uygulamalarında kullanılırlar.
3. Yüksek sıcaklıklı FDM'ler; Faz geçiş sıcaklığı 90 °C'nin üzerinde olan malzemelerdir ve endüstriyel ısı kayıplarının geri kazanımında ve havacılık uygulamalarında tercih edilirler.

En fazla tercih edilen FDM'ler ise faz geçiş sıcaklığı 15-90 °C aralığında olan orta sıcaklıklı FDM'lerdir. Bu tür FDM'ler bina tasarımında, güneş enerjisi, medikal, tekstil, elektronik, gıda ve enerji tasarrufu uygulamalarında kullanılmaktadırlar (Pielichowska and Pielichowski, 2014; Lin et al., 2018).

FDM'lerin katı-sıvı, katı-katı, sıvı-gaz ve gaz-sıvı gibi faz geçiş modlarına göre sınıflandırılması aşağıdaki gibi yapılmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Faz değişim malzemeleri (Farid et al., 2004; Liu vd., 2012; Pielichowska and Pielichowski, 2014).

Termal enerji depolama sistemlerinde kullanılacak FDM'ler, uygulama alanlarının gereksinimlerine göre seçilmelidir. FDM'lerde aranan en önemli özellikler Şekil 2'de verilmiştir (Schröder and Gawron, 1981; Abhat, 1983; Kenisarin, 2010; Alva et al., 2017).

Şekil 2. Faz değişim malzemesi seçiminde aranan özellikler

Termal enerji depolama uygulamalarında kullanılan sıvı-gaz ve katı-gaz faz geçişlerine sahip FDM'ler yüksek faz geçiş gizli ısısına sahip olmalarına rağmen faz geçişlerinde meydana gelen büyük hacim değişikliklerinden dolayı çok fazla tercih edilmezler. Katı-katı ve katı-sıvı FDM'ler faz değiştirirken %10 veya daha az faz değişikliğine uğrarlar. Ekonomik ve pratik olduklarından en çok tercih edilen FDM'lerdir (Sharma et al., 2009). Su, tuz hidratlar, parafinler, bazı hidrokarbonlar, polimerler ve metal alaşımları gibi birçok farklı katı-sıvı FDM türü bulunmaktadır. Tuz hidratların uyumsuz erimeleri ve korozyona neden olmaları gibi olumsuz özelliklere sahip olmalarına rağmen yüksek gizli füzyon ısıları, faz geçiş sıcaklıklarının uygunlukları ve ekonomik olmalarından dolayı termal enerji depolama (TES) uygulamaları için en çok tercih edilen faz değişim malzemeleridir (Pielichowska and Pielichowski, 2014).

En fazla kullanılan FDM'ler organik ve inorganik FDM'lerdir. Organik FDM'lerden en fazla kullanılan parafinler, inorganik FDM'lerden en fazla kullanılanlar ise tuz hidratlardır. Erime noktası –12/+71 °C sıcaklık aralığında olan parafinler yüksek füzyon ısılarının yanı sıra, kararlı oldukları ve metal kaplarla uyumlu oldukları için en çok kullanılan ticari FDM'ler olarak bilinmektedir. Parafinlerin yüksek maliyet, düşük ısı iletkenliği, yüksek hacim değişikliği ve yanıcılık gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Parafin mumların erime sıcaklıkları ise 43–56 °C arasındadır. Toksik değildirler. Parafinler, tuz hidrat ve organik FDM'lere göre daha ucuzdurlar. Organik FDM'lerden yağ asitleri ise parafinlere göre daha yüksek füzyon ısısına, tekrarlanabilir erime ve donma davranışına sahiptirler. Aşırı soğuma davranışı göstermezler, fakat parafinlerden 2-2,5 kat daha maliyetlidirler (Sharma et al., 2009). Tuz hidratlar ise bilinen en eski faz değişim malzemeleridir. Üretimleri büyük ölçekte yapılır. Çoğu tuz hidrat topraktan çıkarıldığı için maliyetleri düşüktür. Erime sıcaklıkları 7–117 °C aralığında değişmektedir. Tuz hidratların düşük maliyet, kullanım kolaylığı, yüksek ısı iletkenliği, füzyon ısısı ve yoğunluk gibi avantajlarının yanı sıra yüksek yoğunluk nedeniyle tuzların dibe çökmesi gibi dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca daha fazla hacim değişikliğine uğrarlar. Tuz hidratların hepsi düşük su buharı geçirgenliklerine sahip olduklarından dolayı hava geçirmez kapalı kaplarda kullanılmalıdırlar. Pazarlanan tuz hidratların çoğu toksisite açısından iyi bir güvenlik marjinine sahiptir. Yanıcı değildirler. Erime sıcaklıkları 4–93 °C aralığında bulunan ötektik malzemeler ise yüksek iletkenliğe sahiptirler. Fakat birim ağırlık başına düşük füzyon ısısına sahiptirler (Jurinak and Abdel-Khalik, 1978; Lane, 1986; Sharma et al., 2009; Rathod and Banerjee, 2013).

GÜNEŞ ENERJİLİ UYGULAMALAR

Güneş enerjisinin depolanması, enerjideki dalgalanmaları engellemek, sürekli enerji üretimi sağlamak ve enerji istikrarını arttırmak açısından oldukça önemli bir konudur. Gece saatlerinde ve güneşin olmadığı günlerde güneşten sağlanan enerji minimum seviyelerine inmektedir. Güneşli günlerde üretilen enerji depolanarak, güneşin olmadığı veya yetersiz olduğu günler ve saatlerde enerjinin kullanılması sağlanır. Bu şekilde sürekli bir enerji akışı sağlanmış olur.

Fotovoltaik (PV) sistemlerde FDM'lerin kullanılması:

Son yıllarda fotovoltaik paneller (PV) ile ilgili yapılan çalışmalar, PV panel yüzeyindeki artan sıcaklığı düşürme üzerinedir. Panel yüzey sıcaklığı; güneş ışınımının derecesi, panel yüzeyine gelen rüzgar hızı ve ortam sıcaklığı gibi birçok parametrenin birleşimiyle artmaktadır (Chandel and Aqarwal, 2017; Siecker et al., 2017). Yüzey sıcaklığındaki her 1 °C'lik artış panellerdeki hücrelerin elektriğe dönüşüm verimliliğinin %0.4-0.65 oranında azalmasına neden olur (Hasan et al., 2010; Ma et al., 2015). PV sistemlerine FDM entegre edilerek elektrik verimliliği yaklaşık %5 kadar arttırılabilmektedir (Chandel and Aqarwal, 2017). PV panellerdeki yüzey sıcaklığını düşürmek için birçok yöntem kullanılmaktadır. Genellikle su veya hava kullanılarak soğutma işlemi yapılmaktadır. Fakat kullanılan bu yöntemlerin çoğunda pompa gibi elektrikle çalışan sistemler kullanılmaktadır. Bu da elektrik tüketimine neden olmaktadır (Chandel and Aqarwal, 2017). Bu tür soğutma sistemlerinin PV panellerde kullanılması hem hareketli parçaların bakım gerektirmesinden hem de elektrik tüketiminden dolayı sistemin maliyetini çok fazla arttırmaktadır. Fakat faz değişim malzemeleri ile soğutma sistemi, sadece ilk yatırım anında yüksek maliyet gerektirmektedir.

Faz değişim malzemeleri, fotovoltaik (PV) sistemlerde hücrelerin aşırı ısınmasını önleyerek sıcaklık kontrolünü sağlarlar ve PV sistemlerinin performanslarının arttırırlar. Aynı zamanda, FDM'de depolanan ısı, su ısıtma gibi çeşitli uygulamalarda kullanılarak sistem daha verimli hale getirilebilir (Ma et al., 2015; Chandel and Aqarwal, 2017; Choubineh et al., 2019). PV sistemlerde kullanılan FDM'ler, soğutma amacıyla kullanıldığında bir dizi avantaja sahiptirler: gürültüsüz çalışırlar, elektrik tüketimi gerektirmezler, pasif bir şekilde işlerler ve düzenli bakım ihtiyacı duymazlar. Ayrıca depoladıkları ısı, ısıtma amaçlı kullanılabilmektedir. Ancak, bu avantajların yanında diğer soğutma sistemlerine göre FDM'lerin yüksek maliyetli olduğu bir gerçektir. Bunun yanı sıra, bazı FDM'lerin yanma, toksiklik ve korozyon gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Hasan et al., 2010).

Güneş enerjili sıcak su sistemlerinde FDM'lerin kullanılması:

Güneş enerjili sıcak su sistemleri, evsel ve endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu sistemlerde kullanılan güneş kolektörleri, güneş ışığını emerek sıcak su üretirler. Ancak, bu sistemlerin en

büyük dezavantajı, güneşin olmadığı günlerde veya gece saatlerinde sıcak su sağlayamamalarıdır. Faz değişim malzemeleri ise güneşli saatlerde güneş kolektörlerinin emdiği enerjiyi depolayarak güneşin olmadığı zamanlarda sıcak suyun kesintisiz bir şekilde kullanılmasını sağlarlar. Özellikle akşam saatlerinde ve bulutlu günlerde güneş olmadığı için güneş kolektörleri etkili bir şekilde çalışamaz ve sıcak su üretemezler. Fakat FDM'leri bu sistemlerde kullanarak güneşli saatlerde üretilen enerjinin depolanması ve ihtiyaç halinde kullanımı sağlanabilir. FDM'ler, güneş ışığının az olduğu bulutlu günlerde bile sistemin sıcak su üretme kapasitesini arttırabilirler. Bu şekilde güneş enerjili sıcak su sistemleri daha güvenilir ve sürdürülebilir hale gelirler. FDM'ler, sıcak su depolama tanklarında, ısı transfer borularında ve güneş kolektörlerindeki emici yüzeylerde kullanılabilmektedir (Kılıçkap vd., 2015; Kılıçkap et al., 2018; Elbahjaoui and Qarnia, 2019; Işık and Yıldız, 2020; Yamaç and Koca, 2023).

Güneş pişiricilerinde FDM'lerin kullanılması:

Her evde, günlük olarak belirli miktarda yemek pişirilir ve bu süreçte önemli bir enerji tüketimi gerçekleşir. Güneş enerjisinin pişirme işleminde kullanılması, enerji tüketimini büyük oranda azaltabilir. Güneş pişiricileri, özellikle mutfak uygulamalarında güneş enerjisinin etkili bir şekilde kullanılabilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Bu sistemlerde genellikle tuz hidrat FDM'ler veya parafin kullanılmaktadır. Güneş pişiricileri güneş ışığını emerek, kullanılan FDM'yi ısıtırlar ve FDM içerisinde enerjinin depolanmasını sağlarlar. Daha sonra, bu depolanan enerjiyi pişirilecek yiyeceğe vererek yiyeceğin pişmesini sağlar. Bu sayede, güneş ışığının azaldığı zamanlarda bile yiyeceklerin pişirilmesi mümkün olur. Ayrıca FDM kullanılmayan güneş pişiricilerinde pişirme işlemi uzun zaman almaktadır. Kullanıcılar da güneş ışığına çok fazla maruz kalmaktadırlar. Bu durum, ilerleyen zamanlarda deri kanseri, güneş yanıkları ve diğer cilt hastalıkları gibi ciddi sağlık sorunlarına neden olabilir. Diğer yandan FDM'lerin kullanıldığı güneş pişiricilerinde, yiyecekler daha yüksek sıcaklıklara maruz kalacağından daha kısa sürelerde pişirme işlemi tamamlanmaktadır. Bu da hem enerji verimliliğini arttırır hem de kullanıcıların güneş ışığına maruz kalma sürelerini azaltır. Bu şekilde FDM'lerin kullanılması ile enerji sürekli hale gelir, yenilenebilir enerjiye olan güven artar ve enerjinin olmadığı kırsal bölgelerde yaşayanlar için ekonomik ve çevresel faydalar sağlanabilir (Omara et al., 2020; Balachandran and Swaminathan, 2022).

Güneş enerjili kurutma sistemlerinde FDM'lerin kullanılması:

Kurutma sistemlerinin temel amacı, kurutulacak malzeme içerisindeki suyu buharlaştırmaktır (Isik and Yildiz, 2022). Kurutma sistemleri gıda, tarım, kimya ve tekstil gibi pek çok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Ürünlerin kurutulması ile kalitesi korunarak depolanabilirliği arttırılabilir (Das and Akpinar, 2020). Bu sistemlerde genellikle güneş kolektörleri, havalandırma sistemleri ve kurutma alanları kullanılmaktadır. Güneş enerjili kurutma sistemlerinin temel bileşeni güneş kolektörleridir. Güneş kolektörleri, güneş ışığını absorbe ederek transfer akışkanına iletir. Transfer akışkanı olarak genellikle hava veya su kullanılır. Isınan transfer akışkanı, kurutulacak malzemenin bulunduğu kurutma odasına yönlendirilir ve bu şekilde malzeme içerisindeki suyun ısınarak buharlaşması sağlanır. Güneş enerjili kurutma sistemlerinde, FDM ile ısı depolama sistemi kullanılarak güneş enerjisi ile üretilen ısı depolanabilir. Güneş ışığının yetersiz olduğu zamanlarda, FDM içerisinde depolanan ısı kullanılarak kurutma işleminin devam etmesi sağlanır (Mofijur et al., 2019). Bu şekilde hem enerjiden tasarruf edilir hem de işlemin sürekliliği sağlanır. FDM'ler bu sistemlerde, genellikle kolektörlere ve kurutma odalarına entegre edilerek kullanılmaktadır.

Güneş enerjili damıtma sistemlerinde FDM'lerin kullanılması:

Güneş enerjili damıtma sistemleri, ekonomik bir şekilde kirli sudan temiz su üretmek için kullanılmaktadır. Bu sistemlerdeki temel mantık, suyun buharlaştırılması ve buharın yoğunlaştırılmasıyla temiz su elde edilmesidir. Bu sistemde yenilenebilir enerji kaynağı kullanıldığından, temiz su üretmek için harcanan enerji maliyetleri en aza indirilecektir. Ayrıca, gelecekte yaşanabilecek su kıtlığı ile mücadelede çok önemli bir rol oynamaktadır. FDM'ler ise enerji verimliliğini arttırmak ve güneş enerjisi ile temiz su üretimi için harcanan süreyi en aza indirebilmek için kullanılmaktadırlar. Güneş damıtıcılarında kullanılan FDM'ler depoladıkları ısıyla, güneşin olmadığı saatlerde bile suyun ısınma ve yoğunlaşma işleminin devam etmesini sağlayacaklardır. Böylece damıtma işleminin sürekliliği sağlanacaktır (Mousa et al., 2019; Katekar and Deshmukh, 2020).

Güneş enerjili taşıtlarda FDM'lerin kullanılması:

Taşıtlarda güneş enerjisinin kullanılması, karbon ayak izini azaltmak için son derece önemlidir. Faz değişim malzemeleri ise ısı depolama özellikleri sayesinde araç içi sıcaklıkları düzenleyerek enerji tüketimini azaltmaya ve verimliliği arttırmaya yardımcı olurlar. Sürdürülebilir ulaşım için, faz değişim malzemeleri ve güneş enerjisi, ulaşım sektörü için hayati öneme sahip faktörlerdir. Son zamanlarda yaygınlaşan ve gelecek için oldukça önemli olan elektrikli araçlar için güneş enerjisi, vazgeçilmez bir rol oynayacaktır. Şarj istasyonlarında elektrikli araçları şarj etmek için gerekli olan elektrik enerjisi, güneş panellerinden sağlanarak enerji maliyetleri azaltılabilir. Hatta güneş panelleri, elektrikli araçların üzerlerine yerleştirilerek araç hareket halindeyken veya park halindeyken bile kesintisiz elektrik sağlanabilir. Bu yaklaşım, emisyonun azalmasında önemli bir rol oynayan elektrikli araçlar için oldukça önemlidir (Jaguemont et al., 2018). Elektrikli araçların en önemli parçalarından olan bataryaların termal yönetimi için FDM'lerin kullanılması, bataryaların ısınmasını önleyerek ömürlerini uzatmaya ve potansiyel patlamalardan kaynaklanabilecek riskleri azaltmaya faydalı olacaktır (Moraga et al., 2016).

Güneş enerjili binalarda FDM'lerin kullanılması:

Yenilenebilir enerjilerin binalarda kullanılması ile artan enerji talebi ve çevresel sorunlar ile başa çıkılacaktır. Güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarında enerji üretimi sırasında dalgalanmalar yaşanmaktadır. Bu tür enerji kaynaklarının kullanıldığı sistemlerde, üretilen enerjideki dalgalanmalardan etkilenmemek için FDM gibi enerji depolama malzemeleri kullanılmaktadır (Zhou et al., 2015). Güneş enerjili binalarda da iç mekân sıcaklığını dengelemek için FDM'ler kullanılmaktadır. FDM'lerin kullanılması ile binalarda enerji verimliliği arttırılabilmekte ve ısıtma/soğutma ihtiyacı azaltılabilmektedir. FDM'ler, iç mekânları sıcaklık değişimlerine karşı koruyarak konfor seviyesini arttırırlar. Binalardaki enerji maliyetlerinin azalmasına ve enerji verimliliğinin artmasına fayda sağlarlar. FDM'ler binaların dış cephe izolasyon malzemelerinden, pencerelerine, iç duvar kaplamalarına, tavan kaplamalarına ve zemin kaplamalarına kadar pek çok farklı alanda kullanılırlar. FDM'lerin binalarda kullanılmasında dikkat edilecek en önemli faktör ise sızıntı ve korozyonun önlenmesidir (De Gracia

et al., 2015). Binalarda güneş enerjisi entegrasyonu yapılarak yüksek enerji verimliliği ve bunun sürekliliği sağlanabilir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Güneş enerjisinin depolanması ile daha etkili ve sürdürülebilir enerji sistemlerine katkıda bulunularak enerji ihtiyaçları karşılanabilecektir. Ayrıca yenilenemeyen enerji sistemlerine olan ihtiyacı azaltarak çevresel etkilerin en aza indirilmesine de katkı sağlayacaktır. Güneş enerjisinin depolanmasında, genellikle gizli ısı depolama yönteminden yararlanılmaktadır. Gizli ısı depolama yönteminin temel bileşeni de FDM olarak tanımladığımız faz değişim malzemesidir. FDM'ler faz değişim anında enerjiyi depolayarak gerektiğinde salabilmektedirler. FDM'lerin kullanıldığı güneş enerjili sistemlerin temel özelliği, güneş enerjisini depolayarak güneş ışığının olmadığı veya yetersiz olduğu zamanlarda bu enerjiyi sisteme geri salmak ve sistemin sürekliliğini sağlamaktır. FDM'lerin güneş enerjili sistemlerde kullanılması ile özellikle, doğal arıcılıkla uğraşanlar gibi şebekelerden uzak alanlarda çalışanların ve oralarda yaşayan insanların ihtiyacı olan enerjinin, depolanarak güneşin olmadığı günlerde ve saatlerde çalışmalarını ve hayatlarını sürdürebilmeleri için gerekli olan enerji ihtiyaçlarının karşılanmasına olanak sağlanacaktır. Bu şekilde daha güvenli, rahat, sürdürülebilir ve verimli bir hayat sürmüş olacaklardır.

KAYNAKÇA

[1] Abhat, A. (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Solar Energy,* 30(4), 313-332.

[2] Al-Jethelah, M., Tasnim, S. H., Mahmud, S., Dutta, A. (2018). Nano-PCM filled energy storage system for solar-thermal applications. *Renewable Energy,* 126, 137-155.

[3] Alva, G., Liu, L., Huang, X., Fang, G. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 68, 693-706.

[4] Balachandran, S., Swaminathan, J. (2022). Advances in Indoor Cooking Using Solar Energy with Phase Change Material Storage Systems. *Energies,* 15(22), 8775.

[5] Chandel, S. S., Agarwal, T. (2017). Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 73, 1342-1351.

[6] Choubineh, N., Jannesari, H., Kasaeian, A. (2019). Experimental study of the effect of using phase change materials on the performance of an air-cooled photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 101, 103-111.

[7] Das, M., Akpinar, E. K. (2020). Determination of thermal and drying performances of the solar air dryer with solar tracking system: Apple drying test. *Case Studies in Thermal Engineering, 21*, 100731.

[8] De Gracia, A., Cabeza, L. F. (2015). Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings, 103*, 414-419.

[9] Demirbas, M. F. (2006). Thermal energy storage and phase change materials: An overview. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy,* 1:1, 85-95.

[10] Dinçer, I., Rosen, M.A. (2021). Thermal energy storage systems and applications (Third Edition). Canada: WILEY.

[11] Dutil, Y., Rousse, D. R., Salah, N. B., Lassue, S., Zalewski, L. (2011). A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 15(1), 112-130.

[12] Elbahjaoui, R., El Qarnia, H. (2019). Thermal performance of a solar latent heat storage unit using rectangular slabs of phase change material for domestic water heating purposes. *Energy and Buildings,* 182, 111-130.

[13] El-Dessouky, H., Al-Juwayhel, F. (1997). Effectiveness of a thermal energy storage system using phase-change materials. *Energy Conversion and Management,* 38(6), 601-617.

[14] Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management,* 45(9-10), 1597-1615.

[15] Hasan, A., McCormack, S. J., Huang, M. J., Norton, B. (2010). Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics. *Solar Energy,* 84(9), 1601-1612.

[16] Işık, S., Yavuz, S. (2022)-a. Biyokütleden Elde Edilen Biyoyakıtlara Genel Bir Bakış. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 193-201.

[17] Işık, S., Yavuz, S. (2022)-b. Investigation of biogas production potential from livestock manure by anaerobic digestion in Bingöl Province. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, *11*(1), 116-122.

[18] Işık, S., Yavuz, S. (2022)-c. Determination of Biomass Energy Potential That Can Be Obtained from Agricultural and Animal Wastes of Konya Province. *Türk Doğa ve Fen Dergisi,* 11(2), 89-98.

[19] Işık, S., Yıldız, C. (2020). Improving thermal energy storage efficiency of solar collector tanks by placing phase change materials in novel finned-type cells. *Thermal Science and Engineering Progress,* 19, 100618.

[20] Isik, S., Yildiz, C. (2022). A new spray dryer supported with freely rotatable propellers enables more efficient drying of milk samples. *Thermal Science,* 26(2 Part C), 1871-1882.

[21] Jaguemont, J., Omar, N., Van den Bossche, P., Mierlo, J. (2018). Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review. *Applied thermal engineering*, *132*, 308-320.

[22] Jebasingh, B. E., Arasu, A. V. (2020). A comprehensive review on latent heat and thermal conductivity of nanoparticle dispersed phase change material for low-temperature applications. *Energy Storage Materials*, 24, 52-74.

[23] Jurinak, J. J., Abdel-Khalik, S. I. (1978). Properties optimization for phase-change energy storage in air-based solar heating systems. *Solar Energy,* 21(5):377–83.

[24] Khan, Z., Khan, Z., & Ghafoor, A. (2016). A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility. *Energy conversion and management*, *115*, 132-158.

[25] Kalidasan, B., Pandey, A. K., Saidur, R., Samykano, M., Tyagi, V. V. (2022). Nano additive enhanced salt hydrate phase change materials for thermal energy storage. *International Materials Reviews,* 1-44.

[26] Katekar, V. P., & Deshmukh, S. S. (2020). A review of the use of phase change materials on performance of solar stills. *Journal of Energy Storage*, *30*, 101398.

[27] Kenisarin, M. M. (2010). High-temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 14(3), 955-970.

[28] Kılıç, F.Ç. (2015). Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri. *Mühendis ve Makina,* 56(671), 28-40.

[29] Kılıçkap, S., El, E., Yıldız, C. (2018). Investigation of the effect on the efficiency of phase change material placed in solar collector tank. *Thermal Science and Engineering Progress,* 5, 25-31.

[30] Kılıçkap, S., Yıldız, C., Çakmak, G. (2015). Elazığ iklim koşullarında sıcak sulu güneş kolektörlerine ilişkin verimlerin araştırılması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi,* 6(2), 103-110.

[31] Kırbaş, İ. (2021). Taşınabilir Fotovoltaik (PV) Sistem Tasarımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi,* (25), 675- 679.

[32] Lane, G. A. (1983). Solar heat storage: latent heat materials, Volume I: Background and Scientific Principles. Boca Raton, FL, USA: CRC press, Vol. 1, 1-238.

[33] Lane, G. A. (1986). Solar heat storage: latent heat materials, Volume II: Technology. Boca Raton, FL, USA: CRC press, Vol. 2, 1-235.

[34] Lin, Y., Jia, Y., Alva, G., Fang, G. (2018). Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 82, 2730-2742.

[35] Liu, M., Saman, W., Bruno, F. (2012). Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 16(4), 2118-2132.

[36] Ma, T., Yang, H., Zhang, Y., Lu, L., Wang, X. (2015). Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: A review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 43, 1273-1284.
Makina, 56(671), 28-40.

[37] Mofijur, M., Mahlia, T. M. I., Silitonga, A. S., Ong, H. C., Silakhori, M., Hasan, M. H., Putra, N., Rahman, S. A. (2019). Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage: An overview. *Energies,* 12(16), 3167.

[38] Mondal, S. (2008). Phase change materials for smart textiles–An overview. *Applied thermal engineering*, *28*(11-12), 1536-1550.

[39] Moraga, N. O., Xamán, J. P., Araya, R. H. (2016). Cooling Li-ion batteries of racing solar car by using multiple phase change materials. *Applied Thermal Engineering, 108*, 1041-1054.

[40] Mousa, H., Naser, J., Gujarathi, A. M., & Al-Sawafi, S. (2019). Experimental study and analysis of solar still desalination using phase change materials. *Journal of Energy Storage*, *26*, 100959.

[41] Omara, A. A., Abuelnuor, A. A., Mohammed, H. A., Habibi, D., Younis, O. (2020). Improving solar cooker performance using phase change materials: A comprehensive review. *Solar Energy,* 207, 539-563.

[42] Pielichowska, K., Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science,* 65, 67-123.

[43] Piper, S. L., Kar, M., MacFarlane, D. R., Matuszek, K., Pringle, J. M. (2022). Ionic liquids for renewable thermal energy storage–a perspective. *Green Chemistry,* 24(1), 102-117.

[44] Rathod, M. K., Banerjee, J. (2013). Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 18, 246-258.

[45] Schröder, J., Gawron, K. (1981). Latent heat storage. *International Journal of Energy Research,* 5(2), 103-109.

[46] Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 13(2), 318–345.

[47] Siecker, J., Kusakana, K., Numbi, E. B. (2017). A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 79, 192-203.

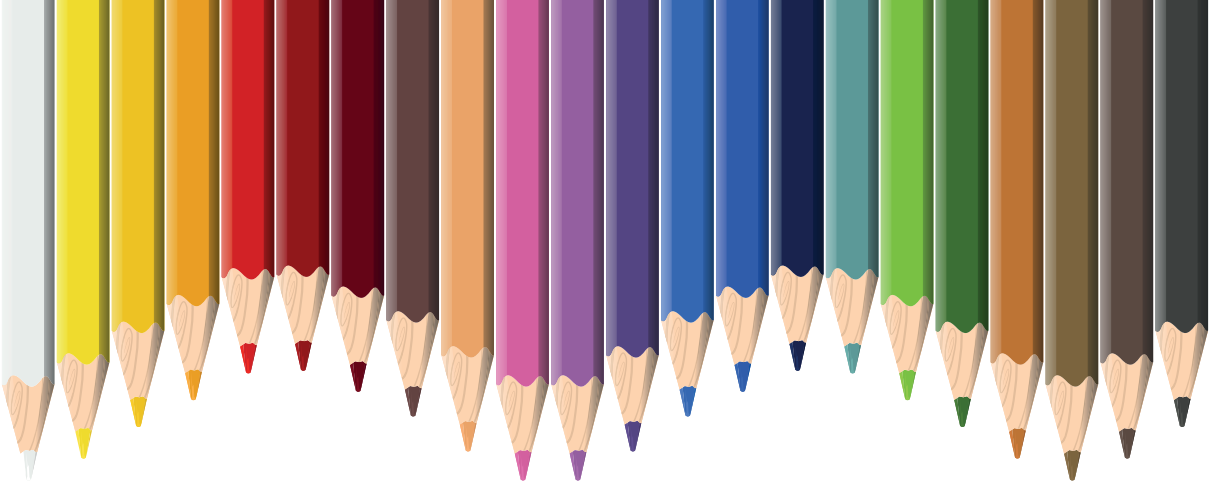
[48] Vijayakumar, G., Kummert, M., Klein, S. A., Beckman, W. A. (2005). Analysis of short-term solar radiation data. *Solar energy,* 79(5), 495-504.

[49] Wu, S., Yan, T., Kuai, Z., Pan, W. (2020). Thermal conductivity enhancement on phase change materials for thermal energy storage: A review. *Energy Storage Materials,* 25, 251-295.

[50] Yamaç, H. İ., & Koca, A. (2023). Investigation of water flow window with/without energy storage tank during winter season. *Applied Thermal Engineering*, *225*, 120164.

[51] Yang, Y., Wu, W., Fu, S., & Zhang, H. (2020). Study of a novel ceramsite-based shape-stabilized composite phase change material (PCM) for energy conservation in buildings. *Construction and Building Materials*, *246*, 118479.

[52] Zhou, Z., Zhang, Z., Zuo, J., Huang, K., Zhang, L. (2015). Phase change materials for solar thermal energy storage in residential buildings in cold climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *48*, 692-703.



Bölüm 21

TEMEL UÇUŞ PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASINDA KULLANILAN SENSÖRLER ÜZERİNE

Harun ÇELİK[1]

1 Dr. Öğr. Üyesi, Uzay Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri/Türkiye
ORCID: 0000-0001-5352-3428

Uçmak, insanoğlunun çok erken dönemlerden itibaren kazanmaya çalıştığı bir hareket kabiliyetidir. Öyle ki IX. yüzyılda İsmail bin Hammâd el-Cevherî'nin, XVII. yüzyılda Hezârfen Ahmed Çelebi'nin denemeleri gibi daha birçok teşebbüsle bu kabiliyetin kazanılma hayali gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Yüz yıllarca yapılmış çalışmalar insan gücüyle uçmayı mümkün hale getirememiş olsa da XX. yüzyılın başlarında Wright kardeşlerin ilk motorlu uçuşu gerçekleştirmesi insanoğlunun uçma hayalini araçlarla gerçekleştirebilmesinin başlangıcı olmuştur.

Uçuş, tasarlanması hem oldukça karmaşık hem de hassas olan bir aracın dengesini, kararlılığını ve kontrolünü içeren çok kapsamlı bir süreçtir. Tüm hava araçları aynı fizik kurallarına tabidir, ancak hareketlerinin ayrıntıları yalnızca araçların şekillerine, ağırlıklarına ve itiş gücüne değil aynı zamanda yapılarına, kontrol sistemlerine, hızına ve uçulan ortama bağlı olarak oldukça farklı olabilir. Oldukça farklı olan hareketin bu ayrıntılarını inceleyebilmek için modern dünyada matematiksel yöntemler ve modeller oluşturulmakta ve tasarımlar bu modeller üzerinden gerçekleştirilmektedir.

Uçuş hareketleri diğer birçok harekette olduğu gibi matematiksel olarak adi diferansiyel denklemlerle ifade edilmektedir. Bu denklemler, yerçekimi, hava akışı ve kontrol yüzeyleri hareketi gibi dış etkilerin harekette neden olabileceği değişim oranlarını belirleyebilmektedir. Uçuş üç boyutlu bir hareket olduğundan üç eksende ve bu eksenler arasındaki üç açıda gerçekleştiği kabulü ile altı serbestlik derecesinde alınabilir. Yani uçuş esnasında üç eksen boyunca yer değiştirme ve bu eksenler etrafında dönme hareketleri yapılabilir. Bu hareketlerin bir hava aracı tarafından hedeflenen şekilde gerçekleşebilmesi; uçuşun güdüm, seyrüsefer ve kontrolü hava aracının uçuş davranışını modelleyen matematiksel ifadelerin çözülmesiyle yani değişkenlerin ve denklemlerin hesaplanmasıyla mümkün olmaktadır.

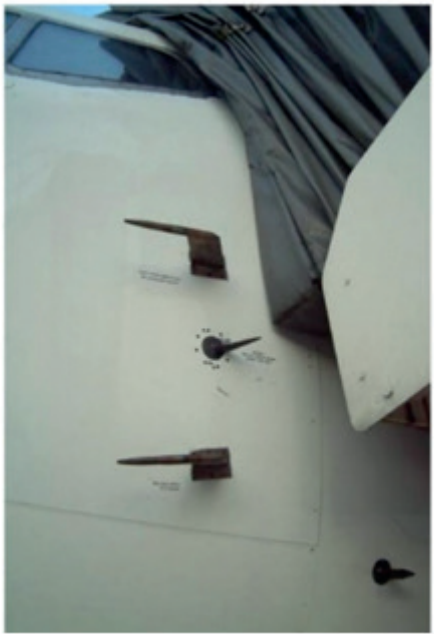
Hava aracı hareketini hesaplamada kullanılan değişkenler farklı sensörler aracılığıyla yapılan ölçümler neticesinde belirlenir ve matematiksel denklemlerin çözümünde kullanılır. Uçuş dinamiğinde hava aracı hareketinin belirlenebilmesinde ihtiyaç duyulan değişkenlerin ölçülmesi için farklı sensörler kullanılmaktadır. Hareketi hesaplayabilmek için aracın kendi gövde eksen takımının hareket değişkenleriyle birlikte, hareketi gerçekleştirdiği ortam (atmosfer) özelliklerinin de bilinmesi gerekmektedir. Nitekim uçuşun gerçekleştiği hava; uçuş performansı, kararlılığı ve kontrolünü etkileyen önemli özellikler barındırmaktadır. Ayrıca güdüm ve seyrüsefer açısından hava aracının başka bir yere göre hareketinin de belirlenebilmesi amacıyla da ölçümler yapılması gerekir.

1970'lere kadar üretilen uçaklarda gerekli ölçümler daha çok mekanik olarak yapılmış ve mekanik aletlerle uçuş verileri pilotlara gösterilmiş iken sonraki zamanlarda elektronik göstergeler ve hesaplamalar yaygınlaşmaya

başlamıştır. Dolayısıyla eski uçaklarda hava sürati, suni ufuk, irtifa, dönüş, istikamet, düşey sürat olmak üzere altı temel uçuş aleti tamamen mekanik iken ve ölçümlerini de hava boruları ve dönü ölçerler (jiroskop) kullanarak mekanik olarak yaparken; günümüzde hava araçları daha hassas ve gelişmiş sensörler kullanarak oldukça ileri hesaplamalar yapabilen ve bunları elektronik ekranlarda sunabilen elektronik sistemlere sahip hale gelmişlerdir.

Temel uçuş aletleri hava aracının tipine veya büyüklüğüne göre değişiklik gösterebilir. Örneğin, açısal hareketin belirlenmesinde kullanılan sistem, küçük insansız hava araçlarında ataletsel ölçüm birimi (inertial measurement unit, IMU) iken bu sistem geniş gövdeli uçaklarda yönelim ve istikamet referans sistemi (attitude and heading reference system, AHRS) olarak isimlendirilir. Atalete dayalı olarak yönelim ve yön hesabı yapan bu sistemler uzay araçlarında yönelim ve yörünge kontrol sistemi (attitude and orbit control system, AOCS), daha çok robot teknolojilerinde ise ataletsel seyrüsefer sistemi (inertial navigation system, INS) olarak bilinmektedir. Her ne kadar sistemler farklı da olsa uçuş için ölçülmeye ve belirlenmeye çalışılan asgari veriler tüm hava araçlarında aynıdır. Yani üç boyutlu bir uçuş hareketini oluşturan çizgisel ve açısal hareketi belirleyebilecek verileri sağlayabilen temel sensörler kullanılır. Elde edilen veriler sayesinde uçuş dinamiğini oluşturan hareketlerin temel uçuş parametreleri hesaplanabilir.

Çizgisel ve açısal hareket parametrelerini hesaplamak için eski uçaklarda sensör olarak toplam ve statik basınç ölçerleri ile klasik dönü ölçerler kullanılmıştır. Yeni uçaklarda da toplam basınç sensörü (koç başı) ile statik basınç sensörü eskilerdekine benzer yapıdadır. Ancak yeni uçaklarda bu sensörlerden alınan veriler dijitalleştirilmekte ve artık hava veri bilgisayarında (air data computer, ADC) işlenerek elektronik ortamda kullanılmaktadır. Ticari bir uçakta yer alan bazı hava veri sensörleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Modern uçaklarda dönü ölçerlerin yerini ise titreşimli dönü ölçerler gibi sistemler almıştır. Bu sensörlerden ölçülen açısal hareket verileri ise dijital olarak AHRS'de işlenmektedir. Böylece modern hava araçlarında temel uçuş verilerinin işlendiği önemli iki elektronik sistem hava veri sistemleri ve ataletsel ölçüm sistemleri olmaktadır.



Şekil 1. Ticari bir uçakta yer alan hava sensörleri (yukarıdan aşağıya doğru) kaptan pitot tüpü, hücum açısı, II. pilot pitot tüpü, toplam hava sıcaklığı sensörü)

Hava veri sistemlerinde hava ölçümlerini kullanılarak hücum açısı, yana kayma açısı, hava sürati, irtifa, düşey sürat ve dış ortam sıcaklığı gibi bilgiler hesaplanırken; ataletsel ölçüm sistemleri, dönü ölçerler vasıtasıyla uçağın yönelim, dönüş, kayma ve savrulma ölçümlerini yapabilmektedir. Bazı modern uçaklarda ise bu iki sistem de birleştirilerek ADAHRS (air data and attitude and heading reference system) oluşturulmuştur. Bu birleşimde olduğu gibi aslında modern havacılık teknolojilerinde sistemler arası işbirliğinin geliştirilmesi üzerine gün geçtikçe daha fazla çalışma yapılmaya başlanmıştır. Bu çalışmalar da entegre modüler aviyonik (integrated modular avionics, IMA) başlığı altında bir araya gelmektedir. Bu vasıtayla, verilerin elde edilmesinde alternatif yöntem ve kaynakların oluşturulması, veri akışının kesintisiz hale getirilmesi gibi hedeflerin sağlanması amaçlanmaktadır.

Hava aracı sistemleri, aletleri ve sensör teknolojileri sürekli olarak gelişmektedir. Bu sayede uçuşun temel parametreleri de yeni ve alternatif yöntemlerle hesaplanmaktadır. Ancak bu sistem ve yöntemler ne kadar değişse de bir uçuş için hesaplanması gereken temel veriler her zaman çizgisel ve açısal hareketin belirlenmesini sağlayacak yeterlilikteki sensörler ile ölçülmelidir. Temel uçuş verilerinin hesaplandığı bu sistemler tarafından kullanılacak verileri sağlamak amacıyla gerekli ölçümlerde kullanılan temel sensörler bu kitap bölümünün konusunu oluşturmaktadır. Bu sensörler ile bunlardan elde edi-

len veriler kullanılarak hesaplanan temel uçuş değişkenleri özet olarak Tablo 1'de verilmiştir. Bu sensörlerden toplam basınç, statik basınç, sıcaklık ve hücum açısı sensörü hava sensörleri olarak; dönü ölçer, ivmeölçer ve manyetik alan ölçer ise yön ve yönelim sensörleri olarak da isimlendirilir. Bu sensörlerle doğrudan algılanan veriler sınırlı olsalar da özellikle modern sistemlerde bu veriler kullanılarak uçuşla ilgili çok daha farklı parametreler de türetilebilir.

Tablo *1 Sensörler, algılanan ve türetilen veriler*

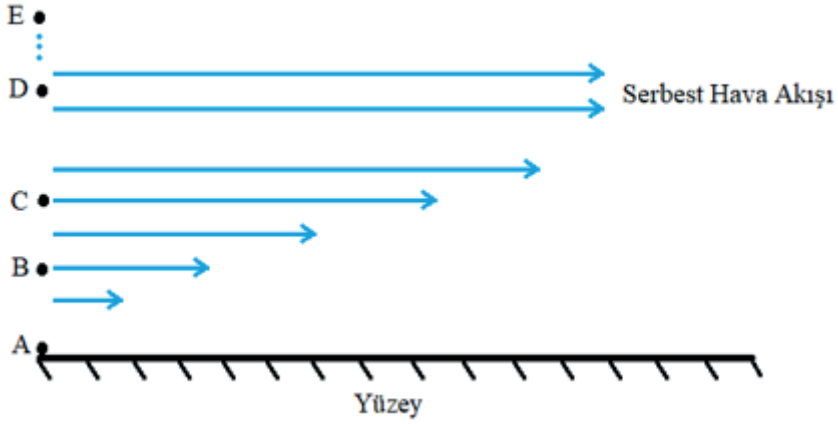
Sensör	Ölçülen Veri	Hesaplanan **Bazı Veriler**
Statik Basınç Sensörü	Statik Basınç	İrtifa (Barometik) Düşey Hız Hava Hızı (İşari, Kalibre Edilmiş, Gerçek) Mach Sayısı Azami Hava Hızı Sınırı Hücum Açısı Statik Hava Sıcaklığı Gerçek Hava Hızı
	Statik Basınç Değişimi	
Toplam Basınç Sensörü	Dinamik Basınç (Toplam basınç aracılığıyla)	
Hücum Açısı Sensörü	Hücum Açısı	
Sıcaklık Sensörü	Toplam Hava Sıcaklığı	
Dönü Ölçer	Yönelim Açıları Dönme (turn), kayma (slip) ve savrulma (skid)	Doğrusal İvmelenmeler Yönelim Konum İstikamet Manyetik Doğrultu Ataletsel Hız Vektörleri Açısal Hızlar Ataletsel İrtifa Düşey Hız Yer Hızı Uçuş Doğrultusu Açısı Rüzgar Hızı ve Yönü
İvmeölçer	İvme	
Manyetik Alan Ölçer	Manyetik Alan Büyüklüğü ve Yönü	

1. Hava Veri Sensörleri

Hava veri sensörleri, uçulan ortamın özellikleriyle ilgili bilgileri algılamada kullanılır. Ortamdan doğrudan algılanan parametreler toplam basınç, statik basınç, statik basınçtaki değişim ve sıcaklıktır. Bu ölçümler kullanılarak barometik irtifa, düşey hız, hava hızı (işari, kalibre edilmiş, gerçek), mach sayısı, azami hava hızı sınırı, hücum açısı, statik hava sıcaklığı, gerçek hava hızı gibi farklı uçuş parametreleri de hesaplanabilir.

1.1 Statik Basınç Sensörü (Statik port)

Statik basınç; hava aracında hava sürati, düşey sürat ve irtifa gibi önemli değişkenlerin hesaplanmasında kullanıldığından hava aracındaki en önemli sensör olarak düşünülebilir. Bu öneminden dolayı hava aracında birkaç yerde yedeği de bulundurulur. Statik port veya piezometre olarak da isimlendirilen bu sensör ile ortamın durağan basıncının ölçülmesi hedeflendiğinden hava aracındaki konumu, mümkün oldukça sıkıştırılabilir dinamik basınçtan etkilenmeyen yüzeylerde olacak şekilde belirlenir. Uçuş esnasında dinamik basınçtan arındırılmış durağan basıncı saf olarak elde etmek oldukça zordur. Hatta hareket halindeki bir hava aracı üzerindeki sensörün de hareket ediyor olması nedeniyle hareketsiz/durağan havanın basıncının ölçülmesi imkansız gibi görünebilir. Ancak bu sorunun çözümü sınır tabaka akış özellikleri sayesinde mümkün olmaktadır. Akışkanın viskozitesinden (akmaya karşı gösterdiği dirençten) kaynaklı olarak katı cisme temas bölgesinde ve yakınlarında akışkanın hızı düşme özelliğindedir. Hızın düştüğü bu katı cisim-akışkan temas noktasından, viskozite etkilerinin ihmal edilebilir düzeye indiği noktaya kadarki bölgeye sınır tabaka denir. Şekil 2'de A noktası katı cisim ile akışkanın temas noktasını ve D noktası viskoz etkilerinin ihmal edilebilir düzeye düştüğü serbest hava akışının gerçekleştiği noktayı temsil etmek üzere A noktasından D noktasına kadar olan bölge sınır tabakadır. Böylece Şekil 2'de temas noktası olan A noktasında akışkan ve katı cismin birbirlerine göre hızının 0 olduğu da görülmektedir. Dolayısıyla hava aracının uygun yüzeyine yerleştirilecek statik portta hava aracının hareketine rağmen durağan olan basınç ölçülebilmektedir. Diğer taraftan bu sensörün konumu en iyi şekilde belirlense dahi hava aracının yön değişimi, dönüş hareketleri veya farklı hücum açılarında/hava süratinde uçulması gibi durumlarda ölçümün tam olarak doğru yapılması mümkün olmayabilir. Bu amaçla da statik basınç sensörleri farklı yerlerde konumlandırılarak ortalama değerler alınmaktadır.



Şekil 2. Sınır tabakada akış

Dünyamızda yerden yükseldikçe hava yoğunluğu azalmakta, böylece havanın statik basıncıda düşmektedir. Yükseklik ile basınç arasındaki ilişki sayesinde statik basınç sensörüyle ölçülen basınç değeri kullanılarak hava aracının yeryüzüne olan mesafesi bulunabilmektedir. Bu hesaplamalar yapılırken, aslında statik basınç değişimi doğrusal olmadığından ve dünyanın farklı bölgelerinde aynı mesafede aynı değere sahip olmadığından, uluslararası standart atmosfer şartları geliştirilmiştir. Standart atmosfer (ISA); atmosferin ses hızı, sıcaklık, yoğunluk, basınç ve viskozitesinin deniz seviyesindeki değerini ve bunların irtifa ile değişimini gösteren, özellikle uçuş performansı kıyaslaması için gerek duyulmuş atmosfer modelidir ve tüm uçaklar tarafından kullanılmaktadır. Böylece yeryüzüne olan mesafe tam olarak doğru hesaplanamasa dahi aynı bölgedeki uçaklar aynı değerleri referans aldıklarından aynı hata oranına sahip olmaktadır. Yere göre yükseklikte hata bulunsa da hava araçları arasındaki yükseklik farkları doğru kalacağından bu yöntem hava trafik yönetimine önemli katkılar sunmaktadır.

Yere göre mesafenin hesaplanması farklı sensör ölçümleri ve yöntemlerle mümkün olmakla birlikte statik basınç sensörüyle bu ölçüm barometrik olarak yapılmaktadır. Barometrik ölçümlerde hava aracının yere göre mesafesi, referans alınan düzleme göre isimlendirilir. Hava aracının yeryüzündeki ortalama deniz seviyesine olan mesafesi irtifa olarak isimlendirilir. Standart deniz seviyesine olan mesafesi ise uçuş seviyesidir. Standart deniz seviyesi, basıncın 1013,2 milibar veya hektapaskal olduğu noktaların birleştirilmesiyle meydana gelen düzlemdir. Dolayısıyla bu seviye bazı yerlerde ortalama deniz seviyesinin altında bazı yerlerde ise üzerinde olabilir. Ancak bir hava aracının yeryüzünden yeterince fazla mesafelerde seyrettiği durumlarda bu hata miktarlarının çok önemi kalmamaktadır. Yeryüzüne daha yakın uçuşlarda ise yeryüzü şekilleri önem kazanır. Bu uçuşlarda yeryüzüne veya hava limanının bulunduğu rakıma göre mesafe ölçülmektedir ki bu da yüksekliktir. Rakım ise hava limanının ortalama deniz seviyesine olan mesafesidir. Böylece irtifa hesaplamaları farklı şekillerde yapılabilmektedir[1].

Statik basınç sensörü ile yapılan ölçümler farklı zaman dilimlerinde gerçekleştirildiğinde bu zaman dilimlerinde meydana gelen basınç değişimlerinden irtifa değişimleri de hesaplanabilir ki irtifadaki değişim düşey hızı vermektedir. Temel uçuş parametrelerinden irtifa ve düşey hız tek başına statik portun sağladığı basınç verisi ile bu basıncın zamana göre değişiminden barometrik olarak hesaplanabilmektedir.

1.2 Toplam Basınç Sensörü (Pitot Tüpü veya Koçbaşı)

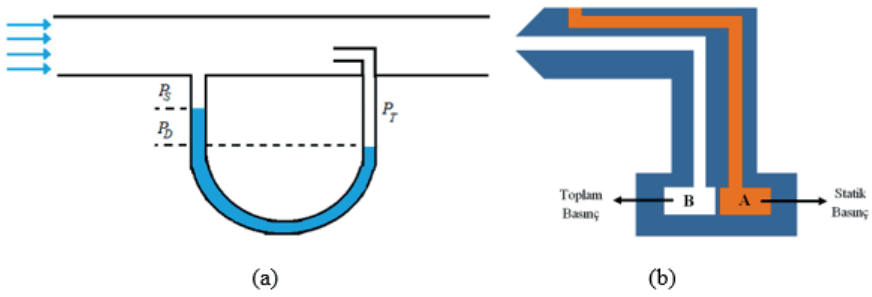
Pitot tüpü, içerisinden geçen havadaki statik basınç ile akan havanın neden olduğu dinamik basıncın toplamını ölçebilen bir sensördür. Hava aracının sınır tabakasından etkilenmeyecek bir uzaklıkta ve hava akışını doğru-

1 Farklı referans düzlemlere göre ölçülen irtifa türleri hakkında daha detaylı bilgi için QNH, QNE, QFE kısaltmalarını araştırabilirsiniz.

dan içine alacak bir yönde olması şartıyla pitot tüpünün hava aracı üzerindeki konumu farklılık gösterebilir. Bu şartları sağlaması için geliştirilen pitot tüpleri şekilsel olarak koçbaşını andırdığından bu sensör koçbaşı olarak da isimlendirilmektedir.

Pitot tüpü ile yapılan toplam basınç ölçümlerinden statik port ile yapılan statik basınç değeri çıkarılarak dinamik basınç elde edilebilmektedir ki dinamik basınç da yine önemli bir temel uçuş verisi olan hava süratinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Aslında burada dinamik basıncı bir basınçtan ziyade kinetik bir enerji olarak düşünmek daha uygun olacaktır. Nitekim *m* kütlesine sahip bir havanın kinetik enerjisi; *V*, referans noktaya göre havanın hızını gösterecek olursa, $E_K = mV^2/2$ Nm ve birim hacim başına kinetik enerji ise V havanın hacmi olacak şekilde $E_{K_p} = (mV^2/2)/\mathrm{V}$ Nm/m^3 olacağından birim yüzey alanına uygulanan kuvvet şeklinde dinamik basınç; $Q = (\rho V^2/2)$ hPa olarak verilebilir. O halde dinamik basınç akışkanın hızına bağlı olduğundan ancak belirli bir noktaya göre bağıl olarak ölçülebilmektedir. Dinamik basıncın (*Q*) ölçülebilmesi durumunda hava hızı da hesaplanabilir.

Hava aracında dinamik basıncın doğrudan ölçülmesini sağlayan bir sensör bulunmamaktadır. Toplam basınç pitot tüpü ile ölçülebildiğinden bu toplamdan statik porttan elde edilen durağan basınç çıkarılırsa dinamik basınç elde edilebilir. Şekil 3(a) göz önüne alındığında bu şekildeki bir yapıyla statik ve toplam basıncın ölçülebileceği ve $P_T = P_S + P_D$ bağıntısının sağlandığı görülür. Pitot tüpü ile statik port Şekil 3(b)'deki gibi tasarlanacak olursa A noktası bir statik port, B noktası ise bir pitot tüpü vazifesi görecektir.

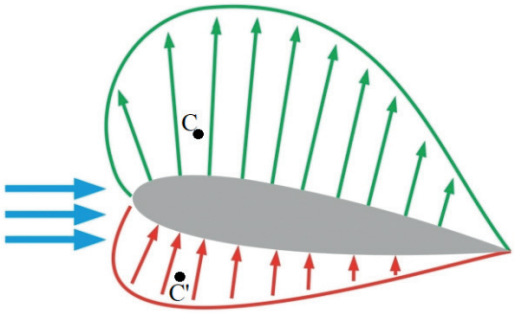


Şekil 3. (a) Basınç farkı ölçümü ve (b) pitot-statik tüpü

Toplam basınç sabit alınarak dinamik basınçtaki artışın hızdan kaynaklandığı kabul edilebilir. Hız arttıkça dinamik basıncın artması, toplam ba-

sıncın sabit kalabilmesi için, statik basıncın azalması anlamına gelir. Sabit irtifada uçan bir uçakta dinamik basıncın artması statik basınçta azalmaya neden oluyorsa aslında sabit irtifadaki uçak, düşen statik basınç nedeniyle, daha yüksek irtifalara çıkıyor gibi hatalı ölçümler yapar. Bu hataya düşmemek için irtifa değişmedikçe statik basıncın da değişmediğini kabul etmemiz gerekir. Peki, statik basınç değişmiyorsa bir kanat profilinde taşımayı oluşturan fark nasıl oluşmaktadır? Çünkü kanatta taşımanın oluşumu, kanat altındaki statik basıncın üst taraftan yüksek olması ve böylece kanadın yukarı doğru itilmesiyle açıklanabilmektedir. $P_T = P_S + P_D$ eşitliğinde kanat altında statik basınç artmayıp sabit kabul edilirse taşıma oluşmaz. Statik basıncın değiştiği, toplam basıncın sabit kaldığı kabul edilirse, statik basınç nedeniyle irtifa sabit kabul edilemez.

Bu soru veya karmaşa aslında basınç ölçümlerinde kullandığımız hız değişkeninin vektörel bir nicelik olduğunun ve referans alınacak noktaya göre değiştiğinin yani izafi olduğunun göz ardı edilmesinden kaynaklanmaktadır. Yani aslında statik basıncın da toplam basıncın da sabit kabul edildiği durumlar mümkündür. Sadece referans alınan noktalar ile basınç tanımlarının iyi yapılması gerekir. Bu amaçla Şekil 2 yeniden göz önüne alındığında hava akışının durduğu A noktasındaki basınç değeri ile E noktasındaki atmosfer durağan basıncı aslında eşittir ($P_{S_A} = P_{S_E} = P_0$). Yani buralarda ortam basıncını sadece statik basınç oluşturmaktadır. Durağan havanın, durağan havaya göre hızı sıfır olduğundan herhangi bir dinamik basınç bileşeni bulunmayacaktır. C noktasında ise $P_{T_C} = P_{S_C} + P_{D_C} = P_0$ olur. Dinamik basınçtan bulunan hava hızının uçağın kanatlarının hızı olduğu kabul edilerek, yine kanat üzerinde bulunan aerodinamik merkez üzerinde hız nedeniyle oluşan kuvvetlerin uçağa etkisi incelenir. C noktasının Şekil 4'teki gibi bir kanat üzerinde olduğu düşünülürse bu noktanın kanada göre izdüşümü de C' olursa; C' 'deki akışın serbest hava akışına göre olan hızı, C noktasındaki akışın serbest hava akışına göre olan hızından daha düşük ($V_{C'} < V_C$) olacağından $P_{T_C} = P_{T_{C'}} = P_0$ iken $P_{D_C} > P_{D_{C'}}$ ve $P_{S_C} < P_{S_{C'}}$ olacaktır. Yani yüzey arasındaki hız ölçümleri serbest hava akışı referans alınarak yapılmaktadır. Serbest hava akış hızı ise atmosferdeki durağan havaya göredir. Dolayısıyla kanat yüzeylerindeki hız bileşenleri ile serbest hava akışı hızı aynı değildir. Kanat profilinin yapısına göre serbest hava akış hızı V_{SA}, V_C veya V_D den küçük olabileceği gibi $V_{C'}$ veya $V_{D'}$ 'den büyük de olabilir. Dolayısıyla kanatta oluşan taşıma V_C ile $V_{C'}$ (ve diğer noktalar) arasındaki serbest hava akışına göre hız farklarından oluşmaktadır.



Şekil *4. Kanat profili üzerinde basınç farkının oluşumu*

Referans olarak serbest hava alındığından bu noktalardaki toplam basınç ise eşittir $P_{T_C} = P_{T_{C'}}$. Serbest havanın hızı ise serbest havaya göre değil durağan havaya göre belirlendiğinden, hızı arttıkça toplam basıncı artacaktır. Yani $P_{T_{SA}} = P_{S_{SA}} + P_{D_{SA}}$ olduğundan, serbest hava akış hızı arttıkça $P_{D_{SA}}$ artacaktır. Burada $P_{S_{SA}}$ ise ortam basıncı olarak ölçüldüğünden sabit kalacaktır. Dolayısıyla aynı irtifada ölçülen statik port basıncı sabittir ($P_{S_{SA}} = P_0$). Dinamik basınç veya hızın artması nedeniyle de serbest havanın toplam basıncı artmaktadır. Nitekim $P_{T_{SA}} \neq P_{T_C}$ ve çoğunlukla kanat üzerindeki hız artışı nedeniyle $P_{D_{SA}} < P_{D_C}$ ve $P_{D_{SA}} > P_{D_{C'}}$'dir. Böylece yukarıda bahsedilen karmaşanın aslında referans noktası olarak durağan hava alındığı durumdaki toplam basınç ile akan hava alındığı durumdaki toplam basıncın karıştırılmasından kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

Pitot tüpüyle ölçülen basınç, serbest hava akışının toplam basıncıdır. Bu da;

$$P_{T_{SA}} = P_0 + \frac{1}{2}\rho V^2$$

şeklinde verilebilir. Dolayısıyla burada *V*, hava aracının (veya serbest hava akışının) durağan havaya göre olan hızı yani işari hava hızıdır (indicated airspeed)[2] ve pitot basıncı ile statik basınç farkından

$$V = \sqrt{\frac{2(P_{T_{SA}} - P_0)}{\rho}}$$

şeklinde bulunabilir. ρ ise deniz seviyesindeki hava yoğunluğudur ve tüm irtifalar için aynı şekilde deniz seviyesindeki hava yoğunluğu değeri alı-

2 Hız (velocity) ile sürat (speed) karıştırılmamalıdır. Hız vektörel bir nicelik olduğundan sahip olduğu bir değeri/şiddeti ile birlikte yönü de vardır. Sürat skalerdir, yönsüzdür. Hava hızı her ne kadar hava sürati (airpeed) olarak kullanılıyor olsa da vektörel bir hızdır.

narak işari hava hızı hesaplanmaktadır.

İşari hava hızı uçuş performansı veya tutunma kaybı (stall) sınırı gibi bilgilerin hesaplanmasında oldukça önemli olmakla birlikte başka yönlerden bakılınca aslında içerisinde birçok hatayı da barındırmaktadır. Bu hatalarda hava aracının ilerlerken ki pozisyonundan kaynaklanan statik basınç ölçümlerindeki hatanın işari hızdan giderilmesiyle kalibre edilmiş hava hızı bulunmaktadır. Bir diğer hata ise deniz seviyesindeki havanın sıkıştırılabilirliği ile özellikle yüksek hızlardakinin aynı olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu hata özellikle ses üstü hızlardaki uçuşlarda etkili olmaktadır. Kalibre edilmiş hava hızından bu hatanın giderilmesiyle oluşan hız ise eşdeğer hava hızıdır. Ayrıca her ne kadar hava yoğunluğu olarak deniz seviyesi yoğunluğu alınıyor olsa da aslında gerçek hava hızının bulunabilmesi için hava yoğunluğunun, bulunulan irtifadaki değerinin alınması gerekir. Örneğin 40 bin feette hava yoğunluğu deniz seviyesine göre 4 kat azaldığı için gerçek hava hızı, görünen işari hava hızının aslında iki katı olur. Gerçek hızı bulmak için bilinmesi gereken uçulan irtifadaki hava yoğunluğu ise hava sıcaklığından[3] hesaplanabilir. Tüm bu düzeltmeler sonucundaki hızlar aslında yer hızını göstermek için hala yeterli değildir. Çünkü ölçülen hava sürati vektörel bir nicelik olarak hava aracının durağan havaya göre (serbest hava akışı) hızını vermektedir. Ancak hava aracını destekleyen veya engelleyen bir rüzgâr hızı hava aracının yere göre hızını değiştirir. Bu nedenle yere göre hız ancak rüzgâr hızının da etkisi bilinerek bulunabilir. Hava aracı üzerinden dış rüzgar hızlarını belirlemek çok zor olduğundan yer hızının belirlenebilmesi için seyrüsefer aletlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu aletlerin kullanılarak yer hızının bulunması durumunda yer hızı ile gerçek hava hızı arasındaki fark rüzgarın hızını verir. Hava aracının uçuş performansı ve kararlılığı gibi özellikleri ise gerçek hava hızına göre hesaplanır, bu nedenle rüzgar hızı, yeryüzüne göre hız gibi hızların bu açıdan önemi azalmaktadır.

1.3 Toplam Hava Sıcaklığı Sensörü

Dış ortam sıcaklığı doğru olarak ancak hava aracının sabit durması veya çok yavaş hareket etmesi durumunda ölçülebilir. Dış ortam sıcaklığı statik sıcaklık olarak da isimlendirilir. Hava aracının hızından dolayı bu sıcaklığın doğrudan ölçülmesi mümkün değildir. Havadan ölçülen sıcaklık toplam hava sıcaklığıdır. Hava hızından dolayı toplam sıcaklık dış ortam sıcaklığından daha yüksek olmaktadır. Toplam hava sıcaklığı, dış ortam statik hava sıcaklığı ile hava akış hızından kaynaklanan sıkışan hava nedeniyle oluşan ısı değişimsiz (adyabatik) sıcaklık artışını birlikte içermektedir.

---

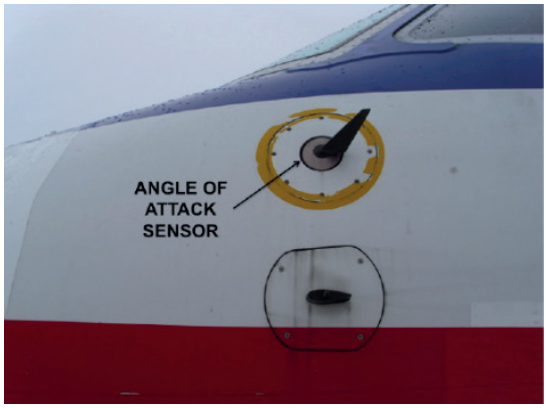
3 Statik porttan elde edilen basınç, $P = \rho RT$ olduğundan ve bu bağıntıdaki R havanın gaz sabit değeri olduğundan bulunulan irtifadaki T sıcaklığının bilindiği durumda bu irtifadaki $\rho_{gerçek}$ değeri de hesaplanabilir.

Hava akışı sensör içerisinde durağanlaştırılarak sıcaklığı ölçülmektedir. Ancak ölçüm yapılan durağan havanın belirli aralıklarla değiştirilmesi gerektiğinden giriş çıkıştan dolayı hava akışının tam olarak durağanlaştırılması mümkün değildir. Bu nedenle bir hata payı her zaman vardır. Sıcaklık sensörünün giriş açıklıkları sınır tabakasının dışında olacak ve hava akışı ile hizalı olacak şekilde konumlandırılması gerekir.

1.4 Hücum Açısı Sensörü

Hücum açısı hava aracı için en önemli parametrelerden biri olmasına rağmen hücum açısı sensörü aslında temel uçuş aletleri arasında yer almamaktadır. Çünkü hücum açısı bir sensör ile doğrudan ölçülmese dahi farklı yöntemlerle hesaplanabilmektedir. Hücum açısı kanat veter hattı ile uçağa etkiyen serbest hava akışı veya uçağın hız vektörü arasındaki açıdır. Kanat veter hattı ile hava aracı uzunlamasına ekseni paralel alındığında bu açı, uzunlamasına ve düşey hızlardan veya sabit hızlı bir uçuş esnasında hava aracının yunuslama açısı ile uçuş düzlemi açısı arasındaki farktan da bulunabilmektedir. Ancak uçuşun sabit hızla gerçekleşmediği durumlarda hücum açısı hesabı ancak gerçek hava hızı, yer hızı, rüzgar hızı gibi verilerin de bilinmesini gerektirmektedir. Taşıma, hava hızı ve hücum açısı arasındaki ilişki sayesinde hava araçlarında hücum açısını belirlemek için farklı yöntemler kullanılabilmektedir. Tüm bu yöntemler ise parametreler arasındaki belirli ilişkilerden hücum açısının hesaplanmasını sağlamaktadır.

Küçük boyutlu hava araçlarında kullanımı yaygın olmasa da aslında gerçek hücum açısının ne olduğunu ölçmek sadece hücum açısına özel sensörler sayesinde mümkün olmaktadır. Bu sensörler gövdeye monte edilerek uçuş esnasında üzerlerinde oluşan taşıma kuvveti ölçülebilmekte, taşıma kuvveti ile hücum açısı arasındaki doğrusal ilişki sayesinde bu kuvvetin büyüklüğüne göre de hücum açısı belirlenebilmektedir. Aynı yöntemlerle tutunma kaybı ikazı da oluşturulabilmektedir. Ancak hücum açısı sensörü de yerleştirildiği yerde kanat hücum açısını değil sadece o yerin hücum açısını ölçebilmektedir. Konumu belirlenirken de hava akışının bozulduğu yerlere yerleştirilmemesi gerekir. Bu nedenle çoğunlukla kanadı terk eden hava akışlarına maruz kalmaması için kanadın ön tarafındaki gövde yüzeylerine konulmaktadır. Bir hücum açısı sensörü Şekil 5'te verilmiştir. Bunun bir ikincisi daha eklenerek yana kayma açısı da aynı çalışma mantığıyla ölçülebilmektedir.



Şekil *5 Hücum açısı sensörü*

2. Yönelim Sensörleri

Hava aracının bir yere göre yöneliminin (açısal duruşunun) belirleyebilmek için o yeri sabit kabul ederek sabit yer ile hava aracının uzunlamasına, yanlamasına ve düşey eksenleri arasında yapılan açıların hesaplanması gerekir. Bu açılar yuvarlanma, yunuslama ve sapma açılarıdır. Hava aracı hareketli olduğundan sabit eksenlere göre bu açıların hesaplanabilmesi için sabit yer eksenlerini temsilen sabit kalabilen bir ölçüm aletini barındırması gerekmektedir. Hava aracı açısal hareketler yapsa da sabit kalabilen sensör klasik olarak dönü ölçer (jisorkop) sensörleridir. Dönü ölçerler ve ivmeölçerler atalet sensörleri olarak bilinir. Bu sensörler ataletsel ölçü birimi (IMU), yönelim ve istikamet referans sistemi (AHRS) ile ataletsel seyrüsefer sistemi (INS)'nin temel bileşenleridirler ve uçağın kontrolü, pozisyon bilgilerinin elde edilmesi ve yönlendirilmesi için oldukça önemlidirler.

2.1 Dönü Ölçer

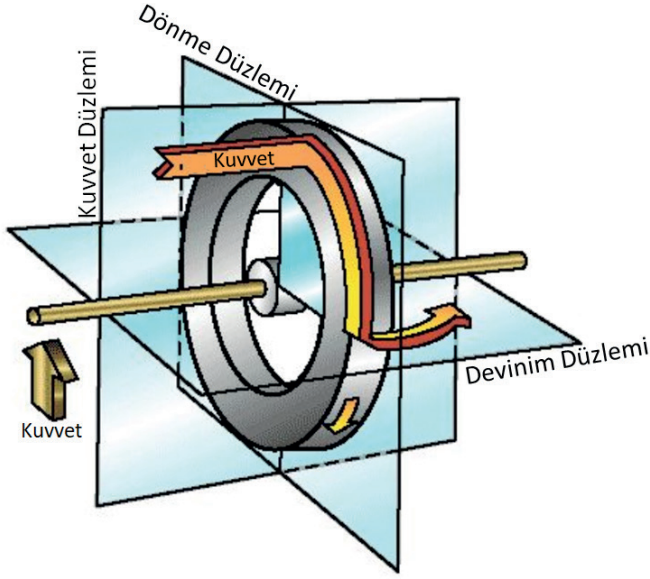
Dönü ölçerler hava araçlarında yönelimin belirlenmesinde kullanılan sensörlerdir. Ayrıca yön ölçümünde kullanılan sensörlerle birlikte kullanılarak yönün belirlenmesi amacıyla da kullanılırlar. Dönü ölçerler üzerine yapılan araştırma ve geliştirme faaliyetleri neticesinde bu teknoloji klasik dönü ölçerin çok daha farklı ve ileri seviyelere gelmesini sağlamıştır.

2.1.1 Klasik Dönü Ölçer

Dönü ölçer, içerisinde dönen bir teker barındırır ve bu teker döndükçe bir sensör olarak ölçüm yapabilmesini sağlayan iki önemli özellik gösterir. Bunlardan ilki, sensörün içinde bulunduğu ortamın ve çevresindekilerin hareketinden bağımsız olarak sabit kalmasıdır. Dönen rotorun açısal momentumu, üzerine monte edildiği mafsallı yatak (gimbal adı verilen düzenek) açısal hareketler yapsa dahi rotorun yönelimi korunur. Hava aracına yerleştirilen

dönü ölçer bu özelliği sayesinde, araç hareket etse de sabitliğini koruyabilir. Bu sabitlik özelliği kullanılarak hava aracının sabit eksenlere göre yuvarlanma, yunuslama ve sapma açısal hareketleri ölçülebilmektedir.

Dönü ölçerin bir diğer özelliği ise uygulanan kuvvetin yönünü değiştirmesidir. Tekeri dönen bir dönü ölçerin miline uygulanan kuvvetin etkisi, kuvvetin uygulama doğrultusunda hissedilmeyip uygulama noktasından tekerleğin dönüş yönüne dik (doksan derecelik) bir doğrultuda hissedilir. Örneğin Şekil 6'da verilen bir dönü ölçere aşağıdan yukarıya doğru bir kuvvet uyguladığınızı düşünün, dönü ölçer yukarı yönde dönmek yerine sizin sağınıza doğru döner/devinir. Bu özellik kullanılarak da hava aracının dönme, kayma ve savrulma gibi hareketleri belirlenebilmektedir.



Şekil *6. Dönü ölçer yapısı*

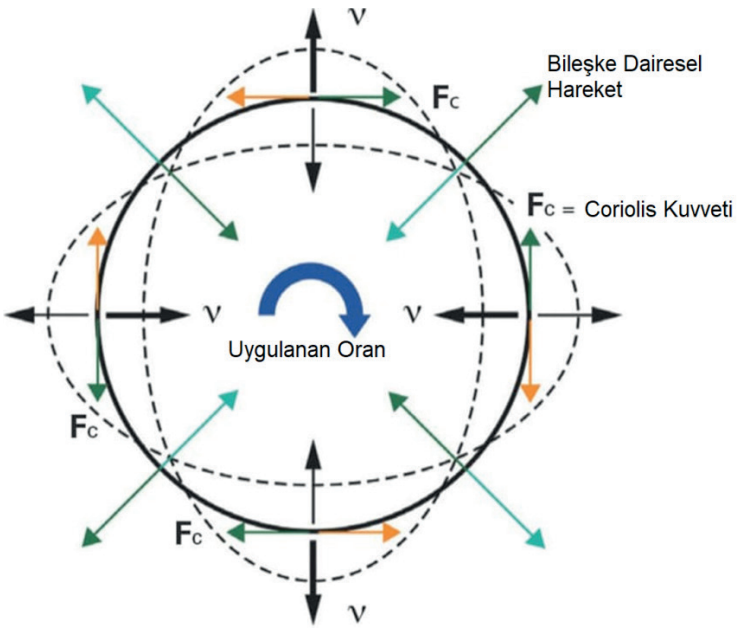
Yuvarlanma, yunuslama, sapma dönme, kayma, savrulma gibi farklı parametrelerin ölçülmesi için dönü ölçerler farklı formatlarda kullanılır. Düşey dönü ölçerler, dünyanın merkezinden geçen bir doğruyu referans sabit eksen olarak alır. Mili bu doğruya paralel olacak şekilde hava aracına yerleştirilir. Hava aracı yuvarlanma ve yunuslama hareketi yaptığında sabit olan bu mile göre yaptıkları açılar ölçülür. Dönü ölçer milinin hava aracının baş doğrultusunu gösterecek şekilde yerleştirildiği durumda istikamet dönü ölçeri olur. baş doğrultusunda sabit kalan mile göre yapılan açıyla sapma ölçülür. Yine kalkıştan önce, manyetik bir pusula kullanılarak uçağın gerçek kuzeyiyle hizalanana dönü ölçer hava aracının istikametini ölçebilir. Belirli bir eksen etrafındaki dönüş hızını ise oran dönü ölçerleri ölçebilir. Bu eksenler sapma, yunuslama ve yuvarlanma eksenlerinden birisi olabilir. Oran dönü ölçeri bu eksenler etrafındaki açısal değişim oranını yani açısal hızı verir. Bu bilgilerle

de kayma ve savrulma miktarı ile yatış oranı gösterilebilir.

2.1.2 Titreşimli dönü ölçer

Klasik dönü ölçerler günümüz modern teknolojilerine kıyasla hantal kalabilmektedir. Hem büyüklükleri hem de tekerin dönmesi için elektrik veya hava gibi bir tahrik gücüne ihtiyaç duymaları gün geçtikçe daha az kullanılmalarına neden olmaktadır. Günümüzde bunların yerine mikro elektro-mekanik sistemler (MEMS) yaygınlaşmaktadırlar. Yarı iletken yapıda olan bu sensörlerde dönen bir teker bulunmaz. Titreşimli dönü ölçerin temel bileşenleri mekanik elemanlar, sensörler, eyleyiciler ile bunlar tarafından üretilen işaretleri işleyen elektronik elemanlardır. İşaret üretim ve iletimi için karmaşık elektrik devrelerinin kullanılması gerekir. Diğer birçok entegre devre elemanı gibi MEMS'ler de silikon yarı iletken teknolojisini kullanmaktadır.

Titreşimli dönü ölçerde dönen teker yerine yuvarlak bir silikon halkanın hareketten kaynaklanan titreşimi (vibrasyon) kullanılmaktadır. Şekil 7'deki gibi bu halka dönü ölçer içerisinde uzay boşluğu özelliği gösteren boş bir ortama konumlandırılmakta ve sabit bir titreşim hareketiyle yerinde kalması sağlanmaktadır. Herhangi bir açısal hareketin olmadığı durumlarda halka bu sabit titreşimini aynı yönlerde devam ettirmektedir. Ancak açısal bir hareket esnasında halka üzerinde oluşan kuvvetin büyüklüğüne göre halkanın titreşim hareketinin yönü değişmektedir. Bu titreşim hareketi Coriolis kuvveti etkisiyle meydana gelmektedir.



Şekil *7. Hareketten etkilenen bir silikon halka yapısı*

Coriolis kuvveti, sabit düzleme göre dönüyor olan bir düzlem içerisinde hareket eden bir cisme uygulanan sanal kuvvettir. Sabit düzleme göre aslında doğrusal bir hareket gerçekleştiren cisim dönen düzlemdeki sabit bir noktaya göre açısal bir hareket gerçekleştirir. Bu farkın oluşmasına neden olan Coriolis kuvvetine *Coriolis etkisi* denir. Bu etkiyle gerçekleşen açısal hareketlerin ölçülmesini kullanan bir dönü ölçer türü de yarı küresel *çınlaç dönü ölçer*dir. Yüksek teknolojilerle üretilebilen ve oldukça hassas ölçümler yapabilen bu dönü ölçerler daha çok uzay araçlarında kullanılmış olsa da son yıllarda AHRS gibi hava aracı sistemlerinde de kullanılmaya başlanmıştır.

Mikro elektro-mekanik sistemler düşük güç tüketimi ve uygun maliyet avantajlarına sahiptir. Boyutlarının küçük olması çok daha küçük insansız hava araçlarında veya kameralar gibi küçük cihazlarda kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece MEMS kendisine geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Diğer taraftan çevresel faktörlerden etkilendiklerinden çevreden iyi bir şekilde izole edilmeleri gerekmektedir. Ayrıca bu sensörlerin fiziksel olarak modellenmesi zordur.

2.1.3 Lazer Dönü Ölçer

Başta uçaklar olmak üzere hava araçlarında lazer ışınları kullanılarak ölçüm yapılan dönü ölçerler de kullanılmaktadır. Diğer dönü ölçer türlerinin dönen teker veya titreşim/çınlama özelliği kullanmalarının aksine bunlarda haraketli bir yapı yerine lazer ışınını kullanarak yönelimi belirler. Bir ışın demeti ikiye bölünerek bu ışınların aynı dairesel yol üzerinde ancak zıt yönlerde ilerlemeleri sağlanır. Yola giriş noktasına dönüşte halkadan çıkan iki ışının çarpışması sağlanır. Dönü ölçerin üzerinde bulunduğu hava aracı açısal hareket etmiyorsa çarpışan bu iki ışın aynı özellikte (faz farkında) kalır. Hava aracının açısal hareketi anında bu iki ışın arasında faz farkı oluşur. Bu fark hava aracının açısal hareketiyle orantılı olarak gerçekleşir. *Sagnac etkisi* olarak isimlendirilen ışınlar arasındaki bu faz farkı kullanılarak hava aracının yönelimi belirlenebilmektedir. Bu etkinin kullanıldığı dönünü ölçerlere fiber optik dönü ölçer ile halka lazer dönü ölçer örnek verilebilir.

2.2 İvmeölçer

İtki, taşıma ve sürükleme kuvvetlerinin, yani yerçekimi kuvveti hariç uçağa etki eden temel kuvvetlerin toplamının uçağın kütlesine bölünmesine özgül kuvvet denilir. Diğer bir atalet sensörü olan ivmeölçer, belirli eksen üzerinde özgül kuvvetin bileşenini ölçmektedir. İvmeölçerlerde tipik olarak bir yaya bağlı bir kütle bulunmaktadır. İvmeölçerin bağlı olduğu cisim ivmelendiğinde bu kütle ataletinden dolayı sabit kalmak ister. Bunun sonucunda yayda gerilme veya sıkışma meydana gelir. Yani yayda bir kuvvet oluşur. İvmeölçerler basitçe, bahsi geçen özgül kuvvet bileşenini bu prensibe dayanarak elde etmektedir. Elde edilen kuvvet bileşeni bilgisinden eksen üzerindeki ivmenin hesaplanabilmesi için ivmeölçer eksenlerine göre yerçekimi kuvve-

tinin büyüklüğünün ve yönünün bilinmesi gerekmektedir. İvmeölçerler ile doğrusal ivme, açısal ivme ve cismin titreşimi ölçülebilir. Üç ayrı ivmeölçerden oluşan üç eksenli ivmeölçerler oldukça yaygındır. Bunların içerdiği ivmeölçerlerin her biri uzunlamasına, yanlamasına ve düşey eksenlerden birindeki ivmelenmeyi ölçebilir.

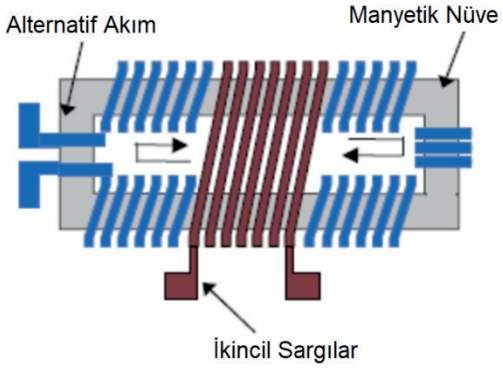
Günümüzde mikro elektro-mekanik sistem (MEMS) ivmeölçerler de oldukça yaygın kullanılmaktadır. Bunlarda bir, iki veya üç eksenli ivmeölçerler barındırabilir. Küçük ve hafif bir ivmeölçer çeşidi olduğu için kullanımı yaygındır. Bir diğer ivmeölçer çeşidi olan piezoelektrik ivmeölçerlerin ise titreşimi ölçmek için kullanımı yaygındır. Matematiksel yöntemlerle ivmeölçer verilerinden hız ve yer değiştirme elde edilebilir. İvmeyi farklı yönlerde ölçebilme yetenekleri nedeniyle ivmeölçerler de AHRS'nin temel bileşenleri arasında yer alır.

2.3 Manyetik alan ölçer

En eski manyetik alan ölçer sulu pusuladır. Yaygın olarak kullanılan sulu pusula, metal bir şamandıraya lehimlenerek bir sıvı kabında asılı duran küçük bir kalıcı mıknatıstan oluşur. Mıknatıs dünyanın manyetik alanının etkisine girerek bu alan doğrultusunda hizalanır. Bu sulu pusula hassas ölçümler gerektiren parametrelerin anlık hesaplamalarında kullanılamaz. Bunun yerine istikamet dönü ölçeri kuzeyi gösterecek şekilde sabitlenerek bu sabit doğrultu ile yapılan yatay açı hava aracının kuzeye göre doğrultusunu verebilir. Ancak dönü ölçer kuzeyi takip etme özelliğine sahip değildir dolayısıyla hava aracının konumu değiştikçe kuzeye göre yeniden ayarlanması/sabitlenmesi gerekir. Klasik dönü ölçer ile yön hesabında bu ihtiyaç her on beş dakikada bir manyetik alan ölçerin gösterdiği yöne göre dönü ölçerin ayarlanmasıyla giderilmektedir. Yön hesabı için dönü ölçer ile manyetik alan ölçer birlikte kullanılmaktadır.

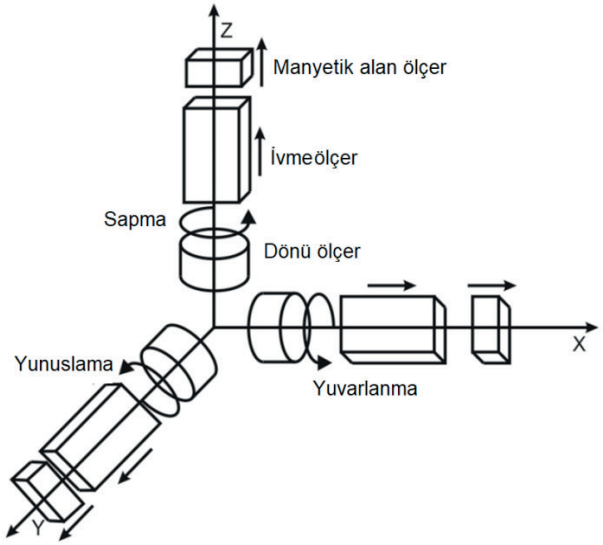
Manyetik alan ölçer (manyetometre) yön belirlemede kullanılan bir sensördür. Dünyanın manyetik alanının büyüklüğünü ve yönünü ölçerler. Dünyanın manyetik alanındaki değişiklikleri algılayabilen sensörlerdir. Manyetik alan şiddetiyle orantılı elektrik sinyalleri üretirler. İrtifa arttıkça manyetik alanın kuvveti azaldığından manyetometreler genelde diğer sensörlerle birlikte kullanılmaktadır. Manyetometreler skaler ve vektörel olarak ayrılırlar. Skaler olanlar manyetik alanın sadece büyüklüğünü ölçer. Hava araçlarında ise manyetik alanın hem büyüklüğünü hem de yönünü ölçebilen vektörel manyetometreler tercih edilmektedir. Hava araçlarında yaygın olarak kullanılan manyetik alan ölçerler arasında *akıgeçiş pusula* sayılabilir. Şekil 8'de verildiği gibi tipik bir akıgeçiş manyetometresi, manyetik özelliği bulunan demir gibi bir malzemeden üretilmiş nüveye sarılan birincil ve ikincil sargılardan oluşur. Birincil sargılara alternatif bir akım uygulanarak manyetik alanın sinüzoidal olarak değişmesi sağlanır. Birincil sargılar iki tarafta bir-

birine zıt yönde sarılır ve oluşturulan kapalı çevrim akı yolu sayesinde akım ile beslenen birincil sargılar ile algılamayı sağlayan ikincil sargılar arasındaki etkileşimin en aza indirilmesi hedeflenir. Manyetometrenin dışında harici bir manyetik alanın varlığında ikincil sargılar aracılığıyla bu harici alan nüve tarafından (üzerindeki değişen alternatif akım nedeniyle değişen şekilde) çekilir. Bu şekilde ikincil sargılar üzerinden manyetometreye akı geçişiyle ölçüm yapıldığından akıgeçiş manyetometresi ismini almaktadır.



Şekil *8. Akıgeçiş pusula yapısı*

Bir diğer tür olan MEMS manyetik alan ölçer de IMU gibi yönelim belirleme sistemlerinde temel sensörler olan ivmeölçer ve dönü ölçerlere ilave olarak kullanılıp yön belirlenmesini sağlamaktadır. Bunlara hava sensörleri de ilave edildiğinde yönelim, yön ve hava verileri ölçülebilir hale gelmektedir. Üç eksenli bir ivmeölçer ile dönü ölçer içeren bir ataletsel ölçüm sistemi altı serbestlik dereceli hareketi belirleyebilirken üç eksenli bir manyetometre de barındırırsa dokuz serbestlik derecesine sahip bir sistem elde edilir. Serbestlik derecesi arttıkça ataletsel ölçü biriminin yaptığı ölçümlerin doğruluğu artmaktadır.



Şekil *9. Dokuz serbestlik dereceli bir ataletsel ölçüm sistemi modeli*

Ataletsel ölçüm sistemleri yön ve yönelim belirlemede kendi başlarına yeterli sistemlerdir. Bu sistemler sabit bir noktayı referans eksen takımı olarak alıp bulundukları hava aracının başlangıç noktasından ne kadar uzaklaştığını hesaplayabilirler. Bilinen başlangıç noktası ve bu yer değiştirme bilgisiyle mevcut konumlarını da hesaplayabilirler. Ancak hareket belirli bir noktaya göre sürekli toplanarak hesaplandığından zamanla hesaplamalara dahil olan hata miktarı da toplanarak artmış olmaktadır. Bu nedenle ataletsel ölçüm sistemleri küresel konumlandırma sistemleri gibi seyrüsefer sistemleriyle birlikte de yaygın olarak kullanılır. Bu da ataletsel ölçüm sistemlerinin doğruluğunu ve güvenilirliği arttırmada faydalı ve önemlidir. Bu sayede zaman içinde sapmalardan kaynaklanan uzun vadeli konum hesaplamalarında oluşan hatalar engellenebilir. Diğer taraftan ataletsel ölçüm sistemleri sıcaklık değişimi ve titreşimler gibi çevresel faktörlere duyarlı ve maliyeti yüksek bir sistemdir. Özellikle havacılık ve uzay alanında bu ölçümlerin yüksek hassasiyetle yapılması gerektiğinden maliyetleri de daha yüksek olmaktadır.

Sonuç

Temel uçuş parametreleri olarak ticari uçaklarda kullanılan temel uçuş ekranındaki uçuş ile ilgili önemli göstergelerin hesaplanmasında kullanılan parametreler ifade edilmektedir. Uçuş için önemli ve öncelikli olan bu göstergeler irtifa, düşey hız, hava hızı, yönelim, yön ve hücum açısı göstergeleridir. Uçuş hakkında bilgi veren bu göstergelerdeki temel uçuş parametrelerinin ölçülmesini sağlayan sensörler hava veri sensörleri ile yönelim ve yön sensörleridir. Bu bölümde temel uçuş aletlerinin gösterdiği bilgilerin üretilmesine

kaynaklık eden bu ölçüm birimleri ele alınmıştır. Ölçümlerin dayandığı temel kuramlar, sensörlerin çalışma mantıkları ve havacılıkta uygulanma yöntemleri irdelenmiştir. Farklı birçok alanda kullanılan sensörlerin temel uçuş parametrelerinin hesaplanmasındaki yerleri ve havacılıkta kullanım şekilleri ortaya konulmuştur.

Bu bölümde temel uçuş parametreleri olarak hava veri sensörleri ile yönelim sensörleri alınmıştır. Bunların yanında manyetik alan ölçer de bir seyrüsefer sensörü olduğu halde yönelim sensörleriyle yaygın olarak kullanıldıkları için ele alınmaktadır. Diğer taraftan hava aracında anten ve radar gibi algılama birimlerinin kullanıldığı birçok seyrüsefer sistemi veya hava aracı motorunda kullanılan oldukça yüksek sayıda sensör bulunmaktadır. Bu sensörlerin ele alındığı daha genişletilmiş çalışmalar da yapılabilir.

Bu bölümde küresel konumlandırma sisteminin veya manyetik alan ölçerin ataletsel sistemleri desteklemesinin oluşturduğu örnek gibi son zamanlarda yapılan modern teknolojik çalışmalar da hava araçlarında farklı sistemlerin birlikte çalışabilmeleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu sayede entegre modüler aviyonik (integrated modular avionics, IMA) mimarileri geliştirilmektedir. Bu yapılar sistem performans ve kapasitelerini arttırmaları, farklı donanımların birbirini destekleyerek kullanılabilmesi ve daha az bakım-onarım ihtiyacı gerektirmesi nedeniyle maliyeti de önemli ölçüde düşürmektedir. Hava aracının barındırdığı farklı sensör sistemleri de bu çalışmalar kapsamında entegre edilmeye oldukça açıktır.

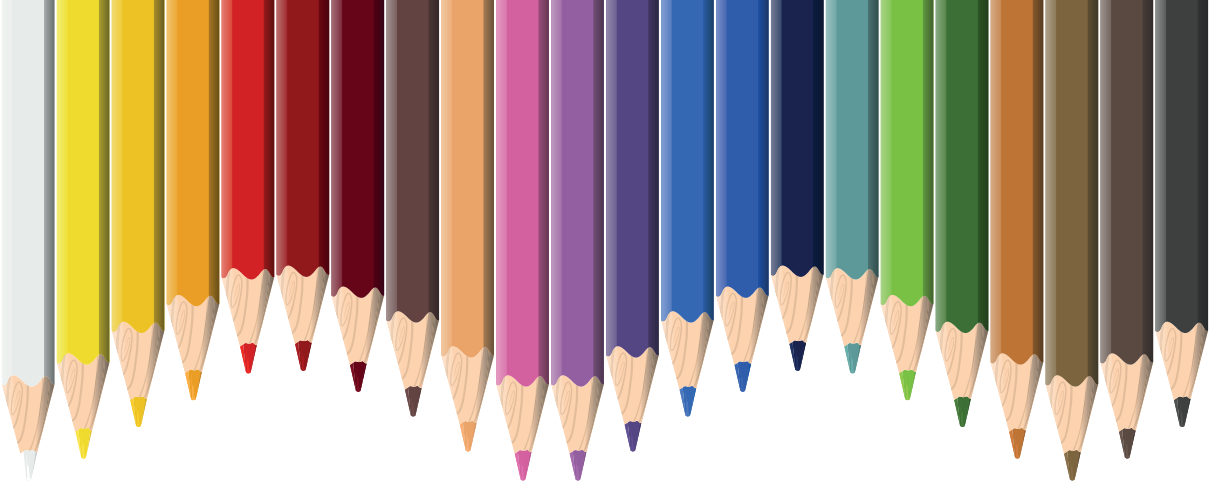
KAYNAKÇA

Collinson, Richard PG. *Introduction to avionics systems*. Springer Science & Business Media, 2013.

Johansen, T. A., Cristofaro, A., Sørensen, K., Hansen, J. M., and Fossen, T. I. (2015, June). On estimation of wind velocity, angle-of-attack and sideslip angle of small UAVs using standard sensors. In *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 510-519).

Wenz, A., Johansen, T. A., and Cristofaro, A. (2016, June). Combining model-free and model-based angle of attack estimation for small fixed-wing UAVs using a standard sensor suite. In *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 624-632).

Çelik, H., and Sayıl, A., (2023). Aviyonik Sistemlerde Blok Zinciri Teknolojisi. Mühendislik Alanında Gelişmeler 1 (pp.121-149), Ankara: Platanus Publishing.



Bölüm 22

HİDROLİK ÇATLATMA: TARİHSEL GELİŞİMİ VE TÜRKİYE'DEKİ UYGULAMALARI

İnci TÜRK TOĞRUL[1]

1 Prof.Dr. Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Bölümü, incitgrl@gmail.com, ORCİD: ORCID No: 0000-0001-7549-2968

GİRİŞ

Konvansiyel yollarla petrol üretiminin mümkün olmadığı, geçirgenlik ve gözenekliliğin çok çok düşük olduğu rezervuarlarda petrol veya doğalgaz üretimi yapabilmek için hidrolik çatlatma adı verilen teknik uygulanmaktadır. Kaya gazlarında konvansiyel olarak üretim pek mümkün olmadığından hidrolik çatlatma yöntemiyle bu tür rezervuarlarda petrol veya doğalgaz üretimi yapmak mümkündür. Hidrolik çatlatma, kayaçları veya yer altı oluşumlarındaki kırıkların açılmasını sağlamak için su ve basınç kullanılan bir madencilik ve petrol ve doğalgaz endüstrisi uygulamasıdır. Bu işlem, kuyu delme veya madencilik operasyonları sırasında istenilen sonuçlara ulaşmak amacıyla kullanılır.

Hidrolik çatlatmada; su, jel yapıcı kimyasallar ve kumu yüksek basınç ve yüksek debilerde rezervuara enjekte ederek akışkanın kuyu içine daha kolay akmasını sağlayacak akış kanalları oluşturulur (Heinberg, 2013). Stanolind Oil firmasının Kansas'da bulunan Hugoton sahasında 1947 yılında gerçekleştirdiği çatlatma operasyonu ilk çatlatma operasyonu olarak kabul edilir. 1949 yılında Amerikan menşei Halliburton firmasının Oklahoma'da iki kuyuda yaptığı hidrolik çatlatma operasyonları ise ticari manada ilk olumlu hidrolik çatlatma operasyonu olarak kabul edilir (Montgomery & Smith, 2010). Böylelikle hidrolik çatlatma, petrol endüstrisinde ciddi yer edinmeye başlamıştır. 2015 yılı itibariyle Amerika'da hidrolik çatlatma yapılarak üretilen yıllık gazın hacmi diğer konvansiyel yöntemlerle üretim yapılan yıllık gaz hacmini geçmiştir. Enerji açısından dışa bağımlı olan Türkiye'de ise ABD Enerji Bilgi İdaresi'ne göre 4,6 trilyon m^3 kaya gazı rezervi bulunmaktadır (Özalp, 2018). Kaya gazı üretimi açısından henüz yolun başında sayılan Türkiye için sahip olunan bu potansiyel ekonomik açıdan ciddi önem arz etmektedir.

HİDROLİK ÇATLATMA NEDİR?

Artan enerji ihtiyacını karşılamak için petrol endüstrisi 20. yüzyıl başlarında farklı arayışlara girmiş, nihayet 1940'lı yıllarda hidrolik çatlatma denilen tekniğin başarılı bir şekilde uygulanması ile şeyl gazı gibi sıkı rezervuarlarda üretim yapılabilmesinin önü açılmış ve enerji talebini karşılamada tüm dünya için umut ışığı olmuştur. Petrol/doğalgazın oluşum teorisine göre kaynak kayadan meydana gelen petrol üstte geçirimsiz bir kayaç olmadığında göç ederek üstünde geçirimsiz bir örtü kayanın olduğu rezervuar kayada kapanlanır. Ana kayadan göç ettikten sonra üstte geçirimsiz bir kayanın altına kapanlanan petrol konvansiyonel yolla üretim yapılmaktayken, petrolün göç öncesi oluştuğu ana kayadan yapılan üretim ankonvansiyel üretim olarak adlandırılmaktadır (Beşergil, 2022). Şekil 1'de solda konvansiyel yol ile üretim yapan bir kuyu ile sağda ankonvansiyonel yöntemlerle üretim yapan bir kuyu görülmektedir. Şekilde sol taraftaki kuyuda kapanlanmış bölgede bulunan petrol/gaz konvansiyonel kuyuyu temsil ederken, sağdaki kuyuda kaynak kayaya doğru yatay olarak kazılmış ankonvansiyonel olarak üretim yapmaktadır.

Ankonvensiyonel gaz üretimi

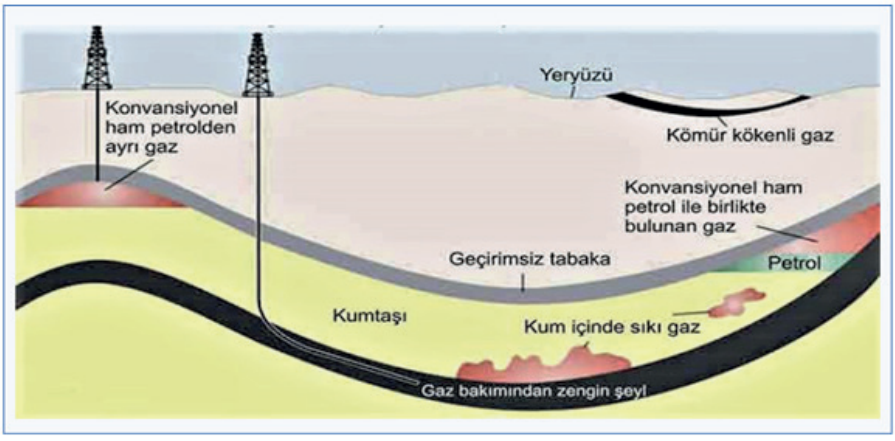
Ankonvensiyonel gaz üretimi, geleneksel gaz rezervuarlarından farklı olan daha karmaşık ve özel tekniklerin kullanıldığı bir süreçtir. Ankonvensiyonel gaz, genellikle mikroporözite ve kılcal çatlaklar içinde hapsolmuş durumdadır. Bu tip rezervuarlardan gaz çıkarmak için geleneksel yöntemler genellikle yeterli değildir çünkü gaz, doğal akış veya basınçlı kuyu başlığı ile serbest bırakılamaz. Ankonvensiyonel gaz türleri ve üretimleri ile ilgili bazı temel bilgiler aşağıda sıralanmıştır;

Şeyl gazı, genellikle şeyl kayaçları içinde sıkışmış olan doğalgazdır. Bu kayaç formasyonlarından gaz çıkarabilmek için hidrolik çatlatma tekniği kullanılır. Bu işlemde, kayaç formasyonlarına yüksek basınçlı su, kum ve kimyasal katkı maddeleri enjekte edilerek çatlaklar açılır ve doğalgazın serbest bırakılması sağlanır.

Sıkıştırılmış gaz, genellikle kumlu ve poroziteleri düşük olan formasyonlarda bulunur. Bu gaz rezervuarlarından gazın çıkarılabilmesi için sıkıştırılmış gaz rezervuarlarının açılması ve gazın akışkan hale getirilmesi gerekir. Yatay delme ve hidrolik çatlatma gibi teknikler sıkıştırılmış gaz üretiminde kullanılabilir

Kömür yataklarında bulunan metan gazına *kömür yatağı metanı* denir. Bu tür gaz rezervuarlarından gazın çıkarılabilmesi için kömür yataklarının içine su enjekte edilerek metanın serbest bırakılması sağlanır. Bu süreç, gazın serbest bırakılmasını kolaylaştırır.

Hidratlar, su ve metanın birleşiminden oluşan katı veya yarı katı bir formdaki kristal yapıdır. Bu *hidrat yataklarından* metan çıkarılması zordur ve özel yöntemler gerektirir. Sıcaklık ve basınç koşulları altında hidratın çözülmesi veya gazın hidrata dönüştürülmesi gibi tekniklerle bu gaz rezervuarlarından gaz elde edilebilir.



Şekil 1. *Konvansiyel ve ankonvansiyonel üretim yapan kuyular (https://tr.wikipedia.org/wiki/Kum_gaz%C4%B1)*

Ankonvensiyonel petrol üretimi

Ankonvensiyonel petrol üretimi, geleneksel veya konvensiyonel yöntemlerle elde edilen petrol üretiminden farklıdır. Ankonvensiyonel petrol, genellikle kumlu ve sıkıştırılmış formasyonlarda bulunur ve bu nedenle çıkarılması daha zor olabilir. Ankonvensiyonel petrol üretimi ile ilgili yöntemler ve elde edilen petrol türleri aşağıda verilmiştir;

*Şeyl petrolü***,** genellikle kayaç formasyonları arasında bulunan ve sıkışmış petrol içeren özel kaya türleri olan şeyl kayaçlarından elde edilir. Bu tür petrol, genellikle hidrolik çatlatma veya diğer özel tekniklerle çıkarılır. Seyl petrol üretimi, özellikle ABD'de önemli bir artış göstermiştir

Sıkıştırılmış petrol, yoğunluğu yüksek ve porozite (gözeneklilik) düşük olan kayaç formasyonlarında bulunan petrolü ifade eder. Bu tür petrol, genellikle hidrolik çatlatma ve yatay delme teknikleriyle çıkarılır.

Ağır petrol, normalden daha yoğun ve viskoz olan bir petrol türüdür. Ağır petrol rezervuarları, genellikle geleneksel yöntemlerle çıkarılmasının zor olduğu alanlarda bulunabilir. Bu tür rezervuarlardan petrolü çıkarmak için özel teknikler ve termal iyileştirme yöntemleri kullanılabilir.

Petrol kumları, genellikle bitümen içeren kumlu rezervuarlardan elde edilen bir petrol türüdür. Bu rezervuarlardan petrol çıkarmak için genellikle açık madencilik veya yüzey yöntemleri kullanılır. Özellikle Kanada'nın Alberta eyaletinde Athabasca Oil Sands bölgesi, büyük bir petrol kumu rezervuarına sahiptir.

Artırılmış Petrol Kurtarma, Ankonvensiyonel petrol rezervuarlarından daha fazla petrol çıkarmak amacıyla uygulanan çeşitli teknikler arasında kimyasal çatlatma, su enjeksiyonu ve termal iyileştirme (ısıtma) gibi yöntemler bulunur.

Konvansiyel petrol ve doğalgaz rezervuarlarında petrol akışı olabilmesi için gerekli olan en temel iki özellik, gözeneklilik ve geçirgenlik değerlerinin iyi olmasıdır. Şeyl rezervuarların yapısı konvansiyonel rezervuarla karşılaştırıldıklarında kayaç ve akışkan özellikleri tümüyle farklıdır. Bu formasyonlarda; gözenekler nano ölçektedir, kimyasal yapısı oldukça değişik olup, kuartz, kalsit ve kili minerallerden oluşmakta olup ayrıca şeyl rezervuarlardaki sıvılar, sıvılardaki yüksek orandaki hafif bileşenler nedeniyle yoğuşmaya eğilimlidir (Feng vd., 2020). Şeyl (killi formasyon) gibi konvansiyel olmayan (ankonvansiyonel) kuyularda gözenek yapısının nano ölçekte olması ve geçirgenliğin oldukça düşük olması akışkanın gözeneklere doğru akmasını engellediğinden konvansiyel yollarla petrol ve doğalgaz üretimi yapmak pek mümkün değildir. Bu aşamadan sonra hidrolik çatlatma uygulanır. Hidrolik çatlatma, kayaçların içerisindeki doğal çatlakları genişletmek veya yapay olarak çatlaklar oluşturmak amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem

enerji endüstrisinde özellikle sıkıştırılmış doğal gaz (şeyl gaz) ve sıkıştırılmış petrolün (şeyl petrol) üretimi için kullanılmaktadır. Hidrolik çatlatma, kayaç içindeki doğal gaz veya petrolü serbest bırakmak amacıyla kullanılır. Su, kum ve kimyasal katkılar içeren özel bir karışım, yüksek basınç altında kayaçlara enjekte edilir. Bu, kayaçları çatlamaya zorlar, akışkanın kuyu içine daha kolay akmasını sağlayacak akış kanalları oluşturulur ve kayaç içerisindeki doğal gaz veya petrolü serbest bırakır (Heinberg, 2013).

Şeyl formasyonlarının konvansiyonel formasyonlara göre daha büyük yapılarda olması ve artık hidrolik çatlatmada gelinen seviyeden dolayı pek çok ülkede doğalgaz üretiminde yaşanan azalmalar da göz önünde tutulduğunda şeyl gazından üretim potansiyeli daha çok önem kazanmaktadır. ABD Enerji Bilgi İdaresi dünyada bilinen şeyl gazı yataklarının mevcut olan üretilebilir doğalgaz rezervlerinin %47'sine denk geldiğini tahmin etmektedir (Kudapa vd., 2018).

UYGULAMA YÖNTEMİ

Akışkanın gözenekler boyunca akışını kolaylaştırmak için yapay gözeneklilik oluşturmak gerekir. Bunu da hidrolik çatlatma yöntemi ile yapmak mümkündür. Yöntemin uygulanması aşağıdaki işlem adımlarında gerçekleşir (Murthy & Chavali, 2020; Chremisinoff & Davletshin, 2015):

- İlk adım, yeraltındaki kaynaklara ulaşmak için kuyu delme işlemidir. Bu delik, genellikle yatay veya dikey olarak açılır ve genellikle binlerce metre derinliğe kadar inebilir.

- Delik içine enjekte edilen su, kayaçları çatlatmak için kullanılır. Su, yüksek basınç altında enjekte edilir ve bu basınç, kayaçlarda doğal çatlakları genişletir veya yapay çatlaklar oluşturur. Çatlatmanın yayılmasını sağlayan bu basınca "yayılma basıncı" denir.

- Su enjekte edilirken, içine çeşitli kimyasal katkı maddeleri ve/veya propant (çatlamış kayaçlardaki çatlakların açık kalmasına yardımcı olmak için kullanılan küçük tanecikler) da eklenir.

- Bu kimyasal maddeler, kayaçların daha kolay çatlamasını sağlamak, çatlakların genişlemesini ve açık kalmasını desteklemek amacıyla kullanılır.

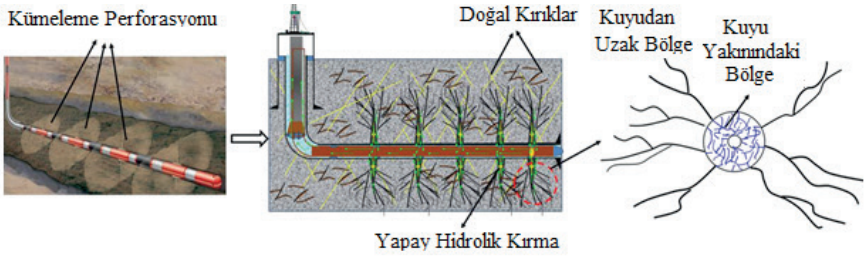
- Enjekte edilen su ve kayaçlara uygulanan yüksek basınç, kayaçları çatlatarak içerdikleri maddelerin serbest bırakılmasını sağlar.

- Bu basınç altında çatlaklar oluşur ve bu çatlaklar boyunca petrol, doğalgaz veya diğer değerli maddeler kuyuya veya madencilik operasyonuna yönlendirilir.

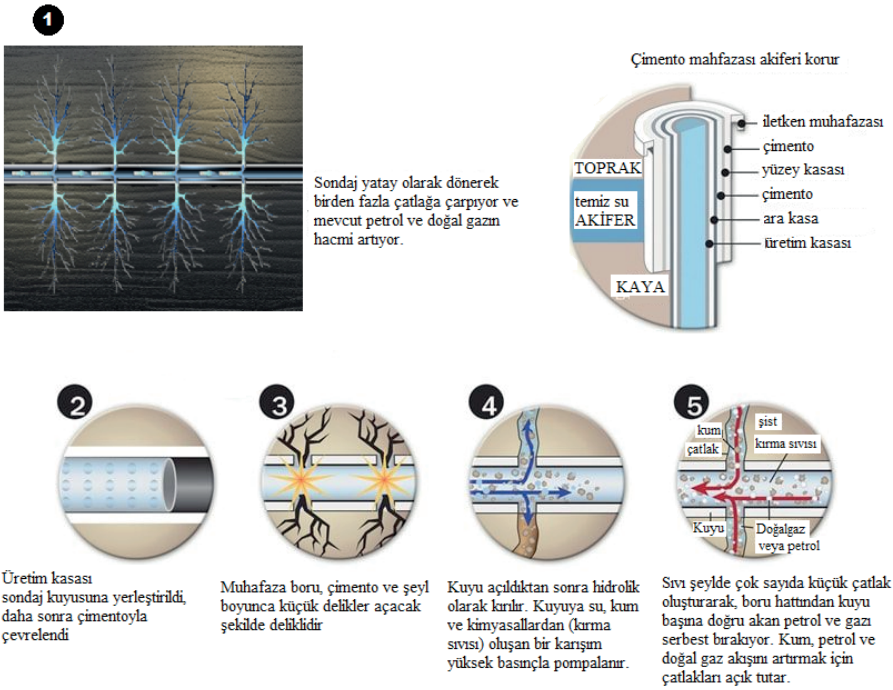
- Çatlanmış kayaçlardaki çatlakların açık kalmasını sağlamak için propant kullanılır. Propant, çatlaklardaki aralıklara yerleştirilir ve bu sayede çatlaklar kapatılmaz, enerji üretimi veya madencilik faaliyeti devam edebilir.

- Son aşama, çatlaklardan serbest bırakılan petrol veya doğalgaz kuyuya daha kolay bir şekilde akabilmekte ve de üretim yapılabilmektedir.

Şekil. 2'de hidrolik çatlatma yapılmış ve doğal olarak kırılmış formasyon ve aralarındaki iletişim görülmektedir. Şekil 3'de yatay olarak delinen boruda çatlata mekanizması verilmiştir. Şekild 3'den görüldüğü üzere oluşan çatlakların arasına yerleşen kum tanecikleri sayesinde kuyuya petrol veya doğalgaz akışı kolaylaşmakta, böylelikle üretim sağlanabilmektedir.



Şekil 2. *Yapay hidrolik kırılma ve doğal olarak kırılmış bir formasyon arasındaki iletişim (Li, 2020).*



Şekil 3. *Çatlatma mekanizması (Munster, 2013, watershedcouncil.org)*

Propant, hidrolik çatlatma işleminde kullanılan hidrolik çatlatma sırasında yüksek basınçlı sıvının içine enjekte edilen malzemelerdir. Hidrolik çatlatma ile çatlatılmış kayaçların açık kalmasını sağlamak ve hidrokarbonların (gaz veya petrol) serbest bırakılmasına yardımcı olmak için kullanılır.

Propant, genellikle yüksek mukavemetli ve aşınmaya dayanıklı malzemelerden yapılır. En yaygın kullanılan propant türleri aşağıda verilmiştir (Mader, 1989).

Kum, hidrolik çatlatma işleminde en yaygın kullanılan propant türüdür. Yüksek mukavemetli ve uygun maliyetli olması nedeniyle tercih edilir. Kum, çatlatılmış kayaçlardaki çatlakları açık tutarak gaz veya petrolün serbest bırakılmasına yardımcı olur.

Seramik küreler, yüksek mukavemetleri ve kimyasal dirençleri nedeniyle tercih edilen bir propant türüdür. Kumdan daha dayanıklı olabilirler, ancak maliyeti genellikle daha yüksektir.

Reçine kaplı kum, daha iyi mukavemet ve akışkanlık özelliklerine sahip olması için kum tanelerinin reçine ile kaplanmasıyla elde edilir. Bu, çatlatılmış kayaçlardaki çatlakların daha iyi desteklenmesini sağlayabilir.

Sinterlenmiş Bauxite ve Alümina Küreler: Bu propant türleri, yüksek mukavemet, aşınma direnci ve kimyasal dayanıklılık özellikleri nedeniyle tercih edilir. Ancak genellikle yüksek maliyetlidir.

Propant seçimi, hidrolik çatlatma operasyonlarının başarısını etkileyebilir. Verimli bir hidrolik çatlatma işlemi için uygun propant türünün seçilmesi önemlidir. Propant kullanımı, çatlatma işleminin etkinliğini ve hidrokarbon üretimini artırma amacına hizmet eder.

Çatlatma akışkanına göre yedi tür hidrolik çatlatma yöntemi vardır. Bunlar; (Holloway, 2018);

- Su bazlı sıvılar (su, jel veya hibrit),
- Köpük bazlı sıvılar,
- Petrol bazlı sıvılar,
- Asit bazlı sıvılar,
- Alkol bazlı sıvılar,
- Emülsiyon bazlı sıvılar,
- Kriyojenik akışkanlar (CO2,N2,He vb.) .

Su/jel ile çatlatma operasyonlarında ana sıvı olarak su ve/veya jel kullanılır ve 70-120 varil/dak gibi yüksek debide basma işlemi gerçekleştirilir. Kumun daha öteye taşınması veya daha yüksek basınçlara çıkılması gerektiği durumlarda su yerine jel tercih edilmektedir. Diğer sıvı türlerine nazaran en çok tercih edilen çatlatma tekniklerinin başında gelmektedir.

Asitle çatlatma yöntemi, yoğun olarak kullanılan başka bir çatlatma yöntemidir. Bu teknikte çatlatılan formasyonlar genelde asidin etkili olduğu

karbonat kayaçlardır. Asit gözenekler boyunca ilerleyerek ve kayaçla tepkimeye girerek yapay gözenekler oluşturur. Aside geciktirici etkisi yapılan katkılar katılarak daha geniş bir alanda asidin yavaşça nüfuz etmesi sağlanır. Asitle çatlatmada sadece asidin kayaçla tepkimeye girmesi sağlanmaz ayrıca oluşan çatlaklarda aşındırma yaparak oluşan gözeneklerin dallandırılması da sağlanmış olur (Chang, 2022). Matriks asitlemeden farklı olarak asit ile çatlatmada düşük geçirgenlikli rezervuarlarda gerçekleştirilir ve hacim/debi/basınç olarak yüksek değerlerde operasyon yapılır. Daha çok kalker ve dolomit rezervuarlarda uygulanır. Bu yöntemde genel olarak kum basılmaz ve su/jel ile çatlamaya göre bir avantajı da kum basılmadığından kumun meydana getirebileceği olumsuzluklardan muaf olmasıdır (Fink, 2020).

Köpükle çatlatma yönteminde genellikle karbondioksit ve nitrojen gazları ile yüzey gerilimi düşürücüler kullanılarak çatlatma sıvısı hazırlanır. Su yerine gaz kullanılmasındaki temel amaç suyun kullanımını azaltarak formasyon kirlenmesinin önüne geçmektir (Agarwal & Kudapa, 2023).Bu yöntemde su/jel ile çatlatmaya nazaran daha az kimyasal kullanıldığından daha çevresel bir çatlatma yöntemidir (Stacy & Weber,1995).

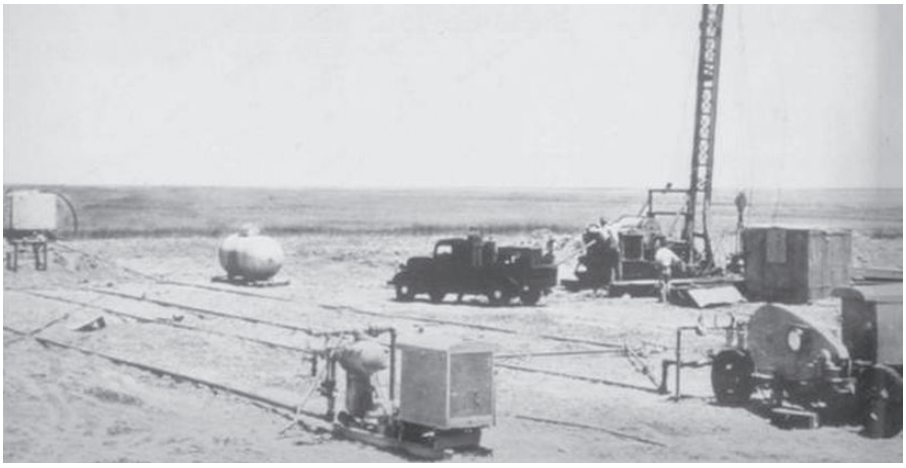
Petrol bazlı sıvı ile çatlatma yönteminde su/jel yerine suya göre akmazlık derecesi daha yüksek olan petrol kullanılmaktadır. Su ile çatlatma ile karşılaştırıldığında en büyük avantajı suya karşı duyarlı olan formasyonlarda (kil gibi) petrolün daha rahat basılabilmesidir (Fink, 2021).

Alkol ile çatlatma tekniği; rezervuardaki kalın olan kısımlardaki tutulmayı azaltmak ve çatlatma sıvısının zararını indirgemek gibi temel avantajlarından dolayı diğer tekniklere nazaran tercih edilebilmektedir (Yan vd.,2015).

TARİHSEL GELİŞİMİ

Petrol çıkarmak amacıyla sığ ve sert kaya kuyularının açılmasının tarihi 1860' lara kadar uzanmaktadır. O dönemde petrol içeren oluşumlardan petrol ve doğal gaz üretimini artırmak için nitrogliserin veya dinamit kullanılmaktaydı. (Newton, 2015). 1940' ların sonlarında petrol mühendisleri hidrolik kırmayı kuyu üretimini artırmanın bir yolu olarak kullandılar. Hidrolik çatlatma tekniği, ilk kez 1947'de Stanolind Oil and Gas Corporation (bugünkü adıyla Halliburton) tarafından uygulandı. Şekil 4'de 17 Mart 1949'da Halliburton firmasının gerçekleştirdiği ilk ticari hidrolik çatlatmaya ait fotoğraf görülmektedir. Bu dönemde, hidrolik çatlatma daha çok kuyu tamamlama işlemlerinde kullanılıyordu (Heinberg, 2013). Hugoton sahasında 1947 yılında yapılan ilk hidrolik çatlatma operasyonunda 1000 galon naftanik, asitli palm yağı ve jel kırıcı basılmış operasyon teknik olarak başarılı olsa da kuyunu verimi açısından efektif olmamıştır. Bu ilk denemeden sonra Halliburton firmasının 1949 yılında peşpeşe gerçekleştirdiği iki çatlatma operasyonu hidrolik çatlatma işi için adeta kırılma noktası olmuştur. Bu iki operasyonda ham petrol ve benzinle birlikte kuyulara 100-150 lb kadar

kum basılmış hem operasyonlar başarıyla tamamlanmış hem de kuyu verimlerinde artışlar görülmüştür. Takip eden bir yıl içinde 332 kuyuda çatlatma operasyonları yapılmış ve %75 verim artışı sağlanmıştır (Montgomery & Smith, 2010). Şüphesiz ilk çatlatma operasyonundan farklı olarak Halliburton firmasının kum basması açılan çatlakların kalıcı olmasında faydalı olmuş ve böylelikle kuyu verimleride artış sağlanmıştır.



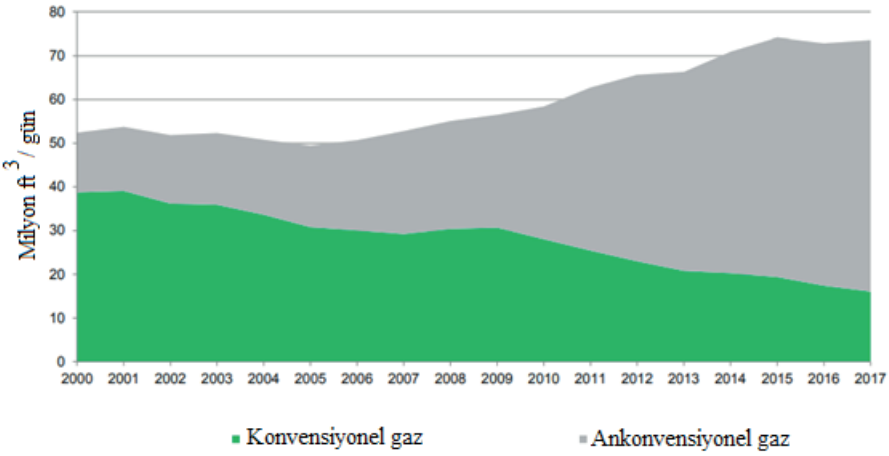
Şekil 4. *1949'da Halliburton firması tarafından gerçekleştirilen ilk ticari hidrolik çatlatma operasyonu (Suchy, 2019)*

1960' ların ortalarında, hidrolik çatlatma teknolojisi daha geniş çapta kullanılmaya başlandı. Bu dönemde, hidrolik çatlatma kuyuların verimliliğini artırmak amacıyla petrol ve doğalgaz endüstrisinde daha yaygın bir uygulama haline geldi. Hidrolik çatlatma operasyonları Amerika'da yaygınlaştıktan sonra 1960'larda İngiltere'de uygulanmaya başlamıştır. Kuzey Denizi'nde bulunan West Sole isimli offshore kuyusunda yapılan çatlatma İngiltere'de ilk çatlatma operasyonu olarak geçer (Mader, 1989). Aynı yıllarda ABD'de ise çatlatma operasyonları artık kaya gazı (şeyl gaz) keşiflerinde kullanılmaya başlanmıştır (Heinberg, 2013).

1965 yılında Ohio ve Cleveland şeyl formasyonunda yapılan çatlatma operasyonu tarihsel açıdan önem arz etmektedir. Bu operasyon ile tarihte ilk defa bir şeyl formasyonunda çatlatma yapılmıştır. Yine kritik bir kırılım noktası 1980'lerde yatay kuyularda hidrolik çatlatma yapılmaya başlanmasıyla yaşanmıştır. Yatay sondaj sayesinde üretim formasyonu içinde daha çok ilerlenebilmekte bu da daha geniş bir sağım alanı sağlamaktadır.

1980' lerde, hidrolik çatlatma özellikle ABD'de, özellikle Barnett Şekeri rezervuarında, şeyl gazının ekonomik olarak çıkartılmasını mümkün kıldı. Bu dönem, şeyl gazının endüstri için önemli bir kaynak olduğunun fark edildiği bir dönemdir.

2000' li yıllarda doğal gaza olan ihtiyacın artması, teknolojinin gelişmesi ve petrol şirketlerince bu işlere ayrılan bütçelerin arttırılmasıyla şeyl gazı üretiminde ciddi bir ivme kazanılmıştır. Yatay olarak kazılan kuyularda birden fazla çatlatma yapılarak şeyl gazı üretilmeye çalışılmıştır. Bu dönemde, özellikle ABD'de, Marcellus, Bakken ve diğer şeyl formasyonlarında hidrolik çatlatma sayesinde büyük miktarlarda doğalgaz ve petrol üretildi. Şekil 5' de Amerika Birleşik Devletleri'nin yıllara göre artan şeyl kaynaklı doğal gaz üretimi görülebilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere özellikle 2008-2009 yıllarında konvansiyel yolla üretilen gaz hızlı bir şekilde azalmakta buna karşın ankonvansiyonel yollarla üretilen doğal gaz hacmi hızlı bir şekilde artmıştır.

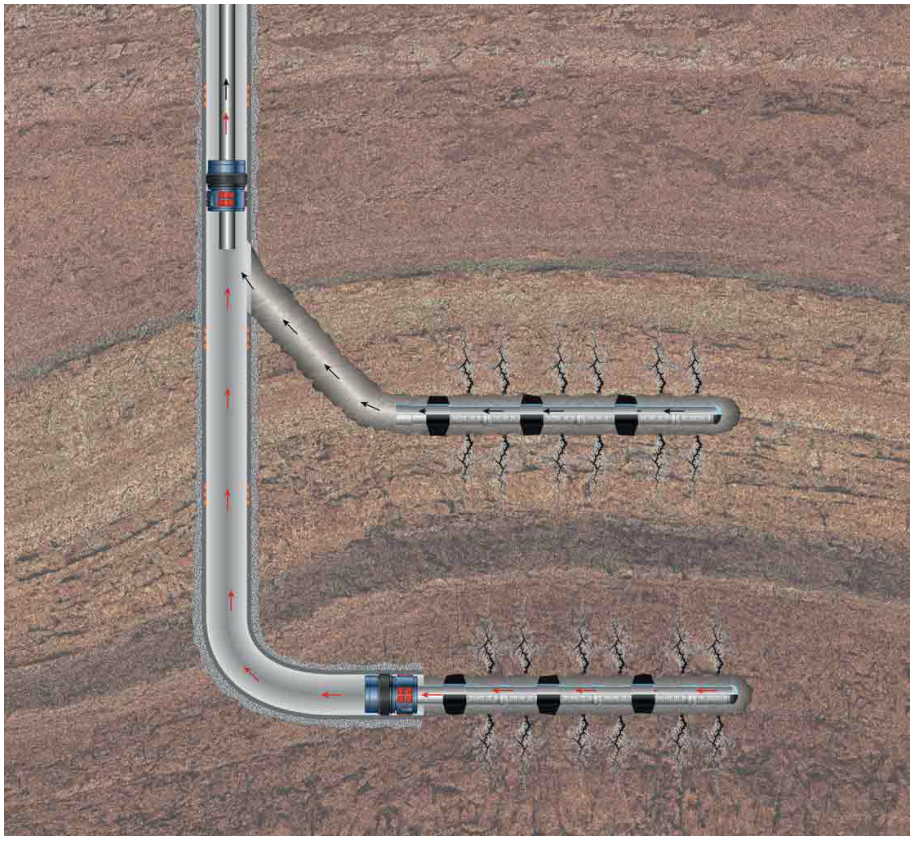


Şekil 5. *Amerika'da yıllara göre konvansiyonel/ankonvansiyonel gaz üretimi (eia.gov, 2022)*

2010' ların ortalarına doğru, hidrolik çatlatmanın çevresel etkileri konusundaki endişeler arttı ve bu tekniğin kullanımına yönelik çeşitli düzenlemeler getirildi. Toplumlar arasında çevresel ve sağlık konularında endişeler arttıkça, hidrolik çatlatma uygulamalarına yönelik düzenlemeler yaygınlaştı.

2020' lere gelindiğinde aynı kuyuda birden fazla yapılan çatlatma operasyonlarında; her çatlatma operasyonu icra edildikten sonra çatlatılan bölge packer denen izolasyon malzemesi ile izole edilerek bir sonraki çatlatma operasyonu yapılır. Bu şekilde tüm çatlatma operasyonları bittikten sonra izolasyon malzemesi matkap ile kesilerek tüm çatlatma yapılmış bölgelerden hep birlikte üretim yapılmaktadır. Şekil 6'da yatay olarak kazılmış bir kuyuda arada packer (izolasyon malzemesi) inilerek her kolda yapılmış olan üç farklı çatlatma aralığı görülmektedir. Şekilde aynı dikey kuyudan farklı noktalardan saptırma yapılarak kazılmış iki yatay kol görünmektedir. Bu kolların her birinde üç farklı metrajda çatlatma operasyonu yapılmış her çatlatma bölgesi

üstüne izolasyon malzemesi inilmiş ve en sonunda her kolda bulunan üçer bölgeden topluca üretim yapıldığı görülmektedir.



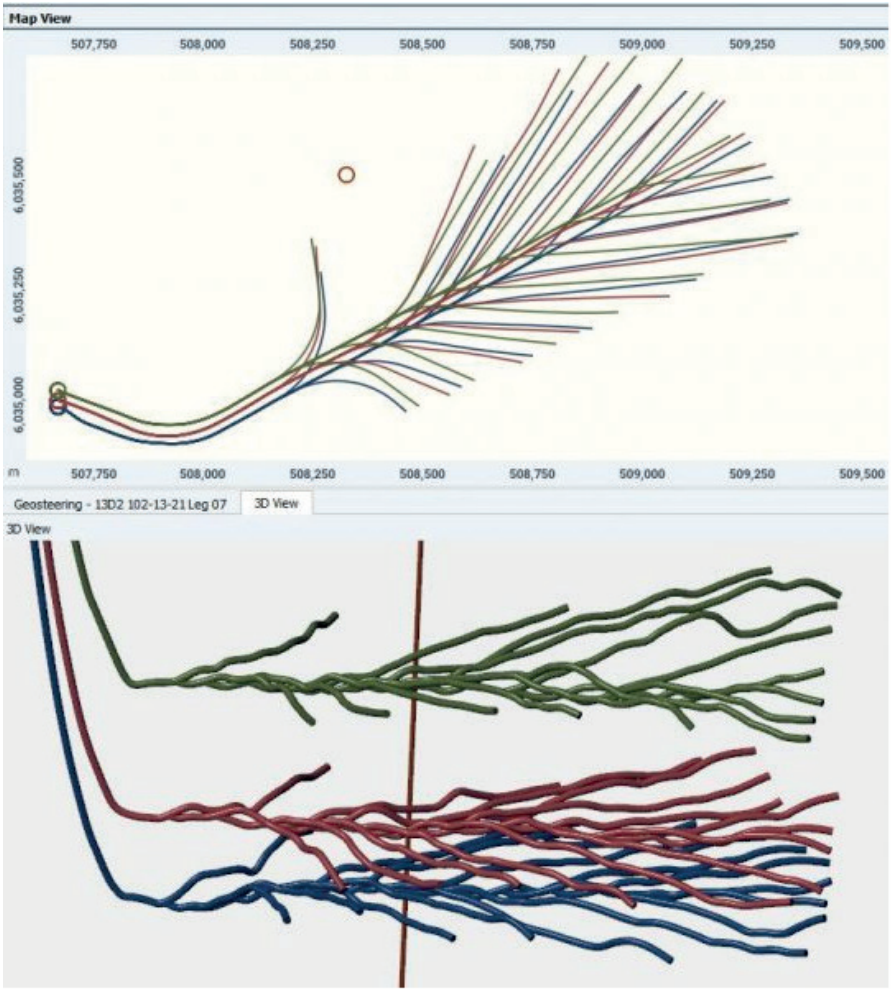
Şekil 6. *Yatay kazılan kuyularda birden fazla yapılan çatlatma tekniği (slb.com, 2022)*

Gelinen son noktada ise dikey başlanan tek kuyudan üretim yapılacak formasyona ulaşıldığında farklı yönlere uzanan birden fazla yatay kol kazılarak ve bu kolların her birinde de birden fazla çatlatma operasyonu yapılarak kuyulardan ciddi miktarda üretim sağlanabilmektedir (Bocaneala vd, 2019). Bu tekniğe fishbone (balık kemiği/omurgası) adı verilmektedir. Şekil 7'de bu yöntemle yan yana kazılmış üç adet kuyunun ve kuyudaki kolların yönlenmesi 3D olarak verilmiştir. Şeklin üst tarafında bu üç kuyunun tasarlanmış yönelim haritası verilmekteyken, alt tarafında ise kuyular kazıldıktan sonra alınan yönelim loğları ile ortaya çıkan üç boyutlu görünümleri görülebilmektedir.

Hidrolik çatlatmanın yaygın kullanıldığı sahalar aşağıda sıralanmıştır:

- ABD'nin kuzeydoğusunda bulunan ***Marcellus Şekeri***, özellikle doğalgaz üretimi için önemli bir alandır. Hidrolik çatlatma, Marcellus Şeke-

ri'ndeki şeyl gazı rezervuarlarının ekonomik olarak çıkartılmasını mümkün kılmıştır.



Şekil 7. *Yatay çoklu kuyu tekniği ile kazılmış 3 kuyuya ait harita ve 3D görünüm (Dragoie,2020)*

- ***Bakken Formasyonu***, ABD'nin kuzeybatısında Montana ve Kuzey Dakota ile Kanada'nın Saskatchewan ve Manitoba eyaletlerinde bulunur. Bu bölgede hidrolik çatlatma, sıkıştırılmış petrol üretiminde önemli bir rol oynar.
- Güney Teksas'ta yer alan ***Eagle Ford Şekeri***, hem şeyl gazı hem de sıkıştırılmış petrol üretimi için hidrolik çatlatma uygulamalarının yoğun olarak kullanıldığı bir alandır.

- ***Permian Havzası***, ABD'nin Teksas ve New Mexico eyaletlerinde yer alır. Bu bölge, hem sıkıştırılmış petrol hem de şeyl gazı üretiminde en büyük hidrokarbon rezervuarlarından biridir ve hidrolik çatlatma bu bölgede yaygın olarak kullanılmaktadır,

- Batı Kanada'da yer alan ***Montney Formasyonu***, hem British Columbia hem de Alberta eyaletlerinde bulunur. Bu formasyon, şeyl gazı üretimi için hidrolik çatlatma uygulamalarının önemli olduğu bir alandır.

- Arjantin'de bulunan ***Vaca Muerta formasyonu***, dünya genelindeki en büyük şeyl gazı rezervuarlarından biridir. Hidrolik çatlatma, bu alanda enerji üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır.

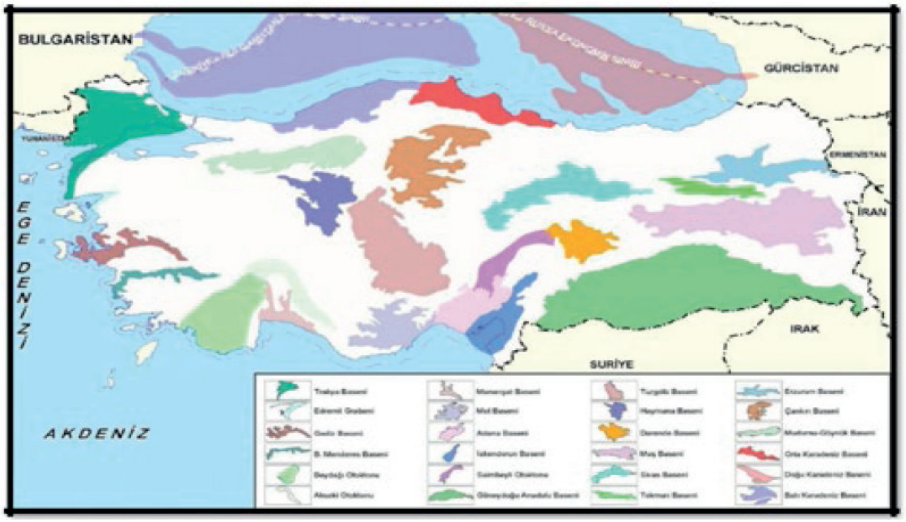
Hidrolik çatlatmanın yaygın kullanıldığı ülkeler arasında, ABD, Kanada, Arjantin, Çin ve Avustralya sayılabilir. ABD, hidrolik çatlatma uygulamalarının en yaygın ve büyük ölçekli kullanıldığı ülkelerin başında gelir. Marcellus Şekeri, Bakken Formasyonu, Eagle Ford Şekeri ve Permian Havzası gibi birçok bölgede hidrolik çatlatma, şeyl gazı ve sıkıştırılmış petrol üretimi için yaygın olarak uygulanmaktadır. Kanada, Bakken Formasyonu, Montney Formasyonu ve diğer bazı şeyl gazı ve sıkıştırılmış petrol rezervuarlarında hidrolik çatlatma uygulamalarını kullanmaktadır. Özellikle Alberta ve British Columbia gibi bölgelerde bu teknik yaygın olarak kullanılmaktadır. Arjantin, Vaca Muerta formasyonu gibi büyük şeyl gazı rezervuarlarında hidrolik çatlatma uygulamalarını yoğun bir şekilde kullanmaktadır. Çin, enerji talebindeki artışı karşılamak amacıyla şeyl gazı ve sıkıştırılmış petrol üretimini artırmak için hidrolik çatlatma teknolojisini benimsemeye çalışmaktadır. Çin, Fuxin ve Sichuan havzaları gibi bölgelerde hidrolik çatlatma uygulamalarını test etmiştir. Avustralya, Cooper Havzası ve Beetaloo Havzası gibi bölgelerde şeyl gazı rezervuarlarına odaklanarak hidrolik çatlatma uygulamalarını kullanmıştır.

TÜRKİYE'DE HİDROLİK ÇATLATMA

EPDK 2021 yılı raporuna göre Türkiye'de 60 milyar m^3 doğal gaz talebi olmuş bu talebin ancak ve ancak 94 milyon m^3'lük kısmı Türkiye'de üretilebilmiştir. (EPDK, 2022). Bu da talebin % 0,6 oranında Türkiye'nin üretimiyle karşılandığı anlamına gelmektedir. Başka bir deyişle Türkiye'nin iç kaynaklarla doğal gaz talebini karşılayabilmesi için doğal gaz üretimini 151 kat arttırması gerekmektedir. Bu denli doğal gaz açığı olan bir ülkede açığın kapanması için büyük doğal gaz keşifleri yapılması gerekmektedir. Konvansiyel rezervuarların kısıtlılığı göz önünde alındığında açığın kapanması ancak daha büyük yapılarda bulunan ankonvansiyel rezervuarla gerçekleşebileceği düşüncesini güçlendirmektedir.

ABD Enerji Bilgi İdaresi'ne göre Türkiye'de 4,6 trilyon m^3 şeyl gazı rezervi olduğu tahmin edilmektedir (eia.gov, 2023). Şekil 8'de Türkiye'de bulunan sedimanter basenlerin dağılımı görülmektedir, sol üste Turkuaz rengi ile

Trakya baseni ve sağ altta yeşil renk ile Güneydoğu Anadolu Basen' lerinde ekonomik oranda şeyl gazı ihtiva ettiği ve buralardan doğal gaz üretimi yapıldığı bilinmektedir (Derman, 2017). Bu basenlerden 679 milyar m^3 gaz ve 4,7 milyon varil petrol üretilebileceği öngörülmektedir.



Şekil 8. *Türkiye'de bulunan sedimanter basenlerin dağılımı (Derman, 2017)*

Türkiye'de mevcut bilinen şeyl formasyonlar denizel kaynaklı olup, Güneydoğu Anadolu Baseni'nde Dadaş Formasyonunda şeyl gazı ihtiva ettiği bilinmektedir. Dadaş formasyonu, Siluriyen-Devoniyen yaşlıdır ve organik madde miktarı, olgunluk açısından şeyl muhteviyatı yönünden uygun özelliklere sahiptir (Erik, 2016).

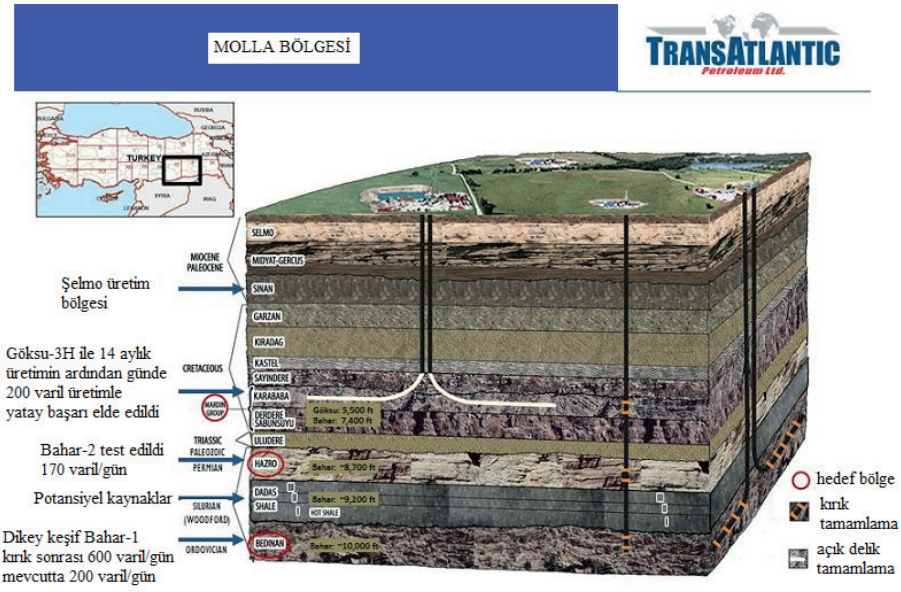
Şeyl gazı açısından potansiyeli olan bir ülkede maalesef hidrolik çatlatma açısından gerekli ve yeterli çalışma halen yapılmış değildir. Türkiye'de hidrolik çatlatma sayısı oldukça az olup yapılan operasyonlar ile ilgili detay bilgi kısıtlı düzeydedir. Ülkenin Milli Petrol şirketi olan TPAO ile Shell ortaklığında 2012 yılında Diyarbakır bölgesinde Sarıbuğday-1 kuyusunun kazıldığı fakat ekonomik bir keşfin yapılamadığı bilinmektedir (Karslı vd., 2016). Bu kuyunun dışında ayrıca Konacık, Akçay, Çeşmekolu, Gözalan, Mermer ve Çakıcı sahalarında da hidrolik çatlatma yöntemi ile petrol/doğal gaz üretimi yapmaya çalışılmıştır (Özalp, 2018). Bunlardan Çeşmekolu, Mermer ve Gözalan'da petrol/doğal gaz keşfi yapıldığı bilinmektedir.

Su/jel ile çatlatma haricinde TPAO'nun Batı Raman ve Raman sahalarında asitle çatlatma operasyonları ile üretim arttırma tekniği uyguladığı bilinmektedir. TPAO 2019 yıllık raporunda Batı Raman sahasında 3 kuyuda asitle çatlatma operasyonu yapıldığı ve bu 3 kuyuda çatlatma sonrası üretimin toplamda 3 katına çıktığı bilgisine ulaşılmıştır. (TPAO, 2019; TPAO, 2020)

Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde hidrolik çatlatma yöntemini kullanarak

üretim yaptığı bilinen bir başka firma Transatlantic Petroleum'dur. Firmanın 2014 yılı şirket sunumundan edinilen bilgiye göre Bahar sahasında hidrolik çatlatma yaparak üretim yaptığı bilinmektedir. Firmanın web sitesinden temin edilmiş Bahar sahasında kazılan bir kuyuya ait kuyu kesiti Şekil 9'de verilmektedir. Şekilde solda; Göksu sahasında yatay olarak kazılan ve açık olarak (muhafaza borusu inilmeden) bırakılan 2 kuyu görülmektedir. Ortada dikey olarak kazılan Bahar-1 kuyusunda Karaba, Hazro ve Bedinan formasyonlarında çatlatma yapıldığı ve çatlatmalar sonrası ilk üretim olarak günlük 600 varil petrol ürettiği anlaşılmaktadır. Şekilde sağda görünen 2 yatay kuyu ise Bedinan formasyonunda ileride kazılması planlanan, yatay kazılarak çatlatılacak kuyuları temsil etmektedir.

Trakya bölgesindeki şeyl formasyonlarında bulunan doğal gaz üretimi de ciddi bir seviyeye ulaşmıştır. Bugüne kadar çoğunlukla geleneksel rezervuarlardan 400 milyar ft^3' ün üzerinde gaz üretilmiştir ve bu sıkı gaz rezervuarları, ekonomik üretim için hidrolik uyarım gerektirmektedir. 2011-2014 yılları arasında, Güney Trakya Havzası'nda, Keşan Grubu, Mezardere Formasyonu ve Teslimköy Üyesi'nin orta Eosen-Oligosen türbidit ve prodelta yataklarını hedef alan 645 km^2' lik üç boyutlu sismik elde edilmiş ve 50' den fazla kırık gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, mevcut kuyu deliklerine yeniden girilerek ile tek aşamalı kırılmalar gerçekleştirilmiş, dikey kuyu sondajlarında çok aşamalı kırılmalar gerçekleştirilmiş ayrıca on adede kadar kırılma aşamasıyla yatay kuyular açılmıştır. Başlangıçtaki üretim oranları, değişen miktarlarda su üretimiyle birlikte 0,5 milyon ft^3/gün ila 5,0 milyon ft^3/gün arasında değişmiştir. (Sadownyk vd., 2014) .



Şekil 9. *Bahar sahası jeolojik kesiti (sec.gov, 2022)*

Hidrolik çatlatmanın dezavantajları ve çevresel etkileri

Hidrolik çatlatma, enerji üretimi için kullanılan bir yöntem olmasına rağmen, çeşitli çevresel endişelere neden olabilir. Bu endişeler, hidrolik çatlatma işleminin su, toprak ve hava kalitesi üzerindeki aşağıda sayılan potansiyel etkilerini içerir;

- Hidrolik çatlatma sırasında kullanılan yüksek basınçlı sıvı, yeraltı su tabakalarına nüfuz edebilir ve bu suların kirlenmesine neden olabilir. Kuyudan geri dönen suyun içinde çeşitli kimyasal maddeler ve metaller bulunabilir.

- Hidrolik çatlatma için kullanılan suya çeşitli kimyasal katkı maddeleri eklenir. Bu kimyasalların yeraltı sularına sızması veya yüzeye çıkması, çevresel sorunlara yol açabilir.

- Hidrolik çatlatma operasyonları sırasında toprak erozyonu riski artabilir. Büyük ölçekli madencilik ve kuyu inşası, toprak yapısını bozabilir ve erozyonu tetikleyebilir.

- Hidrolik çatlatma, yer altındaki kayaçları çatlatmak ve içerdikleri enerji kaynaklarını serbest bırakmak için kullanıldığından, bu işlem deprem riskini artırabilir. Ancak depremlerin doğrudan kırılmadan mı yoksa kırma işlemi sırasında oluşan atık suyun bertaraf edilmesinden mi kaynaklandığı konusunda tartışmalar bulunmaktadır.

- Hidrolik çatlatma işlemi için büyük miktarlarda su gereklidir. Her yıl normalde insan tüketimine açık olabilecek milyarlarca galon su tüketilmesi, yerel su kaynaklarının tükenmesine veya rekabetçi su kullanımı durumlarına yol açabilir.

- Hidrolik çatlatma sırasında kayaçlardan serbest bırakılan gazlar ve partiküller, hava kalitesini olumsuz etkileyebilir. Bu, çevredeki hava solunum sağlığı üzerinde potansiyel etkilere neden olabilir.

Hidrolik çatlatma, yerel topluluklarda ve ekosistemlerde olumsuz etkilere neden olabilir. Çevresel etkiler genellikle yerel halk arasında endişe yaratır ve toplumsal tartışmalara neden olabilir. Bu çevresel endişeler nedeniyle, hidrolik çatlatma uygulamalarının düzenlenmesi ve izlenmesi önemlidir. Birçok ülkede ve bölgede, hidrolik çatlatma uygulamalarını düzenleyen çevresel standartlar ve yasal düzenlemeler bulunmaktadır.

SONUÇ

Hidrolik çatlatma, enerji endüstrisinde önemli bir rol oynamaktadır, ancak çevresel etkileri nedeniyle çeşitli tartışmalara neden olmuştur. Uygulama yöntemleri ve çevresel etkiler konusundaki araştırmalar devam etmektedir.

Trakya ve Güneydoğu Anadolu Basen'lerinde görüldüğü üzere yapılan hidrolik çatlatma operasyonlarında başarıya ulaşılmıştır. Ülkede 4,6 trilyon m^3 şeyl gazı rezervi olduğu göz önünde tutulursa; şeyl formasyonlarında çok kollu yatay kuyular kazılarak ve yine her kazılan kolda hidrolik çatlatma operasyonları yapılarak ciddi petrol/doğalgaz üretimi sağlamak mümkün olacaktır. Bu konuda henüz yolunda başında olunmasına rağmen varılan başarılı sonuçlar Türkiye'de ileride şeyl gazı üretiminde ve hidrolik çatlatma operasyonlarında ciddi gelişmeler olacağı fikrini uyandırmaktadır.

KAYNAKÇA

Agarwal, M., & Kudapa, V. K. (2023). Foam based fracking in unconventional shale reservoir. *Materials Today: Proceedings*, *72*, 2785-2790.

Beşergil B. (2022) Hampetrolün Kökeni ve Oluşumu, http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/2-petrolun-kokeni-ve-olusumu.html [Erişim Tarihi: 19.12.2022]

Bocaneala, B., Norris, M., Conrad, J., Tomlins, A., Bramald, J., & Airnes, J. (2019, September). Multilateral Multistage Hydraulic Fractured Offshore Wells; A New Trend in Completion Design and Optimization for More Effective Field Development. In *SPE Offshore Europe Conference and Exhibition* (p. D031S012R003). SPE.

Chang, F. F. (2022). Acid fracturing stimulation. In *Fluid Chemistry, Drilling and Completion* (pp. 387-419). Gulf Professional Publishing.

Cheremisinoff, N. P., & Davletshin, A. (2015). *Hydraulic fracturing operations: handbook of environmental management practices*. John Wiley & Sons

DERMAN, A. (2017). Unconventional Resources in Turkey: Myth or Reality?. *Energy Policy Turkey*, (3), 75-87.

Dragoie, C., (2020) *A look at Well Designs in a Mature Basin.* https://chinookpetroleum.com/multilateral-feather-fishbone/

EPDK, 2022. Doğal Gaz Piyasası 2021 Yılı Sektör Raporu, T.C. ENERJİ PİYASASI DÜZENLEME KURUMU, Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara

Erik, N.Y (2016). Şeyl Gazı; Jeolojik Özellikleri, Çevresel Etkileri ve Küresel Ekonomik Anlamı. Türkiye Jeoloji Bülteni, 59(2), 211-237.

Feng, Q., Xu, S., Xing, X., Zhang, W., & Wang, S. (2020). Advances and challenges in shale oil development: A critical review. *Advances in Geo-Energy Research*, *4*(4), 406-418.

Fink, J. (2020). *Hydraulic fracturing chemicals and fluids technology*. Gulf Professional Publishing.

Fink, J. (2021). *Petroleum engineer's guide to oil field chemicals and fluids*. Gulf Professional Publishing.

Heinberg, R. (2013). A brief history of fracking. https://www.resilience.org/stories/2013-10-02/snake-oil-chapter-2-technology-to-the-rescue/

Holloway, M. D. (2018). *Fracking: further investigations into the environmental considerations and operations of hydraulic fracturing*. John Wiley & Sons.

https://www.slb.com/completions/well-completions/multilaterals, 2022

https://www.eia.gov/international/overview/country/tur (Erişim tarihi: 1 Aralık 2023)

https://watershedcouncil.org/our-work/policy-advocacy/state-policy-advocacy/hydraulic-fracturing/

(Erişim tarihi: 1 Aralık 2023)

https://tr.wikipedia.org/wiki/Kum_gaz%C4%B1

Karslı, S., Kaya, F., Güllüce, H., & Özakın, A. N. (2016). SHALE GAS POTENTIAL IN TURKEY AND ITS ROLE IN WORLD ENERGY MARKETS. *Mugla Journal of Science and Technology*, *2*(1), 27-29.

Kudapa, V. K., Gupta, D. K., & Sharma, P. (2018). Modeling of gas flow within the shale fracture network. In *Advances in Fire and Process Safety: Select Proceedings of HSFEA 2016* (pp. 21-43). Springer Singapore.

Li, Y. (2020). Simulation of the interactions between multiple hydraulic fractures and natural fracture network based on Discrete Element Method numerical modeling. *Energy Science & Engineering*, *8*(8), 2922-2937.

Mader, D. (1989). *Hydraulic proppant fracturing and gravel packing*. Elsevier. pp. 174, 250.

Montgomery, C. T., & Smith, M. B. (2010). Hydraulic fracturing: History of an enduring technology. *Journal of Petroleum Technology*, *62*(12), 26-40.

Munster, J., 2013. Hydraulic Fracturing!. Jason Munster's Energy and Environment Blog .http://www.jasonmunster.com/hydraulic-fracturing/

Murthy, R. R., & Chavali, M. (2020). A novel hydraulic fracturing gel realization for unconventional reservoirs. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, *9*, 1-7.

Newton, D. E. (2015). *Fracking: a reference handbook*. Bloomsbury Publishing USA.

Özalp, M. (2018). Dünya Enerji Rekabetinde Oyun Değiştirici Olarak Kaya Gazının Rolü ve Türkiye'ye Olası Etkileri. *İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, *7*(4), 2926-2959.

TPAO, 2020.Sürdürülebilirlik Raporu,*https://www.tpao.gov.tr/file/2201/surdurulebilirlik-raporu-2020-67761eff5e5838ec.pdf*

TPAO,2019.YıllıkRapor.*https://www.tpao.gov.tr/file/2007/tpao-2019-yillik-rapor-3415f1946eb80faa.pdf*

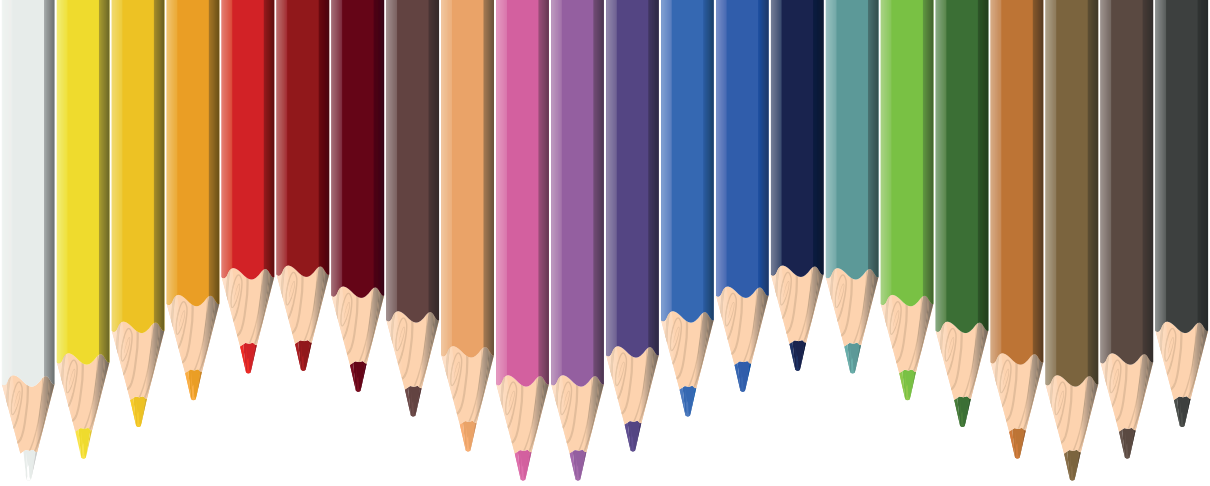
Transatlanic Şirket Raporu, 2014. *https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1092289/000114420414005961/ v367202_ex99-1.htm* [Erişim Tarihi: 16.12.2022]

Sadownyk, R., Luxton, P., & Umul, B. (2014,Eylül) Tight Gas Development Within Thrace Basin, NW Turkey. In *International Conference & Exhibition*.

Stacy, A. L., & Weber, R. B. (1995). Method for reducing deleterious environmental impact of subterranean fracturing processes. *Journal of Cleaner Production*, *4*(3), 248.

Suchy, D. R., & Newell, K. D. (2011). *Hydraulic fracturing of oil and gas wells in Kansas*. Kansas Geological Survey.

Yan, S., Wang, Y., He, J., & Zhang, H. (2015). Performance of the reproducible polyvinyl alcohol fracturing fluid system. *Russian Journal of Applied Chemistry*, *88*, 1884-1891.



Bölüm 23

DOĞAL GAZ KULLANIMIYLA HAVA EMİSYONLARININ DEĞİŞİMİ: MARDİN İLİ

Abdulkadir AYANOĞLU[1]

Gizem AYAS[2]

1 Dr.Öğretim.Üyesi.Abdulkadir AYANOĞLU, ayanoglu@artuklu.edu.tr, Mardin Artuklu University
2 Öğr.Gör.Gizem AYAS, gizemayas@artuklu.edu.tr, Mardin Artuklu University

1. GİRİŞ

19. yüzyılla başlayan hızlı nüfus popülasyonuyla beraber gelen sera gaz oluşumları, mali dalgalanmalar ve adını yeni duyduğumuz hastalıklar ile gıda üretim metotları, 21. Yüzyıla dayanarak, fosil yakıtların tükenmesi problemiyle alternatif yakıt arayışı hem iklim değişikliği hem de çevre kirliliği ile dünya dengelerini değiştirmeye yüz tutmuştur. Özellikle, doğanın kirlenmesi yeryüzü ile gökyüzü arasında ki ilişkiden ötürü havanın da kirlenmesiyle beraber dünyada bulunan tüm canlı ve cansız dengesini kalıcı zararlar meydana getirecek şekilde bozmuştur [1-3].

Günümüzde bilim ve teknolojinin gelişimi son hızla artarken insanoğlunun enerji gereksinimleri de aynı ivmede artmaktadır. Enerjinin kullanım alanları olan sanayi tesisleri ve trafik yoğunluğu, baca gazları ile atmosferik dengeyi bozarken asit yağışlarıyla hem insan sağlığını hem de doğadaki bitkileri ve su kaynaklarını tahrip etmektedir. Fakat hızlı ivmenin rastgele kullanımı çevreye atılan oransız atıklar özellikle atmosferi temizlenmeyecek derecede kirletmektedir. Büyüyen sanayiye ek olarak ısınmadan dolayı kış aylarında emisyonlarartmaktadır.Emisyon oranının artışını etkileyen temelfaktörler;kalitesiz yakıt,fakir yanma, hızlı endüstrileşme,ormanların azalmasıve iklim değişimidir [4-6].

Tarihte hava kirliliği 14. Yüzyılda İngiltere'de ve 20. Yüzyılda Belçika'da ve ABD'de kükürt emisyonu binlerce kişinin ölümüne ve hastalanmasına sebep olmuştur.1955yılında ilk kanun HavaKirliliğiKontrol diye İngiltere'deki mecliste onaylanmıştır. Dünya Sağlık Örgütü(WHO) havanın kirlenmesinden dolayı yıllık 2 milyoninsanın hastalanmasına ve ölümüne sebep olduğu; gelişmemiş ülkelerde ise kayıt altına alınmadığından daha fazla bir değerde olduğu tespit edilmiştir. Sağlıkta bozukluklar başlıca öksürük, bronşit,kalp ve akciğerhastalığı ciddi oranda yükseldiği gibi kronik ve akut hastalıklara yol açmıştır. Bu durum çocuklara kadar inmiştir. Direk etkilenen bireylerle dolaylı olarak suları ve doğa örtüsünü de etkilemektedir. Hava kirlenmesinden dolayı birçok ulusal ve uluslararasıkuruluşlar ile çeşitliülkeler "Hava Kirliliği Standartları"oluşturarak Hava KalitesiİndeksI (HKİ) değerlerini 0-500 ölçümü yapılarak değer artığında hava kirliliğive sağlıkriski arttığı görülmüştür[7-12].

Havanın içinde bulunan kükürtdioksit(SO_2), partikülermadde(PM),-nitrojen oksitleri(NO_X) veozon(O_3)gibiemisyonlar hem çevrehem desağlık üzerinde zararlı etkisi vardır. Artan nüfus ile kentleşmeyle 2030yıllarında beşkata artması beklenmektedir. UlusalHavaKalitesi İndeksi,partikülmaddeler(PM10),karbonmonoksit(CO),kükürtdioksit (SO_2), azot dioksit (NO_2) veozon (O_3) emisyonlarını hesaplamıştır[13].

Yoğunlaşan şehir hayatında hava kirliliğiniazaltmak için doğalgaz kullanımı artmıştır. Doğalgazın tarihsel süreci İran veÇin'de sızıntılarla başla-

yarak, 17. ve 18.yüzyıllarda Avrupa'dakullanımlıyla, Amerika'da sanayide ve enerji alanında kullanılırken II.Dünya Savaşı'yla kullanımı artış sağlanarak dünya geneli enerji üretiminin ortalama%25'ini sağlanmıştır. Rezervlerin 150 trilyon m^3civarında olup, 70 yıla yakın yeterli olabileceği tespit edilmiştir[14].

Türkiye'de 1970'de Kırklareli'nde tespit edilen doğalgaz, 1976'da Pınarbaşı Çimento ve Mardin İli Nusaybin İlçesi Çamurlu Beldesinde 1975 yılında doğalgaz çıkarılıp 1982 yılında Mardin Çimento Fabrikası kullanmıştır. Fakat Türkiye için yeterli rezervlere sahip değildir. Bu nedenle doğalgaz yurtdışından temin edilmeye başlanmıştır. 1984 yılında SSCB getirilen doğalgaz, 1988'de Ankara'da, 1992 yılında İstanbul, Bursa, Eskişehir ve İzmit'te kullanılmaya başlanmıştır. Rusya ve İran`dan, Cezayir ve Nijerya`dan, Azerbaycan ve Türkmenistan doğal gaz temini yapmaktadır. Mardin'de doğalgaz kullanımı 17.01.2014 tarihinde EPDK tarafından Akmercan Doğal Gaz Dağıtım A.Ş. lisanslı kullanım hakkı verilerek ISO 14001 Çevre Yönetim Sistemi kullanıma girmiştir[15].

Mardin İli karasal iklime sahip olup, kış aylarında ısınma ihtiyacı duymaktadır. İlk olarak 2017 yılından başlayarak 466,53 abone iken 2023 yılında ise 1,508,000 aboneye Mardin İli ve ilçelerine ulaşmıştır. Bu çalışmada doğalgazın şehre gelmesiyle hava kirlenmesi incelenmiştir.

2.DOĞALGAZIN YAKIT KARAKTERİSTİĞİ

Doğalgaz havadan hafif, renksiz vekokusuz THT(tetra hidro teofen)ile TBM(tersiyer bütil merkaptan) eklenerekkokulandırılır. Mağaralarda ve yer altında gaz halinde yeryüzüne sızmaktadır.Metan (CH_4),etan(C_2H_6) propan (C_3H_8), bütan (C_4H_{10}), azot(N_2), oksijen(O_2),karbondioksit (CO_2), hidrojensülfür (H_2S) ve diğer gazlar bulunmaktadır. Doğalgazçeşitliliği metan içeriğine bağlıdır.Doğalgazda ya az miktarda ya da hiç bulunmayan kükürtve bileşenleri havayı kirletmedikleri için temiz yakıt olarak kabul edilmiştir. Kaynamanoktası-161,6 °C olup yanma verimi yaklaşık %90civarındadır. CO_2oranının düşük olması sera gazıetkisinin azalmasını sağlar.NO_xdeğeri isediğer yakıtlara göre çak düşükorandadır. Kül ve kurumtabakası diğer yakıtlara göre olmaması kazan veriminive bakımveişletmesi ömrünün uzun olmasını sağlar[16-17].

Doğalgazın genel içeri Tablo l' de sunulmuştur[8]. Metan Oranı % 70 ile %90 arasında değişmektedir. Genelde, Türkiye'de metan oranı %75 civarındadır.

Tablo l. *Farklı Doğalgaz kaynaklarının bileşenleri[8]*

Bileşen	**%**
CH_4	70-90
C_2H_6	5-15
C_3H_8, C_4H_{10}	<5
CO_2,N_2,H_2S,vb.	<1

Tablo 2'de, Doğalgazınkarbon, hidrojen ve hava fazlalığıile ısıl değerikömürve fuel-oilarasında olup kükürt, kül, nem oranı ve baca gazında ki SO_2 değeri ise yoktur [10].

Tablo 2. *Kömür, Fuel-Oil ve Doğal Gaz Özellikleri[10]*

Bileşen	**Kömür**	**Fuel-Oil**	**Doğal Gaz**
C (%)	77.40	84.58	73.98
H(%)	1.40	10.90	24.57
S (%)	1.00	4.00	-
H_2O (%)	7.00	-	-
Kül (%)	8.00	-	-
Isıl Değer (kJ/kg)	29,600-7,080	39,220-9,380	49,085-11,780
SO_2Baca Gazı (ppm)	1.64	5.50	-
Hava Fazlalığı(λ)	1.40-2.00	1.20-1.30	1.05-1.10

3. DOĞALGAZIN YANMA VE EMİSYON DEĞERLERİ

Yanma olayı yanıcı madde içinde bulunan Karbon (C) ve Hidrojen (H)elementlerinin havada bulunan oksijen (O) reaksiyona girerek ısı enerjisini açığa çıkarmasıyla gerçekleşir. Genelde doğalgazda yüksek oranda karbon, hidrojen,azmiktarda kükürtvereaksiyona girmeyenazot,su veküliçerirken kömürde ise yüksek oranda kükürt bileşeni bulunmaktadır.Yanma sonucunda karbonmonoksit (CO), hidrokarbon (HC), azotoksit (NO_x), kükürtdioksit (SO_2), partikülmadde (PM ve PM_{10}), UçucuOrganik Bileşikler (UOB),veduman gibikirleticiler oluşurken; oksijen (O_2),karbondioksit(CO_2)vebuhar (H_2O) zararsız bileşiklerde ortaya çıkmaktadır[10].

İdeal-stokiyometrik koşullarda, doğalgazda bulunan C ve H elementlerinin tam yanması halinde yanma denklemi aşağıda verilmiştir[10].

$C + O_2$ ….. CO_2 + ISI ve 2 H_2 + O_2 ….. 2 H_2O + ISI

Doğalgazda yanma reaksiyonları[10]:

$CH_4 + 2\ O_2 \ldots.. CO_2 + 2\ H_2O$

$C_2H_6 + 7/2\ O_2 \ldots.. 2\ CO_2 + 3\ H_2O$

$C_3H_8 + 10/2\ O_2 \ldots.. 3\ CO_2 + 4\ H_2O$

$C_4H_{10} + 13/2\ O_2 \ldots.. 4\ CO_2 + 5\ H_2O$

$C_5H_{12} + 16/2\ O_2 \ldots.. 5\ CO_2 + 6\ H_2O$

CO; ne koku ne renk ne de tadı olan zehirli bir emisyon olup fakir yanma sonucunda hava yanioksijen azlığından dolayı karbon elementinin yeterince oksijen ile reaksiyona girmemesinden oluşan havadan hafiftir. SO_2;renksiz olup oksijen ile birleşerek oluşan hem zehirli hem de zararlı bir gazdır. Petrol ve türevleri yakıtlarda 0.5-6 yüzdelik aralığındabulunur.NO_X;kahverengivekokulu olup yanma neticesinde oluşarak solunum rahatsızlığı ve küresel ısınmaya sebep olur. UOB; solunum ve diğer sağlık sorunları oluşturarak sinir sistemini zedeler. PM;10 μm küçüklüğünden partiküller su ile birleşerek solunum sistemini zedeler. HC;yanma olayının eksik oluşmasıyla ve ayrıca yakıtın dolumu esnasında gerçekleşen buharlaşmayla da ortaya çıkar. Sağlığa zararlı olup5000 ppm'i aşan değerlerinde canlıların yaşamasızorlaşır[18-20].

4. MARDİN'DE EMİSYON ÖLÇÜMLERİ

Mardin; Güneydoğu Anadolu Bölgesinde 8891 km^2 yüzölçümü ileDiyarbakır, Batman,ŞanlıurfaŞırnak, Siirt ve Suriye Devleti;Mezopotamya'nın Fırat ve Dicle nehirleri arasında dağın başında rakımı 1.083 m; M.Ö. 4500 kurulu olan(36°,55'-38°,51' kuzey enlemleri ile 39°,56'-42°,54' doğu boylamları) birçok medeniyete beşiklik yapan açık hava müzesidir[21-30].

Nüfusu ise artarak 2022yılında 870.374sayısınaulaşmıştır.Akdeniziklimine benzeyen, yazınçok sıcakve kurak,kışın ise soğuk ve bolyağışlıve ılıman olanMardin;Ova kısmında yazlarçoksıcakgeçer, kışlar iseılımanveyağmurlu dağda ise yazlarıserin,kışlarisesertrüzgâr,yağmurve karyağışlıdır. Rüzgârveyağışyüksekliği yüksek;nemvesıcaklıkdüşük olan Mardin diğer yerleşim yerlerine göre farklıdır. Arsenik, kadmiyum, nikel ve benzo(a)piren) birleşenleri olan PM_{10}ve SO_2 sınır değerleri, aşılınca hem insanlar için hem de diğer canlılar için tehdit olduğu için Dünya Sağlık Örgütü HavaKalitesiDeğerlendirmesi, Ulusal Hava KaliteİndeksiKesmeNoktaları ve Ulusal Hava KalitesiİndeksiileStandartlaşarak sırasıyla Tablo 3, 4 ve 5'teverilmiştir [21-28].

Tablo 3.*Hava Kalitesi Değerlendirme limit değerleri [21]*

Emisyon	**LimitDeğer (µg/m³)**
SO_2	40
PM_{10}	40
CO	10

Tablo 4.*Ulusal Hava KaliteİndeksiKesmeNoktaları[29]*

İndeks	HKİ	SO_2[µg/m³]	NO_2 [µg/m³]	CO[µg/m³]	O_3 [µg/m³]	PM_{10} [µg/m³]
		1 Sa.Ort.	1 Sa.Ort.	8 Sa.Ort.	8 Sa.Ort.	24Sa.Ort.
İyi	0–50	0-100	0-100	0-5.500	0-120[L]	0-50
Orta	51–100	101-250	101-200	5.501-10.000	121-160	51-100
Hassas	101 –150	251-500	201-500	10.001-16.000[L]	161-180[B]	101-260
Sağlıksız	151 –200	501-850	501-1.000	16.001-24.000	181-240[U]	261-400
Kötü	201 –300	851-1.100	1.001-2.000	24.001-32.000	241-700	401-520
Tehlikeli	301 –500	>1.101	>2.001	>32.001	>701	>521

L: LimitDeğer, B: BilgiEşiği, U:UyarıEşiği

Tablo 5. *Ulusal Hava KalitesiİndeksiI[29]*

HavaKalitesi İ n d e k s i (AQI)	**Sağlık Endişe Seviyeleri**	**Renkler**	**Anlamı**
0-50	İyi	Yeşil	Havakalitesi iyi
51- 100	Orta	Sarı	Havakalitesiuygun
101- 150	Hassas	Turuncu	Halkın etkilenmesi beklenmemektedir.
151-200	Sağlıksız	Kırmızı	Halkın bazı sağlıketkileri yaşamasımuhtemeldir.
201- 300	Kötü	Mor	Hassas gruplar açıkhava etkinliklerini kısıtlamalıdır.
301-500	Tehlikeli	Kahverengi	Herkes, ciddisağlık etkileriyaşayabilir.

Şekil 1'de Mardin Hava Kalitesi Ölçüm İstasyonu Konumları sırasıyla 21 Kasım Şehir Stadyumu ile 90 m, 10 m, 190 m, 30 m, 250 m ve 2000 m'dir.

Şekil 1 *Mardin Hava Kalitesi Ölçüm İstasyonu Konumları*

Tablo 6'da 2015-2022 yılında kullanılan yakıt türleri, ısıl değeri ve miktarları verilmiştir. Verilere göre kömürün hem sanayide hem konutlarda doğalgazın gelmesiyle azalması ve ısıl değerinin kömürün ısıl değerinden yüksek olması tüketim miktarının artışını göstermektedir[21-28]

Tablo 6. *2015-2022 yılında kullanılan yakıt türleri, ısıl değeri ve miktarları [21-28]*

Yıl	Kullanım Yeri	Yakıt Türü	IsılDeğeri (kcal/kg)	Tüketim Miktarı
2015	Konut	Kömür	6.400	1.370,999ton
2015	Konut	SYV Kömürü	4.800	18,200 ton
2015	Sanayi	Kömür	6.400	6.313,37 ton
2016	Konut	Kömür	7.265	969,05ton
2016	Sanayi	Kömür	6.400	135.000ton
2017	Konut	Kömür	6.400	57.304,220ton
2017	Konut	SYV Kömürü	4.800	16.900,00ton
2017	Sanayi	Kömür	7.150	11.223ton
2017	Konut	Doğalgaz	9.261,9785	173.511m^3
2017	Sanayi	Doğalgaz	9.225,5695	494.379 m^3
2018	Konut	Kömür	6.400	35.262,800ton
2018	Konut	SYV Kömürü	3.400	22.409,250ton
2018	Sanayi	Kömür	7.150	7.346,140ton
2018	Konut	Doğalgaz	9.261,9785	6.836.251,49m^3

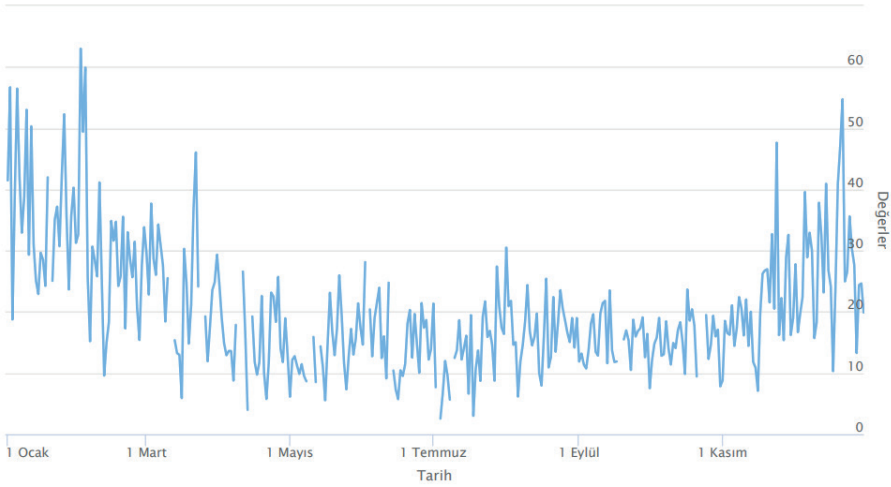
2018	Sanayi	Doğalgaz	9.225,5695	3.796.326,86m^3
2019	Konut	Kömür	6.400	81.600,19ton
2019	Konut	SYV Kömürü	3.400	14.617ton
2019	Sanayi	Kömür	7.150	1.715,720ton
2019	Konut	Doğalgaz	9.261,9785	25.407,885m^3
2019	Sanayi	Doğalgaz	9.225,5695	1.588.119,3m^3
2020	Konut	Kömür	6.400	42.765,66ton
2020	Sanayi	Kömür	7.150	4.380,350ton
2020	Konut	Doğalgaz	9.273,9747	30.369.487,75 m^3
2020	Sanayi	Doğalgaz	9.273,9763	1.432.571,92m^3
2021	Konut	Doğalgaz	9.273,9747	40.759.857,12m^3
2021	Sanayi	Doğalgaz	9.273,9763	2.454.815,18m^3
2022	Konut	Kömür	6.400	18.352,11ton
2022	Sanayi	Kömür	7.150	280,987ton
2022	Konut	Doğalgaz	9.273,9747	104.618,675 m^3
2022	Sanayi	Doğalgaz	9.273,9763	1.679.091,31m^3

*Sosyal YardımlaşmaVakfı

Tablo 7'de 2015-2022 yıllarındaki SO_2emisyon değerleri 2018 yılından itibaren doğalgazın gelişiyle azalmaya başlamıştır. Şekil 2'de ise 2022 yıl boyu değerleri Hava Kalitesi Değerlendirme limit değerleri altında olduğu görülmektedir.

Tablo 7. *2015-2022 yılları kış dönemi SO_2 değerleri (µg/m^3) [30]*

	2015	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**
Ocak	28	18	25	21	29,03	19,12	36,25	36,14
Şubat	18	14	20	21	20,81	20,18	26,39	29,54
Mart	11	13	11	10	----	15,13	25,40	24,20
Kasım	12	27	7	19	17,20	21,93	22,77	20,40
Aralık	21	26	17	22	16,10	31,09	33,29	27,76

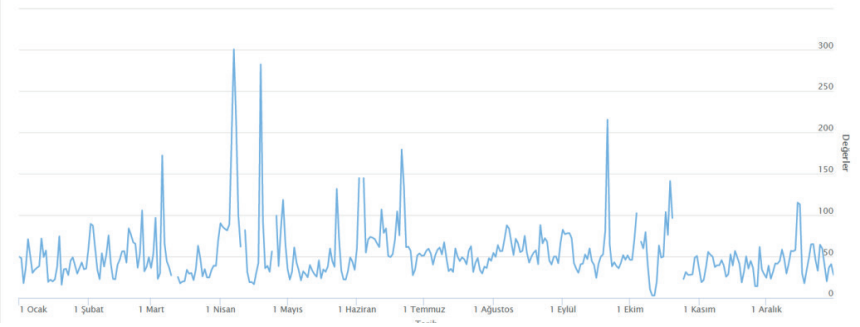


Şekil 2. *2022 yılıMardinistasyonu SO_2Emisyon Değeri [30]*

Tablo 8'de 2015-2022 yıllarındaki PM_{10}emisyon değerleri 2018 yılından itibaren doğalgazın gelişiyle azalmaya başlamıştır. Şekil 3'de ise 2022 yıl boyu değerleri Hava Kalitesi Değerlendirme limit değerleri altında olduğu görülmektedir.

Tablo8. *2015-2022 yılları kış dönemi PM_{10}değerleri (µg/m³) [30]*

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Ocak	76	32	72	82	61,67	31,98	46,87	39,01
Şubat	69	93	41	68	2.92	32,78	40,58	53,81
Mart	77	51	40	85	2,94	34,66	34,88	42,02
Kasım	41	60	11	28	50,60	60,12	53,2	37,70
Aralık	44	48	12	26	39,92	38,21	55,12	46,59



Şekil 3. *2022 yılıMardinistasyonu PM_{10}Emisyon Değeri [30]*

5. SONUÇ

2015-2022 yılları arasında Mardin ilinde SO_2 ve PM_{10} değerlerinin özellükle doğalgazın gelmesi ile değiştiği ve 2018 yılından önce kömür ve fakir yanma durumlarından dolayı çevreyi kirlettiği fakat doğalgazın gelmesiyle hava kalitesi yönetmeliğinde belirtilen sınırlar aşılmamıştır.

Hava kirliliğindeki azalması temiz yakıt olan doğalgaz ile büyük miktarda artmıştır. Sanayi bölgesinde ise endüstriyel ihtiyaçlardan ötürü geçiş daha tamamlanmamıştır. Bu nedenle hala şehir merkezi dışında kirlilikler bulunmaktadır.

KAYNAKLAR

[1]Borat, O., Balcı, M., Sürmen, A., 1992,Hava Kirlenmesi ve KontrolTekniği,Gazi Üniversitesi TeknikEğitimVakfı Yayınları, (s.16-110),Ankara.

[2] KazımY.,ŞengünSveMehmetY.ÇevreBilimiveEğitimi,Ankara:GündüzEğitimve Yayıncılık, 2008.

[3] Müezzinoğlu, A., 1987,HavaKirliliğinin ve KontrolününEsasları, DokuzEylül ÜniversitesiYayınları, İzmir.

[4]Kadı,İ.,Özdalyan,B.veÇelik,M.B.,2000, Karabük HavaKirliliği Araştırması, DPT Projesi, No: 98K12170, Karabük.

[5] Turan,T.ve Yalçın Çelik,B.,2012,Erzurum İlinde Hava KirliliğindekiDeğişim., BiyolojiBilimleri AraştırmaDergisi,5 (1): 65-68.

[6]Aydınalp C. Çevrekirliliğinin nedenleri veetkileri. ÇevreveİnsanJ,37, 37-41,1997.

[7] Papacostas, C. S., and Prevedouros, P. D., 1993,Transportation Engineeringand Planning.,2nded., p498-543, Prentice- Hall International editions New Jersey.

[8]. Borat, O., Sürmen, A., Balcı, M., 1994, Yanma Bilgisi, Gazi Üniversitesi TeknikEğitim Vakfı Yayınları, Ankara.

[9] Cay Y.,YıldızA, "FosilKaynaklıYakıtlarınNedenOlduğuHavaKirliliğinin Doğalgaz Kullanımı ileDeğişimi, Van İli Örneği" MakineTeknolojileri Elektronik Dergisi

[10] ÇayY, YıldızA, . FosilKaynaklıYakıtlarınNeden Olduğu HavaKirliliğinin Doğal GazKullanımıİle Değişimi, VanİliÖrneği. MakineTeknolojileri Elektronik Dergisi Cilt:8, No:4, 2011 (45-52).

[11]BayramH,DörtbudakZ,EvyapanFişekçiF,KargınM,BülbülB,""HavaKirliliğinin İnsanSağlığına Etkileri,Dünyada,Ülkemizde veBölgemizde HavaKirliliğiSorunu"Paneli Ardından. DicleTıp Dergisi, Cilt:33, Sayı:2, (105-112),2006.

[12] KyrkilisG,ChaloulakouA,KassomenosP.A. DevelopmentofanaggregateAirQuality Index for an urban Mediterraneanagglomeration: Relationtopotentialhealtheffects. EnvironmentInternational, 33, 670-690,2007.

[13]Gültekin,A.H, Örgün Y,.Doğal Gaz Ve Çevre, Çevre Dergisi, Ekim-Kasım-Aralık, Sayı:9, 1993

[14]Oruç,N.,Ataman,E.veKırkgöz,H.,2012, "Eskişehir'deHavaKirliliğive Doğal Gazın Tarihçesi: Genel Değerlendirme", Tüketim Toplumu ve ÇevreSempozyumu,-Karabük.

[15]https://www.akmercanmardingaz.com.tr/tr/bilgi-bankasi/dogalgaz-nedir/

[16] Gültekin, A.H. veÖrgün,Y.,1993, DoğalGaz veÇevre, ÇevreDergisi,Sayı: 9.

[17]GümrükçüoğluM., SoyluS., Adapazarı'ndaIsınma KaynaklıHavaKirliliğinin İncelenmesi,TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi , Antalya, 2011.

[18] Yıldız,A.,Çay, Y. veÖzer,F.,2012,Karabük ilindekiHavaKirliliğinin Doğal Gaz Kullanımı ile Değişimi., Tarih Kültür ve Sanat Araştırmaları Dergisi, (ISSN:2147-0626), Vol1,No. 4.

[19] YazıcıH, AkçayM,Çay Y,SekmenY,Yılmazİ.T.,GölcüM.HavaKirliliğinin DoğalgazKullanımıİleDeğişimi,DenizliİliÖrneği.Selçuk ÜniversitesiISSN 1302/6178, Teknik-Online Dergi .2010.Cilt 9, Sayı:3.

[20] AyE.F., Balta M., Çolak M.,Semercioğlu H. HavaKirliliği veModellemesi, Sakarya,2010.

[21] https://www.akmercanmardingaz.com.tr/tr/musteri-hizmetleri/dogalgaz-tarifeleri/

[22] https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/mard-n_-cdr2022-20231013125746.pdf

[23] https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/mard-n_-cdr2021-20220721084838.pdf

[24] https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/mard-n_-cdr2020-20210621151924.pdf

[25] https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/mard-n_-cdr2019-20201102163404.pdf

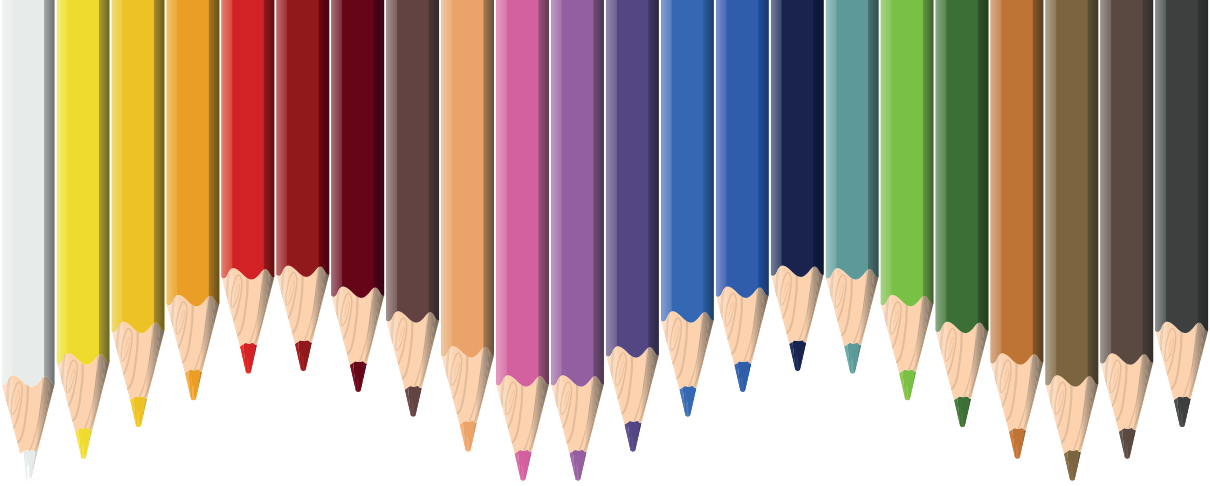
[26] https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/2018_mard-n_-l_cevre_durum_raporu-20190516083628.pdf

[27] https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/2017-mard-n-il--icdr-20180528164222.pdf

[28] https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/editordosya/Mardin_icdr2016.pdfhttps://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/editordosya/Mardin2015.pdf

[29] havaizleme.gov.tr

[30] http://laboratuvar.cevre.gov.tr/Default.ltr.aspx



Bölüm 24

HİDROJEN DEPOLAMA VE TAŞIMA

Yelda Altınsoy[1]

1 Dr. Dr. Yelda Altınsoy, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Etlik-Ankara, ORCID: 0000-0002-5277-6981, Mail: yeldaaltinsoy@gmail.com

GİRİŞ

Ülkelerin kalkınmasında yeni teknoloji ve endüstrinin ülke içerisinde geliştirilmesinin önemli bir rolü vardır. Savunma sanayii, uzay teknolojileri, nükleer teknolojiler, yakıt ve enerji teknolojileri sağlık ve tarım teknolojileri bunların başında gelir. Dünya ile rekabet edilmesini doğrudan etkileyen bu tür teknolojilerin geliştirilmesinde ham madde ve insan kaynağı en önemli iki avantajdır. Ülkemiz fosil yakıt teknolojileri bakımından %90 dışa bağımlı bir yüzyıl geçirilmiştir. Ancak gelecek yüzyılda kullanılacak yeni enerji teknolojileri bakımından stratejik öneme sahip Bor ve Hidrojene sahiptir. Bununla birlikte yenilebilir enerji, yazılım ve donanım teknolojilerinde araştırma-geliştirme ve yenilikçi yaklaşım hareketliliği sürdürmektedir. Her ne kadar ülkemizin 2023 hedefleri içerisinde İnovasyon kabiliyetinde artış ve dünya ile rekabet edilebilirlik önemli bir amaç olsa da hızla ilerleyen ve değişime ayak uyduran teknoloji sağanağı içerisinde istenilen noktaya gelinememiştir. Özellikle Dünya rezervlerinin %74 ü ne sahip olduğu Bor cevheri için mevcut konum daha çok önem arz etmektedir. Hidrojen için ise Karadeniz dip suları yeni bir alternatif sunmaktadır. Bu iki değer üzerine yeni teknolojiler geliştirme hususunda istenilen noktaya gelinememiş olması ülkemizin milli ar-ge hedeflerini olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada Hidrojen Enerjisinde Hidrojenin kritik olan teknolojilerine de yer verilmiş Ağır Su üretimi gibi ortaya çıkarılabilecek kritik değerler hususunda otoritelere yol gösterilmiştir. Ortaya çıkan bu bilgiler, ülkemizin geleceğine güvenle bakabileceğini göstermektedir bunun yanında elimizde olan değerlere sahip çıkıldığı takdirde süper güç olma hususunda önümüzde hiçbir engel kalmayacağını da kanıtlamaktadır.

Küresel Enerji Krizine Hidrojen Teknolojileri ve Sürdürülebilirlik İle Çözüm

Ülkelerin gelişmesi ve zenginleşmesinde sahip olduğu kaynakların ve ileri beceri tekniklerinin rolü oldukça büyüktür. Ülkemiz sera gazı etkisine sahip ve yoğun emisyon kaynağı temel yakıtlar ve kaynaklar açısından oldukça fakir olmasına rağmen gelecek enerji teknolojileri bakımından oldukça kritik olan bor ve hidrojen için önemli kaynaklara sahiptir. Enerji teknolojilerinde meydana gelen gelişmeler, bor ve hidrojenin kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Bu bölümde hidrojen teknolojilerinde hidrojen depolama da kritik öneme sahip bor için Türkiye'nin özel konumu ve sahip olduklarının değeri anlatılmaya çalışılmıştır. Bu alanda genel itibar ile az bilinen özel teknolojik gelişmelere atıfta bulunarak ülkemizin atması gereken adımlar konusunda tavsiyelere yer verilmiştir. Çalışma içerisinde bu tür teknolojilere sahip ülkelerin teknolojik olarak önde olacağını, bununla birlikte Hidrojen enerjisine geçişte ülkemizin jeopolitik konumunun avantajını,

Karadeniz' in önemi, H_2S ile Ağır suyun ilişkisi, Ağır suya sahip olmanın nükleer santral teknolojilerinde ki önemini, Hidrojen ile Borun birleşmesi ile elde edilen ürünlerin yeni enerji sistemlerinde kritik rolünden bahsedilmektedir. Ayrıca biyokütle gazlaştırma teknoloji ile sentez gaz üretimi içinde Hidrojen oluşum mekanizması ve proses parametrelerinin Hidrojen üretimine etkisinden bahsedilmektedir.

Hidrojen Teknolojileri

Hidrojen ikincil enerji kaynağı olarak dünyada elementel formda bulunmaz. Bileşik halinde bulunduğu molekül içinden ayrıştırılmak suretiyle çeşitli prosesler kullanılarak gaz formda elde edilir. Buna rağmen yüksek enerji içermesi ve hidrojen kaynaklarının doğada bol bulunması nedeniyle sürdürülebilir temel yakıt olarak alternatif enerji seçenekleri arasında bulunmaktadır.

Hidrojen primer enerji kaynaklarının yardımıyla farklı kaynaklardan sentetik olarak elde edilebilen ikincil bir enerji kaynağıdır. Üretim aşamasında kullanılan prosesler arasında steam reforming, waste gas purification (atık gazlardan saflaştırma), elektroliz, fotokimyasal, termokimyasal prosesler gibi pek çok farklı proses günümüzde kullanılmaktadır. Aynı zamanda elde edilen hidrojenin boru hatlarına direk verilmesi veya deniz yolu ile uzun mesafelere taşınabilmesi mümkündür. Hidrojenin taşınması konusunda halihazırda çok büyük sorunların olmaması, kullanım alanının daha büyük yelpazelere ulaşacak olmasının bir göstergesidir. Hidrojen, enerji kaynakları arasında kg başına 120,7 kJ ile oldukça yüksek kalorifik değere sahip sahiptir. Hidrojen yaklaşık -252,00 ˚C'de sıvı forma gelir ve sıvı halde bulunan hidrojen hacimsel olarak gaz formda bulunan hacminden sadece 0,0014 kadar bir hacim kaplar. Sıvı fazda bulunan hidrojen kalorifik değeri 142,0 MJ/kg olup petrole kıyasla 3,2 kat oranında yüksek enerji içeriğine sahiptir. Birim hacim olarak ele alındığında ise sıvı hidrojen kalorifik değeri ise 10,0 MJ/m^3 olup petrolün %28'i kadar bir enerjiye sahiptir.

Gaz formda ele alındığında hidrojenin kütle başına kalorifik değeri sıvı formda bulunan hidrojenle eşit değerdir bununla birlikte doğal gaz ile kıyaslandığında 2,8 katı daha fazladır. Hidrojenin gaz formda hacim başına 0,013 MJ/m^3 kalorifik değer içerir ve doğal gaz ile karşılaştırıldığında %32,5'i kadarlık bir enerjiye sahiptir. Hidrojenin önemli bir özelliği, hidrit biçime dönüşmesidir. Özellikle kimyasal reaksiyonun ekzotermik koşullar altında birtakım alaşım ve metal ile kolayca büyük miktarlarda hidrit oluşuma dönüşebilmektedir. Burada en önemli konu hidrojenin taşınmasında getirdiği kolaylıktır. Metal hidritler özellikle hidrojenin depolanması ve taşınması için kullanılan en kolay proseslerden birisidir.

Metal hidritlerin birim ısıl enerji yoğunluğu 2-11 MJ/kg ile sıvı formda bulunan hidrojene göre çok daha azken hidritler hacimsel ısıl enerji olarak 12,6-14,3 MJ/m^3 ile gaz ve sıvı hidrojenden çok daha fazla enerji içermektedir.

Günümüzde hidrojen iki farklı yöntemle enerji üretiminde kullanılmaktadır. Bu proseslerden biri oksidasyon yani yakma diğeri ise yakıt pili teknolojisidir. Her iki teknolojide hidrojen enerjisinin nasıl kullanılacağı konusunda yön belirlemede kritik noktadadır. Yüksek enerji kapasitesinin yanında emisyon olarak sadece su buharı oluşturması ve küresel ısınmanın hayatı tehdit eder duruma gelmesi ile alternatif yakıtlar arasında öne çıkan hidrojen, aynı zamanda küresel enerji krizinin oldukça yoğun yaşandığı günümüzde hem üretim hem depolama, taşıma ve hem de kullanım teknolojileri üzerine yapılan çalışmaları hızlandırmıştır.

Enerji üretiminde gaz emisyonlarının sınırlandırılması hedefi ile küresel ısınmanın önüne geçebilmek aynı zamanda refahı azaltmadan yeterli enerjiyi düşük maliyetler ile üretmek adına en önemli çözüm odağı olan hidrojen Türkiye için özellikle 2030 yılı hedefleri içine alınmıştır. Özellikle endüstri ve ulaşım sektöründe hidrojenin kısa vadede kullanımını sağlanabilecek sektörlerden bazılarıdır. İstatistiki olarak 2021 yılı itibariyle fosil yakıtlardan elde edilen hidrojen ile takribi 70 milyon ton hidrojen tüketilmiştir. Gelecek yıllarda bu tüketim miktarının yaklaşık 8 kat artacağı öngörülmektedir. Ancak hidrojenin fosil yakıtlardan üretilmesi de emisyona sebep olan unsurlardan birisidir bu nedenle sera gazı emisyonlarının azaltılmasıdır. Hidrojen bu konuda önde gelen enerji kaynağıdır ve burada hidrojenin önemini belirleyen üretim, depolama, taşıma ve hidrojen uygulamalarını da içeren yüksek teknolojilerin geliştirilmesi ve bu teknolojilerin yaygınlaştırılmasıdır. Hidrojen depolama teknolojilerine hem tutucu hem depolama özelliği kazandıran milli değerimiz boru kullanımının teşvik edilmesi gündemi oluşturan diğer bir önemli husus olacaktır.

Hidrojen Üretim Teknolojileri

Hidrojen ikincil enerji kaynağı olarak kendi başına yeryüzünde elementel formda bulunmaz. Bu nedenle hidrojen üretimi için gereken öncelikle birincil bir enerji kaynağıdır. Gerekli olan enerji kaynağının elde edildiği yöntem ve kullanılan girdi ise hidrojenin rengini belirlemekle birlikte, bahse konu renk emisyon miktarlarını belirleyen en temel işarettir. Örneğin fosil yakıtların reformasyonundan elde edilen hidrojen "mavi hidrojen" olarak isimlendirilir. Bu proses özellikle CO_2 tutma fonksiyonu ile üretildiği için "mavi hidrojen" olarak adlandırılmıştır. Hidrojen üretiminde özellikle karbondan arındırılmış bir proses emisyon oranlarında azalma açısından oldukça önemlidir. Yenilenebilir enerji olarak hidrojenin elektroliz metodu ile sudan üretilmesi emisyon ve sera gazları üretimine sebep olmaması nedeniyle yeşil hidrojen adıyla anılmaktadır.

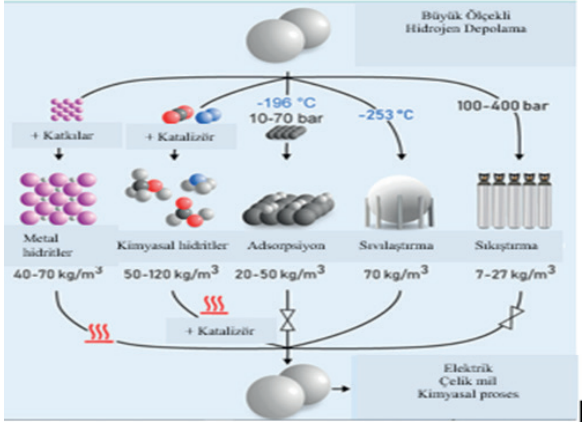
Hidrojenin Depolaması

Hidrojenin depolaması birçok seçenek içermektedir. Bu çokluk, depolama kriterlerine göre kategoriler halinde düzenlemeyi gerektirir. Bununla bir-

likte, optimal bir sınıflandırma söz konusu olduğunda birçok araştırmacının farklı kategorize kriterleri kullandığı görülmektedir (David,2011). Burada en kritik nokta hidrojen ile depolandığı kap özellikle depolama malzemesi ile arasındaki etkileşime bağlı doğayı analiz ederek oluşturulan sınıflandırmadır. Bu şekilde yapılan sınıflandırma hidrojen depolama teknolojilerini hidrojen, diğer malzemelerle herhangi bir önemli fiziksel veya kimyasal bağ olmaksızın %100 hidrojen içeren , kimyasal olarak sıvı ya da gaz formda depolanabilme; moleküler hidrojende bulunan göreceli olarak zayıf fiziksel Van der Waals bağları ile tutulan malzeme üstünde veya adsorbe edilebilme; kimyasal olarak bağlanabilme (emilebilir) olmak üzere üç ayrı sınıfa ayırır.

Bununla birlikte, kimyasal bağa dayalı depolama teknolojilerini metal hidritler ve kimyasal hidritler olmak üzere iki alt sınıfa bölmek daha faydalı olacaktır. Bu ayrım, bu malzemelerin temel olarak farklı hidrojen depolama özelliklerinden dolayı anlamlıdır. Adlandırmalarından da anlaşılacağı gibi, metal hidritler içeriğinde metal atomları içermektedir.

Hidrojen elementel metal hidritler ve metaller arası hidritler olmak üzere doğrudan metal atomuna bağlı olabildiği gibi bir kompleks metal hidritler olmak üzere metal atomuna bağlı bazı karmaşık iyonların bir bölümünü oluşturabilir. Buna yanında, hidritler kimyasal olarak hidrojen, nitrojen, karbon, oksijen, bor gibi yalnızca metalik olmayan elementler ile genellikle bazı kombinasyonlar oluşturabilir.



Şekil 1. Hidrojen depolama yöntemleri

Hidrojen, ikincil enerji kaynağı olarak 287 kJ/mol büyük ısıl değer ve son ürün çıktısının çevre uyumlu su olması nedeniyle, enerji uygulamaları için fosil yakıt türevlerine karşı güçlü bir alternatiftir. Ancak hidrojen yüksek ısıl değere sahip olduğu halde hacimsel yoğunluğunun düşük olması depolanma ve taşınma konusunda çok ciddi zorluklara neden olmaktadır (Salehi vd., 2015; Roes vd., 2011; Khalil, 2018). Bununla birlikte, moleküler hidrojen, yakıt

olarak pratik uygulamalar için sıvı halde ele alınması gereken 32,97 K ile düşük kritik sıcaklığa sahiptir. Bu kritik sıcaklığa bağlı olarak, hidrojene dayalı enerji teknolojisinin geliştirilmesindeki sıkıntılar meydana gelmektedir. Yani hidrojen depolama kriter ve koşulları, hidrojen kullanımda sınırlandırıcı durum olarak önümüze gelmektedir. Bu anlamda üstünde yoğun çalışmaların olduğu seçeneklerden biri, fiziksel etkileşimler yoluyla hafif malzemelerin nano boşluklarında depolanan hidrojen konusudur (Thomas, 2007; Zhou, vd., 2007; Zhou, vd., 2016)). Enerji ihtiyacında hidrojenin, ulaşım amaçlı kullanımı için, em önemli ihtiyaç hidrojen depolama tekniklerdir. Hidrojen depolama tekniklerinden güncel teknoloji olan sıkıştırma ve sıvılaştırma mevcut durumda sınırlı olanak sunmaktadır.

Ancak 500 km'lik bir sürüş menzili 10.000 psi basınç ile sıkıştırılmış gaz, küçük bir taşıtta oldukça büyük bir yer kaplamaktadır. Sıvılaştırılmış hidrojen ise, 10.000 psi basınçta sıkıştırılmış gaz hacimsel alanın yarısından daha fazlasını kaplar bununla birlikte, sıvılaştırma süreci boyunca mutlak enerjisinin %30-ile %40 arasında oldukça büyük bir oranda kaybetmesine neden olmaktadır. Geçici bir hidrojen ekonomisinde geçici seçenekler olarak gaz ve sıvı depolama yararlı olsa da hidrojen ekonomisi için daha kompakt ve verimli depolama şartlarına ihtiyaç duyulduğu aşikardır. En umut verici hidrojen depolama yolları, sıvı hidrojenden daha yüksek hacimsel miktarlarda hidrojeni kimyasal olarak bağlayan veya fiziksel anlamda adsorbe edebilen rigid malzemeler olarak önümüze çıkmaktadır.

Buradaki zorluk, mevcut durumda karşımız çıkan sorunlara çözüm bulabilecek özellikte gereksinimi karşılayan bir depolama malzemesi olmaktadır: Bu zorluklar yüksek hidrojen yoğunluğu, mevcut nesil yakıt hücreleriyle uyumlu olacak şekilde 70–100°C sıcaklıkta salma/şarj döngüsünün tersine çevrilebilirliği ve hidrojen salımına ve şarjına minimum enerji bariyerleri ile hızlı salma/şarj kinetiğidir. Birincisi, güçlü kimyasal bağlar ve yakın atomik paketleme; ikincisi, orta sıcaklıkta kırılabilen zayıf bağlar ve üçüncüsü, yığın ve yüzey arasında hızlı hidrojen difüzyonunu kolaylaştırmak için malzeme yapısal özelliği ve hidrasyon üzerine salınan ısı tarafından ayrışmayı önlemek için yeterli termal iletkenlik gerektirir olmasıdır.

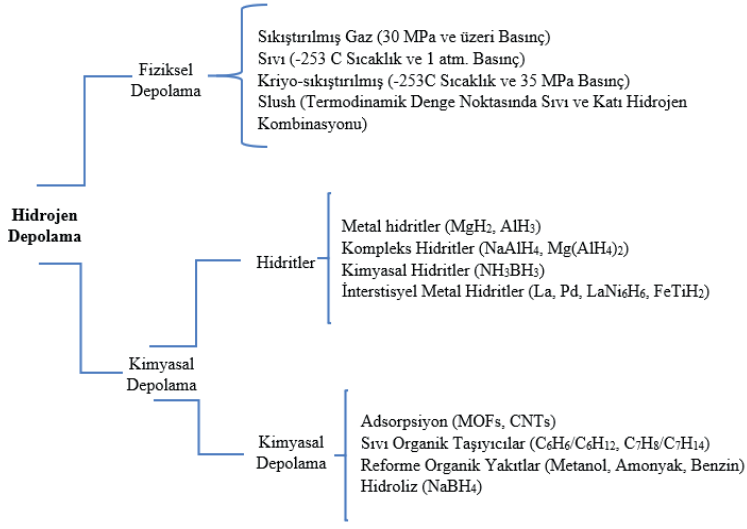
Yapılan çalışmalarda gereksinimlerden birini veya daha fazlasını karşılayan birkaç malzeme bulunmasına rağmen, hiçbirinin üç özelliği karşıladığı kanıtlanamamıştır. Bu temel teknik kriterlere ek olarak, uygun depolama ortamlarının maliyet, ağırlık, kullanım ömrü ve güvenlik gereksinimlerini de karşılaması gerekmektedir. 20 Malzeme bilimindeki son gelişmeler ile zorlu hidrojen depolama sorununun üstesinden gelme konusunda umut vaat etmektedir. Son beş yılda nanobilimdeki hızlı ilerleme ile nano ölçekli malzemelerin küçük boyutları, difüzyon uzunluğunu ve hidrojen atomlarının içeriden yüzeye seyahat etme süresini en aza indirmektedir.

Burada açıklanan malzeme yapısal mekanizması ile geniş bağıl yüzey alanı, moleküler hidrojenin atomik hidrojene ayrışması için bir yüzey alanı oluşturmaktadır bir başka deyişle difüzyon ve yüzey kimyasal bağlanma için bir ön koşuldur.

Yüzey alanı, ayrışmayı sağlamak için tek tabakalı katalizör ile uyarlanabilir yüzey eğimi, hidrojenle reaktiviteyi destekleyen bağlanmamış orbitaller oluşturmak için nanopartiküllerin boyutu aracılığıyla ayarlanabilir. Hidrojeni depolamak için kullanılan malzemeler adına umut verici ikinci gelişme, yoğunluk fonksiyonel teorisinin malzeme davranışını sayısal olarak simüle etme yeteneğinin artmasıdır (Geerlings, vd., 2003; Kiran, vd., 2006; Alapati, vd., 2007; Greeley ve Marikakis, 2006).

Bilgisayar kümelerinde uygulanan yoğunluk fonksiyonel teorisi artık elektronik yapıların, kristal yapıların, bağ güçlerinin ve çok elementli bileşik için reaksiyon ısıları hesaplanması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle simüle edilebilecek bileşiklerin sayısı ve yapıları ve stabiliteleri hakkında kapsamlı bilgi seviyesi, laboratuvarda ölçeğinde aynı zaman keşif sentezi ile deneysel olarak belirlenebilecek olandan çok daha fazladır.

Materyalleri sayısal olarak taramak için potansiyel olarak güçlü olan bu araç, şimdi hidrojen depolama bileşiklerine uygulanmaktadır. Hidrojen depolama yöntemleri geniş kapsamda fiziksel ve kimyasal olarak depolama olmak üzere iki başlıkta toplanır. Bu iki tip farklı teknolojik depolama kendi içinde de farklı gruplara ayrılmaktadır. Şekil 2'de depolama yöntemleri detaylı olarak açıklanmaktadır.



Şekil 2. Hidrojen depolama sınıflandırması

Fiziksel Hidrojen Depolama Teknolojileri

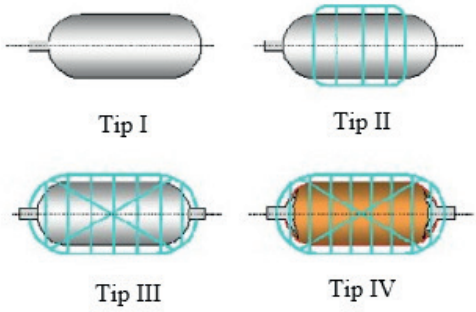
Hidrojenin fiziksel olarak depolanması ve sınıflandırılması hidrojenin sıvı ve soğuk/kriyo sıkıştırılmış gaz olarak depolanması olarak ele alınmaktadır.

Basınçlı Depolama olarak adlandırılan ve hidrojenin sıkıştırılması prensibine dayalı depolama tekniği, günümüzde kullanılan en yaygın tekniklerden biridir (Durbin ve Malardier-Jugroot, 2013). Sıkıştırılmış hidrojen gazının, sıkıştırılmış yüksek basınçlı kaplarda fiziksel olarak depolanmasını içeren en bilinen hidrojen depolama teknolojisi sıkıştırılmış hidrojen depolama tekniğidir (Roes ve Patel, 2011). Hidrojen depolama tankları dört standart tipte sınıflandırılabilir. Tip I genellikle çelik olmak üzere tamamen metal bir kaptan oluşmaktadır.

Bu nedenle tipik olarak endüstride kullanılır ve ağırlık açısından en ağır olanıdır. Tip I kaplar, 200–300 bar basınç altında ağırlıkça yaklaşık %1 hidrojen depolama özelliğine sahiptir (Okonkwo, vd., 2003). Tip II, Tip I silindirden daha hafif, metal astarlı çember sarılı kompozit bir silindirdir. Bununla birlikte Tip I ve II depolama tankları, ağırlıklarından kaynaklanan düşük hidrojen depolama kapasiteleri ve ayrıca hidrojen kırılganlığı sorunları nedeniyle araç uygulamaları için uygun değildir.

Tip III kaplar, hidrojen geçirgenliği bariyeri görevi gören metal astarlı tamamen sarılmış bir kompozit silindir içerir. Metal astar, kırılganlık problemini çözen alüminyumdan (Al) yapılmıştır ve mekanik dirence %5'den daha fazla artırmaktadır (Okonkwo, vd., 2003). Reçineye gömülü karbon fiber kompozit kaplama genellikle tamamen yük taşıyan bileşen görevi görür. Tip III kaplar, Tip I ve II kaplara göre %25-%75 kütle kazancı sağlamaktadır (Langmi, vd., 2022) bu da onları araç uygulamaları için daha uygun hale getirir; ancak daha maliyetlidirler. Tip III kapların da 450 bar basınca kadar olan basınçlarda güvenilir olduğu gösterilmiştir, ancak 700 bar basınçta basınç döngüsü testleriyle ilgili hala sıkıntılar bulunmaktadır (Okonkwo, vd., 2003).

Tip IV kaplar, yalnızca hidrojen geçirgenliği bariyeri görevi gören yüksek yoğunluklu polietilen plastik astarlı bir kompozit silindir içerir. Kompozit kaplama, yük taşıyan yapı olarak hizmet eder ve tipik olarak bir epoksi matrisinde karbon fiber veya karbon/cam fiber kompozitten oluşur. Tip IV kaplar, araç uygulamaları için en uygun basınçlı kaplar olarak en hafifidir. 1.000 bar basınca kadar yüksek basınçlara dayanabilir. Ancak, karbon liflerinin önemli maliyet kalemi olması nedeniyle oldukça yüksek maliyetlere mal olmaktadır. Maliyet projeksiyonları, karbon elyaf maliyetinin, yüksek üretim hacimleri dikkate alındığında, depolama kabı maliyetinin yaklaşık %75'ini oluşturduğu görülmektedir. Yukarıda belirtilen dört basınçlı kap tipinin şematik bir gösterimi Şekil 3'de gösterilmektedir.



Şekil 3. Dört tip basınçlı kap için şematik bir gösterim

Şekil 3'de şematik gösterimi bulunan basınçlı kaplar için maliyet ve yoğunluk bilgileri (Rivard, vd., 2019) Tablo 1'de detaylı olarak verilmektedir.

Tablo 1. Depolamada kullanılan tank tiplerine göre yoğunluk ve maliyet değerleri

Tank Tipi	Gravimetrik Yoğunluk (% ağ.)	Maliyet ($/kg)
Tip I	1,7	83
Tip II	2,1	86
Tip III	4,2	700
Tip IV	5,7	633

Günümüzde hem taşıma uygulamaları ve enerji üretiminde kullanılan basınçlandırılmış hidrojen genel olarak yerleşik tipte sistemlerden oluşmaktadır. Yüksek miktarlarda hidrojen depolama için gerekli olan tesislerde hidrojenin dağıtımı, yakıt pili tabanlı güç üretim tesisleri ve araçlar için yakıt ikmal istasyonları kullanılması gereklidir. Depolama kapasiteleri uygulamanın şekline göre farklılıklar göstermekle birlikte dağıtım ve yakıt ikmal istasyonları için 50-100 ton aralığında ve üretimde 10-1.000 tonlar mertebesinde olabileceği öngörülmektedir (Tzimas, vd., 2003). Özellikle hidrojen kayıplarında öngörülen düşük seviye, hızlı dolum, sağlamak ve gerekli kapasitelere sahip basınçlı kapların imalatı önemli gereksinimlerden bazılarıdır. Özellikle düşük maliyete sahip ve depolama kapasitesi yüksek basınçlı kaplar teslimat maliyetlerinde oldukça büyük avantaj sağlamaktadır.

Sıvı Hidrojen

Hidrojenin oldukça büyük kapasitede depolanması gerektiğinde hidrojenin sıvılaştırılması gereklidir. Sıvılaştırmanın avantajı, çok yüksek hidrojen depolama yoğunluklarının atmosferik basınçta elde edilebilmesidir. Hidro-

jen gazı için sıcaklık değerlerindeki düşüklük kriyojenik sıvı forma dönüşmesinde temel etkendir (Dicks ve Rand, 2018).

Kriyo-sıkıştırılmış hidrojen depolama tekniği, sıkıştırılmış hidrojen depolama ve kriyojenik hidrojen depolama özelliklerinin bir kombinasyonudur. Yukarıda tartışıldığı gibi, sıkıştırılmış hidrojen depolamanın dezavantajlarından biri hem hacimsel olarak hem de basınç açısından yüksek değerlere ihtiyaç duyulmasıdır. Ayrıca, kriyojenik hidrojen depolamanın dezavantajlarından biri de kaynamadan kaynaklı kayıplardır. Kriyo-sıkıştırılmış depolama ile her iki hidrojen depolama yöntemindeki zorluklar oldukça azaltılmış olmaktadır.

Sıvı hidrojenin depolanması için birincil endişe, enerji yoğun sıvılaştırma işlemidir. Hidrojenin sıvılaştırılmasının neden önemli miktarda enerji gerektirdiğinin iki ana temel nedeni vardır: hidrojenin oldukça düşük kaynama noktası (1 bar basınç -253 °C) ve yaklaşık -73 °C'nin üzerinde sıcaklıklar için kısma işlemleri sırasında hidrojen gazının soğumaması (adiyabatik, izantalpik genleşme) ve ikinci sorun olarak sıvılaştırma işleminde, çoğunlukla sıvı nitrojenin buharlaştırılmasıyla ön soğutma yapılmasının gerekliliğidir (Valenti, 2015; Valente, vd., 2015).Burada, hidrojen depolamak üzere kullanılan izole edilmiş kap, kriyojenik sıcaklıklara ve yüksek basınçlara dayanabilir. Bu özel depolama kabı ile, hidrojen depolama kapasitesi ve özellikle güvenlik sorunları daha kolay çözülmektedir.

Bu yöntem ile, sıvılaştırılmış hidrojen 20 K sıcaklıkta sıkıştırılarak hacimsel olarak hidrojen depolama kapsama gücü atmosferik basınçta 70 gL^{-1} hacimsel ağırlıktan 240 bar basınçta 87 gL^{-1} hacimsel ağırlığa yükseltilir (Godula vd., 2012a; Godula vd. 2012b)).Yalıtılmış kabın yüksek basınçları tutma kapasitesi, tank içindeki basıncın kriyojenik depolama durumunda olduğundan daha fazla artmasına izin verir ve dinlenme süresini uzatarak depolama yoğunluğunun artmasına ve kaynama kayıplarının azalmasına neden olur. Ayrıca, sıkıştırılmış hidrojen depolama 700 bar basınçta yapılırken kriyo-sıkıştırılmış hidrojen depolamada bu basınç değeri <300 bar altında yapılmaktadır. Bu nedenle yüksek maliyete sahip karbon fiber kompozit malzemeler daha az kullanılabilmektedir. Kriyojenik hidrojen 70 bar basınçta sıkıştırılmış hidrojenin neredeyse iki katı bir yoğunluğa sahiptir ve sıvı hidrojen, soğutma, ısıtma ve havalandırma için, basınç altında özel olarak yalıtılmış kriyojenik tanklarda depolanır (Folkson, 2022). Depolama kabının teknik değerlendirmesi, hidrojen depolamaya yönelik bu seçeneğin, otomotiv uygulamaları için gravimetrik ve hacimsel hidrojen kapasiteleri ve minimum günlük sürüşün belirli koşulları altında dinlenme sırasındaki hidrojen kaybı dahil olmak üzere belirli Amerika Birleşik Devletleri DOE sistemi hedeflerini potansiyel olarak karşılayabileceğini ortaya koymuştur (Folkson, 2022).

FC elektrikli otobüsler için kriyo-sıkıştırılmış hidrojen depolamanın yakın tarihli hesaplamalı analizinde, kriyo-sıkıştırılmış bir depolama sisteminin (500 bar), mevcut FC gösterisinde sıkıştırılmış bir hidrojen depolama sistemine (Tip III, 350 bar) göre üstün özellikler gösterdiği bulundu. Kriyo-sıkıştırılmış hidrojen depolama sisteminin gravimetrik ve hacimsel kapasitelerde sırasıyla %91 ve %175'lik bir artış elde etmesi öngörülmüştür; karbon fiber kompozit kütlede %46 ve sistem maliyetinde %21 azalma meydana gelmektedir.

Ek olarak, tankın ilk dolumunun %85'e kadar olduğu, kayıpsız >7 günlük bir dinlenme süresi rapor edilmiştir. BMW 2012 yılında, bir prototip kriyo-sıkıştırılmış hidrojen teknolojisi elde ettiğini rapor etmiştir. Bununla birlikte, kullanılan altyapı ve maliyet açısından bu depolama yöntemi için hala önemli engeller bulunmaktadır. Bu durumda uygulanabilirliği açısından sınırlamalar getirmektedir. Burada kullanılan depolama kabı, karbon fiber kompozit (Tip III) ile sarılmış bir Al astardan oluşmaktadır. Ayrıca çevreden kaba ısı transferini engellemek için vakum alanı içine alınmış metalize plastik levhalar içeren bir iç kap ve bir dış paslanmaz çelikten oluşan dış kap bulunmaktadır. Bununla birlikte, bu kap ile ilgili öne çıkan sorunların LH2 pompa performansı, vakum kararlılığı ve üretilebilirliği açısından olduğu rapor edilmiştir;

Günümüzde yapılan çabalar volumetrik etkinliği artırmaya yöneliktir. Sıvı hidrojen elde etmek için 1 bar basınç ve 20 K (-253,15 ^{o}C) gerekli olan şartlardan ikisini oluşturmaktadır. 1 bar basınç altında sıvılaştırılmış hidrojen yoğunluğu 71 kg/m^{3}'tür. Hidrojeni sıvı formda depolamanın en kritik noktası hidrojeni bu kadar düşük bir sıcaklıkta tutmaktaki zorluktur. Hidrojenin sıvılaştırılması sırasında enerji kaybı %40 depolama sırasında enerji kaybı %10 civarındadır. Buharlaşmaya bağlı olarak depolanan sıvı hidrojenin bir kısmının kaybolduğu göz önüne alınırsa sıvı depolama sistemlerinde meydana gelecek basınç artışı ile sürekli tüketim gerekliği meydana gelmektedir. Tüm bunların üstünde değerlendirilmesi gereken bir diğer ayrıntı malzemelerin düşük sıcaklıklarda kırılgan duruma gelmesi ve bu nedenle kapların bozulma riskinin artmasıdır. Bu teknoloji, genellikle kıtalararası nakliye ve kamyon teslimatı gibi ortalama ile büyük ölçek aralığındaki depolama ve tedarik için uygulanır. Örneğin; 5.000 kg hidrojen, bir kriyojenik tanker tarafından taşınabilir ve bu sıkıştırılmış hidrojenli kaplara sahip römorklardan yaklaşık beş kat daha fazla kapasite taşınmasına denk gelmektedir.

Soğuk/Kriyo Gaz Depolama: Süper kritik bir kriyojenik gaz olan kriyo-sıkıştırılmış hidrojen depolama teknolojisi ilk kez 2010 yılında ortaya atılmıştır. Bu yöntemde, gaz halindeki hidrojenin sıkıştırılması, herhangi bir sıvılaşma olmaksızın yaklaşık -233°C'de gerçekleşir. Vakum muhafazası nedeniyle, bu yöntem yüksek güvenlik seviyelerine haizdir. Ayrıca, büyük yüksek depolama yoğunluğu, hızlı ve etkili yakıt ikmali, kriyo-sıkıştırılmış

depolamanın avantajlarıdır. Bununla birlikte, altyapıların erişilebilirliği ve yüksek maliyetleri nedeniyle bu teknoloji halen geliştirme safhasındadır.

Basınçlı Gaz Olarak Hidrojen Depolama

En iyi bilinen hidrojen depolama tekniği basınçlı gaz olarak depolamaktır. Depolama şartları oda sıcaklığında olmak üzere yüksek basınca dayalı tanklarda depolamaktır (Rivard, vd., 2019). Tank tipi ve tank ağırlığı olmak üzere iki parametreye bağlı olmak kaydıyla yüzde 7'ye kadar ağırlıkça hidrojen depolanabilir (Dinçer, 2002; Zhevago, 2016).

Basınçlı gaz olarak hidrojen depolama tekniği motorlu taşıtlar açısından oldukça hızlı yakıt ikmali ve düşük altyapı ihtiyacı nedeniyle uygulaması kolay bir çözüm üretmektedir. Hidrojen doğası gereği basınç altında olmak kaydıyla ortam sıcaklığında depolanmaya uygundur. Ancak düşük sıcaklıklarda yüksek hidrojen yoğunlukları "soğuk" ve "kriyojenik" (150 K ve altı) ortamda basınçlı hidrojen depolama konusu araştırılmaktadır. Hidrojen'nin basınç altında depolanmasında, depolama bölmeleri ve kompresör kullanımı iki ana bileşen olarak önem taşımaktadır.

Ayrıca hidrojen bu şekilde yeraltı ve yerüstü depolarda saklanabilmektedir (Elberry, vd., 2021; Andersson 2019). Yer üstü depolamada özellikle büyük çapta depolama ihtiyacı gündeme geldiğinde, maliyetler önem taşımaktadır, çünkü büyük ölçek depolama da yer üstü depolama yüksek maliyetlere mal olmaktadır. Buna neden ile genellikle hidrojenin basınç altında depolanmasında yer altı depolama sistemleri tercih edilmektedir. Günümüzde hidrojen depolama sistemleri içinde silindirik depolama tercih edilmektedir. Burada hacimsel 50 L kapasiteli tanklar ve uygulama basıncı 200–250 bar olmak kaydı ile depolama gerçekleştirilir. Ancak gaz formunda depolama basıncı 600–700 bar gibi yüksek basınçlara kadar çıkabilmektedir. Hacimsel olarak 50 L tanklar kullanılsa bile hacimsel olarak hidrojenin kütlesi çok düşük olduğu için enerji yoğunluğu da çok düşük olmaktadır (Koşar, 2021). Aynı zamanda oluşan yüksek basınç depolama tanklarında ağırlığa sebep olmaktadır. Bu iki neden hem hidrojenin taşınmasını olumsuz etkilemekte hem de hidrojenden elde edilecek verimde düşüklüğe sebep olmaktadır. Çelik tanklarda ise gravimetrik yoğunluk %1,5 civarındadır. Aynı zamanda 10–12 kg/m^3 hacimsel yoğunluk göze çarpmaktadır (Elberry, vd., 2021; Andersson 2019; Koşar, 2021).

Hidrojenin basınçlı gaz olarak depolanması yıllardır uygulanan bir teknik olmasına rağmen, basınçlandırma için gerekli yüksek enerji, hızlı doldurma hidrojen gazında meydana gelen ısınma ve ön görülen basınçta hacimsel azalma önemli dezavantajlardan birkaçıdır.

Bunun yanında sızdırmazlık için üstün kalite ve yüksek maliyet içeren conta kullanımı yanında gaz hidrojenin kompozit malzemelere nüfuz etme olasılığı ve atmosferik basıncın iki yüz katı gibi yüksek basınçta tutulması

tehlike arz etmesi açısından diğer dezavantajlar içinde bulunmaktadır.

Hidrojenin depolanacağı basınç, tank duvarlarının kalınlığını, tankların boyutunu/ağırlığını, malzeme seçimini ve maliyetleri etkilemektedir. Genellikle, hidrojen depolama tanklarının imalatında üç çeşit malzeme kullanılmaktadır. Bunlar; metal tip (alüminyum ve çelik), polimer tip (yüksek yoğunluklu polietilen ve poliamid) ve karbon fiberlerdir.

Metal tip tanklarda yoğun bir basınç/sıcaklık döngüsü olacaksa, hidrojen geçişine ve hidrojen kırılganlığına maruz kalmamalıdır. Hidrojen depolama tankları, genellikle metalin gerilme mukavemeti tarafından belirlenen minimum duvar kalınlığı ile maksimum çalışma basıncı için tasarlanmaktadır.

Günümüzde özellikle depolama miktarlarının çok yüksek boyutlarda olmasının gerekliliği nedeniyle teknolojik araştırmalar devam etmektedir ve hidrojen depolama çalışmalarının önemini artırmaktadır. Hidrojen depolama yöntemlerine bağlı olmak üzere enerji yoğunluklarında farklılıklar vardır.

Basınçlı gaz olarak hidrojen depolama yönteminde hidrojen miktarı ve enerji yoğunluğunun güncel durumları diğer depolama yöntemlerine göre Tablo 2'de karşılaştırmalı veriler ve Tablo 3'de ise depolama verimlerine yönelik değerler verilmektedir (Rivard, vd., 2019).

Tablo 2. Hidrojen depolama teknikleri güncel durumlar (Koşar, 2021)

Depolama Türü	Depolama Şekli	Gravimetrik Kapasite (% ağ.)	Volumetrik (g/L)
Fiziksel	Basınçlı (350 bar)	2,8-3,8	16- 18
	Basınçlı (700 bar)	2,6-4,4	19-25
	Sıvı	4,8-6,8	31- 39
Kimyasal	Kompleks hidrit	1,9-2,5	16- 28
	Karbon (poroz)	2,9- 3,1	13- 15
	Kimyasal hidrit	2,6- 3,5	22- 29
Hibrit	Kriyojenik sıkıştırılmış	5,0- 5,8	28- 38

Tablo 3. Hidrojen hacimsel depolama verimliliği karşılaştırılması (Rivard, vd., 2019)

Depolama Metodu	Depolama Özellikleri	Hacimsel Depolama Verimi
Basınçlı H_2	5000 psi	~ 23 g H2/L
	10000 psi	~ 39 g H2/L
Sodyum borohidrit	Ağırlıkça %30'luk çözelti	~ 63 g H2/L
Sıvı H_2	Kriyojenik	~ 71 g H2/L

Hidrojenin basınçlı depolanmasında kullanılan tanklara göre gravimetrik yoğunluk ve maliyet değerleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Depolamada kullanılan tank tiplerine göre yoğunluk ve maliyet değerleri (Rivard, vd., 2019)

Tank Tipi	Gravimetrik Yoğunluk (% ağ.)	Maliyet ($/kg)
Tip 1	1,7	83
Tip 2	2,1	86
Tip 3	4,2	700
Tip 4	5,7	633

Hidrojen Depolama Teknolojilerinde Malzeme

Karbon Temelli Adsorbanlar ile Hidrojen Depolama Yöntemleri

Hidrojenin basınçlı gaz tüplerinde, kriyojenik sıvı olarak ve katı halde depolanabildiği bilinmektedir. Hidrojen, basınçlı gaz olarak depolandığında büyük hacim kaplayan yüksek basınçlı depolama tankları güvenlik yönünden endişe yaratabilmektedir. Kriyojenik depolamada ise yüksek enerji maliyetinin yanı sıra, yeniden dolum sırasında hidrojen kayıpları oluşmaktadır. Bu dezavantajlar, birçok araştırmacının ilgisini malzeme/alaşımlar üzerinde adsorpsiyon ve/veya absorpsiyon yoluyla katı hal depolamasına yöneltmiştir (Mohan, vd., 2019).

Hidrojenin katı halde depolanması, hidrojenin absorpsiyon ya da adsorpsiyon yoluyla malzemelerle buluştuğu en güvenilir tercih olduğu kabul edilmektedir. Bir başka seçenek olarak metal hidritler ve karmaşık hidritlerin hidrojen depolama kinetikleri göreceli olarak yavaştır (Xia, vd., 2013). Karbon bazlı malzemeler, hidrojen depolama için birçok avantaj sergilemektedir.

Bunlar (a) görece düşük maliyet, (b) yüksek yüzey alanları, (c) yüksek kimyasal kararlılık, (d) ucuz yenilenebilir kaynaklardan üretilme olasılığı ve (e) metal hidritlere göre düşük ağırlık olarak özetlenebilir.

Bu avantajlar sonucu, bu malzemeler yakıt pilli araçlarda hidrojen depolama sistemi olarak kullanma olasılığı taşımaktadırlar (Sdanghi, vd., 2018).

Metal Organik Yapılar (MOF)

MOF'lar hidrojen depolama kapasitesinde önemli bir potansiyel içermektedir. MOF'lar tersinir ve yüksek oranlı hidrojen adsorpsiyon kapasitelerinin olması sebebiyle gaz depolama uygulamalarında popüler materyaller olarak ilgi çekici duruma gelmiştir. Dezavantajı olarak düşük çalışma sıcaklıkları sıkıntı meydana getirmektedir. MOF yapılar temiz enerji depolamaya alternatif olarak kullanılabilir.

Hidrojen arabaları için yakıt maliyetinin yüksek olması, MOF kullanılarak azaltılabilir. Dolayısıyla, ortam sıcaklıklarında yeterli hidrojen adsorpsiyon kapasitesine sahip MOF'lar otomobil uygulaması için kullanılabilir. MOF'larda çok düşük hidrojen alım kapasitesi gözlendiğinden, gelecekteki araştırmalar, ortam sıcaklıklarında hidrojeni işlemek için MOF malzemelerinin anlaşılmasına odaklanmalıdır.

Zeolitler

Zeolitler kristal yapıda, geniş yüzey alanlı ve mikro gözenekli, alüminyum silikatlardır. Diğer malzemelerin yanı sıra, hidrojen depolama malzemesi olarak zeolit kullanmanın avantajları; üretim yöntemlerinin nispeten basit olması ve kömürün yanması sırasında oluşan uçucu küller gibi atık malzemelerin de zeolit sentezinde kullanılabilmesidir.

Bununla birlikte, örneğin hidrotermal reaksiyon ile zeolit sentezleme düşük sıcaklıklarda (90-100°C) gerçekleşir ve daha az miktarda enerjiye ihtiyaç duyulur. Zeolitlerin güvenli kullanım bağlamında en büyük avantajı ise; hidrojenin adsorpsiyonu sırasında bu atmosferde yanıcı olmamalarıdır (Wieliczko, vd., 2018).

Sodyum Bor hidrürler ile Hidrojen Depolama

Hidrojen elementi yakıt hücreleri içinde depolanma konusunda zorluk çıkaran bir malzemedir. Literatüre göre bor hidritler, metal hidrürler metan, karbonlu nano partiküller, alanatlar, metanol ve hafif H/C'lar ile bazı katı ve sıvı formda malzemeler içinde depolanabilir (Ma vd., 2003). Burada, bor bazlı $NaBH_4$, günümüzde üzerine yoğunlaşan en önemli hidrojen depolama tekniğinde uygulama malzemesi olarak önem oluşturmaktadır.

Hidrojenin gaz formda olmak üzere sodyum bor hidrür çözeltisinden katalitik reaksiyon ile üretilebilirliği, yakılmak suretiyle, geri dönüşsüz pil veya yakıt pillerinde enerjiye dönüştürülebilir özellik (Bahar, vd., 2008). Li-

teratürde bilinen en önemli sodyum bor hidrür özelliği alkali çözeltilerinin katalitik olarak hidrojen üretmesidir.

Birim molekül başına ağırlıkça %10 hidrojen depolanması mümkündür ancak su ile reaksiyona sokularak depolama kapasitesi %20'lere yükseltilmektedir. Bu nedenle sodyum bor hidrürün yanıcı, yakıcı ve patlayıcı özellik oluşturmaması, oluşması muhtemel reaksiyonların kontrol edilebilme kolaylığı sağlaması, sodyum bor hidrürden elde edilen hidrojenin yarı yarıya hidrür ve sudan elde edilmesi ve üretimde kullanılan katalizör ve sodyum meta borat malzemesinin tekrar kullanılabilir özellikte olması sodyum bor hidrüre önemli avantajlar sağlamaktadır.

Türkiye dünyanın bor rezervleri bakımından önde gelen ülkelerinden biridir ve hatta ön sırada bulunmaktadır. Hali hazır bor rezervi dünya rezervlerinin %74'ini kapsamaktadır. Bu nedenle bor cevherinin, özellikle hidrojen depolama teknolojilerinde kullanımı için sodyum bor hidrür üretiminin gerçekleştirilmesi ülkemiz açısından çok önemlidir. Geleceğin önemli potansiyel hidrojen taşıyıcılarından biri olması beklenen "sodyum bor hidrür" ve "diğer bor hidrür bileşiklerinin", ülkemizde endüstriyel üretime dönüştürülmesi gereken önemli alanlardan biri olması gerektiği değerlendirilmektedir. Bor dışında, kompleks alüminyum hidrür bileşikleri (özellikle alanatlar ve AlH_3) de hidrojen depolama açısından oldukça önemli bir malzeme olup bu konuda da Ar-Ge projeleri çalışılmalıdır.

KAYNAKLAR

Alapati, S.V., Johnson, J.K., Sholl, D.S. (2007). Phys. Chem. Chem. Phys. 9, 1438.

Andersson J. Grönkvist S. 2019. Large-scale storage of hydrogen, International Journal of Hydrogen Energy, 44, 11901-11919

Bahar T., Kalafatoğlu E., Baloğlu H., İmamoğlu B., Örs N., Koral M., Köroğlu J., Sarıoğlan Ş., Türdü S., Öz P.H., Gökgün H. 2008. Sodyum borhidrür sentezi ve üretimi, Proje Sonuç Raporu-504G101, TÜBİTAK MAM,

David, WI (2011) Effective hydrogen storage: a strategic chemistry challenge. Faraday Discuss, 151, 399-414

Dicks A. and Rand, DAJ., (2018). Fuel cell systems explained. Hoboken, NJ, USA: Wiley,

Dinçer İ., 2002. Technical, environmental and exergetic aspects of hydrogen energy systems, International Journal of Hydrogen Energy, , 27, 265-285

Durbin, D.J., Malardier-Jugroot, C., 2013. Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications. Int. J. Hydrogen Energy 38 (34), 14595–14617

Elberry A.M., Thakur J., Santasalo-Aarnio A., Larmi M. 2021. Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems, International Journal of Hydrogen Energy, 46, 15671-15690

Folkson, R. (2022). Hydrogen as an energy vector for transportation vehicles. In Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance. Woodhead Publishing, 151-171

Geerlings, P., De Proft, F., Langenaeker, W. (2003) Chem. Rev. 103, 1793.

Greeley, J., Mavrikakis, M. (2006) Catal. Today 11, 52

Godula-Jopek, A., Jehle, W., & Wellnitz, J. (2012a). Hydrogen storage technologies: new materials, transport, and infrastructure. John Wiley & Sons.

Godula-Jopek, A., Jehle, W. ve Wellnitz, J. (2012b). Storage of pure hydrogen in different states. Hydrogen Storage Technologies. doi.org/10.1002/9783527649921.ch4

Khalil, Y.F., 2018. Science-based framework for ensuring safe use of hydrogen as an energy carrier and an emission-free transportation fuel. Process Saf. Environ. Protect. 117, 326–340

Kiran, B., Kandalama, A.K., Jena, P. (2006). J. Chem. Phys. 124, 224703

Koşar C. 2021. Hidrojen Depolama Yöntemleri, Open Journal of Nano, 1-6

Langmi, H.W., Engelbrecht, N., Modisha, P.M., Bessarabov D. (2022). Hydrogen strorage. Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications, Elsevier,455-486.

Ma, J., Su, Y., Zhou, Y., Zhang, Z. (2003). Simulation and prediction on the performance of a vehicle's hydrogen engine. International Journal of Hydrogen Energy, 28, 77-83.

Mohan, M, Sharma, VK, Kumar, EA, Gayathri, V. Hydrogen storage in carbon materials—A review. Energy Storage. 2019; 1:e35. https://doi.org/10.1002/est2.35

Okonkwo, P.C., Barhoumi, E.M., Ben Belgacem, I., Radwan, A.B., Shakoor, R.A. (2003). A focused review of the hydrogen storage tank embrittlement mechanism process. International Journal of Hydrogen Energy (Article in press)

Roes, A.L., Patel, M.K., 2011. Ex-ante environmental assessments of novel technologies–Improved caprolactam catalysis and hydrogen storage. J. Clean. Prod. 19 (14), 1659–1667

Rivard E., Trudeau M., and Zaghib K. 2019. Hydrogen storage for mobility: A review, Materials, , 12, 1 – 22.

Salehi, F., Talei, M., Hawkes, E.R., Yoo, C.S., Lucchini, T., D'Errico, G., Kook, S., 2015. A comparative study of conditional moment closure modelling for ignition of iso-octane and n-heptane in thermally stratified mixtures. Flow, Turbul. Combust. 95 (1), 1–28

Sdanghi, G., Sdanghi, G., Maranzana, G., Celzard, A. and Fierro, V. (2018). Hydrogen Adsorption on Nanotextured Carbon Materials. In Hydrogen Storage Technologies (eds M. Sankir and N.D. Sankir). https://doi.org/10.1002/9781119460572.ch9

Thomas K.M. (2007) Hydrogen adsorption and storage on porous materials. Catalyst Today. 389-398.

Tzimas, E., Filiou, C., Peteves, S.D., Veyret, J.B., 2003. Hydrogen Storage: State-Of-The- Art and Future Perspective. EU Commission, JRC Petten, EUR 20995EN

Wieliczko, M., and Stetson. N. 2020. Hydrogen technologies for energy storage: A perspective, MRS Energy and Sustainability. 7, 1-9. doi:10.1557/mre.2020.43

Xia, Y., Yang, Z., Zhu, Y. 2013. Porous carbon-based materials for hydrogen storage: advancement and challenges J. Mater. Chem. A, ,1, 9365-9381. https://doi.org/10.1039/C3TA10583K

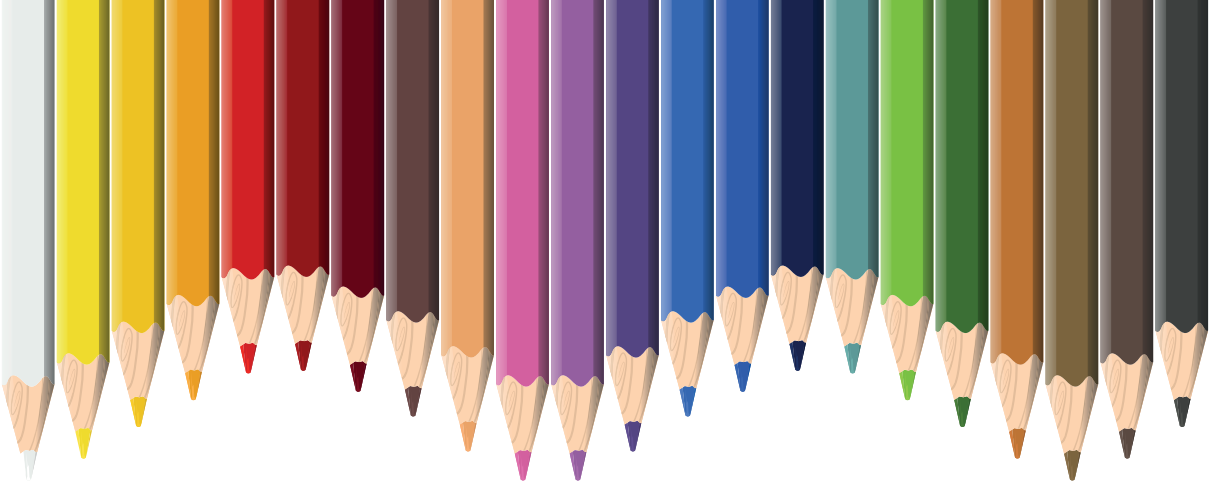
Valenti, G (2015). Hydrogen liquefaction and liquid hydrogen storage. Compendium of hydrogen energy, Elsevier, 27-51.

Valente A, Iribarren D, Dufour J, Spazzafumo G (2015) Life-cycle per-formance of hydrogen as an energy management solution in hydro-power plants: a case study in Central Italy. Int J Hydrog Energy 40:16660–16672

Zhou X, Liu W, Zhang P, Wu W. (2016). Study on heavy metals conversion characteristics during refused derived fuel gasification process. Procedia Environmental Sciences 31, 514-519.

Zhou, W., Wu, H., Hartman, M. R. & Yıldırım T. (2007). Hydrogen and methane adsorption in metal–organic frameworks: a high-pressure volumetric study. J. Phys Chemistry C, 111, 44, 16131–16137.

Zhevago N.K., 2016. Other methods for the physical storage of hydrogen, National Research Centre, Kurchatov Institute, Moscow, Russia,



Bölüm 25

ATIK ISI GERİ KAZANIMI VE PROSES UYGULAMA ANALİZİ

Samet Giray TUNCA[1]
Abdullah AKBULUT[2]

1 Öğr.Gör. Samet Giray TUNCA, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi ORCID: 0000-0002-7632-8745
2 Prof.Dr. Abdullah AKBULUT, Çankırı Karatekin Üniversitesi ORCID:0000-0002-6199-4083

1. GİRİŞ

Sanayide üretimin yapıldığı pek çok sektörde, yüksek sıcaklıklarda çalışan sistemler için atık ısı oluşumu görülmektedir. Atık ısı geri kazanım yatırımları, enerji maliyetlerinin düşürülmesi açısından önemlidir. Atık ısı geri kazanım prosesinin termodinamik hesaplamaları yapılarak atık ısıdan faydalanma yöntemi seçilmelidir. Seçilen yöntemlerde farklı faktörler önem kazanabilir. Atık ısının geri kazanım prosesinde sıcaklık, basınç, debi gibi sistem değerleri, amortisman süresini belirlemektedir.

Erzurum'da bulunan çimento fabrikasında kurulu olan 7,5 MW kapasiteli atık ısıdan enerji geri kazanım sistemine dair mevcut işletme verileri üzerinden enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre, sistemin akış ekserjisi 11096 kW seviyesindedir ve sistemin toplam ekserji verimi %69,5 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, sistemin etkin bir enerji geri kazanımı sağladığını göstermektedir. Aynı zamanda, yıllık ortalama 16 ton CO_2 emisyon azaltımı gerçekleştirilmektedir. Bu veriler, çimento fabrikasının enerji verimliliğini artırmak ve çevresel etkilerini azaltmak adına başarılı bir atık ısıdan enerji geri kazanım sistemi işlettiğini göstermektedir (Memiş, 2019).

Başka bir çalışmada atık ısı geri kazanım sistemleri detaylı bir şekilde tanımlanmış ve bir firma bünyesinde kurulması düşünülen birleşik ısı-güç çevrim santrali tesisi ele alınıp termodinamik analizleri yapılmıştır (Karanfil, Rüşen, Poyraz, & Güler, 2020).

Erdoğan (2023) tarafından yapılan çalışmada bisküvi fırını için bir akış şeması oluşturulmuş ve her bir düğüm noktası için termodinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda, bisküvi fırınının enerji veriminin %3,90 olduğu belirlenmiş ve harcanan enerjinin %49,35'inin atık ısı olarak bacadan atmosfere salındığı tespit edilmiştir. Net bugünkü değer (NBD) yöntemi kullanılarak organik rankine çevriminin maliyet analizi yapılmıştır. Tasarım sonuçlarına göre, sistem çalışma ömrü 20 yıl olarak kabul edildiğinde R113 iş akışkanı kullanılan çevrimde 58,62 kW elektrik enerjisi üretilmiş ve net bugünkü değeri (NBD) 1,979 milyon $ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, organik rankine çevriminin bisküvi fırını enerji verimliliğini %44,9'a, ekserji verimini ise %0,5'ten %32,87'ye yükselttiğini göstermektedir (Erdoğan, 2023).

İstanbul'da faaliyet gösteren 410,8 MW net elektrik üretim kapasitesine sahip doğalgaz yakıtlı kombine çevrim güç santralinde detaylı bir enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan hesaplamalara göre, santralin birinci yasa verimi %55.88, ikinci yasa verimi ise %53.06 olarak belirlenmiştir. Analizler, en büyük güç kaybının kondenserde meydana geldiğini ve bunu baca gazı ile kaybedilen gücün izlediğini göstermektedir. Tersinmezlik açısından incelendiğinde ise en yüksek değerin yanma odasında olduğu ve bunu

gaz türbininin takip ettiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, santralin performansını değerlendirmek ve enerji kayıplarını anlamak için önemli bir bilgi sağlamaktadır. (Dikili, 2019).

Bir firma içinde planlanan birleşik ısı-güç çevrim santrali tesisinin detaylı termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. 5 MW'lık bir tesisin kurulması öngörülmüş ve buna yönelik maliyet analizi yapılmıştır. Firmanın mevcut yakıt, sıcak su ve elektrik enerjisi maliyetlerinin toplamı, kojenerasyon sistemi kurulduktan sonraki yakıt ve tesis maliyeti ile karşılaştırılmıştır. Bu değerlendirme, firmanın enerji maliyetlerini optimize etme potansiyelini değerlendirmek açısından önemli bir perspektif sunmaktadır (Güven, Ekmekçi, & Çiçek, 2003).

Son yıllarda enerji ve ekserji analizinin yeni projelerde uygulanması, sistemlerin ilk dizaynı ve ekonomik analizlerinin yapılması açısından önemli veriler sunmaktadır.

Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ve getirilen yorumlarla enerji kayıplarının yeri, büyüklüğü ve nedenleri saptanabilmekte, dolayısıyla sistemlerin verimleri arttırılabilmektedir.

Çimento fabrikalarının bacalarından atılan ısı ile elektrik enerjisi üreten tesisin sanayideki enerji verimliliğine olan etkisi değerlendirilerek çimento endüstrisinde enerji verimliliğini artırmak amacıyla atık ısıdan enerji üretimi konusunda sağlam bir temel oluşturulabileceği belirtilmiştir (Tütüncü & Özgener, 2016).

Başka bir çalışmada kojenerasyon termik santralına bölgesel ısıtma sisteminin nasıl uygulandığı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elektrik enerjisi üretimi, sistemin parçaları ve görevleri, dizayn ve işletme felsefeleri açıklanarak, tesisin kurulumu ve işletilmesi için gerekli mühendislik detayları ele alınmıştır. Ayrıca, tesisin amortisman süresi hesaplamaları da yapılarak ekonomik bir perspektif sunulmuştur (Kolay, 2004).

Isıtma amaçlı kullanılan sıcak su kazanından atılan baca gazlarından faydalanarak çalışan ısı geri kazanım sisteminin verim değeri, gerçekleştirilen deneyler sonucunda yaklaşık %20 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, ısı geri kazanım sistemlerinin etkinliğini değerlendirmek ve enerji verimliliğini artırmak için uygulanabilirliği hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. (Kuvel, 2005).

Ejektörlerin tek başına soğutma uygulamalarında kullanılması durumunda, geleneksel soğutma sistemlerine kıyasla daha düşük verim değerleri elde edilmektedir. Ancak, bu sistemlerin çevresel etkileri az olan çalışma akışkanlarıyla çalışabilme özelliği, onları avantajlı kılan bir faktördür. Bu özellik, çevre dostu çalışma akışkanları kullanılarak ejektör tabanlı soğutma sistemlerinin tercih edilebilirliğini artırabilir ve sürdürülebilir çözümler su-

nabilmektedir (Ersayın, 2020).

Kafkas Üniversitesi'ndeki bölgesel ısıtma sistemindeki kazanlardan çıkan baca gazlarının atık ısı kaybı incelenerek, yapılan yanma analizi sonuçlarına göre bu kaybın yaklaşık %6-8 aralığında olduğunu ortaya çıkmıştır. Bu kaybın yıllık maliyetinin 58.658,79 $ olduğu hesaplanmıştır. İncelenen ikinci yöntemle, konukevi binasının sıcak su ihtiyacını karşılamak, 20 yıllık ekonomik ömrü boyunca toplamda 122.820,83 $ enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu yöntem, enerji tasarrufu açısından diğer alternatiflere göre daha yüksek bir ekonomik getiri sunmaktadır. (Terhan , Özağdaş, & Omar, 2023).

Hermetik kombilerdeki atık ısı enerjisinin değerlendirilmesi ve atık ısıdan faydalanılarak elektrik enerjisi üretimine yönelik bir sistem üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Kalorifer modunda, dış hava sıcaklığının 20 °C ve kalorifer suyu sıcaklığının 35 °C olduğu durumda en düşük güç değeri 57,83 W, en yüksek güç değeri ise dış hava sıcaklığının -20 °C ve kalorifer suyu sıcaklığının 85 °C olduğu durumda 273,6 W olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde, kullanım suyu modunda en düşük güç değeri 31,19 W ve en yüksek güç değeri -20 °C dış hava sıcaklığı ve 65 °C kullanım suyu sıcaklığı durumunda 273,6 W olarak hesaplanmıştır. Bu sistem, hermetik kombilerdeki atık ısıdan elde edilen enerjinin etkili bir şekilde kullanılabildiğini göstermektedir (Variyenli & Göktekin, 2018).

Erbaş çalışmasında kabarcıklı akışkan yataklı bir reaktörde daldırılmış yüzeyden ısı geçişini belirleyen parametrelerin etkisi farklı test koşullarında deneysel olarak incelemiştir. Isı geçişinin enerji üretimindeki önemini vurgulamıştır (Erbaş, 2019).

Tunca ve Akbulut tarafından yapılan çalışmada; döner fırından elde edilen atık ısıdan, buhar türbini sayesinde elektrik üretimine değinilmiştir. Sistem termodinamik açıdan incelenmiştir. Kazan sisteminin kojenerasyon sistemine uygunluğu değerlendirilmiştir (Tunca & Akbulut, 2016).

Küresel ısınma ve hava kirliliğinin en önemli sebeplerinden biri olan endüstriyel atık ısı ve baca gazları atmosfere bırakılarak büyük bir enerji israfına sebep olmaktadır (Koç & Yağlı, 2020).

Sanayide oluşan sıvı ve gaz atıklarının enerji içeriği, genellikle yüksek olmasına rağmen, çoğu zaman atıl durumda bırakılmaktadır. Ancak, geliştirilen sistemlerle bu atıklar tekrar kullanılarak sanayiye ekonomik ve çevresel katkı sağlanabilmektedir. Bu sistemler, sıcak gazlar ve sıvılar şeklinde dışarı atılan atık ısının minimuma indirilmesi ve geri kazanılması amacıyla ısı boruları, eşanjörler ve atık ısı kazanları gibi teknolojileri içermektedir.

Gelişmiş ülkelerde endüstriyel enerjinin önemli bir kısmı, sıcak gazlar ve sıvılar biçiminde atılan atık ısıdan kaynaklanmaktadır. Bu kayıpları azaltmak ve enerjiyi geri kazanmak için uygun yalıtım önlemleri almak önem-

lidir. Ancak, atık ısının değerlendirilmesi için sistemin entegrasyonunda akışkan debisi, sıcaklık, nem ve basınç gibi önemli parametreler göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, işletme şartları ve detayları da hesaba katılarak sistemin etkili bir şekilde çalışması sağlanmalıdır. Bu yaklaşım, atık enerji kaynaklarını etkili bir şekilde kullanarak ekonomik ve çevresel fayda sağlama potansiyelini vurgulamaktadır.

Atık ısı, 120°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bulunduğunda buhar eldesinde, elektrik üretiminde veya yanma işleminde değerlendirilebilir. Aksine, düşük sıcaklıktaki atık ısı genellikle hacim ısıtması için uygundur (Çengel, Boles, & Kanoğlu , Thermodynamics: an engineering approach, 2011).

Atık ısının ekonomik olarak geri kazanılması ısı geri kazanım teknolojileri, atık ısının sıcaklık seviyesi, enerji maliyetleri, işletme sürekliliği ve yasal düzenlemeler gibi çeşitli faktörlere bağlıdır Aynı tesiste atık ısının kullanılacağı alanın ve optimum sıcaklıkta yeterli miktarda atık ısının bulunması önemlidir. Ayrıca, ısı kaynağı ile kullanım yeri arasındaki uzaklık fazla ise atık ısı kullanımını zorlaştırabilir. Unutulmaması gereken bir diğer önemli nokta ise atık ısı geri kazanım sistemleri, kendi iç enerji ihtiyaçları dikkate alınarak tasarlanmalıdır (Çengel, Boles, & Kanoğlu , Thermodynamics: an engineering approach, 2011).

2. ATIK ISI

2.1. Atık Isının Kullanımı

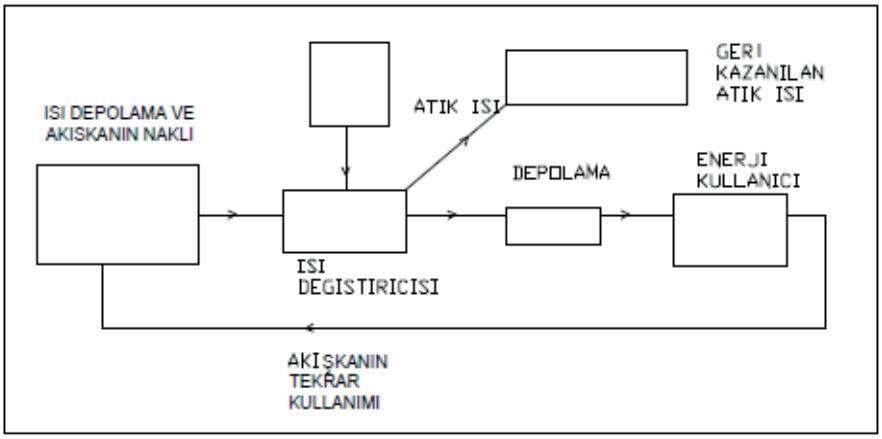
Atık ısı genellikle düşük sıcaklıkta ortaya çıkar ve atık ısıdan enerjinin geri kazanılması ve geri kazanılan bu enerjinin verimli bir şekilde kullanılması için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu proses, genellikle endüstriyel süreçlerden veya diğer enerji üretim yöntemlerinden kaynaklanır. Yanmamış yakıtlar, özel yanma teçhizatında tüketilerek enerjinin tamamen kullanılmasına olanak tanır, bu da kaynakların daha etkili bir şekilde kullanılmasına katkı sağlar.

Isı geri kazanımı uygulamalarında, atık ısının düşük sıcaklıkla karakterize edilmesi yaygındır. Bu durum, özel tasarlanmış ısı değiştiricileri veya sistemlerin kullanılmasını gerektirebilir. Ayrıca, atık ısı ve önerilen uygulamanın sıcaklığına bağlı olarak farklı ısı değiştiricilerinin kullanılması, ısı transferini optimize etmeye yardımcı olabilir.

Enerji geri kazanımı ve kullanımı arasında zaman açısından bir mesafe varsa, enerjinin depolanması ihtiyacı doğar. Bu, enerjinin ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilmesini sağlar ve sürekli bir enerji akışını destekler.

Isı geri kazanım uygulamalarının atık ısı kaynağına fiziksel olarak yakın olması, enerji iletim kayıplarını azaltır ve geri kazanılan enerjiden maksimum verim elde edilmesine katkı sağlar. Bu stratejiler, enerji verimliliğini

artırmak, çevresel etkileri azaltmak ve kaynakların etkili bir şekilde kullanılmasını sağlamak adına önemli adımları temsil eder. Bu tür uygulamalar, sürdürülebilir enerji kullanımının ve üretiminin anahtar bileşenleridir.



Şekil 1. Proseslerde Atık Isı Kullanımı

Atık ısıdan elde edilen proses buharı ve elde edilen buharın elektrik üretiminde kullanılması, teknolojik açıdan önemli bir konudur. Şekil 1'de görüldüğü gibi, atık enerjinin geri kazanılması için hem üst çevrim hem de alt çevrim dikkatli bir şekilde incelenmelidir (Çengel, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, 2000).

2.2. Atık Isıdan Yararlanma Teknikleri

Günümüzde, fosil yakıtların kullanımının artması nedeniyle hava kirliliğini azaltacak yöntemlerin geliştirilmesi büyük bir öneme sahiptir. Enerji maliyetlerinin sürekli artmasıyla birlikte, alternatif ve yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili çalışmalar ve mevcut kaynakların etkin bir şekilde kullanılabilmesi için çözümler üzerinde çalışmalar hız kazanmıştır. Birçok endüstriyel uygulamada, ısı enerjisi farklı formlarda yüksek verimle kullanılmaktadır. Bu noktada, atık ısı geri kazanımında kullanılan ısı değiştirici ve diğer yöntemler önemli bir rol oynamaktadır. 200°C ila 500°C arasındaki sıcaklıklarda enerji geri kazanımı mümkün olabilmektedir.

Araştırmacılar, endüstriyel alanlarda atık enerjinin geri kazanılması için çeşitli yöntemleri incelemişlerdir. Bu yöntemler, çöp yakma fırınları, cam ocakları, çimento fabrikaları gibi alanlarda uygulanabilir. Ekonomizerler, genellikle hissedilir ısıyı geri kazanmak için kullanılırken, atık ısı kazanları özellikle 300°C üzerindeki sıcaklıklarda en etkili şekilde çalışmaktadır (Çengel, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, 2000).

Atık ısıdan faydalanma tekniklerinde önemli etkenler bulunmaktadır.

- **Atık Gazın Temizliği;** Dışarı atılan atık gazın temiz olması, ısı değiş-

tirici yüzeylerinde birikmiş kir ve partiküllerin oluşumunu önler. Kirli yüzeyler ısı transferini engelleyebilir ve sis-tem verimini düşürebilir. Bu nedenle atık gazın mümkün olduğunca temiz olması, ısı değiştiricinin performansını artırır.

- **Çiğ Noktası Sıcaklığı;** Atık gazın sıcaklığı, çiğ noktasının altına düşürülmemelidir. Çiğ noktası, gazın yoğuşma başlayacağı sıcaklığı temsil eder. Yoğuşma, ısı değiştirici yüzeylerinde su birikimine ve buharlaşma sonucu korozyona neden olabilir. Bu durum, sistemde malzeme hasarı ve performans kaybına yol açabilir.

- **Termal Gerilimler;** Isı geri kazanma sistemlerinde kullanılan malzemelerin termal genleşme katsayıları farklı olabilir. Bu durum, sistemde termal gerilmelere ve malzeme yorgunluğuna yol açabilir. Bu nedenle, atık gazın kullanılması sırasında malzemelerin maruz kaldığı sıcaklık değişiklikleri dikkate alınmalı ve malzeme seçimi buna göre yapılmalıdır.

Bu limitlere uyulmaması, sistemde performans kaybına, enerji veriminde düşüşe, malzeme hasarına ve bakım maliyetlerinde artışa neden olabilir. Bu nedenle, ısı geri kazanma sistemlerinin tasarımı, işletilmesi ve bakımı, belirtilen limitlere dikkat edilerek yapılmalıdır.

2.2.1. Atık Isıdan Doğrudan Yaralanma Teknikleri

Atık ısıdan direkt olarak yararlanma yöntemi, herhangi bir ısı değiştirgeci sistemine ihtiyaç duymadan atık ısıyı doğrudan kullanma anlamına gelir. Bu tür sistemlere örnek olarak, atık baca gazlarının doğrudan yanma havası ile karıştırılarak, yanma havasının ön ısıtılmasında kullanılması veya baca gazlarından doğrudan proses hammaddesinin kurutulmasında faydalanılması verilebilir

Atık ısıdan direkt yararlanma teknikleri, diğer atık ısı sistemlerine göre hem daha ekonomik hem de uygulaması daha kolay olabilir. Ancak, bu sistemlerin yaygın bir şekilde kullanılmasını sınırlayan önemli bazı sakıncalar bulunmaktadır. Örneğin, baca gazları ile doğrudan proses hammaddesinin kurutulması durumunda kükürt ve nem içerir. Baca gazlarının sıcaklığı kurutma işlemi sırasında çiğ noktası sıcaklığına düşerse, oluşacak asit ürün kalitesini bozabilir ve yüzeylerde korozyon görülmesine neden olabilir.

Bu yöntem, üretimi etkilemediği sürece, özellikle sadece korozyon sorunlarının söz konusu olduğu durumlarda diğer sistemlere göre ekonomik olarak tercih edilebilir.

2.2.2. Atık Isıdan Dolaylı Yararlanma Teknikleri

Atık ısının doğrudan kullanımının mümkün olmadığı durumlarda, enerji tasarrufu sağlamak ve çeşitli proseslerde kullanabilmek için çeşitli ısı değiştirici sistemleri devreye alınabilir. Bu sistemler arasında, atık ısının ka-

zan besleme suyunu veya yanma havasını ısıtarak sıcak su veya sıcak hava elde edilmesi, atık ısı kazanlarının kullanımıyla buhar üretimi, mevcut bir tesisin herhangi bir noktasında ısıl işleme girecek hammadde veya yarı mamul maddelerin ısıtılması ve atık ısı tesislerinin ek enerji kaynakları ile takviye edilerek yüksek basınçtaki buharın elde edilmesi gibi çeşitli uygulamalar yer almaktadır. Bu yöntemler, atık ısının verimli bir şekilde değerlendirilmesini sağlayarak sadece enerji maliyetlerini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da olumlu katkılarda bulunur.

3. BUHAR TÜRBİNİ

Buhar türbini sistemlerinde endüstride, proses sonucu ortaya çıkan atık ısı buhar kazanlarında toplanır. Bu aşamada kazandaki su, yüksek sıcaklıkta ve yüksek basınçta buhar elde etmek için ısınır. Oluşan yüksek basınçlı buhar, buhar türbinine yönlendirilerek mekanik enerji elde edilir. Sistem sayesinde elde edilen mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Buhar türbini Şekil 2.'de görülmektedir.

Buhar türbininde görevini tamamlayan kızgın buhar, kondensere yönlendirilir ve tekrar su haline dönüştürülerek besleme suyu pompası aracılığıyla kazana geri gönderilir. Bu döngü, termik yolla enerji elde etmeyi sağlar.

Şekil 2. Buhar Türbini Ekipmanları

4. KOJENERASYON SİSTEMİ

Kojenerasyon sistemi, açığa çıkan atık ısı enerjisinden maksimum fayda sağlamak için elektrik üretiminde kullanılır. Kojenerasyon sistemleri, elektrik enerjisinin yanı sıra eş zamanlı olarak yararlanılabilir ısının üretildiği

sistemlerdir.

Kojenerasyon sistemleri sanayideki üretim tesisleri ile entegre çalışarak elektrik ihtiyacının karşılandığı tesislerdir. Bu santraller, toplam verimi artırarak tek bir santralden iki farklı enerji türünün verimli olarak üretilmesini sağlar.

Türbin prensibine dayanan sistemlerde gaz türbini aracılığıyla jeneratör çalıştırılarak elektrik enerjisi üretilir. Bu süreçte aynı anda, egzoz gazından atık ısı kazanı vasıtasıyla ısı enerjisi geri kazanılır. Bu kojenerasyon yöntemleri, enerji verimliliğini artırmak ve atık ısıyı değerlendirmek amacıyla kullanılan etkili ve sürdürülebilir bir enerji üretim stratejisini temsil eder.

4.1. Kojenerasyon Sistemlerinin Endüstriyel Faydaları

Kojenerasyon sistemleri, endüstriyel uygulamalarda bir dizi fayda sağlayabilir. İşte kojenerasyon sistemlerinin endüstriyel faydalarından bazıları:

- Kojenerasyon, aynı anda elektrik ve ısı üretimini içerdiği için enerji verimliliğini artırır. Bir tesisin ihtiyaç duyduğu her iki enerji türünü aynı anda sağlayarak enerji kaynaklarının daha etkili kullanılmasını sağlar.
- Kojenerasyon sistemleri, enerji maliyetlerini azaltabilir. Çünkü iki farklı enerji türünü, tek bir sistemde üretebildiği için, yakıt maliyetlerini düşürerek tasarruf sağlar.
- Kojenerasyon sistemi, bir tesisin ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılan enerjiyi daha verimli bir şekilde kullanmasını sağlar. Bu, enerji kaynaklarının toplam verimini artırır.
- Kojenerasyon sistemleri, enerji üretiminde atık ısının geri kazanılmasını içerir. Bu, çevreye yayılan atık ısının azaltılmasına ve enerji üretim sürecinin çevresel etkilerinin azaltılmasına katkıda bulunur.
- Kojenerasyon, enerji üretimi ve kullanımında sürdürülebilir bir yaklaşımı destekler. Enerjiyi daha etkili kullanarak, doğal kaynakların korunmasına ve enerjinin sürdürülebilirliğine katkıda bulunur.
- Kojenerasyon sistemleri, enerji üretimini kontrol etme ve optimize etme yetenekleri sayesinde kesintisiz enerji temini sağlar. Bu, endüstriyel süreçlerin ve üretimin sürekli olarak devam etmesine olanak tanır.
- Enerji verimliliği ve maliyet tasarrufu sağlayan kojenerasyon sistemleri, bir işletmeye rekabet avantajı sağlayabilir. Daha düşük enerji maliyetleri, pazar rekabetinde güçlü bir pozisyon elde etmeye yardımcı olabilir.

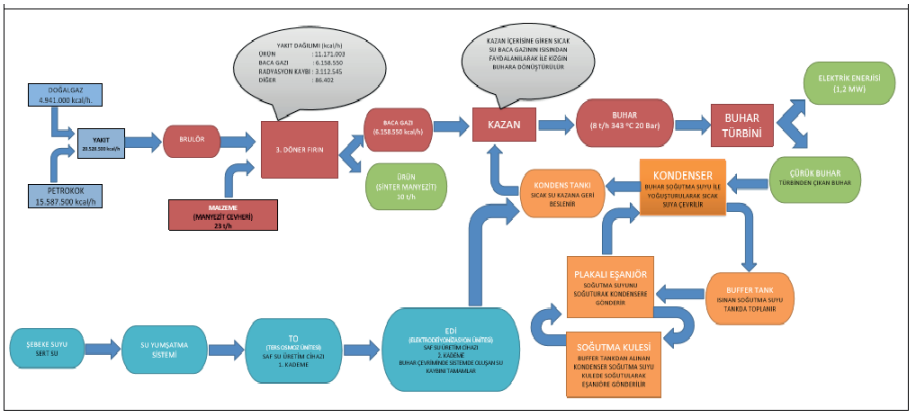
5. PROSES UYGULAMA ANALİZİ

Sinter manyezit üretiminin yapıldığı Fabrika'da döner fırınlar kullanılmaktadır. Sinter manyezit üretiminin gerçekleştirildiği 3 adet döner fırın

bulunmaktadır. Şekil 2.'de döner fırın ve buhar türbini akış şeması görülmektedir. 2013 yılında üretime giren 3. Döner fırın sistemi Şekil 4.'de görülen fırın ağzındaki ateşlemede, doğalgaz ve petrokok birlikte kullanılmaktadır. Ateşlenmiş fırın içerisinde bulunan gazlar Şekil 5'te görülen bağlantı ile atık ısı kazanına yönlendirilir. Buhar kazanlarında ısısı alınan gazlar, tozsuzlaştırma filtresinden geçerek bacadan atmosfere atılır.

Döner fırın kazanında üretilen buharın uygun bir buhar türbini ile elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve maliyetlerde düşüş sağlanması düşünülmüştür. Bu doğrultuda 1,2 MW kapasiteli kojenerasyon tesisi kurulmuştur.

Tamamen çevreci bir tesis olarak kurulan kojenerasyon tesisinde üretilen buhar ile elektrik enerjisi üretilmekte, çürük buharı yoğuşturularak sıcak suya çevrilmekte ve bu su kazana geri beslenerek su tüketimi düşürülmüş ve tamamen kapalı çevrim oluşturulmuştur. Sistemde atmosfere açılan bir baca bulunmamaktadır.



Şekil 3. Döner Fırın ve Buhar Türbini Akış Şeması

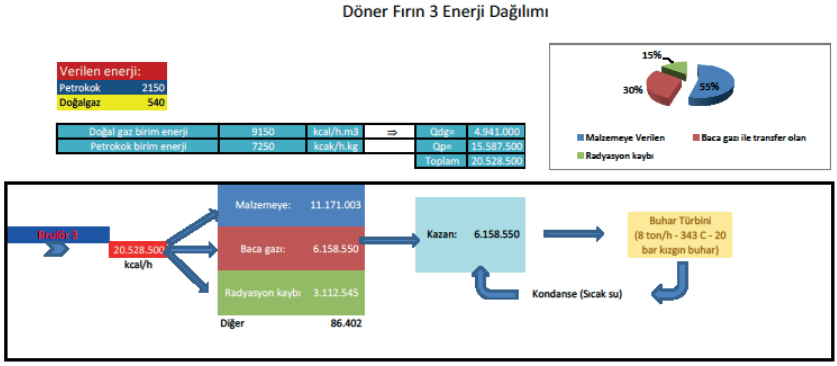
Şekil 4.'te görülen kojenerasyon tesisinden elde edilecek elektrik enerji verimi kazandaki buhar üretimi ile paraleldir. Döner fırın kazanında elde edilen buhar debisi arttıkça verimlilik artmaktadır.

Şekil 4. Döner Fırın Ağzı (Ateşleme Merkezi)

Şekil 5. Döner Fırın Atık Isı Kazanı Bağlantısı

5.1. Döner Fırın Sinter Üretim Prosesi

Sistem endüstriyel süreçte kullanılan bir enerji üretim sisteminin temel özelliklerini içermektedir. Döner Fırın enerji dağılımı Şekil 6.'da görülmektedir.



Şekil 6. Döner Fırın Enerji Dağılımı

- **Fırın Özellikleri:**

•Çapı 3 m, uzunluğu 90 m olan döner fırın.

• Malzeme girişi: 22 t/h, malzeme çıkışı: 10 t/h.

• Dönme devri: 2 d/d.

• Çalışma sıcaklığı: 2000 °C.

- **Yakıt ve Ateşleme:**

• Manyezit cevheri, fırın sonundan beslenmektedir.

• Fırın, doğalgaz ve petrokok kullanılarak ateşlenir.

• Petrokok, petrokok dozajlama tesisinden belirlenmiş bir miktarla fırın ağzındaki brülöre gönderilmektedir.

- **Atık Isı Geri Kazanımı:**

• Fırın sonucu oluşan yüksek sıcaklıktaki yanma gazı, atık ısı kazanına yönlendirilmektedir.

• Kazandaki sıcak su, baca gazının ısısından faydalanılarak kızgın buhara dönüştürülür.

- **Elektrik Üretimi ve Kojenerasyon:**

• Kızgın buhar, ideal koşullarda 8 t/h, 343 °C ve 20 bar ile buhar türbinine gönderilmektedir.

• Türbinde buhar ile elektrik enerjisi üretilmektedir.

• Türbinden çıkan çürük buhar, kondensere gönderilerek tekrar sıcak suya çevrilmektedir.

• Sıcak su, kondens tankına gönderilerek atık ısı kazanına geri besleme yapılmaktadır.

- **Baca Gazı Temizleme ve Kontrol:**

• Yanma gazları, filtrede tozlarından arındırılmaktadır.

• Baca gazı içeriği çevre standartlarına uygun olarak çevre bakanlığı tarafından online kontrol edilmektedir.

- **Soğutma Sistemi:**

• Türbinden çıkan çürük buharın kondenserde soğutulması için su kullanılmaktadır.

• Soğutma suyu, plakalı eşanjör ve soğutma kulesinde döngü oluşturarak tekrar kullanılır.

- **Su Yumuşatma ve Su Yönetimi:**

• Buhar çevriminde oluşan su kaybı, şebekeden alınan sert suyun yumuşatma sisteminde yumuşatılarak tamamlanır.

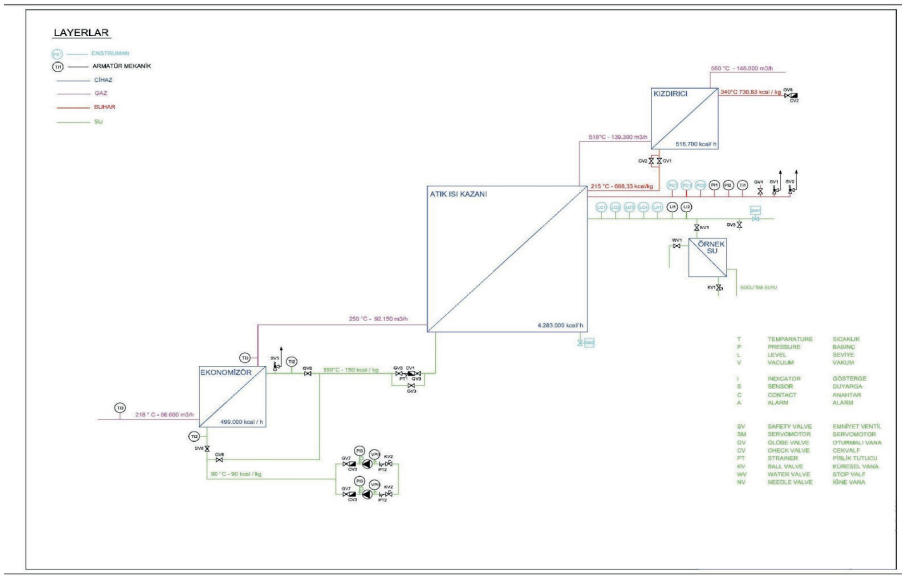
• Bu sistemde su, sürdürülebilir bir döngüde kullanılarak verimliliği artar.

Bu kompleks sistemde atık ısı geri kazanımı, kojenerasyon, baca gazı temizleme, su yönetimi gibi stratejiler kullanılarak enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik amaçlanmaktadır.

5.2. Atık Isı Kazanı Çalışma Prensibi

Döner fırından ortaya çıkan baca gazının atık ısı kazanındaki enerji giriş çıkış değerlerini bulunduğu şematik gösterim Şekil 7.'de görülmektedir. Baca gazı, 550°C sıcaklıkta ve 145,000 m^3/h debide kızdırıcıya giriş yapar. Kızdırıcıdan çıkan bu baca gazı, sıcaklık olarak 518°C ve debi olarak 139,300 m^3/h şeklinde, atık ısı kazanına yönlendirilir. Aynı zamanda ekonomizöre giren su, 90°C sıcaklıkta ve 90 kcal/kg entalpi ile atık ısı kazanından çıkan baca gazı (25°C sıcaklıkta ve 92,150 m^3/h debide) ile karşılaşarak ekonomizörden 150°C sıcaklıkta ve 150 kcal/kg entalpi ile çıkar ve tekrar atık ısı kazanına yönlendirilir. Ekonomizörden çıkan baca gazı, 218°C sıcaklıkta ve 86,600 m^3/h debide, filtreleme işleminden geçirildikten sonra Döner fırın bacasından atmosfere atılır.

Atık ısı kazanına 518°C sıcaklıkta giren baca gazı, ekonomi-zörden gelen 150°C sıcaklıktaki su ile etkileşime girerek ka-zandan 215°C sıcaklıkta ve 668,33 kcal/kg entalpi ile buhar olarak çıkar. Bu buhar, 215°C sıcaklıkla kızdırıcıya yönlendirilir ve içerisindeki Döner fırından gelen 550°C'lik baca gazı ile etkileşime girer. Bu süreç sonucunda buharın sıcaklığı artar ve kızdırıcıdan 340°C sıcaklıkta ve 730,83 kcal/kg entalpi ile çıkan buhar, kojenerasyon ünitesine elektrik üretimi için gönderilir.



Şekil 7. Atık Isı Kazanı Enerji Giriş ve Çıkış Değerleri

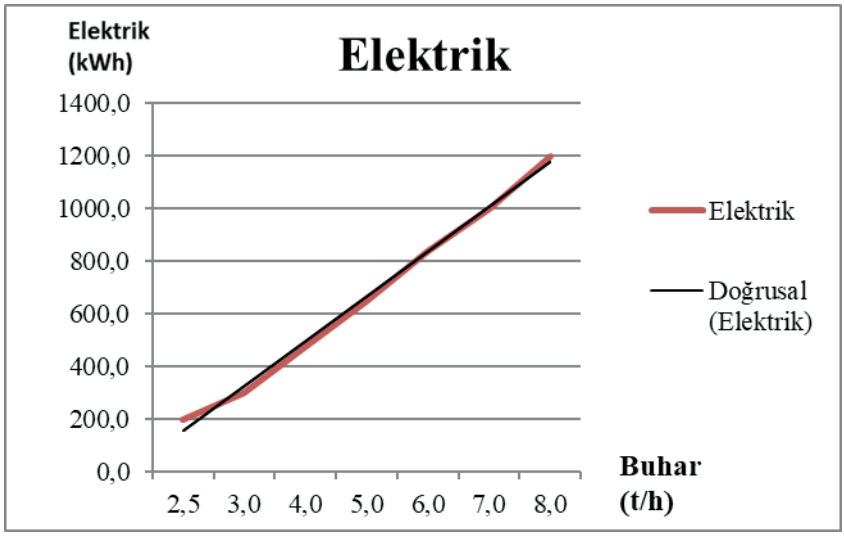
6. KOJENERASYON ÜNİTESİ

Optimal koşullarda, kazandan çıkan buhar, 8 ton/saat miktarında, 343 °C sıcaklık ve 20 bar basınç ile Şekil 8.'de görülen buhar türbinine yönlendirilir. Bu türbini vasıtasıyla buhar enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülerek üretim süreci tamamlanır.

Şekil 8. Kojenerasyon Tesisi

Buhar türbini kurucu firmasının yaptığı hesaplamalarda buharın 8 ton/

saat debi, 343 °C sıcaklık ve 20 bar basınç değerleri karşılığında elde edilecek elektrik üretim eğrisi Şekil 9.'da verilmiştir. Eğim hesabı göz önünde bulundurularak gerçek debi miktarlarına göre taahhüt edilen fiili elektrik üretimi hesaplamaları yapılmıştır (bkz Şekil 11).



Şekil 9. Türbin Kurucu Firmasının Elde Buhar Debi Miktarına Bağlı Taahhüt Ettiği Elektrik Üretimi

7. TERMODİNAMİĞİN BİRİNCİ VE İKİNCİ KANUN ANALİZİ VE EKSERJİ KAVRAMI

Termodinamiğin birinci kanunu ile ilgili olan ve fizikte temel bir prensip olan kütlenin ve enerjinin korunumu ilkesi, izole bir sistemdeki kütlenin ve enerjinin toplamının sabit olduğunu belirtir. Kütlenin korunumu prensibi, bir sistem içindeki kimyasal reaksiyonlar veya diğer fiziksel süreçler sırasında bir bileşenin kütlesinin başka bir bileşene dönüşebileceğini, ancak toplam kütlenin değişmeyeceğini ifade eder. Enerjinin korunumu ilkesi ise enerjinin bir formunun diğer bir forma dönüşebileceğini, ancak toplam enerjinin izole bir sistemde sabit kalacağını vurgular. Bu prensipler, birbirleriyle iç içe geçmiştir; örneğin, bir kimyasal reaksiyon sırasında madde bir formdan diğerine dönüşebilirken, bu süreç sırasında ortaya çıkan enerji de bir başka formda ortaya çıkabilir. Kütlenin ve enerjinin korunumu prensipleri, fiziksel olayların temelini oluşturarak enerji dönüşümlerini anlamamıza ve bilimsel çalışmaların yapı taşını oluşturmamıza olanak tanır.

- Kütlenin Korunumu: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3$ (1)
- Enerjinin Korunumu: $\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 - \acute{W}_{pnp}$ (2)

$\acute{W}_p = (\dot{m}s(h_2 - h_1))/ \eta_p$ (3)

Ekserji terimi termodinamikte bir kavramdır ve enerji analizi ile ilgilidir. Ekserji, bir sistemin iş yapma kapasitesini veya enerji kapasitesini ölçen bir termodinamik bir ölçüdür. Sistemin iç enerjisi, sıcaklık ve basınç gibi termodinamik özelliklerine bağlı olarak iki bileşenden oluşur. Bunlar entalpi ve ekserjidir.

Entalpi, bir sistemdeki iç enerjinin ısı iletimi ve hacim değişiklikleri ile ilgili kısmını temsil eder. Ekserji ise bir sistemdeki enerjinin iş yapabilme kapasitesini temsil eder. Ekserji kaybı, sistemdeki enerjinin iş yapma yeteneğini azaltan faktörleri ifade eder.

Ekserji, enerji dönüşümlerini ve prosesleri analiz etmek için kullanılır. Termodinamik sistemlerin verimliliğini değerlendirmek, enerji kayıplarını anlamak ve enerji transferlerini optimize etmek için önemli bir araçtır.

Buharlı güç çevrimindeki her bir elemanın tersinmezliklerini hesaplamak için, giren ve çıkan ekserji miktarlarını belirlemek önemlidir. Ekserji, bir sistemdeki enerjinin iş yapma kapasitesini ölçen bir termodinamik kavramdır. Her bir elemandaki ekserji değişimleri, sistemin toplam ekserji değişimini belirlemeye yardımcı olur.

Her bir eleman için ekserji transferini hesaplamak, sistemin toplam ekserji değişimini değerlendirmek ve çevrimin verimini optimize etmek için önemlidir. Bu hesaplamalar, enerji sistemlerinin tasarımı ve analizi sırasında kullanılır.

$$\dot{W}= \sum \dot{E}_Q + \sum_g \dot{m}\varepsilon - \sum_ç \dot{m}\varepsilon - I \quad (4)$$

$$\dot{E}_Q=Q\,((T-T_0)/T) \quad (5)$$

$$\dot{E}_W=\dot{W} \quad (6)$$

- Ekserji denkliği;

$$\dot{E}_Q - \dot{E}_W = \sum_ç \dot{m}\varepsilon - \sum_g \dot{m}\varepsilon + T_0 S_{üretim} \quad (7)$$

Verilen bilgilerde $\dot{E}_Q$ ve $\dot{E}_W$ birim zamandaki ısı transferi ve mekanik enerjiye karşılık gelen ekserji değerlerini temsil eder. ε, özgül ekserjiyi ifade eder ve T_0 çevre sıcaklığını temsil eder. ė alt indeksi çıkışı, g alt indeksi girişi gösterir.

Her bir bileşenin tersinmezlik değerleri belirlendikten sonra, sistemdeki toplam tersinmezlik (I);

$$I=T_0 S_{üretim} \quad (8)$$

Bu denklemde I, birim zamanda kaybolan ekserjiyi veya tersinmezliği ifade eder. Bu, sistemin çevresine verdiği toplam ekserji kaybını belirtir. Ekserji genellikle termodinamiksel ve kimyasal ekserjilerin toplamı olarak değerlendirilir. Bu hesaplamalar, sistemin enerji dengesi ve entropi üretimi gibi

termodinamik özelliklerini anlamak ve optimize etmek için kullanılır.

8. ÇALIŞMADA YAPILAN KABULLER

Buharlı güç çevriminin çalışması sırasında belirtilen kabuller çerçevesinde, sistemde bazı önemli verecekler ve varsayımlar bulunmaktadır. İlk olarak, pompa ve boru hatlarındaki basınç kayıpları ihmal edilmiştir, bu da sistemin basit bir şekilde modellenmesine olanak tanır. İkinci olarak, pompadaki sıkıştırma adyabatik olarak gerçekleşir, yani pompanın işlevi esnasında dış ortam ile enerji transferi olmaz.

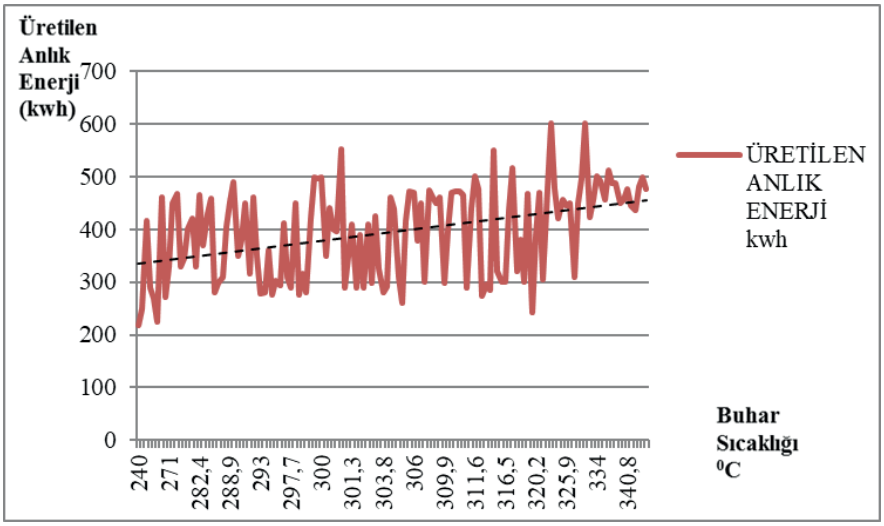
Buhar güç çevriminde dolaşan güç akışkanının debisinin sabit olduğu kabul edilmiştir, bu da sistemin bu açıdan stabil bir yapıya sahip olduğunu gösterir. Ayrıca, sistem elemanlarından dış ortama ısı transferi olmadığı kabul edilmiştir, bu da çevrimin izole bir sistem olarak modellendiği anlamına gelir.

Kazana yoğuşturucudan çıkan su haricinde başka bir kaynaktan su verilmemesi, dış ortamdan kazana ısı transferi olmaması ve ısının tamamının yakılan dönel fırından alınması gibi kabuller, sistemde su döngüsü ve ısı transferi üzerindeki kontrolü vurgular. Türbinden dış ortama ısı transferi olmaması ve türbindeki basınç kayıplarının ihmal edilmesi de, enerji dönüşüm süreçlerini basitleştirir.

Son olarak, kazan ve yoğuşturucuda iş etkileşimi olmadığı kabul edilmiştir. Bu, kazan ve yoğuşturucunun sadece enerji transferi sağladığı ve iş yapmadığı bir sistemi temsil eder. Bu değerler ve kabuller, birinci ve ikinci kanun analizlerinin bu spesifik koşullar altında yapılmasını mümkün kılar.

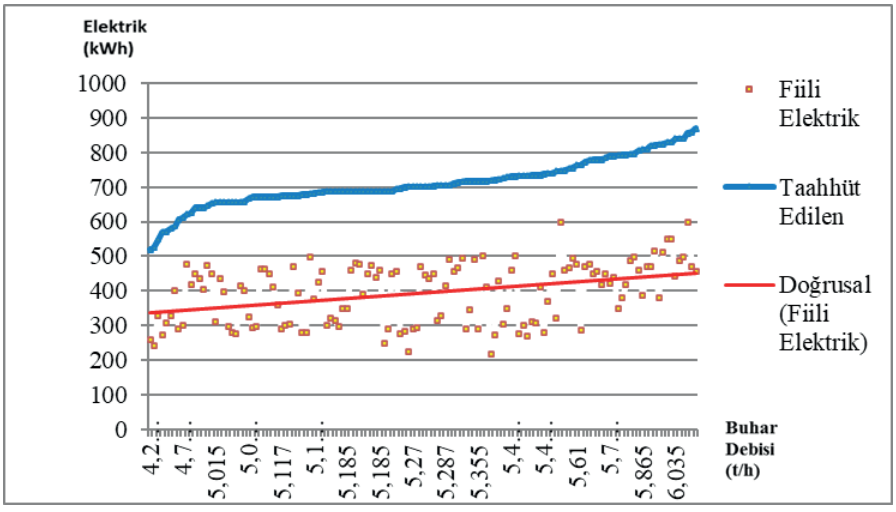
9. ÇALIŞMANIN SONUCU VE TARTIŞMALAR

Bu çalışma, kojenerasyon ünitesinin beklenen verimin altında çalıştığını ve istenilen enerji seviyelerine ulaşmak için kazandan gelen kızgın buharın debi ve sıcaklık değerlerinin belirli parametrelerde olması gerektiğini göstermiştir. Debi miktarına göre üretilen anlık enerji grafiği Şekil 10.'da görülmektedir. Şekil 9.'da görülen aynı debi miktarlarında taahhüt edilen elektrik üretimi ile üretilen anlık enerji üretimi birbiri ile örtüşmemektedir. Atık ısı kazanının yapısı, bu değerlere ulaşmayı engellemektedir. Döner fırından gelen atık ısıda bulunan manyezit madeni nedeniyle içerisinde toz partikülleri bulunmaktadır. Bu toz partikülleri, kazan içindeki boru demetlerinde ısı iletimini olumsuz etkilemektedir. Bu sorunun çözümü için döner fırın çıkışında, kazandan önce, tozsuzlaştırmaya yardımcı olacak bir siklon grubunun kullanılması önerilmektedir.



Şekil 10. Kojenerasyon Tesisinde Üretilen Anlık Enerji

Döner fırınlarda malzeme değişikliklerine bağlı olarak sıcaklık farkları, doğalgaz ve petrokok oranlarında değişimlere neden olmaktadır. Bu durum, farklı malzemeler ile yapılan sinter üretimi atık ısı kazanına giden baca gazındaki kalori değerlerinde dalgalanmalara yol açmaktadır. Şekil 11.'de görülen fiili elektrik üretimindeki bu değişkenlik, sistem sabit değerlerde çalıştığında verimin artacağı, ancak işletme yapısı ve proseslerinden kaynaklı olarak bu durumun gerçekleşmesinin mümkün görülmediği tespit edilmiştir.



Şekil 11. Debi Değerlerine Göre Taahhüt Edilen ve Fiili Elektrik Üretimi

Elde edilen veriler sonucunda sistemdeki en büyük tersinmezlik değerinin kazanda olduğu görülmektedir. Bu durum, atık ısı kazanının yapısı ve çalışma şartları açısından detaylı bir araştırma ve çalışma yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKÇA

Çengel, Y. (2000). *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik.* Literatür.

Çengel, Y., Boles, M., & Kanoğlu , M. (2011). *Thermodynamics: an engineering approach.* MCGraw-hill 5.

Dikili, K. (2019). *Atık Isı Kazanlı Gaz-Buhar Çevrimli Güç Santralinin Ekserji Analizi*. Zonguldak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Erbaş, O. (2019). *Kabarcıklı Akışkan Yataklı Bir Reaktörde*. Savunma Bilimleri Dergisi Cilt 18.

Erdoğan, M. (2023). *Endüstriyel Bisküvi Fırınının Termodinamik, Maliyet Analizi Ve Atık Isı Geri Kazanımı*. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Ersayın, E. (2020). *Atık Isı Geri Kazanımında Yeni Tekniklerin Modellenmesi*. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Güven, H., Ekmekçi, İ., & Çiçek, A. (2003). *Bir Sanayi Tesisinde Kojenerasyon Ve Atık Isı Geri Kazanımının İncelenmesi*. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.

Karanfil, G., Rüşen, S. E., Poyraz, Ş., & Güler, M. (2020). *Atık Isı Geri Kazanım Sistemleri Ve Isıl Verim Parametrelerinin Deneysel İncelenmesi*. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi.

Koç, Y., & Yağlı, H. (2020). *Isı-Güç Kombine Sistemlerinde Kullanılan Kalina*. Politeknik Dergisi.

Kolay, E. (2004). *Korejenerasyon Sistemlerinde Atık Isı Kullanımı Ve Bir Uygulama Örneği*. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kuvel, A. (2005). *Baca Gazlarından Atık Isı Geri Kazanımının Deneysel Olarak İncelenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

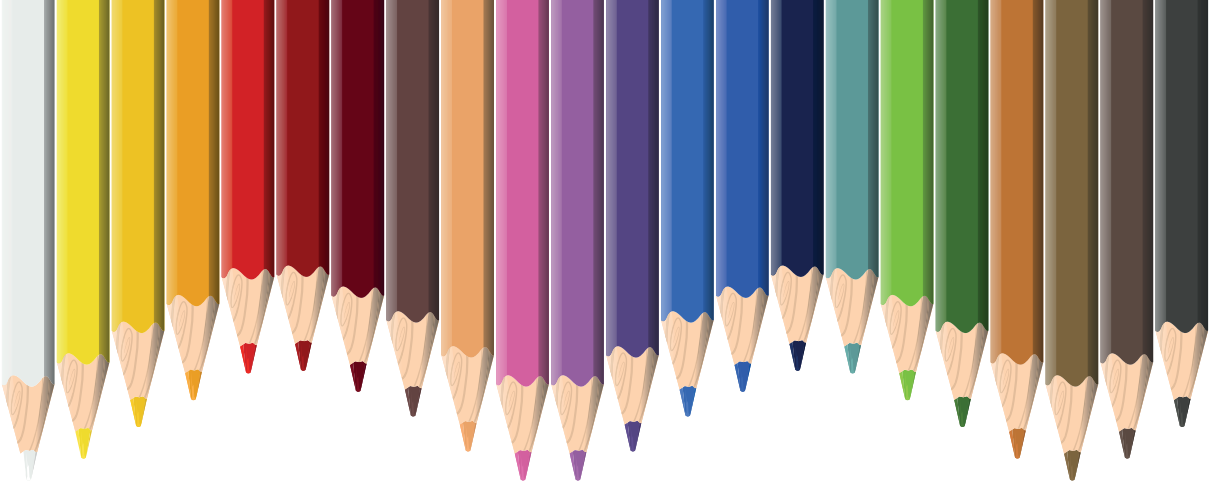
Memiş, O. (2019). *Çimento Sektöründe Atık Isı Geri Kazanım (WHR) Sisteminin Ekserji ve Enerji Analizi*. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Enerji Mühendisliği İşletim ve Teknolojileri Anabilim Dalı.

Terhan , M., Özağdaş, E., & Omar, M. (2023). *Ekonomizer, Yoğuşmalı Ekonomizer Ve Hava Ön Isıtıcı Tasarımları İle Atık Isı Geri Kazanımının Enerji Ve Ekonomik Değerlendirilmesi*. Gazi Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dergisi.

Tunca, S., & Akbulut, A. (2016). *Use of Waste Heat of Rotary Kiln For Electricity Production During Sinter Magnesite Manufacturing*. 8. IEESE (8. International Ege Energy Symposium and Exhibition).

Tütüncü, G., & Özgener, Ö. (2016). *Çimento Sektöründe Atık Isı Geri Kazanım (WHR) Sisteminin Termodinamik İncelenmesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi.

Variyenli, H., & Göktekin, K. (2018). *Hermetik Gaz Yakıcı Cihazlardaki Atık Isı Enerjisinin Elektrik Enerjisine Dönüştürülmesi*. Politeknik Dergisi.



Bölüm 26

AKILLI ŞEHİRLER VE ÇOK YÖNLÜ KARAR VERME TEKNİKLERİ

Muhammet Annagurdov[1], Serpil Aydın[2]

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Telekomünikasyon Mühendisliği, ORCID:
2 Dr.Öğr.Üyesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstatistik Bölümü, ORCID: 0000-0001-6985-6120

1. GİRİŞ

Günümüzde nüfus artışı ve teknolojinin gelişmesiyle, kentlerde çıkan sorunların giderilmesi için son zamanlarda sıkça dile getirilen akıllı şehirler projeleri gündeme getirilmektedir. Akıllı şehir, çevre dostu fiziksel, dijital ve beşeri sistemler aracılığıyla insanların yaşam kalitesini artıran ve yaşamı sürdüren modern teknolojiyle desteklenen modern, rekabetçi, işlevsel ve sürdürülebilir bir gelecek sunan bir şehirdir. Akıllı şehirlerin geliştirilmesi, şehir planlamacılarına ve karar vericilere, şehirlerin zekasını değerlendirerek daha akıllı hale gelme açısından şehirler için gelecekteki yönleri önermede yardımcı olacak uygun ve kapsamlı bir değerlendirme çerçevesi gerektirmektedir. Dolayısıyla, bu bölümde iki temel amaç incelenmektedir: akıllı şehir kavramı incelenmekte ve hem öznel hem de nesnel kriterleri göz önünde bulundurarak çok yönlü karar verme yöntemini kullanarak akıllı şehir değerlendirmesi yapılmaktadır.

2008 yılında dünya nüfusunun %50'den fazlası kentsel alanlarda yaşıyordu. 2050 yılına kadar bu oranın %70'e çıkması beklenmektedir (Albino, Berardi ve Dangelico, 2015). Kentleşmenin küresel ölçekte hem olumsuz hem de olumlu etkileri olmuştur. Olumlu tarafı, ekonomik ve kültürel seviyeleri geliştirmiş ve yeni iş olanakları yaratmış olmalarıdır. Öte yandan, şehirlerin dünyadaki enerjinin yüzde 60 ila 80'ini tükettiği ve muazzam sera gazı emisyonlarına yol açtığı bilinmektedir (Albino vd., 2015). Trafik sıkışıklığı, ozon tabakasının incelmesi, artan karbondioksit emisyonları, aşırı kalabalık okullar, açık alan kaybı, atık bertarafı ve insanların refahı üzerinde olumsuz etkiye sahip kamu hizmetlerinin artan maliyetleri de kentleşmenin sonuçlarıdır. (Cocchia, 2014). Doksanlı yıllarda bu tür sorunlara ve artan enerji ve doğal kaynaklara olan talep karşısında akıllı büyüme ve akıllı şehir kavramları ortaya çıkmıştır (Cocchia, 2014). Birçok bilim adamı, boyutlarına açıklık getirmek ve akıllı şehitin tam olarak ne olduğunu açıklamak için farklı tanımlar önermeye çalışmıştır. Bununla birlikte, akıllı şehir kavramının evrensel bir tanımı henüz yapılmamıştır.

2. AKILLI ŞEHİRLER

Akıllı bir şehrin temel amacı, akıllı teknolojileri ve veri analizini kullanarak şehir işlevlerini optimize etmek ve ekonomik büyümeyi teşvik

ederken aynı zamanda vatandaşlar için yaşam kalitesini iyileştirmektir. Aynı zamanda ne kadar teknolojinin mevcut olduğundan ziyade teknoloji kullanımının bir fonksiyonudur.

Bir şehrin akıllılığı, aşağıdakiler de dahil olmak üzere bazı özellikler tarafından belirlenir

- Teknoloji altyapısı.
- Çevresel çabalar.
- Verimli ve yüksek işlevli toplu taşıma.
- Güvenli ve ilerici şehir planları.
- Mevcut kaynakları kullanarak şehirde yaşayabilen ve çalışabilen insanlar.

Akıllı bir şehrin başarısı, kamu ve özel sektör arasındaki ilişkiye bağlıdır, çünkü veri odaklı bir ortam yaratma ve sürdürme çalışmalarının çoğu yerel yönetimin görev alanı dışında kalmaktadır. Örneğin, akıllı CCTV için birden fazla işletmeden girdi ve teknoloji gerekebilir.

Akıllı bir şehir tarafından kullanılan teknolojiye ek olarak, sorunları ele almak ve iyileştirmeleri belirlemek için akıllı şehir sistemleri tarafından sağlanan bilgileri değerlendirmek üzere veri analistlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde, her biri akıllı bir şehir için farklı bir boyut öneren çeşitli çerçeveler ve kılavuzlar önerilmiştir. Akıllı Ekonomi, Akıllı Vatandaşlar, Akıllı Yönetişim, Akıllı Hareketlilik, Akıllı Çevre ve Akıllı Yaşam.

2.1. Akıllı Şehir Teknolojileri

Akıllı şehirler, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve çeşitli yazılımlar, kullanıcı arayüzleri ve iletişim ağlarını kullanarak halka bağlantılı çözümler sunar. Bunlar arasında IoT en önemlisidir. IoT, birbirleriyle iletişim kuran ve veri alışverişinde bulunan bağlı cihazlardan oluşan bir ağdır. Bu cihazlar araçlardan, ev aletlerine ve yol sensörlerine kadar çeşitlilik gösterebilir. Bu cihazlardan toplanan veriler, hem kamu hem de özel sektörün verimliliğini artırmak, ekonomik faydalar sağlamak ve vatandaşların yaşamlarını iyileştirmek için bulutta veya sunucularda saklanır.

Şekil-1: Akıllı şehir teknoloji kullanımı

Çoğu IoT cihazı, iletişim ağı üzerinden yalnızca en ilgili ve gerekli verilerin iletilmesini sağlamak için uç bilişim kullanmaktadır. Şehrin veri platformunun IoT ağına yetkisiz erişimi önlemek ve akıllı şehir ağından veri iletimini korumak, izlemek ve kontrol etmek için bir güvenlik sistemi de uygulanmaktadır:

- Uygulama Programlama Arayüzleri (API's)
- Yapay Zeka (AI)
- Bulut Bilişim Hizmetleri - (Cloud Computing Services)
- Gösterge Tabloları - (Dashboards)
- Makine Öğrenimi - (Machine Learning)
- Makineler arası iletişim
- Mesh Ağları - (Mesh Networks)

2.2. Akıllı Şehir Uygulamaları

Bağlı IoT cihazları ve diğer teknolojilerden oluşan bir ağ aracılığıyla akıllı şehirler, yaşam kalitesini artırmak ve ekonomik büyümeyi sağlamak için dört adımı takip eder. Bu adımlar aşağıdaki gibidir:

- Topla - Akıllı sensörler gerçek zamanlı olarak veri toplar.

- Analiz Et - Veriler, kentin hizmetlerinin ve operasyonlarının işleyişi hakkında içgörü kazanmak için analiz edilir.
- İletişim - Veri analizinin sonuçları karar vericilere iletilir.
- Eylem - Operasyonları, varlık yönetimini ve kent sakinlerinin yaşam kalitesini iyileştirmek için eylemler gerçekleştirilir.

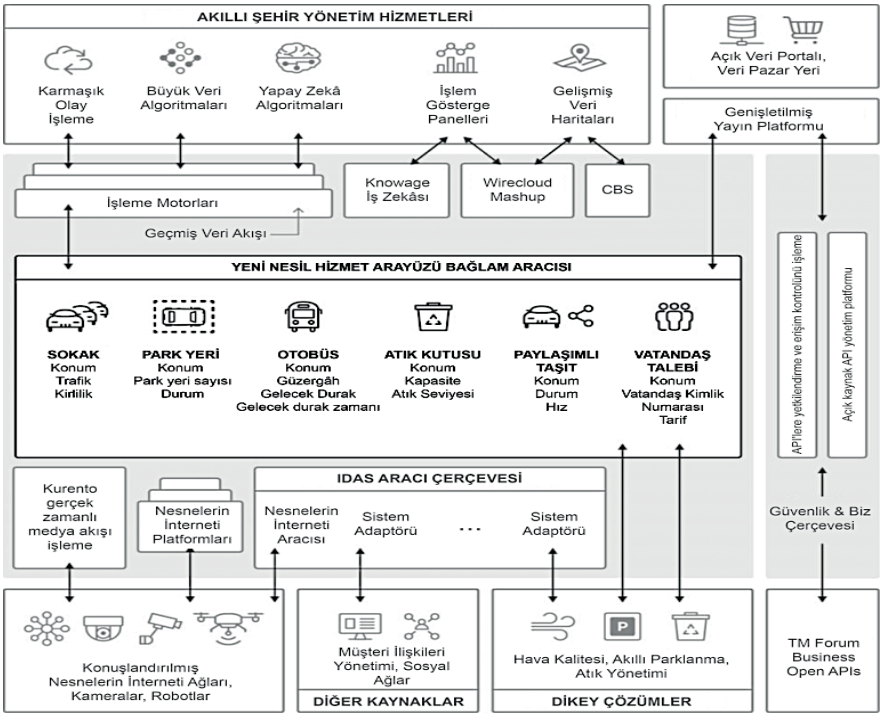
Şekil-2: Akıllı Şehir uygulamaları

2.3. Akıllı Şehir Özellikleri

Akıllı şehir teknolojileri otomasyon, makine öğrenimi ve IoT'yi bir araya getirerek çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Örneğin, akıllı park etme sürücülerin nereye park edeceklerini bulmalarına yardımcı olabilir ve dijital ödemeye izin verebilir. Bir başka örnek de trafik akışını izlemek ve trafik ışıklarını optimize ederek sıkışıklığı azaltmak için akıllı trafik yönetimi olabilirken, akıllı şehir altyapısı araç paylaşım hizmetlerini de kontrol edebilir.

Akıllı şehir özellikleri arasında enerji tasarrufu ve çevresel verimlilik de yer alabilir, örneğin sokak ıssız olduğunda loşlaşan sokak lambaları gibi. Operasyon, bakım ve planlamadan güç kaynağına kadar her şey akıllı şebeke teknolojileri aracılığıyla iyileştirilebilir.

Akıllı Şehir girişimleri ayrıca iklim değişikliği ve hava kirliliğiyle mücadele etmek ve internet bağlantılı çöp toplama, çöp kutuları ve filo yönetim sistemleri aracılığıyla atık ve sanitasyonu yönetmek için de kullanılabilir.



Şekil-3: Akıllı şehir özellikleri

Akıllı şehirler, hizmetlerin yanı sıra, yüksek suç alanlarının izlenmesi veya sel, toprak kayması, kasırga veya kuraklık gibi olaylar için erken uyarı sağlamak için sensörlerin kullanılması gibi güvenlik önlemlerinin sağlanmasına izin verir. Akıllı binalar ayrıca gerçek zamanlı alan yönetimi veya yapısal sağlık izleme ve onarımların ne zaman yapılması gerekebileceğini belirlemeye yardımcı olacak geri bildirim sağlayabilir. Sensörler sızıntı yapan su boruları gibi altyapı sorunlarını da izleyebilir ve vatandaşlar sisteme erişerek çukurlar gibi sorunları yetkililere bildirebilir. Akıllı şehir teknolojisi sayesinde üretim, kentsel tarım, enerji kullanımı ve daha birçok alanda verimlilik de artırılabilir. Akıllı şehirler, vatandaşlar için entegre çözümler oluşturmak üzere farklı hizmetleri entegre edebilir.

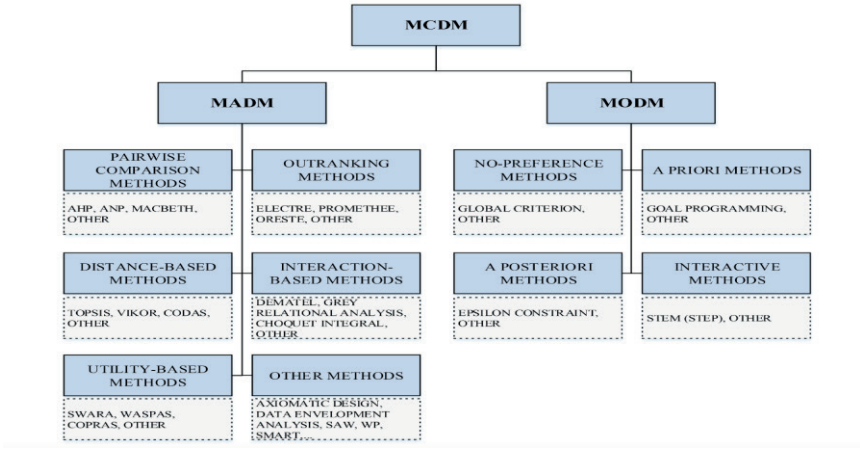
2.4. Akıllı Şehir Zorlukları

Akıllı şehirlerin tüm faydalarına rağmen üstesinden gelinmesi gereken zorluklar vardır. Örneğin, vatandaşların devlet kurumlarına geniş katılımına ihtiyaç vardır. Ayrıca, herkesin toplumu olumlu yönde etkileyebilmesi için özel ve kamu sektörleri ile kent sakinleri arasında uyum sağlanması gerekmektedir.

Akıllı şehir projeleri şeffaf olmalı ve açık veri portalları veya mobil uygulamalar aracılığıyla erişilebilir olmalıdır. Bu sayede kent sakinleri fatura ödeme, verimli seyahat seçenekleri bulma ya da evdeki enerji kullanımını değerlendirme gibi kişisel görevlerini yerine getirmek için verilerle etkileşime geçebilir. Bilgisayar korsanlığını veya kötüye kullanımı önlemek için sağlam ve güvenli bir veri toplama ve depolama sistemi gereklidir. Akıllı şehir verilerinin gizlilik sorunlarını önlemek için anonimleştirilmesi de gerekmektedir. En büyük zorluk bağlantıdır; binlerce hatta milyonlarca IoT cihazının birbirine bağlanması ve birlikte çalışması gerekir. Bu şekilde hizmetler birleştirilebilir ve talep arttıkça sürekli iyileştirmeler yapılabilir. Teknolojinin yanı sıra, akıllı şehirlerin orada yaşayan ve çalışanlar için cazip bir kültürel doku oluşturmaya yardımcı olan sosyal faktörleri de dikkate alması gerekir. Bu, özellikle sıfırdan inşa edilen ve sakinlerini çekmesi gereken şehirler için önemlidir.

3. ÇOK YÖNLÜ KARAR VERME YÖNTEMLERİ

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) bir yöntemler bütünüdür. Karar Biliminin bir alt kümesidir ve farklı yaklaşımlar içerir. ÇKKV, karar sürecinin kriterlere göre modellenmesine ve karar vericinin süreç sonunda elde edeceği faydayı maksimize etmek için analiz edilmesine dayanır.



Şekil-4: Karar verme yöntemleri

Örneğin, bir ev satın almaya karar verme sürecindesiniz. Sizden iki kriter, fiyat ve metrekareye dayalı iki alternatif evin değerlendirilmesi ve karar verilmesi isteniyor. Böyle bir karar probleminde, herhangi bir karar verme yöntemi kullanmadan basit bir karşılaştırma yaparak size maksimum fayda sağlayacak

alternatif seçmek mümkündür. Ancak, alternatiflerin sayısının 2'den çok daha yüksek olacağını ve evi satın alma sürecinde dikkate alınacak kriterlerin sayısı, karşı karşıya olduğunuz ev satın alma sorunu gerçek hayata uyum sağlarsak çok daha fazla olacağını tahmin edebilirsiniz. Bu durumda, etkili bir karar vermenize yardımcı olacak mantıksal testler yapmak mümkün olmayacak ve karar vermek için sezgilerinizi kullanarak çok etkili sonuçlar elde edemeyeceksiniz. Böyle bir durumda, karar verme sürecini desteklemek için bilimsel bir karar desteği sistemi kullanarak karar sürecinden etkili bir çıkış elde edebilirsiniz. Çok Nitelikli Karar Verme (ÇNKV), karar sorununda ele alınan alternatiflerin sınırlı ve iyi tanımlanmış olduğu ayrıntılı durumlarda karar vermeyi ifade eder.ÇNKV problemlerinde alternatifler önceden belirlenen sayıdadır. Örneğin, bir işletme için tedarikçi seçim probleminin Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) problemi olarak modelleneceğini düşünelim. Bu karar probleminde işletmenin değerlendirmeye tabi tutacağı alternatif sayısı sonlu sayıdadır. Ayrıca her bir alternatif bir tedarikçi işletmeyi temsil ettiği için kesikli bir durumda karar verme söz konusudur. Bu tip bir problemi çözmek için ÇNKV yöntemleri kullanılarak işletme için en ideal (uygun) tedarikçi alternatifini belirlenmesi mümkündür. Çok Amaçlı Karar Verme (ÇAKV), alternatiflerin bir matematik programlama modeli aracılığıyla analiz edildiği sürekli durumda karar vermedir. ÇNKV yöntemlerinden farklı olarak adından da anlaşılacağı üzere birden çok amacı sağlanmaya çalışan, bu doğrultuda bir karar vericiye çözüm sunan yaklaşımlardır. ÇAKV karar vermenin daha iyi anlaşılabilmesi için ÇNKV başlığında incelenen tedarikçi seçimi karar problemini ele alalım. Örnek karar problemimizi işletmenin tek bir tedarikçiden tüm ürünlerini tedarik edemediği, bir den çok tedarikçiye ihtiyaç duyduğu varsayımı ile genişletelim. Yani işletmeye ürün arz edecek tedarikçilerin tek başlarına işletmenin talep ettiği ürün miktarını sağlamayacağını düşünelim. Bu durumda işletme karar probleminde en az iki amaca ulaşmayı hedefleyecektir. Bunlardan birincisi hangi tedarikçileri tercih etmelidir, ikincisi ise tercih ettiği tedarikçilerin her birinden ne kadar ürün satın alarak talebini karşılamalıdır. Örnekten de görüleceği üzere işletme birden çok amacı sağlayacak bir çözüm bulmak durumunda kalmaktadır. Bu tip bir karar problemi ÇNKV probleminden daha zor ve daha matematik işlemler gerektirmektedir.

Akıllı şehir problemlerinin çözümünde kullanılan çok yönlü karar verme tekniklerinden bazıları SECA, WASPAS, TOPSIS, CoCoSo, MultiMOORA ve Promthee II'dir.

3.1. SECA

Simultaneous **E**valuation of **C**riteria and **A**lternatives kelimelerinin kısaltmasından adını alan yöntem, yakın zamanda geliştirilmiş bir puanlama (telafi edici) yöntemi olarak sınıflandırılmaktadır (Keshavarz-Ghorabaee vd., 2018). Bu yöntem, alternatifleri değerlendirme ve aynı anda bir karar verme probleminin kriter ağırlıklarını hesaplama yeteneğine sahiptir. Bu amaçla, her bir alternatifin toplam puanını maksimize ederken, kriter ağırlıklarının referans noktalarından (yani, kriter içi ve kriter arası değişkenler) sapmalarını en aza indiren çok amaçlı doğrusal olmayan bir matematiksel model formüle edilmiştir. Kriterlerin ve Alternatiflerin Eşzamanlı Değerlendirilmesi yöntemi 5 adımda hesaplanmaktadır.

- 1.Adım: I alternatifleri ve J kriterleri ile karar matrisinin $[x_{ij}]$ geliştirilmesi.
- 2.Adım: Doğrusal normalizasyona göre normalleştirilmiş karar matrisinin oluşturulması:

$$x_{ij}^{N}\begin{cases}\dfrac{x_{ij}}{max_k x_{kj}} \; eğer\; j\varepsilon\; fayda\; kriteri\; ise\\ \dfrac{x_{ij}}{max_k x_{kj}} \; eğer\; j\varepsilon\; fiyat\; kriteri\; ise\end{cases} \tag{3.1}$$

- 3.Adım: *j*'inci nitelik ile $\pi_j$arasındaki çelişki derecesinin ve bir kriter vektörü (σ_j) içindeki varyasyonun hesaplanması

$$\pi_j = \sum_{l=1}^{m}(1 - r_{jl}) \tag{3.2}$$

Burada r_{jl}, normalleştirilmiş karar matrisinin sütunları (yani alternatifler) arasındaki korelasyondur.

- 4.Adım: Normalleştirilmiş değerlerinin elde edilmesi

$$\sigma_j^N = \frac{\sigma_j}{\sum_{l=1}^{m}\sigma_l} \tag{3.3}$$

$$\pi_j^N = \frac{\pi_j}{\sum_{l=1}^{m}\pi_l} \tag{3.4}$$

- 5.Adım: Her bir kriterin ağırlığını (w_j) ve alternatiflerin performans puanını (S_j) bulmak için aşağıdaki çok amaçlı matematiksel formülasyonu çözülür.

$$maxS_j = \sum_{j=1}^{m} w_x x_{iJ}^N$$

$$
\begin{aligned}
&min\lambda_b = \sum_j^m (w_j - \sigma_j^N)^2 \\
&min\lambda_c = \sum_j^m (w_j - \pi_j^N)^2 \\
&\sum_{j=1}^m w_j = 1 \\
&w_j \leq 1 \\
&w_j \geq \varepsilon
\end{aligned}
\tag{3.5}
$$

3.2. WASPAS

Bir puanlama (telafi edici) yöntem olan WASPAS, (Zavadskas, Turskis ve Antucheviciene, 2012) tarafından geliştirilmiştir. İki iyi bilinen yöntemi birleştirir: WSM (Ağırlıklı Toplam Modeli) ve WPM (Ağırlıklı Ürün Modeli). WASPAS yönteminin sıralama doğruluğunun WSM ve WPM'den sırasıyla 1,6 ve 1.3 kat daha fazla olduğu kanıtlanmıştır. Bu yöntemin arkasındaki mantık oldukça kolaydır ve prosedür uzman olmayan kişiler için bile anlaşılabilir. Özellikle, yöntem, doğrusal normalleştirme yöntemiyle orijinal değerleri [0, 1] aralığına dönüştürerek hem maliyet hem de fayda kriterlerini basitçe ele alabilir. WASPAS yönteminin açılımı Weighted Aggregated Sum Product Assessment kelimelerinin kısaltmasından gelmektedir, yani Ağırlıklandırılmış Bütünleşik Toplam Çarpım Değerlendirmesi yöntemi 4 aşamada hesaplanmaktadır.

- 1.Adım: I alternatifleri ve J kriterleri ile karar matrisinin $[x_{ij}]$ geliştirilmesi
- 2.Adım: Karar matrisinin lineer normalizasyonunun elde edilmesi.

$$x_{ij}^N = \frac{x_{ij}}{max_i\{x_{ij}\}} \; fayda \tag{3.6}$$

$$x_{ij}^N = \frac{min_i\{x_{ij}\}}{x_{ij}} \; fiyat \tag{3.7}$$

- 3.Adım: Sırasıyla WSM ve WPM ölçülerini ifade eden Q_i^S ve Q_i^P değerlerinin hesaplanması.

$$Q_i^S = \sum_j^m w_j x_{ij}^N \tag{3.8}$$

$$Q_i^P = \prod_j^m (x_{ij}^N)^{w_j} \tag{3.9}$$

- 4.Adım: WASPAS ölçüsünü Q_i^S ve Q_i^P'nin konveks kombinasyonu olarak hesaplamak, $\gamma \in [0,1]$

$$Q_i = \gamma Q_i^S + (1-\gamma) Q_i^P \tag{3.10}$$

Q_i değerlerinin azalan sırası, alternatiflerin sıralama vektörünü gösterir.

3.3. TOPSIS

İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralaması Tekniği (TOPSIS), seçilen alternatifin pozitif ideal çözüme (PIS) yakın olması gerektiği kavramına dayalı olarak geliştirilen ve en yaygın çok kriterli karar analizi yöntemlerinden biridir. Negatif ideal çözümden (NIS) mümkün olduğunca uzak tutulur (Hwang ve Yoon, 1981). Ancak, bu mesafelerin göreceli önemini ihmal eder. TOPSIS, fayda ve maliyet kriterlerine uygulanabilir.

- 1.Adım: I alternatifleri ve J kriterleri ile karar matrisinin $[x_{ij}]$ geliştirilmesi.
- 2.Adım: Normalleştirilmiş karar matrisinin hesaplanması:

$$x_{ij}^{*} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^{2}}} \tag{3.11}$$

- 3.Adım: Ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisinin hesaplanması:

$$r_{ij} = w_j . x_{ij}^{*} \tag{3.12}$$

- 4.Adım: Pozitif ideal ve negatif ideal çözümlerin belirlenmesi:

$$A^{+} = \{(\max r_{ij} j \in J\ fayda\ kriteri\ )\ veya\ (\min r_{ij} j \in J\ fiyat\ kriteri),\ \ i = 1 \ldots m\ \}$$

$$A^{-} = \{(\min r_{ij} j \in J\ fayda\ kriteri\ )\ veya\ (\max r_{ij} j \in J\ fiyat\ kriteri),\ \ i = 1 \ldots m\ \}$$

- 5.Adım: İdeal ve negatif ideal çözüme olan mesafe:

$$d_i^{+} = \sqrt{\sum_j (r_{ij} - a_j^{+})^2} \tag{3.13}$$

$$d_i^{-} = \sqrt{\sum_j (r_{ij} - a_j^{-})^2} \tag{3.14}$$

- 6.Adım: İdeal çözüme göreceli yakınlığın hesaplanması, CLi değeri 1'e yakın olan alternatif daha iyi bir alternatiftir.

$$CL_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \tag{3.15}$$

3.4. CoCoSo

CoCoSo (Combined Compromise Solution) Birleşik Uzlaşma Çözümü yöntemi yakın zamanda Yazdani ve ark. (2019) tarafından geliştirilen, basit katkı ağırlıklı ve üstel ağırlıklı ürün modellerini entegre etmeye dayanmaktadır. Bu yöntemde, sonuçların esnekliğini sağlamak ve geliştirmek için gri rasyonel katsayıdan kaynaklanan bir mesafe ölçüsü dikkate alınır.

- 1.Adım: I alternatifleri ve J kriterleri ile karar matrisinin $[x_{ij}]$ geliştirilmesi
- 2.Adım: Karar matrisinin aşağıdaki gibi normalleştirilmesi.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - min_i x_{ij}}{max_i x_{ij} - min_i x_{ij}} \; fayda\ için \tag{3.16}$$

$$x_{ij}^* = \frac{max_i x_{ij} - x_{ij}}{max_i x_{ij} - min_i x_{ij}} \; fiyat\ için \tag{3.17}$$

- 3.Adım: Güç ağırlığının miktarının hesaplanması

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_j x_{ij}^* \tag{3.18}$$

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} (x_{ij}^*)^{w_j} \tag{3.19}$$

- 4.Adım: Üç değerlendirme puanı stratejisini değerlendirerek alternatiflerin ağırlıklarını hesaplamak.

$$k_{ia} = \frac{P_i + S_i}{\sum_{i=1}^{m} (P_i + S_i)} \tag{3.20}$$

WSM ve WPM puanlarının aritmetik ortalaması

$$k_{ib} = \frac{S_i}{min_i S_i} + \frac{P_i}{min_i P_i} \tag{3.21}$$

Burada, WSM ve WPM'nin göreli puanlarının en iyi ile karşılaştırıldığında toplamı belirtilir.

$$k_{ic} = \frac{\lambda S_i + (1-\lambda) P_i}{\lambda max_i S_i + (1-\lambda) max_i P_i}; 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (3.22)$$

Bu ifade, WSA ve WPM puanlarının dengeli uzlaşmasını serbest bırakır. Bu denklemde λ genellikle karar vericiler tarafından 0,5 olarak kabul edilir.

1. Adım: Alternatiflerin nihai sıralaması:

$$k_i = (k_{ia} + k_{ib} + k_{ic})^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{3}(k_{ia} + k_{ib} + k_{ic}) \quad (3.23)$$

3.5. MULTIMOORA

MULTIMOORA (Multi-objective Optimization By Ratio Analysis) yöntemi (Brauers ve Zavadskas, 2010), ayrık alternatifleri olan çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinden biri olan MOORA yönteminin geliştirilmiş bir versiyonudur (Brauers ve Zavadskas, 2006). Oran Analizi ile Çok Amaçlı Optimizasyon yöntemde nihai sıralama üç ölçüye göre elde edilir; bu nedenle daha doğru ve sağlamdır (Maghsoodi vd., 2018).

- 1.Adım: I alternatifleri ve J kriterleri ile karar matrisinin $[x_{ij}]$ geliştirilmesi
- 2.Adım: Normalleştirilmiş karar matrisinin hesaplanması:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \quad (3.24)$$

- 3.Adım: Oran sistemi, referans noktası ve tam çarpımsal yaklaşımlara dayalı sıralama vektörlerini bulunması.

Oran sistemi: $y_i^* = \sum_{j \in fayda\ kriteri} w_j\, x_i^* - \sum_{j \in fiyat\ kriteri} w_j\, x_i^*$

Referans noktası:

$$min_i\{min_i|w_j r_j - w_j x_j^*|\} \text{ burada } r_j \begin{cases} max_i x_j^*\ fayda\ için \\ min_i x_j^*\ fiyat\ için \end{cases} \quad (3.25)$$

Tam çarpımsal: $U_i = \frac{\prod_{j \in fayda\ kriteri} w_j x_j^*}{\prod_{j \in fiyat\ kriteri} w_j x_j^*}$

3.6. PROMTHEE II

Sıralama yöntemlerinden biri olan PROMETHEE II (Brans vd.,1986) tarafından geliştirilmiştir. Tam bir alternatif sıralamasıyla sonuçlanan PROMETHEE II, PROMETHEE ailesinin en çok uygulanan çeşitidir. Bu yöntemde, tercih fonksiyonları kullanılarak alternatifler ikili olarak karşılaştırılır. Daha sonra, her bir alternatif için pozitif ve negatif sıralama akışları hesaplanarak sıralama vektörü elde edilir. Bu yöntemin birincil avantajı herhangi bir normalizasyon gerektirmemesidir (Tscheikner-Gratl vd., 2017). Ancak, uygun tercih fonksiyonlarını seçmek zorlu bir görev olabilir.

- 1.Adım: I alternatifleri ve J kriterleri ile karar matrisinin $[x_{ij}]$ geliştirilmesi
- 2.Adım: Her bir alternatif çiftinin performansları arasındaki farkların belirlenmesi; burada $g_j(a)$, j kriterine göre alternatif a'nın performansını gösterir.

$$d_j(a.b) = g_j(a) - g_j(b) \tag{3.26}$$

- 3.Adım: Her bir kritere göre her bir alternatif çifti için tercih ilişkilerini hesaplarken, karar verici her kriter için kavramına/doğasına göre uygun bir tercih fonksiyonu seçer:

$$P_j(a.b) = F_j[d_j(a.b)] \tag{3.27}$$

Burada $P_j(a.b)$, $d_j(a.b)$'nin bir fonksiyonu olarak j kriterine göre a alternatifinin b'ye göre tercih derecesini gösterir. Özellikle altı tür tercih fonksiyonu vardır: (1) olağan, (2) U-şekli, (3) V-şekli, (4) seviye, (5) kayıtsızlık kriterli V-şekli ve (6) Gauss.

- 4.Adım: Toplu tercih endekslerinin hesaplanması:

$$\pi(a.b) = \sum_{j=1}^{k} P_j(a.b) w_j \tag{3.28}$$

- 5.Adım: Her alternatifin pozitif, negatif ve net geçiş akışının hesaplanması ve buna göre sıralama vektörünün bulunması.

$$\varphi^{+}(a) = \frac{1}{1-n}\sum_{x\in A}\pi(a.x)\ her\ a\ için$$

$$\varphi^{-}(a) = \frac{1}{1-n}\sum_{x\in A}\pi(x.a)\ her\ a\ için \qquad (3.29)$$

$$\varphi(a) = \varphi^{+}(a) - \varphi^{-}(a)$$

Burada $\varphi^{+}(a)$ve $\varphi^{-}(a)$ sırasıyla pozitif ve negatif sıralama akışlarını gösterir. Net geçiş akışı, $\varphi(a)$ hesaplanarak elde edilir. Net geçiş akışlarının azalan sırası, alternatiflerin sıralama vektörünü gösterir.

4. SONUÇ

Geleceğe yönelik raporlar ve çalışmalar incelendiğinde, şehir ve ülke yöneticilerinin zorluklarla baş edebilmesi için akılcı çözümler üretmesi gerekmektedir. Ülkemizde akıllı şehir uygulamaları arzu edilen yaygınlık ve etkinlik seviyesinde değildir. Bununla birlikte büyük şehirlerde anlamlı ve hatta literatüre giren Akıllı Şehir uygulamaları vardır. Birçok şehir gelişmiş ulaşım bağlantıları, teknoloji altyapısı içeren hizmetleri ile şehirlerini akıllı şehir olarak nitelendirilmektedir. Ülkemizdeki akıllı uygulamalar ağırlıklı olarak bina, ulaşım ve enerji alanlarında yoğunlaşmaktadır.

Akıllı şehir uygulamalarında yenilikçi yaklaşımlar kritik başarı faktörleri arasında ilk sırada yer almaktadır. Kurumların akıllı şehir teknolojileri konusundaki gelişmeleri yakından takip ederek ve içselleştirerek bunları şehrin ihtiyaçlarına göre hızlı bir şekilde uyarlayabilmek için, dünyadaki değişik bölgelerde yer alan başarılı akıllı şehir modellerinin incelenerek dönüştürülmeye çalışılan veya yeni kurulan şehirler için uygulama modelleri geliştirilmesi ve değişik ölçekteki şehirler için ayrı yol haritaları hazırlanması için ve ülkemizde başarılı akıllı şehir uygulamalarının diğer il ilçe ve kurumlarca uygulanabilmesi için çok yönlü, çok nitelikli ve çok özellikli karar verme tekniklerinden faydalanmak her yönden büyük avantaj sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Akıllı şehir nedir? Türkiye'de akıllı şehir uygulamaları, (2016), 21.08.2023 tarihinde https://www.gidahatti.com/haber/11554029/akilli-sehir-nedir-turkiyede-akilli-sehir-uygulamalari adresinden alındı.

Akıllı şehirler, 20.12.2023 tarihinde (2017), https://www.ituvakif.org.tr/_files/ugd/8db14c_84a319a4ac18478c905e1ff0e2a4f28e.pdf adresinden alındı.

Albino, V., Berardi, U., & Dangelico, R. M. (2015). Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives. *Journal of Urban Technology, 22*(1), 3–21. https://doi. org/10.1080/10630732.2014.942092

Anthopoulos, L. G., Janssen, M., & Weerakkody, V. (2015). Comparing smart cities with different modeling approaches. *Proceedings of the 24th International Conference on World Wide Web - WWW' 15 Companion*, 525–528. https://doi.org/10.1145/ 2740908.2743920

Chang, V. (2021). An ethical framework for big data and smart cities. *Technological Forecasting and Social Change*, *165*, 120559.

Cocchia, A. (2014). Smart and digital city: A systematic literature review. In R. P. Dameri, & C. Rosenthal-Sabroux (Eds.), Smart City (pp. 13–43). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06160-3_2.

Çetin, M., & Çiftçi, Ç. (2019). Literatüre göre dünya ve ülkemizden örneklerle akıllı kent kavramının irdelenmesi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, *2*(3), 134-143.

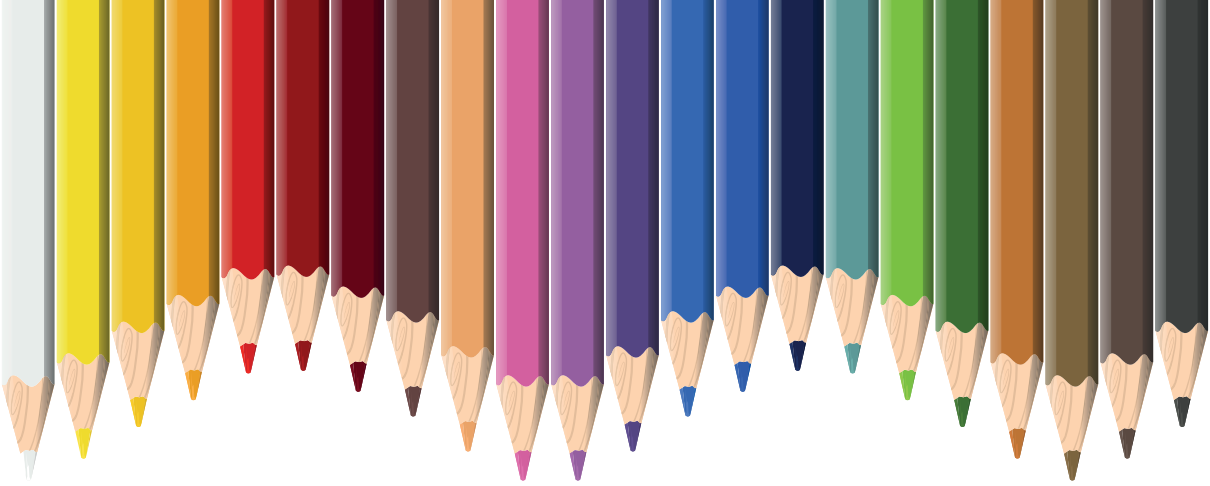
Dünyadan Akıllı Şehir Örnekleri – Aba Innolab, (2020), 20.10.2023 tarihinde https://abainnolab.com/dunyadan-akilli-sehir-ornekleri-aba-innolab adresinden alındı.

Yıldırım Bahadır Fatih, (2019), Çok Nitelikli Karar Verme, 23.11.2023 tarihinde https://bahadirfyildirim.com/blog/note/cok-nitelikli-karar-verme/ adresinden alındı.

Tscheikner-Gratl, F., Egger, P., Rauch, W., & Kleidorfer, M. (2017). Comparison of multi-criteria decision support methods for integrated rehabilitation prioritization. *Water, 9*(2), 68. https://doi.org/10.3390/w9020068

Yalcin, A. S., Kilic, H. S., & Delen, D. (2022). The use of multi-criteria decision-making methods in business analytics: A comprehensive literature review. *Technological Forecasting and Social Change*, *174*, 121193

Zanakis, S. H., Solomon, A., Wishart, N., & Dublish, S. (1998). Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods. *European Journal of Operational Research, 107*(3), 507–529. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00147-1



Bölüm 27

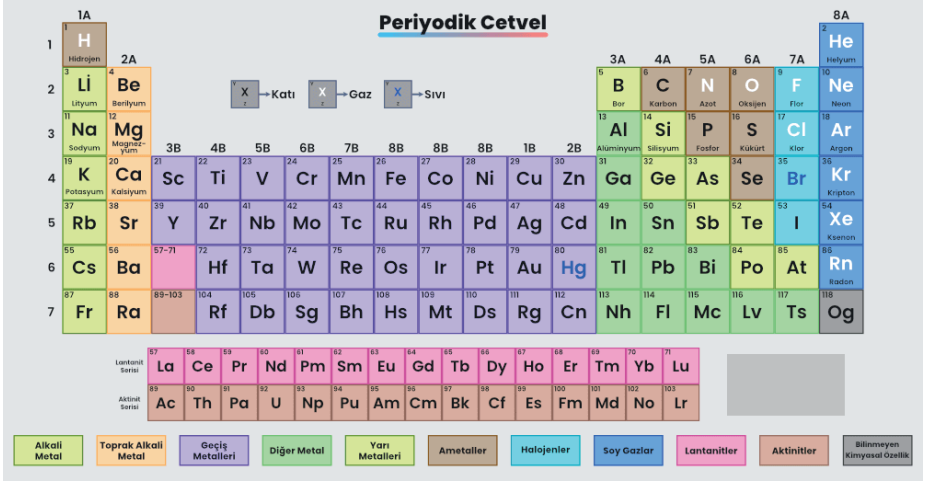
HER YÖNÜYLE ALÜMİNYUM

Gülşah ÖNER[1]

1 Gülşah ÖNER, Doç.Dr., Atatürk Üniversitesi, ORCID ID: 0000-0002-7724-2943

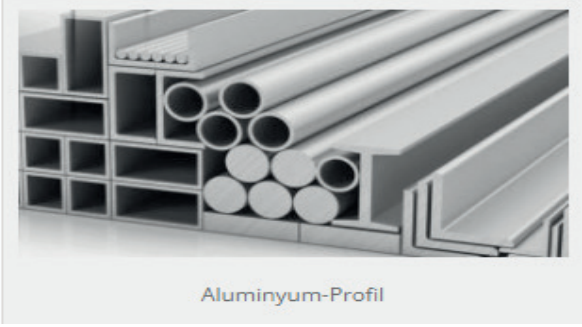
1. GİRİŞ

Alüminyum yerkabuğunda en çok bulunan üçüncü elementtir, ancak diğer elementlerle reaktif olduğundan doğal halde bulunmaz. Kimyasal sembolü Al olan, atom numarası 13 ve atom ağırlığı 27 olan metalik bir element olan Alüminyumun periyodik cetveldeki konumu **Şekil 1**'de görülmektedir. Danimarkalı fizikçi ve kimyager Hans Christian Oersted (1777-1851), 1835'te alüminyumu saf formda ayırmada başarılı olmuştur. Alüminyum kelimesi Kuzey Amerika ve Avrupa dillerinde ortak kullanımda iki farklı versiyona sahip olmasından dolayı farklı şekillerde ifade ediliyordu. Kuzey Amerika'da *aluminum* olarak yazılırken ve Avrupa'da *aluminium* şeklinde yazılmaktadır. Bu isim 1807'de Sir Humphry Davy tarafından verilmiştir. (Latince alumen kelimesine dayanmaktadır) (*Periyodik Sistem – Periyodik Özellikler*, n.d.; Starke, 2005). Dünyanın geri kalanı ise "alüminyum" terimini kullanıyordu. 1886 yılına kadar alüminyum üretmek için, kimyasal olarak alüminyum klorüre dönüştürülen ve daha sonra metalik sodyum ile indirgenerek tuz ve metalik alüminyum oluşturan korindon kristallerinin kullanıldığı kimyasal bir işlem kullanılmıştır. 1825'ten 1886'ya kadar alüminyum, cevherinden çıkarılmasının zorluğu ve maliyeti nedeniyle öncelikle mücevherat ve pahalı sofra takımı olarak kullanılmıştır. O dönemde dünyanın en yüksek yapısı olan Washington Anıtı'nın inşası sırasında, yapının üstünü kapatacak ve paratoner görevi görecek malzemeye ihtiyaç duyulmuştur. Dökme alüminyum piramit, William Frishmuthin 1884 tarafından üretilmiş ve tepesine monte edilmiştir. Bu şimdiye kadar üretilen en büyük alüminyum dökümdü ve bu metalin ilk mimari uygulamasıdır (Starke, 2005).



Şekil 1. *Alüminyumun periyodik cetveldeki konumu(Periyodik Sistem – Periyodik Özellikler, n.d.)*

Modern eritme tekniklerinin icat edilmeye başlandığı yıl olan 1886'dan itibaren alüminyum ciddi bir endüstriyel metal haline gelmiştir**.** Bu nedenle binlerce yıldır sahip olduğumuz bronz, bakır, kurşun, demir vb. ile kıyaslandığında çok kısa bir süre önce elde edilebilmiştir. Bugün hacimsel kullanımda demir dışı metallerin önüne kolaylıkla geçmektedir. Bazı spesifik özelliklerinden dolayı ('hafif ve parlak olması sebebiyle') yerine göre çeliğe nazaran tercih edilmiştir. Alüminyumun çok fazla sayıda uygulama alanı bulunmaktadır. Alüminyumun şu an ki dünya tüketimi yılda yaklaşık 20 milyon tondur (*Aluminium Design and Construction - John Dwight - Google Kitaplar*, 1999)**.** Özellikle endüstri alanlarında yaygın olarak kullanılan alüminyum profiller **Şekil 2**'de görülmektedir (*Alüminyum*, 2023)**.**



Şekil 2. *Alüminyum Profil (Alüminyum, 2023)*

1.1. Alaşım

Saf alüminyum zayıftır ve tempere bağlı olarak yaklaşık 90 - 140 N/mm^2 arasında değişen bir çekme mukavemetine sahiptir. Elektrik iletkenliği ve evsel ürünler (tava, teneke kutusu, ambalaj gibi) için kullanılır, ancak ciddi yapısal kullanım için alaşımlama yoluyla güçlendirilmesi gerekir. En güçlü alaşımların çekme mukavemeti 500 N/mm^2'nin üzerindedir. Alüminyum alaşımlar, hafiflikleri, estetik görünümleri, üretim kolaylıkları ve iyi korozyon dirençleri nedeniyle giderek günümüz teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (*Aluminium Design and Construction - John Dwight - Google Kitaplar*, 1999; F.M.Mazzolani, 1995)**.**

Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında birçok standart kullanılmaktadır. Bu standartlardan en çok kullanılanı Alüminyum Birliği'nin (AA:Aluminium Association) standardıdır. Bunun yanında ALCOA, ASTM, DIN 1713, Fransız Standartları gibi standartlar kullanılmaktadır (DOĞAN, 2006)**.** Bir alüminyum alaşımı, alüminyumun (Al) baskın metal olduğu bir alaşımdır. Tipik alaşım elementleri bakır, magnezyum, manganez, silikon, kalay, nikel ve çinkodur. Alüminyum alaşımları, çökeltme (yaş) sertleşmesine uğrayıp uğramamalarına bağlı olarak ısıl işlem görebilen veya ısıl işlem görmeyen olarak sınıflandırılır. Ayrıca, alüminyum alaşımlarının iki farklı ürün formu vardır; dökümden sonra işlenmiş veya deforme edilmiş dövme alaşım-

lar ve "döküm" durumunda kullanılan döküm alaşımlarıdır. Alüminyumun yaklaşık %85'i haddelenmiş levha, folyo ve ekstrüzyon gibi işlenmiş ürünlerde kullanılmaktadır. Dökme alüminyum alaşımları, genellikle dövme alaşımlardan daha düşük çekme mukavemetine sahip olmalarına rağmen, düşük erime noktası nedeniyle uygun maliyetli ürünler verir. En önemli dökme alüminyum alaşım sistemi, yüksek düzeydeki silikonun (%4-13) iyi döküm özellikleri sağlamaya katkıda bulunduğu Al-Si'dir. Alüminyum alaşımları, hafiflik veya korozyon direncinin gerekli olduğu mühendislik yapılarında ve bileşenlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Polmear, 1995).

Son zamanlarda, Alüminyum alaşımlarının hafiflik ve yanmaya karşı dirençli oluşu sebebiyle, uzay ve havacılık sanayiinde sıklıkla kullanılmaya başlamıştır. (Hombergsmeier, E., & Works, 2007).

1.2. Döküm

Alüminyum döküme son derece uygun bir metaldir. Alüminyum döküm, alüminyumun erimiş halde eritilmesini ve nihai ürün elde etmek için bir kalıba dökülmesini içeren bir işlemdir. Döküm işleminde erimiş alüminyum, alüminyumu hızla soğutan çelik bir kalıba dökülür. Bu, çeliğin gözeneksiz ve sıkışmış gaz içermeyen, çok ince taneli bir doku halinde katılaşmasına neden olur. Bu durum döküm malzemelerde en iyi metalürjik özellikleri ve aşırı derecede gerilim geçirmezlik sağlar. Kum dökümlerle karşılaştırıldığında %15 enerji açısından yarara sahiptir. Daha büyük parçaların üretimi için (özellikle kum dökümleri gibi), alüminyum dökme demire nispeten daha çok tercih edilen bir malzemedir. Daha küçük parçalar için de (döküm boyaları gibi) çinkoya nispeten güçlü bir alternatif sağlar. Dövme alaşımlardan farklı olarak çok çeşitli döküm alaşımları mevcuttur. Alüminyum dökümlerin güvenilirliği, bu malzemelerin tekerlek jantları için standart hale gelmesiyle kanıtlanmıştır (*Aluminum Casting Advantages*, n.d.).

1.3. Sağlık riski

Uzun yıllar boyunca alüminyumun tamamen toksik olmadığına ve bu açıdan diğer metallerin çoğundan üstün olduğuna inanılıyordu. 1980'lerde araştırmacılar, alüminyum tencerelerin uzun süreli kullanımının beyinde az miktarda metalin emilmesine neden olabileceğini ve bunun da Alzheimer hastalığı (bir tür yaşlılık hastalığı) riskini artırabileceğini ifade etmişlerdir. İlerleyen zaman içerisinde Alüminyum kapların artık tercih edilmemesi sebebiyle bu sorunun en aza indirgenmiş olabileceği düşünülmüştür. Daha sonraki araştırmalarda bu bulgu hakkında ciddi şüpheler oluşmuş ve modern görüşle birlikte, Alzheimer hastalığının artan riskine ilişkin "alüminyum teorisinin" fazlasıyla abartıldığı yönünde fikir oluşmuştur. Burada düşünülen iki soru vardır ki, birincisi, yiyecek ve içeceklerimizden aldığımız miktara kıyasla gerçekten önemli miktarlarda alüminyumu tencerelerden mi emiyoruz? İkincisi, alüminyum hangi düzeyde emilimde zararlı hale gelir? Alüminyum

üzerinde her zaman mevcut olan inatçı oksit filmi nedeniyle ilk sorunun cevabı hayır, ikincisinin cevabı ise mutfak tencereleri dışında korkmaya gerek yoktur olacaktır (*Aluminium Design and Construction - John Dwight - Google Kitaplar*, 1999).

Fakat, günümüz araştırmaları göstermiştir ki, Alüminyumun vücuda alınışı; mutfaklarda kullanılan kaplar, içme suyundan, deodorantlardan, gıda katkı maddelerinden, aşı, ilaçlardan, ambalaj materyallerinden ve Alüminyum işleyen fabrikalardan farklı şekillerde olmaktadır (Ö. Akman, S. Atasever, E.Güçlü, G. Gümüş, 2011)**.**

Alüminyumun beyin hücrelerinde toplanması ile Alzheimer, Parkinson, amiotrofik lateral sklerozis (Lou Gehrig's hastalığı) gibi nörolojik hastalıklara; uzun süreli alüminyum kaynaklı antiasit kullanımı ise kemiklerde birikerek kemik yumuşamasına, adinamik kemik hastalığına; hemoglobin sentezini inhibe ederek anemiye neden olmaktadır. Ayrıca, deneysel olarak sıçan testisinde germinatif hasar ve böbrekte özellikle tübüler sisteme yaptığı dejeneratif hasar gibi belirgin histolojik sorunlar oluşturduğu da ortaya konmuştur (Ö. Akman, S. Atasever, E.Güçlü, G. Gümüş, 2011)**.**

1.4. Yangın riski

Alüminyum alaşımlarının inşaat, ulaşım, ev aletleri ve açık deniz yapılarında yaygın kullanımı nedeniyle, 'alüminyum yanar mı?' sorusunu cevaplamak gerekmektedir. Cevap elbette "Hayır"dır. Her yıl yüzbinlerce ton alüminyum hurda yeniden ergitme fırınlarına beslenip erime noktasına kadar ve sonrasında ısıtılmaktadır. Sıcaklık erime noktasını aştığında alüminyum erir, yanmaz. Öyle olsaydı alüminyumun geri dönüşümü mümkün olmazdı. Büyük Britanya ile Arjantin arasındaki Falkland çatışması sırasında ve sonrasında batan bazı gemilerin üst yapısında kullanılan alüminyum alaşımlarının yanarak bu gemilerin kaybına sebep olduğu şeklinde yanıltıcı düşünceler varken, bu çatışmada batan dokuz gemiden yalnızca üçünün alüminyum üst yapısı vardı. Her üç gemi de çelik gövdeye sahipti ve her durumda verilen hasar, üst yapının malzemesi ne olursa olsun bu gemilerin batacağını gösteriyordu. Hiçbir durumda alüminyum yanmadı. Batan ilk İngiliz destroyeri olan HMS Sheffield'ın alüminyum üst yapıya sahip olduğu yaygın olarak bildirilmiştir. Bu aslında çelik gövdeli ve çelik üst yapıya sahip tamamen çelik bir gemiydi. 1982 yılında yapılan araştırmalara göre alüminyum ile ilgili olarak herhangi bir geminin kaybına sebep olduğuna dair hiçbir kanıt yoktu' (*Aluminium and Fire*, n.d.).

Alüminyum malzemeler üzerinde yapılan yangın testlerinde, sıcaklık 600-660°C aralığında erime noktasını aştığında, yangına maruz kalan alüminyum yüzeyin eridiği görülür ama yanmaz. Yangın testinin sonunda metal, yeniden katılaşmış bir havuz halinde kalır. İnce bölünmüş toz veya pul halindeki alüminyum ekzotermik olarak oksitlenir, ancak bu çok büyük yü-

zey alanı/ağırlık oranı nedeniyle çok özel bir durumdur. Alüminyum daha sonra demir ve titanyum, çay, un ve kömür gibi diğer ince bölünmüş malzemelere benzer şekilde davranır ve bunların tümü toz halinde ekzotermik olarak kolayca oksitlenir (*Aluminium and Fire*, n.d.).

1.5. Fiziksel Özellikleri

1.5.1. Ağırlık

Alaşımların yoğunluk değerleri çoğu durumda saf metalin yoğunluk değerlerine yakındır. Saf alüminyumun yoğunluğu ile yapı çeliğinin yoğunluğu ϱ, şu şekilde karşılaştırılır:

Saf alüminyum ϱ =2,70 g/cm^3

Yapı çeliği ϱ =7,9 g/cm^3

ve dövme ürünler için kullanılan alaşımların değeri 2,67-2,80 g/cm^3 aralığındadır. Tasarımda Eurocode 9'a (EN 1999-1-1) göre tasarımda normalde 2,7 g/cm^3'lük yuvarlanmış bir değer kullanılmaktadır. **Tablo 1**'de Metalik elementlerin Yoğunluğu görülmektedir.

Tablo 1. *Metalik elementlerin Yoğunluğu (Aluminium Design and Construction - John Dwight - Google Kitaplar, 1999)*.

Element	Simge	Yoğunluk (g\cm^3]	Alüminyuma göre yoğunluk
Lityum	Li	0,53	0,20
Magnezyum	Mg	1,74	0,64
Alüminyum	Al	2,70	1,00
Titanyum	Ti	4,51	1,67
Çinko	Zn	7,13	2,64
Kalay	Sn	7,28	2,70
Demir	Fe	7,87	2,92
Bakır	Cu	8,93	3,31
Gümüş	Ag	10,50	3,89
Kurşun	Pb	11,34	4,20
Altın	Au	19,28	7,15
Osmiyum	Os	22,58	8,37

1.5.2. Elastik sabitler

Alüminyum daha düşük elastisite modülüne (E) sahip yaylı bir metaldir. Elastisite modülü açısından oda sıcaklığındaki saf Alüminyum ve çelik kar-

şılaştırması şu şekildedir:

Saf alüminyum E=69 kN/mm^2

Yapı çeliği E=205 kN/mm^2,

dövme alaşımlar için değer ise 69–72 kN/mm aralığındadır.

Tasarım amacıyla Eurocode 9 (EN 1999-1-1), E = 70 kN/mm^2 rakamını benimser. Alüminyum için young modülü E, sıcaklıklığa bağlı olarak istikrarlı bir şekilde azalır, bu değerler 100°C'de 67 kN/mm^2'ye ve 200°C'de 59 kN/mm^2'ye düşer. Poisson oranı (v), çelik için kullanılan ve kabul edilen 0,30 rakamından daha yüksektir ve 0,33'e eşit alınmalıdır. Alüminyumun elastisite modülü çeliğin modülünün yalnızca üçte biri kadardır (*Aluminium Design and Construction - John Dwight - Google Kitaplar*, 1999; Baker, J. F., & Roderick, 1948)**.**

1.5.3. Termal genleşme

Oda sıcaklığında saf alüminyum için doğrusal genleşme katsayısı α yapı çeliği ile aşağıdaki şekilde karşılaştırılmıştır:

Saf alüminyum α =23,5×10^{-6}/°C

Yapı çeliği α =12×10^{-6}/°C

işlenmiş alaşımların değeri α =22–24,5×10^{-6} aralığındadır. İngiliz Standardı BS.8118 (BRITISH STANDARD), tasarımda kullanım için α 'nın değeri 23×10^{-6}/°C'lik yuvarlanmış bir değerini kullanmaktadır.Termal genleşme katsayısı α 'nın sıcaklıkla birlikte istikrarlı bir şekilde arttığı ve 200°C'de 26 ×10^{-6}'ya değerine kadar çıktığı belirlenmiştir (*Aluminium Design and Construction - John Dwight - Google Kitaplar*, 1999)**.**

1.5.4. Erime noktası

Yumuşak çelik ile saf alüminyum erime noktası değerleri ile karşılaştırıldığında yumuşak çelik 1500°C'de erirken, saf alüminyum için bu değer 660°C'dir; alaşımların değerleri ise biraz daha düşüktür. Kaynama noktası 1800°C'dir (*Alüminyum ve Özellikleri (Çelikler Alüminyum A.Ş.)*, n.d.).

1.5.6. Elektriksel iletkenlik

Saf alüminyum, bazı elektrik uygulamalarında bakırla rekabet eder ve genel iletim hatlarındaki iletkenler için standart malzemedir (ortada çelik halat bulunur). Çok saf alüminyumun direnci oda sıcaklığında 2,7 Ω cm'dir. Yine bu değer alaşımlamaya karşı oldukça hassastır ve bazı alaşımlar için yukarıdaki değerin iki katıdır (*Aluminium Design and Construction - John Dwight - Google Kitaplar*, 1999; *Alüminyum Çelik Karşılaştırma*, 2023)**.**

2. Çelikle Alüminyumun karşılaştırılması

Maden olarak doğada çokça bulunan iki metal çelik ve alüminyum endüstride oldukça fazla alanda (otomotiv, havacılık-uzay, inşaat v.b.) kendisine kullanım alanı bulmuştur. **Tablo 2**'de Çelik ve Alüminyumun özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir (*Steel vs. Aluminum: How to Make the Best Choice for Your Product Design*, n.d.)

Tablo 2. *Çelik ve Alüminyumun özelliklerinin karşılaştırılması (Steel vs. Aluminum: How to Make the Best Choice for Your Product Design, n.d.)*

Özellikleri	Orta Karbonlu Çelik	Alüminyum Alaşım
Yoğunluk	7.75-7.89 g\cm^3	0.0160-3.63 g\cm^3
Akma Mukavemeti	245-1740 MPa	1.24-730 MPa
Korozyon direnci	Kötü	Mükemmel
Termal iletkenlik	21.9-52.0 W\m-K	1.48-255 W\m-K
Dövülebilirlik	İyi	Mükemmel

2.1. Ağırlık

Alüminyum çeliğe nazaran oldukça hafiftir. Aslında eşit hacimdeki iki parça için çelik, alüminyumun ağırlığının üç katı kadar olabilir. Uygulamada hangi metalin daha iyi dayanıklılığa sahip olduğunu belirlemek, yapılan tasarımın esnekliğine bağlı olacaktır. Örneğin, daha büyük bir alüminyum parça, çelik alternatifine göre daha düşük ağırlıkta daha fazla dayanıklılık sunabilir (*Steel vs. Aluminum: How to Make the Best Choice for Your Product Design*, n.d.).

2.2. Dövülebilirlik

Çeliğin yüksek mukavemetinin bir diğer dezavantajı, özellikle şekil karmaşıksa, onu farklı şekillerde işlemenin alüminyumdan daha zor olmasıdır. Çeliğin çok yüksek sıcaklıklara ısıtılmasıyla bu durumun bir şekilde üstesinden gelinebilir, ancak bu, maliyeti artırır ve diğer özelliklerden ödün verebilir. Öte yandan, alüminyumun soğuk veya sıcakken şekillendirilmesi nispeten kolaydır, ekstrüzyon ve haddeleme gibi imalat işlemleri için idealdir (*Steel vs. Aluminum: How to Make the Best Choice for Your Product Design*, n.d.).

2.3. Termal iletkenlik

Alüminyum genellikle çelikten çok daha iyi bir termal iletkendir. Genellikle ısı emiciler gibi ısı dağıtımının gerekli olduğu uygulamalarda örneğin otomobil radyatörlerinde ve klima ünitelerinde kullanılır (*Alüminyum ve Çelik Arasındaki Farklar Nelerdir?*, n.d.).

2.4. Korozyon Direnci

Sade karbon çeliği zayıf korozyon direncine sahiptir. Kolayca paslanır ve elementlere maruz kaldığında paslanmaya devam eder. Öte yandan alüminyum, yüzeyinde daha fazla oksidasyona karşı inert bir bariyer görevi gören koruyucu bir oksit tabakası oluşturur. Alüminyum, bozulmasına neden olacak bir ortama maruz kalmadığı sürece mükemmel korozyon direnci sağlamaya devam edecektir. **Tablo 3**'te Alüminyum ve çeliğin endüstride kullanım alanları gösterilmiştir (*Steel vs. Aluminum: How to Make the Best Choice for Your Product Design*, n.d.).

Tablo 3. *Alüminyum ve çeliğin endüstride kullanım alanları (Steel vs. Aluminum: How to Make the Best Choice for Your Product Design, n.d.)*.

Endüstri	Alüminyum	Çelik
Altyapı	Yan paneller gibi mimari ve kaplama uygulamaları Pencere ve kapı çerçeveleri, oluklar ve korkuluklar	Köprüler ve otoparklar gibi beton yapılarda çelik takviye Çelik destekler ve kirişler
Mekanik Ekipman	Borular Bazı depolama tankları	Traktörler, buldozerler ve vinçler Haddehaneler Çekiç ve kürek gibi el aletleri
Toplu taşıma	Uçak gövdesi, kanatları ve destek yapısı Araba gövdesi ve tekerlekleri Araba motorları	Araba çerçeveleri Tahrikli trenler Süspansiyon sistemleri
Ev aletleri	Cihaz gövdeleri ve çerçeveleri Kahve makineleri ve karıştırıcılar Fırınlar •	Çamaşır makineleri ve kurutucular Fırınlar
Spor Ekipmanları	Bisiklet gövdesi, tekerlekler ve gidonlar Kayak direkleri Beyzbol sopaları	Kaya tırmanışı ekipmanı Golf kulübü başkanları Bisiklet zincirleri, dişlileri ve kabloları Halter ekipmanı

3. Alüminyum ve günümüzdeki teknolojilerde kullanımı

Günümüzde alüminyum bazlı alaşımlar, pirinç, ısıl işlem görmüş bakır alaşımları, çinko bazlı alaşımlar vb. gibi demir dışı malzemelerde gelişme sağlanmaktadır. Alüminyum alaşımları + Çinko + Bakır karışımı, karıştırma döküm işlemiyle karıştırılarak etkili bir şekilde üretilmektedir. Alüminyum alaşımı-Zn-Cu alaşımları kaliteli özellikler, olağanüstü dayanıklılık sunar ve korozyon direncini geliştirir. Ayrıca, yapısal imalatta bronz, dökme demir ve

alüminyum alaşımları gibi malzemelerin yerini almaktadır. Alüminyum alaşımı-Zn-Cu alaşımları kullanılarak, geleneksel freze makineleri, halat kaldırma üniteleri vb. gibi yüksek yükleme uygulamalarında rulman üretimlerinde kullanılmaktadır (Mahendra Boopathi et al., 2013). Bu tür alaşımlar, düşük erime noktası, sunulan iyi dökülebilirlik karakteri, üstün esneklik doğa özellikleri, mükemmel mukavemet, geliştirilmiş sertlik, üstün yorulma mukavemeti, minimum yoğunluk, düşük sürtünme katsayısı, minimum aşınma oranı ve azaltılmış üretim maliyetleri gibi çok sayıda uygulama özelliği sağlamaktadır. Yüksek yorulma dayanımına sahip Al-Zn-Cu alaşımları, makinedeki dinamik parçaların ömrünü uzatmaktadır. Bu kompozitler, tüm çevre koşullara uygun korozyon direnci yüksek malzemelere dönüşmektedir. Bakır ilavesi, kompozitlerin boyutsal özelliklerini iyileştirir ve ısıl işlem sırasında deformasyonu azaltır (Krishna & Xavior, 2014; Prabhu Rubesh George et al., 2019).

%50 Alüminyum alaşımı(AA7079), %40 Çinko ve %10 bakır kullanılarak iyi mekanik özelliklere sahip (Çekme mukavemeti ve Darbe mukavemeti) hibrit kompozitlerin üretildiği çalışmada mekanik mukavemetin arttığı, aşınma oranının etkili bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir (Paul et al., 2021).

Alüminyum matrisli kompozitlerin (AMC'ler) geliştirilmesi için denenen çeşitli takviyeler, grafit, silisyum karbür, titanyum karbür, tungsten, bor, Al_20_3, uçucu kül, Zr, TiB_2'dir. Silisyum karbür, alümina ve titanyum karbür gibi sert takviyelerin eklenmesi kompozitlerin sertliğini, mukavemetini ve aşınma direncini artırır. Alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları çeşitli uygulamalarda ek avantajlar sağladığından hala yoğun araştırmaların konusudur. Bu alaşımlar, aşınmaya dayanıklı parçaların üretiminde dökme demir ve bronzun yerini almaya başlamıştır. Önceki çalışmalar, Al-matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin parçacık takviyesiyle artırılabileceğini göstermiştir. Partikül takviyeli metal matrisli kompozitler (MMC'ler) esas olarak, partiküllerin kolay elde edilebilmesi ve partikül takviyeli MMC'lerin üretimi için benimsenen ekonomik işleme tekniği nedeniyle kullanılmaktadır. Al alaşımı, çeşitli lifler, parçacıklar ve kıllarla takviye edilmiş MMC'ler için temel metal olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda geliştirilen kompozitlerin farklı türleri arasında, parçacık takviyeli metal matrisli kompozitler ve özellikle alüminyum temel malzemeleri, endüstriyel uygulamalar için aday olarak ortaya çıkmıştır (Krishna & Xavior, 2014).

SONUÇ

Alüminyum gelişmiş toplumların kullandığı en önemli metallerden biridir. Alüminyumun fiziksel özelliklerinin birleşimi, birçoğu modern yaşamın vazgeçilmezi olan çok çeşitli ürünlerde kullanılmasıyla sonuçlanır. Hafifliği ve elektrik iletkenliği nedeniyle, elektriğin uzun mesafelere iletilmesinde alüminyum tel kullanılmaktadır. Alüminyumun gücü, hafifliği ve işlenebilirliği,

yakıt tüketimini azaltma çabalarının artmasıyla birlikte hafif araçlar, vagonlar ve uçaklar dahil ulaşım sistemlerinde kullanımının artmasına sebep olmuştur.

Alüminyumun mükemmel termal özellikleri ve korozyona karşı direnci, iklimlendirme, soğutma ve ısı değişim sistemlerinde kullanılmasına yol açmıştır. Ayrıca dövülebilirliği, çeşitli ambalajlarda kullanılan çok ince tabakalar halinde yuvarlanmasına ve şekillendirilmesine olanak sağlamıştır. Özellikle, günümüz teknolojilerinde ağırlıktan tasarruf çalışmalarında Uçak endüstrisi ve otomotiv sektörlerinde de büyük önem kazanmaktadır (Greene & Decicco, 2000). Çoğu metal, alüminyumdan yaklaşık 3 kat daha ağırdır. Bu durum, alüminyumun yaygın olarak tercih edilmesini sağlamıştır (*OECD Global Forum on Environment Focusing on Sustainable Materials Management*, n.d.). Alüminyum iler ki zamanlarda da hep tercih edilmeye ve yaygın olarak kullanılmaya devam edecek bir element olma özelliğini devam ettirecektir.

KAYNAKLAR

Aluminium and Fire. (n.d.). https://www.alfed.org.uk/files/Fact sheets/11-aluminium-and-fire.pdf

Aluminium Design and Construction - John Dwight - Google Kitaplar. (1999). Taylor & Francis E-Library. https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=VU-2uDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Aluminium+Design+and+Construction,+John+Dwight+MSc,+FI+Struct+E+Former+Reader+in+Structural+Engineering,+University+of+Cambridge&ots=vrhCIWY-oK&sig=cnBZrJDZG-5LMGii-PeHm94w4MAE&re

Aluminum casting Advantages. (n.d.). https://www.investmentcastingpci.com/blog/aluminum-casting-advantage

Alüminyum. (2023). https://www.celikleraluminyum.com.tr/aluminyum/

Alüminyum Çelik Karşılaştırma. (2023). https://borsenboru.com/blog/celik-ve-aluminyum-arasindaki-farklar-nelerdir

Alüminyum ve Çelik Arasındaki Farklar Nelerdir? (n.d.). https://www.censasisilislem.com/aluminyum-ve-celik-arasindaki-farklar-nelerdir/

Alüminyum ve Özellikleri (Çelikler Alüminyum A.Ş.). (n.d.). https://www.celikleraluminyum.com.tr/aluminyum/

Baker, J. F., & Roderick, J. W. (1948). *The strength of light alloy struts (No. 3)*.

DOĞAN, E. (2006). *Alüminyum Alaşımlarının Deformasyon Ve Yeniden Kristalleşme Davranışı*. İstanbul Teknik Üniversitesi.

F.M.Mazzolani. (1995). *Aluminium Alloy Structures* (Second). E&FNSpon.

Greene, D. L., & Decicco, J. (2000). Engineering-Economic Analyses of Automotive Fuel Economy Potential In The United States 1. *Annu. Rev. Energy Environ*, *25*, 477–536. www.annualreviews.org

Hombergsmeier, E., & Works, E. D. I. (2007). *Magnesium for aerospace applications*. In 2nd international conference and exhibition "Magnesium—Broad Horizons.

Krishna, M. V., & Xavior, A. M. (2014). An Investigation on the Mechanical Properties of Hybrid Metal Matrix Composites. *Procedia Engineering*, *97*, 918–924. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2014.12.367

Mahendra Boopathi, M., Arulshri, K. P., & Iyandurai, N. (2013). Evaluation of Mechanical Properties of Aluminium Alloy 2024 Reinforced with Silicon Carbide and Fly Ash Hybrid Metal Matrix Composites. *American Journal of Applied Sciences*, *10*(3), 219–229. https://doi.org/10.3844/AJASSP.2013.219.229

Ö. Akman, S. Atasever, E.Güçlü, G. Gümüş, T. Ç. (2011). *Alüminyum ve İnsan*.

OECD Global Forum on Environment Focusing on Sustainable Materials Management. (n.d.).

Paul, D. L. B., Victor, D. P. M., & Yoganandam, K. (2021). Mechanical properties analy-

sis of hybrid composites prepared by stir casting approach. *Materials Today: Proceedings*, *46*, 4215–4218. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.03.035

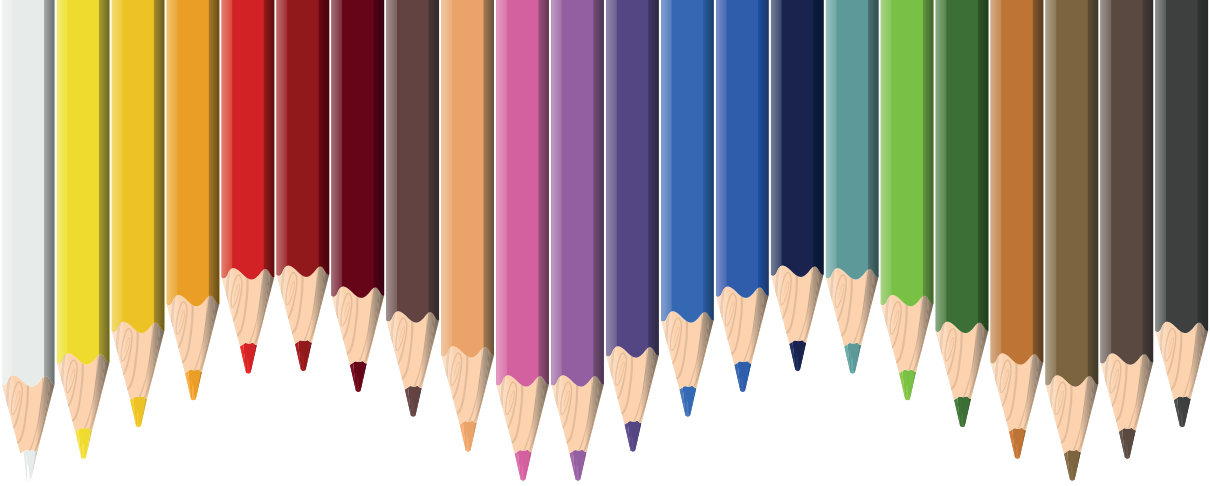
Periyodik Sistem – Periyodik Özellikler. (n.d.). https://bikifi.com/biki/periyodik-sistem-periyodik-ozellikler/

Polmear, I. J. (1995). *Light alloys*.

Prabhu Rubesh George, I., Kantharaj, S., Mohanasundaram, G., Babu Rao, H., & Gabriel, D. D. J. (2019). Article ID: IJMET_10_02_163 15-Cite this Article. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, *10*(2), 1584–1593. http://iaeme.com/Home/journal/IJMET1584editor@iaeme.comhttp://iaeme.com/Home/issue/IJMET?Volume=10&Issue=2http://iaeme.com/Home/issue/IJMET?Volume=10&Issue=2http://iaeme.com/Home/journal/IJMET1585

Starke, E. A. (2005). Alloys: Aluminum. *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*, 18–24. https://doi.org/10.1016/B0-12-369401-9/00534-9

Steel vs. Aluminum: How to Make the Best Choice for Your Product Design. (n.d.). https://www.gabrian.com/steel-vs-aluminum/#Weight



Bölüm 28

ZAMAN ETÜDÜ TEKNİĞİ İLE İŞ ÖLÇÜMÜ: SEKTÖREL BİR UYGULAMA

Özlem Çomaklı Sökmen[1]

1 Özlem Çomaklı Sökmen, Dr. Öğr. Üyesi, : Erzurum Teknik Üniversitesi, ORCID ID: 0000-0001-8765-0038

GİRİŞ

Varlıklarını ve gelişimlerini sürdürebilmek için işletmelerde verimlilik kavramı önemli bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Son teknolojilere göre üretilmiş makine, donanım ve modern üretim teknolojilerine sahip tesislerle verimlilik artırılabilir. Ancak büyük sermaye ve zaman gerektiren bu yöntemler tüm işletmeler için her zaman mümkün olmayabilir. Bu sebeple süreç iyileştirme çalışmalarında eldeki kaynakları kullanarak yapılabilecek düzenlemelerle maliyet azaltma ve verimliliği artırma tekniklerinden yararlanılabilir. Bu tekniklerden birisi olan iş etüdü; sistemde herhangi bir ek maliyet gerektirmeyen veya çok az maliyet gerektiren, etkinliği artırabilen bir yöntemdir. İş etüdü insan çalışmasını gerektiren bir işin veya iş grubunun tüm yönleriyle incelenmesinde kullanılan, metot etüdü ve iş ölçümü tekniklerini içeren genel bir terim olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla işi yapmanın en ekonomik yolunu bulmayı amaçlayan iş etüdünün iki ana unsuru metot etüdü ve iş ölçümüdür. Metot etüdü; gereksiz iş elemanlarını ortadan kaldırmayı, gerekli iş elemanlarını gerçekleştirmenin ise en çabuk ve en iyi yöntemini bulmayı amaçlayan bir tekniktir. İş ölçümü ise işin yürütülmesinde gerekli olan zamanı saptayarak işin toplam zamanının uzamasına sebep olan, etkin olmayan zamanın çıkarılmasını amaçlamaktadır (Kurt ve Dağdeviren, 2011).

Bu çalışma kapsamında ele alınan ve iş ölçüm tekniklerinden biri olan zaman etüdü verimlilik çalışmalarının temelini oluşturan bir tekniktir. Bu bağlamda verimlilik zamanı doğru kullanmakla orantılıdır. Zaman etüdü bir işin belirli bir performans düzeyinde yapılabilmesi için gerekli olan zamanın tespitinde kullanılmakta olup; ekonomiklik, karlılık ve verimlilik gibi önemli sonuçlar elde etmeye yönelik çalışmaları içermektedir. Bu çalışmanın amacı, bir şirketin sunduğu hizmet sürecini incelemek ve zaman etüdü tekniğini kullanarak çalışanların işi yapabilmesi için gerekli olan standart zamanı tespit etmektir. Bu yolla faaliyetlerin zaman etüdü sonucunda daha etkin ve verimli olabilecek şekilde düzenlenmesine katkı sağlanması da hedeflenmektedir. Çalışma kapsamında bir ilimizde faaliyet gösteren bir kargo şirketinin kargo kabul birimi ele alınmıştır. Uygun zaman aralıklarında gerekli ölçümler yapılmış, veri toplama aşamasından sonra zaman etüdü yardımıyla ortalama işlem süreleri belirlenmiş ve söz konusu işin adımları için gerekli zaman tespit edilmiştir. Uygulamada dijital kronometre ve (Reichsausschuss Für Arbeitszetermittlung) REFA zaman ölçüm formu kullanılmıştır. Çalışmanın sonraki bölümlerinde iş etüdü ve zaman etüdü kavramları ele alınmış ve sonrasında uygulama ve sonuçlara ilişkin değerlendirmelere yer verilmiştir.

İŞ ETÜDÜ

Metot etüdü ve iş ölçüm tekniklerini içeren genel bir terim olan iş etüdünün farklı tanımları yapılabilir. Uluslararası çalışma örgütü ILO (International Labour Office) tarafından yapılmış olan tanıma göre iş etüdü; tanımlanmış bir faaliyetin gerçekleşmesinde gerekli malzeme ve insan kaynaklarının en uygun

şekilde kullanımını sağlamayı amaçlayan, iş ölçümü ve metot etüdü tekniklerinin oluşturduğu bir terimdir. Alman İş Etüdü ve İşletme Organizasyonu'nun tanımına göre ise iş etüdü; iş sistemlerinin incelenmesi ve düzenlenmesine ilişkin yöntem ve deneyimlerin, çalışan kişinin iş yapabilme gücünü ve gereksinimlerini de göz önünde tutarak işin iyileştirilmesi ve işletmenin daha ekonomik çalışmasını sağlamak amacıyla uygulanmasıdır (REFA, 1988).

İş etüdüyle ilgili yapılan yukarıdaki tanımlar ve literatürde bulunan diğer tanımlar incelendiğinde iş etüdünün insan, makine ve malzeme sistemlerinin dengeli ve verimli çalışması ile ilgili bir çalışma alanı olduğu söylenebilir. Buradan hareketle iş etüdütün amaçları genel olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir (Akyüz, 2012; Gencer, 2006; Kurt ve Dağdeviren, 2011):

- İşi yapmanın en ekonomik yolunu bulmak,
- Önerilen metot ile gerekli malzeme ve araçları standart hale getirmek,
- Belirlenmiş bir verimlilik düzeyinde çalışmak üzere eğitilmiş bir işçinin işi yapması için gerekli olan zamanı tespit etmek,
- Gereksiz faaliyetlerden kurtulmak,
- Gerekli faaliyetleri mümkün olan en ekonomik şekilde düzenlemek,
- İş ile ilgili doğru zaman standartlarını belirlemek,
- Üretimde kullanılan faktörlerden yararlanma oranını artırmak,
- İş gücünü eğitmek,
- Mevcut çalışma koşullarından daha iyi çalışma koşullarına geçmek.

İş etüdünü oluşturan iki ana teknikten ilki olan metot etüdü; iş elemanlarından gereksiz olduğu düşünülenlerin süreçten çıkarılması, gerekli olanların ise en yüksek verimlilik düzeyinde gerçekleştirilmesi için yeni metotların geliştirilmesidir (Çolak vd., 2016). Dolayısıyla metot etüdünde daha kolay ve etkin yöntemler uygulamak ve maliyetleri azaltmak adına var olan ve önerilen çalışma şekillerinin sistematik şekilde kaydedilmesi ve mevcut sistemin eleştirel bir gözle incelenmesi söz konusudur (Kurt ve Dağdeviren, 2011). İş etüdü çalışmalarında öncelikle metot etüdü çalışmaları yürütülmeli ve bu yolla en etkin ve düşük maliyete sahip olan metot belirlendikten sonra söz konusu iş için zaman standartının belirlenmesi yapılmalıdır. Metot etüdü ile iş etüdünün amaçlarından olan "gereksiz faaliyetleri ortadan kaldırma" ve "gerekli faaliyetleri ise mümkün olan en ekonomik şekilde düzenleme" amaçları gerçekleştirilmiş olur.

Metot etüdünden sonra iş etüdünün ikinci temel tekniği iş ölçümüdür. İş ölçümü en basit anlamıyla standartlaştırılmış iş üzerinde bazı ölçümler

yoluyla işin ne kadar sürede yapılacağını tespit etme çalışmalarıdır. İş ölçümü, kalifiye bir işçinin, belli bir işi, belli bir performans düzeyinde yapabilmesi için gereken zamanı saptamak amacıyla hazırlanmış tekniklerin uygulanması olarak tanımlanır (Kanawaty, 2004). İş ölçümü, bir işi yapmak için gerekli süreyi belirlerken kayıp zamanı da ortaya koyarak zaman kaybını engellemektedir (Seifermann vd., 2014). Dolayısıyla iş ölçümü ile toplam zaman içindeki etkin olmayan süre çıkarılmaktadır. İş ölçümü sadece etken olmayan sürenin varlığını ortaya çıkarmaz, aynı zamanda işin yapılması için standart zamanların belirlenmesinde de kullanılır (Akal, 1997). Bu süreye işçinin kişisel ihtiyaçları ve beklenmeyen gecikmeler için eklenen toleranslarla bulunan değere standart zaman denir (Kobu, 2010). İş ölçümü teknikleri uygulama şekillerine göre dolaysız iş ölçümü teknikleri ve dolaylı iş ölçümü teknikleri olmak üzere ikiye ayrılabilir. Dolaysız iş ölçüm teknikleri ölçülen işin başında bir zaman ölçer ile doğrudan gözlem yoluyla yapılmaktadır. Zaman etüdü, iş örneklemesi ve grup zamanlama tekniği bu tekniklerdendir (Adem vd., 2022). Bir diğer yöntem olan dolaylı iş ölçüm teknikleri ise işin başında doğrudan ölçüm gerektirmeyen standart zamanlar, standart veri ve formül kullanımı yoluyla bulunan tahmin hesaplamaları ya da sentetik zaman sistemleri (P.T.S) kullanımıyla elde edilen bilgilerden oluşan tekniklerdir (Kurt ve Dağdeviren, 2011).

ZAMAN ETÜDÜ

En sık kullanılan iş ölçümü tekniklerinden biri olan ve ilk kez F. W. Taylor tarafından geliştirilen zaman etüdü farklı kaynaklarda değişik şekillerde tanımlanmıştır. Zaman etüdü, nitelikli ve iyi eğitilmiş bir işçinin belirli bir işi yapması için gerekli olan zamanın belirlenmesidir (Barnes, 1991). Bir başka tanıma göre ise zaman etüdü, belli şartlar altında yapılan belirli bir işin elemanlarının zamanını ve derecesini kaydetme yoluyla toplanan verileri çözümleyerek, o işin tanımlanan bir çalışma hızında yapılabilmesi için gerekli olan zamanı saptamakta kullanılan bir iş ölçme yöntemidir (Şenyiğit vd., 2021).

İlgili literatür incelendiğinde farklı sektörlerde iş etüdü tekniklerini kullanan oldukça fazla çalışma olduğu görülmüştür. Zaman etüdüyle iş ölçümü yapan çalışmaların bir bölümüne bu bölümde yer verilmiştir. Şen ve Güven (2002) Ankara Şeker Fabrikasında bir zaman etüdü çalışması yaparak şeker üretimine ilişkin standart zamanı saptamışlardır. Lopez (2005), bazı tamir ve bakım servislerinde standart zaman tahmin modeli geliştirmeye yönelik bir çalışma yapmıştır. Bircan ve İskender (2005), sağlık sektöründe verimlilik değerlendirmesi için bir hastanede endoskopi işlemi üzerinde zaman etüdü çalışması yapmış ve etkin olmayan zamanları belirlemişlerdir. Gümüşay (2006), ekim makinesi üretimi yapan bir işletmede akış gruplarına ilişkin standart zamanları belirlemek için zaman etüdü çalışması yürütmüştür. Yaman vd. (2008) çalışmalarında traktör emniyet kabini imalatı yapan bir

işletmede metot ve zaman etüdü tekniklerini kullanarak detaylı bir iş etüdü çalışması yapmış ve standart zamanı belirlemişlerdir. Cengiz ve Orbak (2010), bir süt ve süt ürünleri işletmesinde verimliliğin artırılmasına yönelik iş ve zaman etüdü çalışması yapmışlardır. Bilgin (2014) çalışmasında bir ambalaj firmasında süreç iyileştirmesine yönelik verimliliği artırmak amacıyla iş etüdü uygulaması yürütmüştür. Malkoçoğlu vd. (2013) çalışmalarında mobilya sektöründe faaliyet gösteren bir fabrikanın levha kesim planlarına yönelik standart zamanı belirlemek için zaman etüdü çalışması yapmışlardır. Ünal (2014) çalışmasında konfeksiyon sektöründe kumaş serim işlemine yönelik standart birim süreyi belirlemek amacıyla REFA zaman ölçüm formu kullanarak zaman etüdü yapmıştır. Bures ve Pivodova (2015) bir otomotiv montaj üretiminde REFA metodolojisi ile Zaman Ölçüm Yöntemlerini (MTM) ve Önceden Planlamış Zaman (MOST) sistemlerini karşılaştırmışlardır. Korkmaz (2016) çalışmasında lojistik işletmelerini ele almış ve seçilen işlerin etüt çalışmasını yaparak iş ve zaman standartlarının belirlenmesini amaçlamıştır. Çolak vd. (2016), bir beyaz eşya yan sanayi işletmesinde üretim için kullanılan sürenin iyileştirilmesi amacıyla Metot Zaman Ölçümü yöntemini kullanmışlardır. Yücel ve Diklik (2021) çalışmalarında mobilya endüstrisinde bir işletmenin üretiminin montaj aşamasında zaman etüdü çalışması yapmışlardır. Çalışmada söz konusu iş için standart zamanı elde etmişler ve sonuçlardan hareketle işletmenin üretim kapasitesi ve verimliliğine ilişkin değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Aksuoğlu ve Yıldız (2022) çalışmalarında bir kamu kurumunda işgören verimliliğini ölçmek için REFA metodunu kullanarak zaman etüdü çalışması yapmışlardır. Söz konusu çalışma insan faktörünü dikkate alması yönüyle diğer çalışmalardan ayrılmaktadır.

Bu çalışmalardan da anlaşılabileceği üzere zaman etüdü genel olarak standart süre, performans ve kapasite planlaması tespitinde kullanılsa da; verimlilik, karlılık, iş ve üretim planlama gibi konularda da zaman etüdünden yararlanılmaktadır. Ayrıca çalışmalar incelendiğinde zaman etüdünün daha çok üretim sektöründe uygulandığı dikkat çekmektedir. Hizmet sektöründe işgörenlerin, sunulan hizmet kalitesi ve sayısını büyük oranda etkilediği göz önünde bulundurulduğunda işgören verimliliğinin bu sektörlerde işletme performansı üzerinde oldukça etkili bir etmen olduğu söylenebilir (Aksuoğlu ve Yıldız, 2022). Buradan hareketle bu çalışmada bir ilimizde faaliyet gösteren bir kargo şirketinin şubesinde kargo kabul birimindeki çalışanların iş süreçleri incelenmiş ve bu sürece ait standart zaman hesabı yapılmıştır.

ZAMAN ETÜDÜ ARAÇLARI VE AŞAMALARI

Zaman etüdü yapabilmek için kronometre, etüt tablası ve zaman etüdü formu gibi bazı genel araç ve formlara ihtiyaç vardır. Bunun dışında saat, kalem, hesap makinesi ve mezure, çelik cetvel vb. diğer ölçüm araçları da yardımcı araçlar olarak kullanılmaktadır (Akyüz, 2012).

Zaman etüdü tekniğinin aşamaları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Doğruer, 2016; Kanawaty, 2004; Kurt ve Dağdeviren; 2011, Yücel, 2019):

1. Zaman etüdü yöntemi uygulanacak iş, işçi ve iş istasyonunun seçilmesi,

2. Çevre koşulları ve çalışanlar ile ilgili bilginin toplanması ve kaydedilmesi,

3. Zaman etüdü yapılacak işin tanımlanarak ölçüme uygun şekilde elemanlarına ayrılması,

4. Her iş elemanı için gözlem ve ölçümlerin yapılarak kaydedilmesi,

5. Gereken gözlem sayısının hesaplanması,

6. Çalışanın performans derecesinin saptanması,

7. Gözlemi yapılan zamanların temel zamanlara dönüştürülmesi,

8. Normal zamana eklenecek payların (toleransların) tespit dilmesi,

9. Zaman etüdü yapılan işin standart zamanının hesaplanması.

BULGULAR

Çalışmada bir ilimizde bulunan bir kargo şirketinin kargo kabul süreci incelenerek bu sürece ilişkin standart zamanın belirlenebilmesi amacıyla zaman etüdü çalışması yapılmıştır. Zaman etüdü uygulamasına başlamadan önce çalışmanın amaç ve önemi açıklanarak çalışanlara gerekli bilgi verilmiştir. Gözlem yapılacak olan çalışanın seçiminde normal tempoda çalışan tecrübeli bir çalışan tercih edilmiştir. Bu birimde 2 kişi çalışmaktadır. Gözlem yapılan çalışan bu işte 5 yıldır çalışmakta olan 35 yaşında bir kadındır. Etüt başlamadan önce iş ile ilgili bilgiler (ısı, nem, yeterli ışıklandırma vb. çevre koşulları) çalışanlardan öğrenilerek ve gözlem yoluyla toplanarak kaydedilmiştir.

Kargo kabul işleminde süreç kısaca şu şekilde gerçekleşmektedir: Sırada bekleyen müşteri işlem yaptırmak için gelmektedir. Müşterinin geliş nedeni sorulmaktadır. Cevap kargo gönderimi olarak verildi ise sırasıyla gönderici ve alıcıya ait bilgiler (T.C. Kimlik Numarası, ad soyad, cep telefonu numarası ve adres gibi) alınıp bilgisayar ortamında şirketin kullandığı sisteme kaydedilmektedir. Bu gönderi hazırlama ekranında ayrıca kargonun alıcı ödemeli ya da gönderici ödemeli olma durumuna göre bir seçenek seçilmektedir. Daha sonra gönderi alınmakta ve içerik türü belirlenmektedir. Kargo cinsi (dosya, paket, koli, sandık, çuval gibi) belirlendikten sonra ise

alınan kargo, gönderi türüne göre paketlenmektedir. Bazı gönderiler hazır ve uygun halde paketli olarak gelmektedir. Bu sebeple paketleme süresi değişkenlik gösterebilmektedir. Sonrasında gerekli ise boyut ölçümü (desi) ve/veya ağırlık (kg) ölçümü işlemi yapılmaktadır. Ölçüm tartım sonuçları, içerik bilgisi ve gönderi türü sistemde kargo-fatura bilgileri sayfasına girilmektedir. Bu sayfada fiyat hesapla düğmesine tıklanarak ücret tutarı sistemde hesaplanmaktadır. Fiyat bilgisi müşteri ile paylaşılıp onay alındıktan sonra kaydet düğmesine basılıp barkod yazıcısından barkod alınmaktadır. Alınan barkod gönderinin üzerine yapıştırılmaktadır. Son olarak kredi kartı veya nakit olarak ödeme alınmakta ve/veya bilgi fişi verilmektedir. İşlemin tamamlandığı belirtilip süreç sonlandırılmaktadır.

Bu gözlem değerlendirilerek ele alınan kargo kabul sürecine ilişkin gözlemlenen faaliyetler elemanlarına ayrılmış ve iş akış sırası belirlenmiştir. Kronometre ile ölçüm yapılarak çalışanın bu işi gerçekleştirmesi için gerekli elemanlara ait zaman kaydedilmiştir. Gözlem yapılırken tek zamanlı ölçüm yöntemi kullanılarak her eleman için kronometre sıfırlanmış ve ölçülen değer kaydedilmiştir. Ölçüm zamanlarının değerlendirilmesinde REFA standart programı kullanılmıştır. Gereken sayıda gözlem yapılmış ve çalışanın performansı derecelendirilmiştir. Kullanılan derecelendirmede "100" standart hızda çalışmayı ifade etmektedir. Performans değeri beş ölçümde bir kez belirlenmiştir. Her akış dilimi için ortalama performans değeri, ortalama çevrim süresi ve temel zaman değerleri sırasıyla (1), (2) ve (3) ile verilen formüller ile hesaplanmıştır. (Kurt ve Dağdeviren, 2011). Birinci akış dilimi için ortalama performans değeri 103,3, ortalama çevrim süresi 9,6 sn ve temel zaman değeri 9,9 sn olarak hesaplanmıştır.

$$\bar{L} = \frac{\sum L}{n} \tag{1}$$

$$\bar{t}_i = \frac{\sum t_i}{n} \tag{2}$$

$$t = \frac{\bar{L}}{100}\,\bar{t}_i \tag{3}$$

Akış dilimlerinin temel zamanları toplanarak işin temel zaman değeri 341 sn olarak elde edilmiştir. Ardından kargo kabul işlemine ait standart sürenin belirlenmesi için dinlenme payı ve dağılım zamanı payları hesaplanıp temel zamana eklenmiştir. Payların tayini için Kobu (2010) tarafından kullanılan ve Tablo 1 ile sunulan değerler esas alınmıştır. Buna göre çalışma koşulları göz önünde bulundurulduğunda faktörlerden kişisel ihtiyaçlar için pay %3 olarak belirlenmiştir. Yorulma payı olarak ise paylar; bedensel çaba yorgunluğu ve beceri için %8, düşünsel çaba yorgunluğu için %1, çalışma esnasındaki duruş pozisyonu için (oturarak %1, eğilme ve uzanma %4) %5 olarak toplamda %14 belirlenmiştir. Bu paylar temel zaman değerine eklenmiş ve kargo kabul

sürecine ait standart zaman 399 sn olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla normal çalışma hızında ve belirlenen çalışma tekniğiyle kargo kabul işleminin yapılma süresi 6,7 dakika olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Dinlenme Payları (Kobu, 2010)

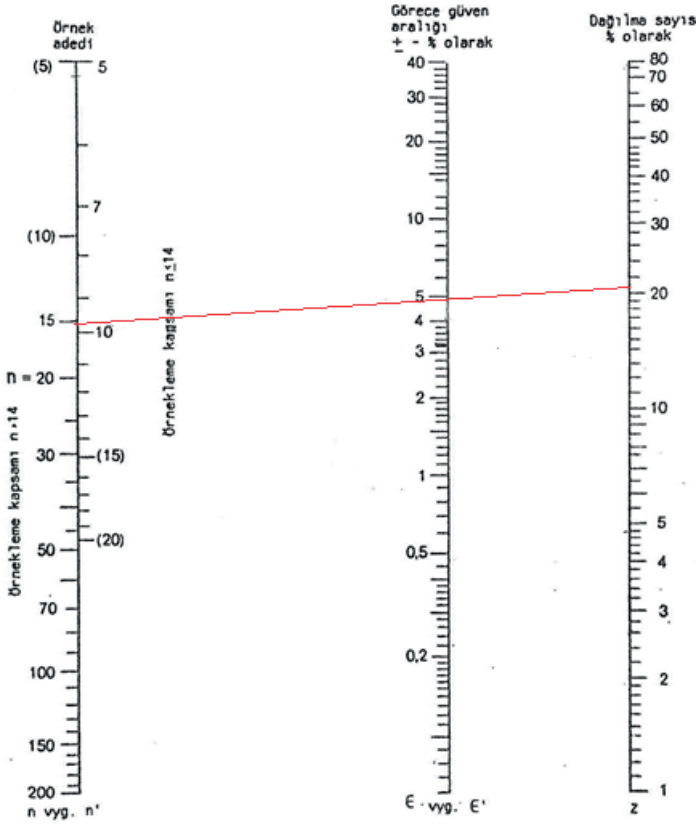
DİNLENME PAYLARI	
FAKTÖRLER	**PAYLAR (%)**
A)KİŞİSEL İHTİYAÇLAR	2-5
B) YORULMA PAYLARI	
1) Bedensel Çaba Yorgunluğu ve Beceri	
Çok hafif	2
Hafif ve ustalık isteyen	4
Orta ağırlıkta ve ustalık isteyen	8
Ağır	16
Çok ağır	24
2)Düşünsel Çaba Yorgunluğu	
%30-40 yoğunluk	1
%41-50 yoğunluk	2
%51-75 yoğunluk	4
%76 ve fazlası yoğunluk	8
3) Çalışma Esnasındaki Duruş Pozisyonu	
Oturma	1
Ayakta	2
Eğilme ve uzanma	4
Yürüme	10
4) Gürültü	
Normal sesle konuşmak	0
Konuşmak için ses yükseltmek gerekirse	1
Bağırarak konuşulabiliyorsa	2
Gürültü konuşmayı engelliyorsa	4
Düzensiz ve sürekli normal gürültü varsa	1
5) Göz Yorgunluğu	
Çıplak gözle yapılan işler	0
Gözlük kullanılıyorsa	4
Mikroskop ve benzeri cihazlar kullanılıyorsa	6
6) Çevre ve Ortam Şartları	
Büro ve benzeri yerler	0
Duman ve yağ kokusu olan yerler	3
Aşırı rahatsızlık veren unsurlar varsa	6
Aşırı soğuk ve sıcak ortamlarda	6
Zararlı kimyasal maddelerin bulunduğu yerlerde	6
C) GECİKME PAYLARI	
Dinlenme araları verilmesi (çay içme ve benzeri gibi)	0
Arızi	1-5
Hazırlık	0

Sonraki aşamada zaman ölçümü istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Çevrimsel akışa göre istatistiksel analizde çevrim sayısına (n) bağlı olarak k değeri belirlenmiştir (n=15, k=3). Sonrasında $\bar{t}_z$ çevrim zamanları ortalaması ve $\bar{R}_z$ değer aralığı ortalamaları değerleri sırasıyla 340,3 sn ve 70 sn olarak hesaplanmıştır. Bu değerler kullanılarak dağılım sayısı Z 20,6% olarak

bulunmuştur. Dağılım sayısı (4) ile verilen formül yardımıyla hesaplanmaktadır (Kurt ve Dağdeviren, 2011).

$$Z = \frac{\bar{R}_z}{\bar{t}_z} \times 100 \qquad (4)$$

Ardından Şekil 1'de verilen nomogram cetveli kullanılarak ε değeri belirlenmiştir. Dağılım sayısı Z (20,6) çevrim sayısı (n=15) ile kesiştirilerek ε değeri yaklaşık %4,9 olarak elde edilmiştir. Elde edilen değer %5'ten küçük olduğu için elde edilen sonuçların %95 güvenilirliğe sahip olduğu ve ek gözlem gerektirmediği tespit edilmiştir.



Şekil 1. Nomogram Cetveli

Elde edilen sonuçlara %95 düzeyinde güvenilmek isteniyorsa ek olarak yapılması gereken gözlem sayısı (5) ile verilen formül ile de hesaplanabilir. Formülde N' yapılması gereken gözlem sayısını, N mevcut durumda yapılan gözlem sayısını; X ise akış dilimine ait ölçüm değerlerini ifade etmektedir (Kurt ve Dağdeviren, 2011).

$$N' = \left[\frac{40\sqrt{N\sum X^2 - (\sum X)^2}}{\sum X}\right]^2 \quad (5)$$

İlgili sürecin akışına ilişkin oluşturulan iş elemanları, belirlenen zaman değerleri ve formüller kullanılarak yapılan hesaplama sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kargo Kabül Süreci Zaman Ölçüm Formu

Akış Dilimi ve Ölçme Noktası		Oranlama Miktarı	Çevrim	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	$\frac{\sum L}{n}$	$\bar{L}$	$t = \frac{\bar{L}}{100}\bar{t}_i$
			m_z																$\frac{\sum t_i}{n}$	$\bar{t}_i$	
1	Müşterinin gelmesi	1	L					105					105					100	$\frac{310}{3}$	103,3	9,9
			t	12	8	10	6	8	7	13	6	8	11	14	8	12	12	9	$\frac{144}{15}$	9,6	
	Geliş nedenini sorma		F																		
2	Gönderici ve alıcıya ait bilgileri sorma	1	L					110					110					100	$\frac{320}{3}$	106,7	125,3
			t	132	88	110	153	94	75	97	141	157	106	96	160	144	94	114	$\frac{1761}{15}$	117,4	
	Bilgileri sisteme kaydetme		F																		
3	Gönderiyi alma	1	L					100					100					100	$\frac{300}{3}$	100	15,7
			t	15	13	8	20	28	7	12	9	18	28	20	27	14	6	11	$\frac{236}{15}$	15,7	
	Gönderi içeriği ve kargo cinsini belirleme		F																		
4	Uygun paket ile paketleme	1	L					100					100					100	$\frac{300}{3}$	100	72,7
			t	9	143	102	56	12	200	73	6	11	18	25	4	17	226	188	$\frac{1090}{15}$	72,7	
	Paketi ölçüm yerine ve/veya tartıya bırakma		F																		
5	Ölçüm (ds) ve/veya	1	L					85					95					90	$\frac{270}{1}$	90	34,1

	ağırlık (kg) hesaplama		t	43	36	51	25	29	14	23	57	26	47	62	49	56	21	30	$\frac{569}{15}$	37,9	
	İşlemi bitirip bilgileri sisteme girme		F																		
6	Sistemden fiyat hesaplama	1	L					100					110					105	$\frac{315}{3}$	105	14,1
			t	12	7	8	18	19	12	16	24	10	17	14	12	13	9	10	$\frac{201}{15}$	13,4	
	Müşteri onayı alıp kaydet düğmesine basma		F																		
7	Barkod yazıcıdan barkod alma	1	L					100					100					100	$\frac{300}{3}$	100	10,3
			t	12	6	8	5	26	10	10	6	13	14	9	8	14	7	7	$\frac{155}{15}$	10,3	
	Bakodu gönderi paketine yapıştırma		F																		
8	Ödeme alma ve/veya bilgi fişi verme	1	L					100					90					90	$\frac{280}{3}$	93,3	58,9
			t	70	66	74	48	91	43	73	49	59	62	96	74	68	35	40	$\frac{948}{15}$	63,2	
	İşlemi bitirme		F																		
n = 15		**k = 3**	t_z *çevrim zamanı*	305	367	371	331	307	368	317	298	302	303	336	342	338	410	409	**5104**		**341**
$\bar{t}_z = \frac{\sum t_z}{n}$ = 5104/15=340,3		R_z *Her 5 çevrim için değer aralığı*		66					70					74					**210**		
$\bar{R}_z = \frac{\sum R_z}{k}$ = 210/3=70		$Z = \frac{\bar{R}_z}{\bar{t}_z} \times 100$ = (70/340,3)100= 20,6%							$\varepsilon = 5$ $\varepsilon' = 4,9$					$n' = 0$							

SONUÇ

Verimlilik ve kalite yalnızca üretim sürecinin sonunda üretilen ürün ya da sunulan hizmet için gerçerli bir kavramlar değildir. Bu kavramlar aynı zamanda üretim veya hizmetin gerçekleştiği çalışma hayatı için de önemlidir. Bu bağlamda bu çalışma kapsamında bir ilimizde faaliyet gösteren bir kargo şirketinin kargo kabul birimi ele alınarak sürecin incelenmesi ve sürece ilişkin standart zamanın zaman etüdü metoduyla değerlendirilmesi amaçlanmıştır. İlk olarak gözlem yapılarak süreç detaylı bir şekilde incelenmiş ve akış dilimlerine ayrılmıştır. Ölçüm yoluyla iş elemanlarına ait süreler belirlenip kaydedilmiştir. Zaman etüdü çalışmasıyla elde edilen temel zaman değerine gerekli ek paylar ilave edilmiş ve yapılan etüdün sonucuna göre normal çalışma hızında ve belirlenen çalışma tekniğiyle kargo kabul işlemine ait standart zaman 399 sn olarak belirlenmiştir. Eklenen paylar inceleme sırasında yapılan gözlemlere göre belirlenmiştir. Örneğin kargo alım ve tartım işlemlerinde oturma pozisyonunda çalışan işgören uzanma ve eğilme pozisyonlarına geçmektedir. Dolayısıyla çalışma esnasındaki duruş pozisyonunda bu pozisyonlara karşılık gelen paylar alınmıştır. Çalışma kapsamında yapılan gözlemler sırasında çalışan verimi ve standart zaman üzerinde etkisi olan bazı durumlar göze çarpmıştır. Genellikle müşterilerin işlemlerini yaptırmak için sıraya girdikleri ancak zaman zaman bu düzenin bozulduğu saptanmıştır. Müşterilerden bazılarının sıraya dikkat etmeden işlem yaptırmak istediği, bazılarının ise çalışanın yaptığı işi kesintiye uğratarak bilgi almak için soru sorduğu gözlemlenmiştir. Bu durum çalışanın dikkatinin dağılmasına ve veriminin düşmesine yol açmaktadır. Bunun önüne geçebilmek için sıramatik sisteminin kullanılması önerilmektedir. Bu sayede sıra numarası gelen müşterinin işlem yaptırması ve sıralanan aksamalardan ötürü işin süresinin gereğinden fazla uzama riskinin azalması beklenmektedir. Zaman etüdü tekniği, çalışma hızının saptanıp bununla standart çalışma performansı arasında bağıntı kurulabilmesi için performans değerlendirme gibi metotların da kullanımını gerektirmektedir (Şenyiğit vd., 2021). Çalışan performansına göre verilen tempo değerleri incelendiğinde bazı akış dilimlerinde tempo değerinin yüksek iken bazı akış dilimlerinde ise daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Zaman etüdü; verimliliğin, süreç içindeki kayıp zamanların ve yönetimden kaynaklı aksamaların tespitinde sektörde faaliyet gösteren işletme ve çalışanlar için yararlı bilgiler sağlayan bir çalışmadır (Yücel ve Dilik, 2021). Bu çalışma ile; mevcut çalışılan zaman etüdü konularına ilişkin araştırmacılara gelecek çalışmalar için bir vizyon sağlamak ve sektörde çalışanlar ve/veya çalışmayı düşünenler için genel bir bilgi sunmak amaçlanmaktadır. Gelecek çalışmalarda, hesaplanan standart zaman değeri ile çalışanların işi yapmak için harcadıkları süreler karşılaştırılarak işgören performanslarına ilişkin değerlendirmeler yapılabilir. Ayrıca sonraki çalışmalarda payların belirlenmesinde kullanılan cinsiyet faktörü, monotonluk

gibi çeşitli kriterleri içeren farklı pay tabloları da kullanılabilir. Ek olarak zaman etüdü yapılacak işletmeden gerekli izinlerin alınması durumunda dağılım pay hesabı için gereken iş örneklemesi yapılabilir. Bu alanda yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle üretim sektörü üzerine yoğunlaşıldığı, insan faktörünü dikkate alan çalışmaların daha az sayıda olduğu söylenebilir. Buradan hareketle sonraki çalışmalarda hizmet sektöründe yer alan farklı alanlarda zaman etüdü çalışmaları yapılabilir.

KAYNAKLAR

Adem, A., Kaya, B. Y., Çakıt, E., & Dağdeviren, M. (2022). Üretim sistemlerindeki dijital dönüşümün iş etüdü teknikleri üzerindeki etkisi. *Verimlilik Dergisi*, 110-122.

Akal, Z. (1997). *İş etüdü*, Ankara: MPM Yayınları.

Aksuoğlu, S., & Yıldız, A. (2022). İşgören verimliliğinin zaman etüdüyle ölçümünde REFA Uygulaması: Bir kamu kurumu örneği. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, *14*(1), 370-388.

Akyüz, I. (2012). *Yatak odası mobilyası üretiminde zaman etüdü uygulaması.* Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Barnes, M. R. (1991). *Motion and time study: Design and measurement of work*. John Wiley & Sons, New York.

Bilgin, E. (2014). Süreç iyileştirme için iş etüdü ve ambalaj sektöründe bir uygulaması, *13. Ulusal İşletmecilik Kongresi içinde (*333-339. ss.). Antalya.

Bircan, H., & İskender, G. (2005). İş ölçümü tekniklerinden zaman etüdü üzerine bir uygulama. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 6*(2), 199-219.

Bures, M., & Pivodova, P. (2015). Comparison of time standardization methods on the basis of real experiment, *25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation* içinde (466- 474. pp.). Vienna: Procedia Engineering.

Cengiz, T. G., & Orbak, A. Y. (2010). Bir süt ve süt ürünleri işletmesinde iş ve zaman etüdü çalışması ile verimliliğin arttırılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, *2*(2), 25-29.

Çolak, M., Keskin, G. A., Çelik, B., & Avcı, S. (2016). Metot Zaman Ölçümü (MZÖ) yöntemi ile üretim süresinin iyileştirilmesi: Beyaz eşya yan sanayisinde bir uygulama. *Sakarya University Journal of Science, 20*(3), *417-424.*

Doğruer, İ. M. (2016). *İş etüdü*, İstanbul: Açılım Kitap.

Gencer, A. (2006). *Verimlilik analizinde iş etüdünün kullanılması ve bir uygulama*. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupunar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

Gümüşay, O. O. (2006). *Ekim makinası imalatında zaman etüdü.* Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Kanawaty, G. (2004). *İş etüdü (çev. Zühal Akal),* Ankara: Mpm Yayımları.

Kobu, B. (2010). *Üretim yönetimi*, İstanbul: Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş.

Korkmaz, İ.H. (2016). Lojistik sektöründe iş analizi ve zaman etüdü, *1. Lisansüstü İşletme Öğrencileri Sempozyumu içinde (366-375. ss.).* Gaziantep.

Kurt, M., & Dağdeviren, M. (2011). *İş etüdü,* Ankara: YESD Yayınevi.

Lopez, Y. C. (2005). *Modeling for the estimation of work duration and management of labor resources for the facilities department at UPMR*. MSc Degree Thesis, University of Puerto Rico Mayagüez Campus.

Malkoçoğlu, A., Çakmak, A., & Üçüncü, K. (2013). Mobilya üretiminde ahşap levha kesim planlarına ait bir zaman etüdü araştırması. *Journal of Polytechnic, 16*(2), 57-68.

REFA, (1988). *İş etüdü yöntem bilgisi*: *İş etüdünün temelleri*, Ankara: MPM Yayınları..

Seifermann, S., Böllhoff, J., Metternich, J., & Bellaghnach, A. (2014). Evaluation of work measurement concepts for a cellular manufacturing reference line to enable low cost automation for lean machining. *Procedia CIRP*, *17*, 588-593.

Şen, A., & Güner, M. (2002). Şeker fabrikasında zaman etüdü. *Journal of Agricultural Sciences*, *8*(02), 157-161.

Şenyiğit, E., Karakaş, S., Uçar, S., & Akbal, S. (2021). Analysis of work-study-productivity practice for enterprise resource planning in a furniture firm: Case study. *European Journal of Science and Technology, Special*, (28), 476-480.

Ünal, C. (2014). Kumaş serim işleminin standart birim süresini belirlemek için bir model geliştirmek amacıyla incelenmesi, *XIII. Uluslararası İzmir Tekstil ve Hazır Giyim Sempozyumu içinde* (96-97. ss.). İzmir.

Yaman, R., Uçmuş, E., & Gönen, D. (2008). Traktör emniyet kabini imalatı yapan bir işletmede metot ve zaman etüdü teknikleri ile verimliliğin arttırılması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *10*(2), 13-32.

Yücel, H. E. (2019). *Ahşap kent mobilyası üretiminde zaman etüdü uygulaması.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ankara.

Yücel, H. E., & Dilik, T. (2021). Zaman etüdü ve ahşap kent mobilyasında bir uygulama örneği. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, *4*(1), 61-68.