

MÜHENDİSLİK

ALANINDA ULUSLARARASI TEORİ,
ARAŞTIRMA VE DERLEMELER

Cilt 1

Ekim 2023

EDİTÖRLER

PROF. DR. COŞKUN ÖZALP
DOÇ. DR. SELAHATTİN BARDAK

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

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

Birinci Basım / First Edition • © Ekim 2023

ISBN • 978-625-6760-01-1

© 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 ALANINDA ULUSLARARASI TEORİ, ARAŞTIRMA VE DERLEMELER

CİLT 1

EKİM 2023

Editörler

Prof. Dr. Coşkun ÖZALP
Doç. Dr. Selahattin BARDAK

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

SOLÜSYON PLAZMA PÜSKÜRTME YÖNTEMİ, BU YÖNTEM İLE UYGULANAN KAPLAMALAR VE KULLANIM ALANLARI

Sevda ALBAYRAK, Canser GÜL 1

Bölüm 2

PUZOLANİK ETKİLERİ AÇISINDAN ATIKLARIN ZEMİN İYİLEŞTİRMEDE KULLANIMI

Murat KARADENİZ, Gamze BİLGİN 19

Bölüm 3

GIYİLEBİLİR TEKNOLOJİLERİN İNSAN SAĞLIĞINA VE PERFORMANSINA ETKİLERİ: YENİ YÖNELİMLER VE ARAŞTIRMALAR

Osman ŞAHİN, Halil ÖZDOĞAN, Okan BİNGÖL 35

Bölüm 4

GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNİN KURULUMUNDA FİZİKİ VE FİNANSAL DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ

Abdulsamed GÜNEŞ 51

Bölüm 5

FELDİSPATIN UYGULAMA ALANLARI VE ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Zehra ÇETİNKAYA 61

Bölüm 6

PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLARINDA KALIP İÇİ TAKVİYE ELEMANI DİZGİ SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

Mustafa SOYLAK 75

Bölüm 7

İŞARET DİLİ İÇİN AKILLI ELDİVEN TASARIMLARI

Serhat KÜÇÜKDERMENCİ 85

Bölüm 8

DENİZALTI TAHRİK SİSTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Aleyna ULUCUTSOY, Betül SARAÇ, Erhan AKSU 103

Bölüm 9

MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMLERİ KULLANARAK ORTA VE YÜKSEK GERİLİM UYGULAMALARINDA KULLANILAN XLPE İZOLELİ KABLOLARDA MEYDANA GELEN ELEKTRİKSEL AĞAÇLANMA UZUNLUKLARININ ANALİZİ

Mustafa KARHAN 117

Bölüm 1

SOLÜSYON PLAZMA PÜSKÜRTME YÖNTEMİ, BU YÖNTEM İLE UYGULANAN KAPLAMALAR VE KULLANIM ALANLARI

Sevda ALBAYRAK¹

Canser GÜL²

1 Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara / Türkiye, e-mail: sevdatas@gazi.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-1504-8061

2 Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Manisa / Türkiye, canser.gul@cbu.edu.tr, 0000-0002-1339-936X

GİRİŞ

Günümüzde gelişmiş ve üstün malzeme arayışları sürmektedir. Korozif ve yüksek aşındırıcı ortamlarda çalışan, sıcaklığın da etkisi altında olan birçok parça, kaliteli ve dayanıklı yüzeylere ihtiyaç duyar. Kaplama tabakaları uygulama yöntemine de bağlı olarak farklı kaliteler ve özelliklerde olabilir. Otomobil, uçak ve gaz türbin motorları, nükleer güç ekipmanları ve hatta insan vücudunda kullanılmak zere biyoyumlu karakterde üretilmesi gereken farklı yapılar için plazma püskürtme uygulamaları kullanılmaktadır. Geleneksel plazma püskürtme yönteminde mikron boyutundaki toz parçacıklar plazma alevi içine bir taşıyıcı gaz ile gönderilirken farklı yöntemlerde bu taşıyıcı alkol veya su olabilir. Bu çalışma süspansiyon ve solüsyon plazma yöntemlerini, bu yöntemlere uygun şekilde hazırlanan çözelti ve süspansiyonları, bu yöntemlerin kullanım alanlarını, temellerini, avantaj ve dezavantajlarını ve yöntemi uygularken karşılaşılabileceğiniz engelleri detaylandırılmıştır.

Plazma püskürtmeli ince filmler ve kaplamalar, korozyon önleyici, aşınma önleyici, radyasyon önleyici, termal izolasyon ve ısı iletimi uygulamaları için mükemmel mekanik özellikler sergiler. Bu kaplamalar, yüksek birikim yoğunluğu nedeni ile uçak, otomobil motorlarının, gaz türbinli motorların, dizel motorların, nükleer güç ekipmanlarının ve petrol arıtma ekipmanlarının metalik parçalarında günümüzde tercih edilen ve sıklıkla kullanılmakta olan bir yöntemdir. Aşındırıcı ve korozif ortamlarda güvenle çalışma imkanı sağlayabilmesi için malzeme yüzeylerine yüksek sıcaklık ayarları katkısı ile kaliteli kaplamalar yapılmasına imkan tanır ve uzun ömürlü kaplama seçenekleri sunduğu için tercih edilmektedir (Liu vd., 2022).

Plazma püskürtme işlemi esnasında önce torç içinde plazma jeti oluşumu gerçekleşir. Torçtan çıkan plazma jeti ile bu jeti çevreleyen gaz karışır ve partikül veya solüsyon enjeksiyonu bölümüne doğru ilerler. Gaz akışında hızlanma ve ısınma meydana gelir ve enjeksiyon bölümünden gelen partiküller plazma aracılığı ile altlık malzeme üzerine kaplanır (Fauchais ve Montavon, 2007). Termal püskürtmeli kaplamaların mühendislik kullanımına başarılı bir şekilde uygulanması, kaplama ile altlık arasındaki yapışmanın kalitesine ve biriken katmanlar arasındaki kohezyona büyük ölçüde bağlıdır. Çoğu durumda, yapışma/kohezyon mekanik niteliktedir; yüzey kırılmaları, pürüzlü bir yüzeyin çukurları ve olukları gibi, darbe basıncı nedeniyle yayılan erimiş malzeme ile doldurulur.

PLAZMA PÜSKÜRTME YÖNTEMLERİ

Günümüzde tozların kullanıldığı ark plazma püskürtme yöntemi, erimiş damlacıkların ve/veya yarı erimin parçacıkların altlıklar üzerine peş peşe çarpması ve katılaşması şeklinde elde edilir. Kaplama tabakasında genelde mikro gözenekler veya küresel gözenekler mevcuttur. Bazı durumlarda ise kaplama tabakaları arasında bağlanmanın tam olarak sağlanamadığı arayüz-

leri ve hatta arayüz enine kesitlerinde gözlemlenebilen dikey çatlakları içerebilir (Liu vd., 2022). Kaplama malzemesi ve altlık arasındaki termal uyum ve benzer termal iletkenlik katsayılarına sahip olmak çoğu durumda önemlidir. Malzemeler arasındaki termal ve elektriksel iletkenlik, young modülü kırılma tokluk değerleri ve kohezyon özellikleri kaplama kalitesini etkiler (Liu vd., 2022; Lashmi vd., 2020).

APS, SPS ve S-HVOF yöntemleri kullanılarak uygulanan seramik kaplamaların, aşınma ve kavitasyon erozyonu alt başlıklarında değerlendirildiği Nowakowska ve ark. (2022)'nin yaptıkları çalışmada APS yöntemi ile kaplanan kaplamaların en kötü sonuçları verdiğini ve süspansiyon kullanarak gerçekleştirilen diğer iki kaplamanın hem aşınma hem de kavitasyon erozyonu bakımından APS yöntemine göre daha avantajlı olduğunu vurgulamıştır. Daha az gözenekli ve daha dayanıklı kaplamaların süspansiyon kullanılarak PS ve HVOF yöntemleri ile elde edilebileceğinin bir kanıtı niteliğindedir (Nowakowska vd., 2022).

Uygulama ortamına, ortam basıncına, hammaddelere ve kullanılan atmosfere bağlı olarak farklı plazma püskürtme yöntemleri vardır. Normal atmosferik ortamda koruyucu gaz olmadan toz besleme stoğunun uygulanması yöntemine atmosferik plazma püskürtme (APS) denir ve en geleneksel plazma püskürtme yöntemidir. Yüksek basınçlı bir ortamda uygulandığında Yüksek Basınçlı Plazma Püskürtme (HPSS) ve düşük basınçlı bir ortamda uygulandığında Düşük Basınçlı Plazma Püskürtme (LPPS) olarak ikiye ayrılır.

Atmosferik plazma püskürtme yöntemi

APS, çok çeşitli proses sıcaklıklarında çalışabilmesi nedeniyle endüstrilerde yaygın olarak kullanılan önemli termal püskürtme tekniklerinden biridir. Temelde toz halinde bulunan besleme stoğunu plazma yardımı ile malzeme üzerine püskürtme ve kaplama tabakası oluşturmaya yönelik bir uygulamadır. Kaplama üretimi için kullanılan tipik besleme stoğu tozları, plazma bulutuna verilen seramik tozlarıdır. Toz parçacıkları plazmadan termal enerji ve momentum kazanır, erimeye uğrar ve alt tabakaya 80–300 m/s hızla çarpar. Alt tabakanın yüzeyine çarptığında, erimiş parçacıklar hızla “splat” oluşturmak üzere katılır. Her bir uyarı birkaç mikron kalınlığındadır ve yukarı doğru olan uyarının çapı 62–103 μm . Bu uyarılar, tuğla duvar benzeri bir yapı oluşturmak için bir araya gelir. Plazma püskürtme için ortalama partikül boyutu 10–100 μm olan hammadde tozları tercih edilmektedir (Lashmi vd., 2020).

Kaplama sonrası yapı katmanlı plakalardan oluşur ve bu katmanlar %30'a kadar ulaşabilen bir gözeneklilik yapısına da sahip olabilen katmanlardır. Kaplama kalınlıkları 50 μm 'den birkaç mm'ye kadardır. Yöntem metal seramik ve sermet esaslı malzemeler de dahil olmak üzere birçok toz kullanılarak gerçekleştirilebilir (Tendero vd., 2009). Tendero vd. (2009)'a göre bunun

için plazma jet sıcaklığının 15000K'e ulaşması ve bu durumda bu tozları eritebilir olması gerekmektedir. Ayrıca erime, bozunma ve buharlaşma sıcaklıkları arasındaki farkın 300K'den büyük olması gerektiğini çalışmalarında belirtmişlerdir.

Yüzey modifikasyonuna yönelik uygulanan atmosferik plazma püskürtme süreçleri üç ana tipte sınıflandırılabilir. Bunlardan ilki bu çalışmanın ana konusu olan kaplama uygulamalarına yönelik kullanımdır. İkinci kullanım alanı plazma aşındırmadır. Plazma temizliği şeklinde de adlandırılabilen bu süreç malzeme yüzeyindeki kirletici maddelerin uzaklaştırılmasını amaçlayan ve plazma ile reaksiyon sonucu temizliği ve aşındırmayı sağlayan süreçtir. Bir diğer süreç ise spesifik kimyasal grupların aşılınması, çapraz bağlanma derecelerinin değiştirilmesi ve yüzey morfolojisinin değişmesi yolu ile altlığın üst katmanının modifikasyonu şeklinde sonuçlanabilen plazma işlemidir (Uricchio ve Fanelli, 2021). Tüm bu süreçlerde kullanım için yani yapısal olarak atmosferik plazma püskürtme yönteminde plazma üretimi için, radyo frekansı veya mikrodalga kullanılabilir. Plazma kaynağı olarak ise radyo frekansı için içi boş katot kaynakları, RF ve soğuk plazma torcu örnek bazı kaynaklar olarak gösterilebilir. Bu torçlar karmaşık yüzey işlemleri durumunda kullanım için idealdir, basit bir tasarıma sahiptir ve kolay kullanılabilirler. Fakat sadece düşük sıcaklık uygulamalarında ve dar alanlar için işlenmiş yüzeylerde kullanılabilirler. Bunların yanı sıra gaz temizleme, spektroskopik analiz, işleme, kaplama, aktivasyon ve yüzey işlemleri için kullanılabilen metalik ve yarı metalik torçlardan bahsetmek de mümkündür. Metalik torçlar karmaşık yüzey işlemleri için uygundur ve hem düşük hem de yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilirler. Fakat mikrodalga güç kaynağı hassas güvenlik kurallarına sahip pahalı bir kaynaktır. Dar bir alanda çalışabilirler. Yarı metalik torçlar ise oldukça düşük sıcaklıklara kadar inebilen geniş bir uygulama alanına sahiptir ayrıca karmaşık yüzeylerin işlenmesi için kullanılabilir. Fakat metalik torçlar gibi dar bir alanda çalışabilir, pahalıdır ve stabilite problemleri ve ömrü sebebi ile sanayileşmesi zor torçlardır. Düşük frekanslı ve DC torçlar da yüzey işlemleri, ark plazma uygulamaları ve yüzey temizlik işlemleri için kullanılan bazı plazma torçlarıdır. Tasarımlarına bağlı olarak, DC ve düşük frekanslı deşarjlar, sürekli veya darbeleri modda çalışabilir. Darbeleri çalışma modu, sistem ısınması sınırlıyken deşarjda büyük miktarda enerjinin enjeksiyonunu sağlar. Öte yandan, darbeleri bir güç kaynağı, bir DC kaynağından teknik olarak daha karmaşıktır ve işlemin tekrarlanabilirliğini tehlikeye atar (Tendero vd., 2009). Ayrıca, DC, RF ve magnetron püskürtme, her ne kadar gözenek oranı düşük ve yüksek saflıkta kaplama üretimine imkan tanısa da düşük basınç koşullarında çalışır ve büyük alt tabakaların kaplanması gerektiğinde endüstriyel ölçeklendirmelerini teknolojik bir zorluk haline getirir. Sebebi bu düşük basıncın sağlanabileceği büyük vakum odaları ve kaynakların eldesinin zorluğudur (Merche vd., 2012).

Düşük basınçlı plazma püskürtme yöntemi

Bununla birlikte, atmosferik plazma püskürtme işlemi boyunca metalik kaplamaların oksidasyonu gözlemlenebilir. Bu nedenle, Al, Cu, Ti ve Ni bazlı alaşımlar gibi metalik kaplamaların büyük ölçekte biriktirilmesi için düşük basınçlı bir plazma püskürtme yöntemi de mevcuttur. Bu yöntemde yarı sütunlu-seramik esaslı kaplamalar üretebilmek için çok düşük basınçlı (50–200 Pa) bir plazma torcu ve fiziksel buhar biriktirme (PS-PVD) teknolojisi birlikte kullanılmaktadır (Liu vd., 2022). Bu teknoloji, yüksek sıcaklıkta oksidasyona dayanıklı katmanlar biriktirmek için havacılık endüstrisinde kullanıma uygundur. Atmosferik koşullara kıyasla azaltılmış basınç, plazma bulutunu 50 ila 500 mm uzunluğunda ve 10 ila 40 mm çapında genişletir. Bu da plazmanın daha geniş bir püskürtme alanına sahip olması anlamına gelir. Bu nedenle partikül hızları ve sıcaklıklar enine kesit üzerinde daha homojen bir şekilde dağılır. Bu durum ise, karmaşık geometrilere sahip parçalarda, özellikle türbin bileşenlerinde bile homojen bir kaplama kalınlığı dağılımına sahip kaplamaların üretilmesine olanak tanır (von Niessen ve Gindrat, 2011).

Yüksek basınçlı vakum plazma püskürtme yöntemi (VPS)

Vakumlu plazma püskürtme (VPS), vakum odası basınç değerine göre düşük basınçlı plazma püskürtme (kabin basıncı yaklaşık 50-200 mbar) ve yüksek basınçlı plazma püskürtme (200 mbar'dan yüksek kabin basıncı) olarak adlandırılır. Vakumlu plazma püskürtme (VPS) sistemi; güç ünitesi, plazma tabancası, toz besleme ünitesi, soğutma ünitesi, vakum ünitesi ve kabin içerisinde atık uzaklaştırma ünitesinden oluşmaktadır. Vakum plazma püskürtme (VPS) vakum altında yapıldığından oksitsiz kaplamalar elde edilir. Vakum plazma püskürtmede (VPS), kabin basıncı arttıkça plazmanın boyu kısalır, dolayısıyla birim zamanda daha fazla toz erir ve plazmanın enerjisi arttığı için püskürtme tozunun eritilmesi daha kolaydır. Seramik gibi yüksek erime sıcaklığına sahip plazma işlemleri, vakum veya düşük basınçlı gaz ortamında gerçekleştirilirse “Vakumlu Plazma Püskürtme (VPS)” olarak adlandırılır. Vakum plazma püskürtme teknolojisi, yüksek oksijen afinitesine sahip malzemeleri kaplamak için kullanılır. Bu yöntemde, püskürtülen toz parçacıkları daha az soğutma ve daha az yavaşlama ile seyreltilmiş bir ortamdan geçer. Böylece kaplama, daha az yüksek kinetik enerjiye sahip parçacıklardan üretilir. Bu nedenle, bu tip kaplama düşük düzeyde gözeneklilik ve oksit içerir (Varbeek, 1992).

Süspansiyon Öncüllü ve Solüsyon Plazma Püskürtme Yöntemleri

Geleneksel plazma püskürtme yöntemlerinde mikron boyutu ve üzerindeki katı toz partikülleri, plazma jeti aracılığıyla yüzeye püskürtülür. Kaplamada kullanılacak partikül boyutları küçüldüğünde, özellikle 5µm ve altındaki toz boyutlarında partiküllerin plazmaya taşımak için taşıyıcı gazın hızının arttırılması gerekir. Taşıyıcı gaz hızının artması, plazma gaz akışını

ciddi şekilde bozar ve böylece kaplamaların birikme hızını ve verimini azaltır. Bunun yanı sıra toz boyutu küçüldükçe artan yüzey enerjisi tozlarda topraklanma ve aglomerasyon oluşumuna neden olabilir. Bu durumda ise kaplama yapısında tam ergimemiş partiküller ve gözenekler yaygın gözlemlenir ve hatta enjektör tıkanması nedeni ile kaplamaların uygulanmasında büyük sorunlar ile karşılaşabilir. Bu nedenlerle plazma püskürtme yönteminde nano veya mikro metre altı parçacıkların kullanımı yüksek yüzey enerjisi nedeni ile çoğu durumda basit değildir (Viswanathan vd., 2006; Fauchais vd., 2015). Bu durumda süspansiyon veya solüsyon öncüllü püskürtme yöntemleri ortaya çıkmıştır. Topaklanmayı önlemek, tozların akışını sağlamak ve kaplama ortamına enjekte edebilmek için taşıyıcı olarak gaz yerine bir sıvı kullanmayı gerektirir (Fauchais vd., 2014). Mikron altı ve nano boyutlu partiküllerin sıvı besleme stoğu aracılığıyla sisteme enjekte edilmesi ile süspansiyonlarda kullanılan dağıtıcılar, bu küçük parçacıkların aglomerasyonunu önleyebilir (Fan ve Bai, 2016). Bu yaklaşım Karthikeyan vd.,(1997), tarafından öne sürülmüştür. Ayrıca süspansiyon plazma püskürtme yöntemi için kullanılan radyo frekans lı bir plazma sistemi yaklaşımı da mevcuttur (Gitzhofer vd., 1997).

Kaplama öncülü malzemeyi içeren bu sıvı besleme stoğu sıvı jeti şeklinde veya damlacıklar halinde plazma içine enjekte edilebilir. Yöntemde kullanılan sıvı besleme stoğu bir çözücü içinde çözünmüş halde bulunuyor ise yöntem çözelti öncüllü plazma püskürtme (SPPS) olarak adlandırılır. Eğer bu besleme stoğu sıvı kimyasallar içinde dağılmış mikron altı veya nano boyutlu parçacıklardan oluşuyor ise bu durumda yöntem süspansiyon plazma püskürtme (SPS) olarak adlandırılır (Vaßen vd., 2010; Fauchais vd., 2015; Killinger vd., 2011).

SPS yöntemi, kirletici ve oksitleyici ortam ile teması da azaltarak ve bir yandan gözenek oluşumunu minimize ederken bir yandan da 100 µm/dk ve üzerinde biriktirme hızları ile kalın kaplamaların üretimine olanak sağlar (Jaworski et al. 2010).

Süspansiyon püskürtme yöntemi için kurulan süspansiyon enjektör sistemi bazı özelliklere sahip olmalıdır;

- Pnömatik bir sistem veya peristaltik bir pompa yardımı ile beslenme sağlanmalıdır.
- Sistem torca ve doğrudan plazma içine kesintisiz bir enjeksiyon sağlayabilmelidir.
- Boyutları belli kalibrasyonlu bir enjektör/nozül kullanılmalıdır.
- Soğutma sırasında sıcaklığın çok fazla düşmemesine özen gösterilmelidir (Pawlowski, 2009).
- Süspansiyon püskürtme yöntemi için hazırlanan süspansiyon ise;

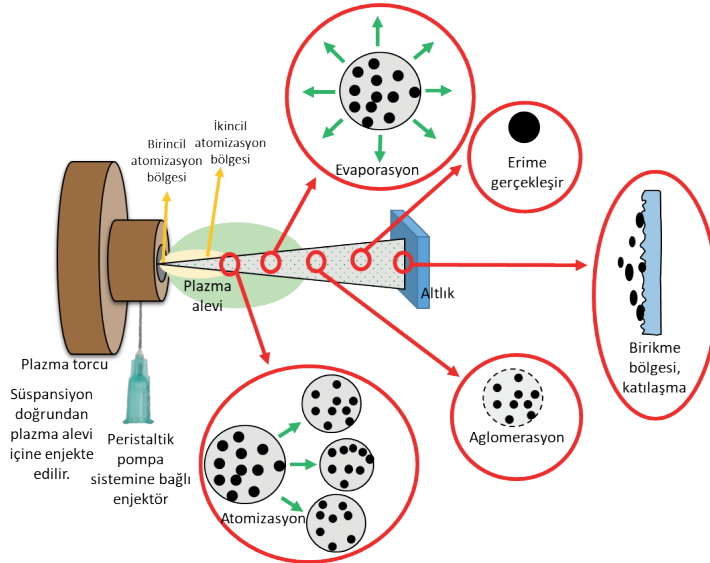
- Stabil olmalı ve topaklanma eğiliminde olmamalıdır. Süspansiyon pH'ı önemli bir parametredir. Ayrıca karıştırıcı ve dağıtıcıların kullanımı da yaygındır.

- Sedimentasyon olarak da adlandırılan partiküllerin çökmesi durumunun yaşanmasına dikkat edilmelidir. Süspansiyon içindeki katı partiküller işlem süresince sıvı faz içinde askıda kalmalı ve yerçekimi etkisi ile düşmemelidir.

- Enjektör türüne göre de değişiklik göstermekle birlikte çözeltilerin yoğunluk değerleri önemlidir. Toz parçacık boyutunun değiştirilmesi ve kullanılan plastikleştiriciler çözelti yoğunluğunun ayarlanmasına katkı sağlayabilmektedir.

- Su jetleri ile alev etkileşimleri önemlidir. Çözelti seçiminde su veya alkol veya karışım kullanılması yaygındır. Plazma içine enjekte edilen alkol sıcaklığı artırırken, su kullanımı plazma merkezindeki sıcaklığı düşürür. Çözen türü ve miktarı değiştirilerek veya süspansiyon besleme hızı ayarlanarak optimum değer tespit edilebilir (Pawlowski, 2009; Chidambaram Seshadri vd., 2016).

Kaplama için plazma alevi içine enjekte edilen bir çözelti, damlacıklara ayrılır ve bu damlacıklar Şekil 1'deki gibi bir fenomen izler. Bu fenomen adımları temelde; birincil atomizasyon, aerodinamik parçalanma, ısıtma, buharlaşma ve iç çökeltme, iç basınçlandırma ve damlacık parçalanması, katı partikülün ısınması ve ergime, eriyikten buharlaşma, altlık ile etkileşim sırası ile gerçekleşir (Pawlowski, 2009; Basu vd., 2008).



Şekil 1. Yüksek sıcaklıktaki bir plazma veya alevde bir çözelti damlacığının kaplama tabakasına kadar izlediği fenomen

Plazma püskürtme yöntemlerin avantaj ve dezavantajları

Elektron ışını fiziksel buhar biriktirme (EB-PVD) yöntemi homojen sütunlu mikro yapıya sahip kaplamaların üretimine imkan tanır. 1–2 µm/dakika biriktirme hızına sahiptir. Ortam ile etkileşim az olduğu için yüksek saflıkta kaplama eldesi sağlar. Yüksek termal verimlilik ve iyi yüzey kalitesi elde edilir. Fakat son derece pahalı bir yöntemdir. bunun yanı sıra bazı dezavantajlara da sahiptir. Görüş hattı kısıtlıdır. Filament bozunması durumu mevcut olabilir. Bu da maliyetlidir. Homojen olmayan buharlaşmalara neden olabilir. Bazı malzemeler EB-PVD tarafından buharlaşmaya uygun değildir.

Atmosferik plazma püskürtme (APS) yönteminde, 5–100 µm aralığında toz besleme stoğu kullanılır. Kullanım alanının gerekliliğine göre gözenekli veya sürekli kaplamalar elde edilebilir ve kaplama üretimi için metaller, seramikler, camlar ve kompozitler gibi çeşitli malzemelerden altlık kullanımına uygundur. EB-PVD tekniğinden daha ucuzdur. Bunlar temelde yöntemin avantajları olarak sıralanabilir. Yöntem aynı zamanda bazı dezavantajlara da sahiptir. Çok sayıda etkileşimli parametre nedeniyle püskürtme işlemi bazen karmaşık olabilir. Görüş hattı bazen kısıtlıdır. Karmaşık şekilleri ve yüzeyleri kaplaması zordur. Kaplama kalitesini korumak için plazma püskürtme tabancası elektrotlarının sık bakımı gerekir.

Süspansiyon plazma püskürtme (SPS) yöntemi, mikron altı veya nano parçacıkların süspansiyonları besleme stoğu olarak kullanılır. Daha yüksek gerilime dayanıklı yapılar, daha yüksek termal döngü ömrü sağlar. Sütunlu kaplama yapılarının üretimine imkan tanır. EB-PVD kaplamalarla karşılaştırılabilir nitelikte kaplamaların yapımına olanak verir. Fakat, toz stoklu besleyiciler ile kıyaslandığında süspansiyon plazma püskürtme yöntemi biraz daha maliyetlidir. Plazma püskürtme sistemine ek bir enjeksiyon ve pompa sistemi gerektirir. Ayrıca, sıvı besleme stoğu enjeksiyonu nedeniyle oldukça karmaşık süreç; Proses parametreleri hala belirsizdir ve tam olarak oluşturulmamıştır; Daha yüksek ısı akışı (20 MW/m²); Geleneksel plazma püskürtmeye göre 2-3 kat daha düşük katı besleme hızı ve biriktirme verimliliğine sahiptir (Lashmi vd., 2020). Yöntemin tam olarak kontrol edilebilir olmadığına dair bazı araştırmalar gerçekleştirilmiştir (Fauchais vd., 2015). Fakat bu yöntemin kontrol edilebilirliğini arttırmak için yapılan araştırmalar ve bu araştırmalar sonucunda geliştirilen bazı nümerik çalışmalar ve modellemeler de mevcuttur (Farrokhpanah vd., 2017).

Nano boyutlu malzemeler, mikron boyut ve bu boyutların üzerindeki malzemelere göre bazı durumlar için yeni ve farklı özellikler sergileyebilir (Ashby vd., 2009). Örneğin, seramikler, sınır kusurları ile fonon saçılması nedeniyle daha düşük termal yayılımı ve histerezise sahiptir; daha küçük tane boyutları nedeniyle daha yüksek sertlik ve tokluk sergilerler. Ayrıca daha yüksek sertlik, tane kayma plastisitesi ve tane boyutu nedeniyle kırılma ve

malzeme kaldırma mekanizmasındaki değişim nedeniyle daha iyi aşınma direncine sahiptirler (Viswanathan vd., 2006). Fakat plastik deformasyonun zorluğu sebebi ile seramik parçacıkların kaplama olarak kullanılması durumunda bazı zorluklar ortaya çıkmaktadır. Özellikle kullanılan geleneksel kaplama yöntemlerinde ve hatta atmosferik plazma püskürtme yönteminde bile gözenekliliklere ve kaplama sonrasında oluşması muhtemel termal gerilim çatlak başlangıç noktaları oluşumunu tetikler ölçüde mikro gözeneklere neden olabilmektedir.

Çözelti öncüllü plazma püskürtme (SPPS) yönteminde, çözelti öncülleri ve çözelti eldesi için gereken diğer kimyasallar ile hazırlanan bir çözelti besleme stoğu olarak kullanılır. Kaplamalar yüksek gerilim toleranslıdır. Dikey, parçalı çatlaklı yüksek gerilim toleranslı mikro yapıların üretimi bu yöntem ile gerçekleştirilebilir. Bu sistemde de süspansiyon plazma püskürtme sisteminde olduğu gibi bir enjeksiyon sistemi eklentisi gereklidir. Ve bunun yanı sıra kaplamada safsızlık fazlarına neden olan reaksiyona girmemiş çözelti öncü türlerinin varlığı; çözelti öncü damlacıkları ile plazma jeti arasındaki yörüngeler sırasında uzun etkileşim, sinterleme ve yerel yeniden eritmenin etkisini indükler. Bu da yöntemin en büyük dezavantajıdır.

Düşük basınçlı plazma püskürtme yönteminde (PS-PVD), tane boyutu 25 μm ve altında olan, sütunlu mikro yapıya sahip hammadde tozları besleme stoğu olarak kullanılır. Daha yüksek gerilim toleranslı kaplamaların yapılmasına olanak sağlayan bu yöntem ile karmaşık geometrilere sahip bileşenler ve bileşenlerin gölgeli alanları kaplanabilir. Ayrıca bu yöntem, yüksek birikme oranları ve düşük gözeneklilik eldesine imkan tanır. Fakat, geleneksel APS sisteminden nispeten maliyetlidir. Tam olarak keşfedilmemiş yeni bir plazma püskürtme tekniğidir ve bu nedenle bu konudaki araştırmalar sürdürülmektedir (Lashmi vd., 2020).

Süspansiyon ve çözelti öncüllü plazma püskürtme yöntemlerinin güncel kullanım alanları

SPS ve SPPS için yöntemleri, kara gaz türbinleri ve havacılık motorları için aşınmaya dayanıklı kaplamalar, yüksek sıcaklıklı yakıt hücreleri (SOFC) bileşenleri, buz önleyici ve süperhidrofobik kaplamalar, silikonsuz güneş pilleri, vücut içi kullanıma yönelik geliştirilmiş biyouyumlu kaplamalar ve termal bariyer kaplamalarının (TBC) üretilmesine yönelik çalışılmaktadır (Chidambaram Seshadri vd., 2016; Wang vd., 2014; Chen vd., 2009; Bai vd., 2018; Sharifi vd., 2019).

Wang vd., (2014), lantanyum zirkonat kaplamaları SPPS yöntemi ile 304 tipi paslanmaz çelik yüzeylerine kaplamışlardır. Çalışmada her bir kaplama parametresi için yaklaşık 20 μm kalınlıkta kaplamalar elde edilmiştir. Çalışma sonucunda tepkimeler sonucunda elde edilen kaplamaların gözenekliliklerini değerlendirmiş ve daha yüksek Zr/La oranı olan kaplamada en faz-

la gözenekliliğin tespit edildiğini vurgulamışlardır. Oluşan oksitli kaplama yapıları $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ve ZrO_2 arasındaki termal genleşme katsayısı farkı nedeni ile kaplamalarda bazı çatlakların bulunduğunu ve çözeltiden elde edilen toz yapılar ile kaplama tabakasındaki yapıların mikroyapılarının farklı olduğunu vurgulamışlardır. Çalışma termal bariyer kaplama uygulamalarına yönelik gerçekleştirilmiştir. Termal bariyer kaplamaya yönelik SPS yöntemi ile gerçekleştirilen YSZ ve ZrO_2 (Tao vd., 2022; Padture vd., 2002; Vassen 2010).

Chen vd. (2009), SPS yöntemi kullanarak alümina-zirkonya kaplamaları mekanik ve termal özellikleri nedeni ile koruyucu kaplama uygulamalarında kullanılmak üzere uygulamışlardır. Çalışma sonucunda farklı toz boyutları ile APS ve SPS yöntemi ile biriktirilen kaplama tabakaları değerlendirilmiş ve birikme verimliliği bakımından SPS yöntemi daha avantajlı bulunmuştur. Kaplamaların mekanik özellikleri ise yakın değerlerde tespit edilmiştir.

Bai vd. (2018), yaptıkları çalışmada SPS yöntemini kullanarak florürlü hidroksiapatit kaplamalar üretmiş ve karakterize etmiştir. Çalışma, biyomalzeme uygulamalarında SPS yönteminin kullanılabilirliğini gösteren ve yöntem sonrasında kaplama yüzeyi üzerinde hücre kültürü ve antibakteriyel aktivitelerin de değerlendirildiği kapsamlı bir çalışmadır. Çalışma kapsamında aynı şartlar kullanılarak SPS yöntemi ile kaplanan kaplama tabakalarının da korozyon dayanımlarının kaplamasız ve biyomalzeme sektöründe sıklıkla kullanılan titanyum altlıklara göre daha üstün olduğu tespit edilmiştir. Kaplama sonucunda biyouyumluluk özelliklerinin geliştirdiği ve yöntem kullanılarak uygulanan her iki kaplama üzerinde tespit edilen hücre kültürünün de metalik titanyum alaşımına göre üstün olduğu gösterilmiştir. Ayrıca yöntemin biyomalzeme uygulamalarında kullanılabilirliğine yönelik farklı çalışmalar da mevcuttur. Allu ve Nallu (2022), Ti6AlNb alaşım yüzeylerini SPS yöntemi ile YSZ kaplayarak Hank's tuz çözeltisi içindeki tribolojik davranışlarını incelemiştir. Mahmud Abir vd. (2022), ise biyomalzeme olarak kullanılmak üzere hidroksiapatit-titanyum kaplamaları SPS yöntemi ile uyguladıktan sonra mekanik ve antibakteriyel özellikleri incelemiş ve umut vadeden sonuçlara ulaşmıştır. Samiksha vd. (2022) ise SPS yöntemi ile titanyum yüzeylere kapladıkları hidroksiapatitin aşınma özelliklerini incelemiş ve biyomalzeme olarak kullanılabilirliğini değerlendirmişlerdir. Tüm bu çalışmalar yöntemin üstünlüklerini ve biyomalzeme uygulamaları için uygunluklarını göstermiştir.

Cai vd. (2016), çalışmalarında SPS yöntemi ile elde ettikleri nadir oksit seramik kaplamalarda superhidrofobik özellik tespit ettiklerini belirtmiştir. Çalışma kapsamında temas açısı 140° ile 165° arasında değişen superhidrofobik özellikte yüzeyler elde edilebilmiştir. Xu vd. (2018), çalışmalarında SPPS yöntemini vakum işlemi ile birlikte kullanarak yeni bir yöntem geliştirmiş, çözelti öncülü vakumlu plazma püskürtme (SPVPS), ve hem superhidrofobik hem de süperhidrofilik karakteristikte olacak şekilde elde edilebilen sera-

mik kaplamalar gerçekleştirmişlerdir. Geri dönüştürülebilir bu ısıtılabilirlik özelliklerini yüzeydeki hidrokarbon türlerinin adsorpsiyon ve desorpsiyonundan kaynaklandığını vurgulayan araştırmacılar bu konuda öncülük eden çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Sharifi vd. (2019), yaptıkları çalışmada buzlanma karşıtı yüzey eldesi için SPS yöntemi kullanarak TiO_2 kaplamalar gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında hem yüzey buzlanma özelliklerini incelemiş hem de kaplama dayanıklılığı ve su damlası erozyonu testlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda süperhidrofobik bir kaplama yüzeyini SPS yöntemi ile sağlayabilmiş ve bu süperhidrofobikliğin 170° 'lik bir temas açısına sahip olduğunu vurgulamışlardır. Kaplama tabakasını, bir rüzgar tüneline simüle edilmiş buzlanma koşulları altında uçuş sırasındaki buzlanmayı azaltmadaki potansiyel performansını değerlendirmek için test eden araştırmacılar, çalışma sonucunda, SPS kaplamaların buz birikimini azaltmada olumlu bir etkiye sahip olduğunu tespit etmiştir. Dayanıklılık testleri ile ilgili olarak, SPS süperhidrofobik kaplamaların, çalışma kapsamında karşılaştırıldığı iki ticari kaplamaya kıyasla kuru partikül erozyonuna karşı önemli ölçüde daha iyi direnç gösterdiğini vurgulamışlardır.

Xu vd. (2022), çalışmalarında CO_2 gaz miktarını tespit edebilmek için ZnO kaplama tabakalarını SPS yöntemi ile Al_2O_3 yüzeylere uygulamışlardır. Çalışma kapsamında ZnO 'nun n-tipi bir yarı iletken olmasından faydalanılarak gaz algılama özellikleri incelenmiştir. Yöntemin safsızlık bakımından diğer yöntemlere göre avantajlı olduğunu ve yüksek kristallığe sahip kaplamalar elde edilebilirliğini vurgulamışlardır. CO_2 gaz algılaması için SPPS yöntemi ile de gerçekleştirilen çalışmalar mevcuttur (Zhang vd., 2015; Geng vd., 2016-1; Geng vd., 2016-2; Zhang vd., 2017).

Nd-Fe-B magnetlerin SPS yöntemi ile kaplanarak üretilmesi ve magnetik özelliklerinin incelenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştiren Zhao vd. (2022), yaptıkları çalışma sonucunda bu yöntemin uygulama için uygun ve üstün bir yöntem olduğunu, yaptıkları çalışma ile süspansiyon plazma püskürtme teknolojisi için yeni bir uygulama alanı sunduklarını belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda yüksek zorlayıcılığa ve iyi termal kararlılığa sahip sinterlenmiş Nd-Fe-B mıknatıslar elde edilmiştir.

SPS ve SPPS yöntemlerinde kontrol edilebilir parametreler

Püskürtme mesafesi

Kısa püskürtme mesafeleri numunede daha az gözenekliliğe ve uzun püskürtme mesafeleri daha çok gözenek ve heterojen kaplama üst yüzeyine neden olur (VanEvery vd., 2012; Tingaud vd., 2008). Tingaud vd., (2008) çalışmalarında 30, 40 ve 50 mm püskürtme mesafesinden SPS yöntemi kullanılarak kapladıkları Al_2O_3 tabakaları nın gözeneklilik miktarını ve üst yüzey özelliklerini değerlendirmiştir. Çalışma sonucuna göre, püskürtme mesafesi arttıkça yüzey kalitesi bozulmakta ve gözenek miktarı artmaktadır. Özetle,

püskürtme mesafesi arttıkça, kötü işlenmiş partiküllerin oranı artar (çoğunlukla partiküllerin düşük termal ataleti nedeniyle) ve sonuçta ortaya çıkan kaplama yüzey topolojisi etkilenir, daha gözenekli ve düzensiz bir kaplama tabakası oluşur.

Paso sayısı

Paso sayısı arttığında, yani püskürtme süresi arttığında numunenin sıcaklığı da 500 °C'ye kadar yükselir. Daha küçük partiküller (<1 µm) bu sıcaklıkta biriken diğer parçacıklara da yapışabilir ve sonuçta istif kusurları oluşturabilir. Nihai numune yüzeyinde pürüzlülükteki artış gözlemlenir ve gözenekli birikme nedeni ile birikme kalınlığı beklenen kalınlıktan fazla olmaya başlar. Süre arttıkça homojen büyümeden gittikçe uzaklaşılır (Tingaud vd., 2008).

Püskürtme hızının etkisi

Düşük püskürtme hızında, şekilsiz ve düzensiz partiküller kaplamadan daha iyi uzaklaştırılır ve plazmadan altlığa aktarılan yüksek ısı akışı, birbirini takip eden partikülleri lokal olarak erimiş halde veya buna yakın tutarak daha yoğun kaplamalara yol açabilir. püskürtme hızındaki artış ise lokal ergimeleri azaltacağından daha gözenekli ve daha düzensiz bir kaplama eldesine neden olur (Tingaud vd., 2008; VanEvery vd., 2012).

Enjektör/Nozül Çapı

Nozulun çap boyutu, kaplama yoğunluğunu büyük ölçüde etkiler. Deneyler, aynı plazma gaz akış hızında, küçük memeler tarafından üretilen kaplamaların, daha büyük memelerle üretilenlere göre daha yüksek yoğunluğa sahip olduğunu göstermektedir (Waldbilling ve Kesler, 2011).

Süspansiyondaki toz miktarı

Tingaud vd., (2008) çalışmalarında ağ. %5, 10 ve 20 olacak şekilde hazırladıkları Al₂O₃ süspansiyonları ile kaplamalar gerçekleştirerek kaplama yoğunluğunu ve gözenek miktarını hesaplamıştır. Ağ. %10 toz içeren süspansiyon %5 içeren süspansiyon ile gerçekleştirilen kaplamaya göre daha yoğun ve daha gözeneksizdir.

Toz boyut dağılımı

Süspansiyon içinde askıda kalan katı toz parçacıklarının boyut dağılımı büyükse bu tozların farklı karakteristikte ve tipte kaplanmasına ve kaplanmış yüzey üzerinde farklı görünmesine neden olabilir (Tingaud vd., 2008; Tarasi vd., 2008).

Toz şekli

P düzensiz şekilli partikülleri, M ise iyi erimiş partikülleri temsil eder ve P/M oranı gözenekliliği tahmin etmede kullanılabilir. Oran ne kadar yüksek

olursa, istif kusurlarının yoğunluğu o kadar yüksek olur ve dolayısıyla gözenek seviyesi o kadar yüksek olur (Tingaud vd., 2008).

Süspansiyon hazırlığında dağıtıcı kullanımı

Canas vd. (2022), yaptıkları çalışmada, dağıtıcı olarak polyacrylic acid kullanmış ve SPS kaplamalar gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan dağıtıcının, çözelti pH değişimine ve zeta potansiyeline etkisini incelemiştir. En uyumlu zeta potansiyelini pH 4 civarında yakalayan çalışma grubu, ağı. %0,5 dağıtıcı eklendiğinde pH'ın neredeyse yarıya düştüğünü ve nötr pH değerinde daha büyük zeta potansiyeli sağladığını rapor etmiştir.

Hazırlanan çözeltilerdeki çözen sıvı türü

Çözeltiler hazırlanırken etanol, su veya etanol-su karışımları tercih edilir. Etanol, yanıcı olduğu için plazma içindeki alev sıcaklığını arttırırken çözeltilerin tutuşmasına da yardımcı olur. Bu durumda daha yoğun bir kaplama eldesi gerçekleşir fakat ortamda su kullanımı, ortam sıcaklığını bir miktar düşürür ve bu nedenle daha gözenekli kaplamaların eldesine neden olur (Pateyron vd., 2013; Rapon vd., 2008; Chen vd., 2004; Pawlowski, 2009; Chidambaram Seshadri vd., 2016).

İşlem sıcaklığı

Genelde kaplama uygulanan tabaka sıcaklığı 500 °C olarak düşünülmektedir. Püskürtme mesafesinin kısaltılması ile de bağlantılı olarak, daha kısa mesafeler, plazmanın etkisi ile daha yüksek sıcaklıklara çıkılmasına ve yerel sıcaklığın artmasına neden olacağından sinterlenme mekanizmasını etkiler. Dolayısı ile daha yoğun kaplamaların eldesini sağlayabilir (Tingaud vd., 2008).

Akım ve güç seviyesi

Akım ve güç, sıcaklık, kaplama karakteristiği ve kaplama hızı ile doğrudan alakalıdır çünkü plazmanın fiziksel karakteristiğini de değiştirir. Kullanılan torç, akım ve güç seviyeleri ayarlanmalı ve torç yeterince iyi soğutulmalıdır (Waldbilling ve Kesler, 2011; Couder ve Rat, 2010).

Gaz akış oranı

Gaz akış hızı, torç gücü üzerinde etkilidir ve kaplama yoğunluğunda değişikliklere yol açar. Literatür çalışmasından, gaz akış hızındaki bir artış torç gücünü ve plazma hızını arttırmaya katkıda bulunmuştur (Waldbilling ve Kesler, 2011).

Altlık pürüzlülüğü

Altlık pürüzlülüğünün uçuş sırasındaki partikül özellikleri üzerinde hiçbir etkisi yoktur. Kaplamanın mikroyapısal özellikleri üzerinde en az etkili parametrelerden biridir ve ne gözeneklilik ne birikme hızı ne de mikro

çatlak yoğunlukları (dikey/yatay) farklı yüzey pürüzlülük değerlerinde uygulanan yüzeyler ile çok az bir değişiklik göstermiştir (Tarasi vd., 2008).

SONUÇ

Süspansiyon ve solüsyon öncüllü plazma püskürtme yöntemleri, günümüzde yaygın bir şekilde kullanılan geleneksel atmosferik plazma yöntemine ve bunun yanı sıra diğer birçok kaplama yöntemine göre avantajlı, düşük gözeneklilik, yüksek saflık ve uygulama kolaylığı sağlayabilen ve çok geniş bir malzeme kitlesine uygulanabilen yeni bir yöntemdir. Bu yöntem kullanılarak başta termal bariyer kaplamalar, süper hidrofobik yüzeyler ve biyomalzeme uygulamaları gerçekleştirilmekte ve bunun yanı sıra yeni alanlarda da kullanımları yaygınlaştırılmaya ve araştırılmaya çalışılmaktadır. Yöntem kapsamında birçok parametre kontrol edilebilir, değiştirilebilir ve farklı özelliklerde kaplamalar elde edilebilir.

KAYNAKÇA

- Allu, H., Nallu, R. (2022). Tribological performance of Yttrium stabilized zirconia coatings on Ti6Al7Nb alloy in Hanks Balanced Salt, *Materials Today Proceedings*, 57(2), 515-521.
- Ashby, M.F., Ferreira, P.J., Schodek, D.L. (2009). Nanomaterials properties, 199–255 in nanomaterials, nanotechnologies and design. Elsevier Ltd., Kidlington, UK
- Bai, Y., Zhou, S.-J., Shi, L., Ma, W., Liu, C.-W. (2018). Fabrication and Characterization of Suspension Plasma-Sprayed Fluoridated Hydroxyapatite Coatings for Biomedical Applications, *Journal of Thermal Spray Technology*, 27, 1322-1332.
- Basu, S., Ürdün, E.H., Cetegen, B.M. (2008). Fluid Mechanics and Heat Transfer of Liquid Precursor Droplets Injected into High-Temperature Plasmas, *Journal of Thermal Spray Technology*, 17, 60–72.
- Cai, Y., Coyle, T.W., Azimi, G., Mostaghimi, J. (2016). Superhydrophobic Ceramic Coatings by Solution Precursor Plasma Spray, *Scientific Reports*, 6, 24670.
- Canas, E., Rosado, E., Alcaazar, C., Orts, M.J., Moreno, R., Sanchez, E. (2022), Challenging zircon coatings by suspension plasma spraying, *Journal of the European Ceramic Society*, 42(10), 4369-4376.
- Chen, D.Y., Jordan, E.H., Gell, M. (2009). Microstructure of Suspension Plasma Spray and Air Plasma Spray Al₂O₃-ZrO₂ Composite Coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, 18(3), 421-426.
- Chen, Z., Trice, R.W., Besser, M., Yang, X., Sordelet, D. (2004). Air-plasma spraying colloidal solutions of nanosized ceramic powders, *Journal of Materials Science*, 39(13), 4171-4178.
- Chidambaram Seshadri, R., Dwivedi, G., Viswanathan, V., Sampath, S. (2016). Characterizing Suspension Plasma Spray Coating Formation Dynamics through Curvature Measurements, *Journal of Thermal Spray Technology*, 25, 1666-1683.
- Coudert J.F., Rat, V. (2010). The role of torch instabilities in the suspension plasma spraying process, *Surface and Coatings Technology*, 205(4), 949–953.
- Fan, W., Bai, Y. (2016). Review of suspension and solution precursor plasma sprayed thermal barrier coatings, *Ceramics International*, 42(13), 14299-14312.
- Farrokhpanah, A., Coyle, T.W., Mostaghimi, J. (2017). Numerical Study of Suspension Plasma Spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, 26, 12–36.
- Fauchais, P., Heberlein, J., Boulos, M. (2014.) Thermal spray thermal spray fundamentals, 1550. Springer, Heidelberg.
- Fauchais, P., Montavon, G. (2007). Plasma Spraying: From Plasma Generation to Coating Structure, *Advances in Heat Transfer*, 40, 205-344.
- Fauchais, P., Vardelle, M., Goutier, S., Vardelle, A. (2015). Key Challenges and Opportunities in Suspension and Solution Plasma Spraying, *Plasma Chem Plasma*

Process (2015) 35:511–525

- Geng, X., You, J. Zhang, C. (2016-1). Microstructure and Sensing Properties of CdS-ZnO_{1-x} Coatings Deposited by Liquid Plasma Spray and Treated with Hydrogen Peroxide Solution for Nitrogen Dioxide Detection at Room Temperature, *Journal of Alloys and Compounds*, 687, 286-293.
- Geng, X., Zhang, C., Debliquy, M. (2016-2). Cadmium Sulfide Activated Zinc Oxide Coatings Deposited by Liquid Plasma Spray for Room Temperature Nitrogen Dioxide Detection under Visible Light Illumination, *Ceramics International*, 42(4), 4845-4852.
- Gitzhofer, F., Bouyer, E., Boulos, M.I. (1997). Suspension Plasma Spray Deposition, US Patent no 5609921.
- Gross, K. A., Saber-Samandari, S. (2009). Revealing mechanical properties of a suspension plasma sprayed coating with nanoindentation. *Surface and Coatings Technology*, 203(20-21), 2995-2999.
- Jaworski, R., Pawlowski, L., Pierlot, C., Roudet, F., Kozerski, S., Petit, F. (2010). Recent developments in suspension plasma sprayed titanium oxide and hydroxyapatite coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 19(1-2), 240- 247.
- Karthikeyan, J., Berndt, C.C., Tikkanen, J., Reddy, S., Herman, H. (1997) Plasma spray synthesis of nanomaterial powders and deposits, *Materials Science and Engineering: A*, 238, 275-286.
- Killinger, A., Gadow, R., Mauer, G., Guignard, A., Vaßen, R., Stöver, D. (2011). Review of New Developments in Suspension and Solution Precursor Thermal Spray Processes, *Journal of Thermal Spray Technology*, 20(4):677–695
- Lashmi, P.S., Ananthapadmanabhan, P.V., Unnikrishnan, G., Aruna, S.T. (2020). Present status and future prospects of plasma sprayed multilayered thermal barrier coating systems, *Journal of the European Ceramic Society*, 40(8), 2731-2745.
- Liu, S.-H., Telles, J.P., Li, C.-J., Li, C.-X., Guo, H.-B. (2022). A review and progress of multiphase flows in atmospheric and low pressure plasma spray advanced coating, *Materials Today Physics*, 27, 100832.
- Mahmud Abir, M.M., Otsuka, Y., Ohnuma, K., Miyashita, Y. (2022). Effects of composition of hydroxyapatite/gray titania coating fabricated by suspension plasma spraying on mechanical and antibacterial properties, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 125, 104888.
- Merche, D., Vandecasteele, N., Reniers, F. (2012). Atmospheric plasmas for thin film deposition: A critical review, *Thin Solid Films*, 520(13), 4219-4236.
- Nowakowska, M., Latka, L., Sokolowski, P., Szala, M., Toma, F.-L., Walczak, M. (2022). Investigation into microstructure and mechanical properties effects on sliding wear and cavitation erosion of Al₂O₃-TiO₂ coatings sprayed by APS, SPS and S-HVOF, *Wear*, 508-509, 204462.
- Padture, N.P., Gell, M., Jordan, E.H. (2002). Materials Science-Thermal Barrier Coatings for Gas Turbine Engine Applications, *Science*, 296(5566), 280–284.

- Pateyron, B., Calve N., Pawłowski, L. (2013). Influence of water and ethanol on transport properties of the jets used in suspension plasma spraying, *Surface and Coatings Technology*, 220, 257-260.
- Pawłowski, L. (2009) Suspension and solution thermal spray coatings, *Surface and Coatings Technology*, 203(19), 2807-2829.
- Rampon, R. Marchand, O. Filiatre C., Bertrand, G. (2008). Influence of suspension characteristics on coatings microstructure obtained by suspension plasma spraying, *Surface and Coatings Technology*, 202, (18), 4337-4342.
- Samiksha, M., Gnanamoorthy, R., Otsuka, Y. (2022). Fretting Wear Characteristics of Suspension Plasma-Sprayed Hydroxyapatite Coating on Titanium Substrate for Orthopedic Applications, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31, 7290-7301.
- Sharifi, N., Dolabati, A., Pugh, M., Moreau, C. (2019). Anti-icing performance and durability of suspension plasma sprayed TiO₂ coatings, *Cold Regions Science and Technology*, 159, 1-12.
- Tao, S., Yang, J., Shao, F., Zhao, H., Zhong, X., Zhuang, Y., Sheng, J., Ni, J., Li, K., Tao, S. (2022). Effect of Cracks on Thermal Shock Behavior of Plasma-Sprayed Thick Thermal Barrier Coatings, *Journal of Materials Engineering and Performance*, in-press
- Tarasi, F., Medraj, M., Dolabati, A., Oberste-Berghaus, J., Moreau, C. (2008). Effective Parameters in Axial Injection Suspension Plasma Spray Process of Alumina-Zirconia Ceramics, *Journal of Thermal Spray Technology*, 17, 685-691.
- Tendero, C., Tixier, C., Tristant, P., Desmaison, J., Leprince, P. (2006). Atmospheric pressure plasmas: A review, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 61(1), 2-30.
- Tingaud, O., Grimaud, A., Denoirajan, A., Montavon, G., Sıçan, V., Coudert, J.F., Fauchais, P., Chartier, T. (2008). Suspension Plasma-Sprayed Alumina Coating Structures: Operating Parameters Versus Coating Architecture, *Journal of Thermal Spray Technology*, 17, 662-670.
- Uricchio, A., Fanelli, F. (2021). Low-Temperature Atmospheric Pressure Plasma Processes for the Deposition of Nanocomposite Coatings, *Processes*, 9(11), 2069.
- VanEvery, K., Krane M.J.M., Trice, R.W. (2012). Parametric study of suspension plasma spray processing parameters on coating microstructures manufactured from nanoscale yttria-stabilized zirconia, *Surface and Coatings Technology*, 206, (8-9), 2464-2473.
- Vaßen, R., Jarligo M.O., Steinke, T., Mack, D., Detlev, S. (2010). Overview on advanced thermal barrier coatings, *Surface & Coatings Technology*, 205(4), 938-942.
- Vaßen, R., Kaßner, H., Mauer, G., Stoßver, D. (2010). Suspension Plasma Spraying: Process Characteristics and Applications, *Journal of Thermal Spray Technology*, 19(1-2):219-225
- Verbeek, A. T. J. (1992). Plasma sprayed thermal barrier coatings: production, chara-

cterization and testing. Phd Thesis, (Research TU/e / Graduation TU/e), Mechanical Engineering). Technische Universiteit Eindhoven.

- Viswanathan, V., Laha, T., Balani, K., Agarwal, A., Seal, S. (2006). *Material Science and Engineering R*, 54, 121–285.
- Waldbilling, D., Kesler, O. (2011). Effect of suspension plasma spraying process parameters on YSZ coating microstructure and permeability. *Surface and Coatings Technology*, 205(23-24), 5483-5492.
- Wang, W.Z., Coyle, T., Zhao, D. (2014). Preparation of Lanthanum Zirconate Coatings by the Solution Precursor Plasma Spray, *Journal of Thermal Spray Technology*, 23(5), 827-832.
- Xu, K., Liu, K., Liao, H., Dosta, S., Zhang, C. (2022). Suspension Plasma Sprayed ZnO Coatings for CO₂ Gas Detection, *Journal of Thermal Spray Technology*, in-press.
- Xu, P., Coyle, T.W., Pershin, L., Mostaghimi, J. (2018). Fabrication of micro-/nano-structured superhydrophobic ceramic coating with reversible wettability via a novel solution precursor vacuum plasma spray process, *Materials and Design*, 160, 974-984.
- Zhang, C. Geng, X., Li, J., Luo, Y. Lu, P. (2017). Role of Oxygen Vacancy in Tuning of Optical, Electrical and NO₂ Sensing Properties of ZnO_{1-x} Coatings at Room Temperature, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 248, 886-893.
- Zhang, C., Geng, X., Li, H., He, P.-J., Planche, M.P., Liao, H., Olivier, H.G., Debliquy, M. (2015). Microstructure and Gas Sensing Properties of Solution Precursor Plasma-sprayed Zinc Oxide Coatings, *Materials Research Bulletin*, 63, 67-71.
- Zhao, P., Bai, Y., Ma, W., Li, D., Wang, Y., Lou, S., Wang, Q. (2022), Magnetic properties and Tb diffusion of sintered Nd–Fe–B magnets by suspension plasma spraying, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 557, 169497.

Bölüm 2

PUZOLANİK ETKİLERİ AÇISINDAN ATIKLARIN ZEMİN İYİLEŞTİRMEDE KULLANIMI

Murat KARADENİZ¹

Gamze BİLGEN²

1 Murat Karadeniz. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9863-1908>

2 Doç. Dr. Gamze Bilgen. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Alaplı MYO, Alaplı-Zonguldak, Türkiye. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2840-7369>

1. GİRİŞ

Atıkların geri kazanımının yapılacağı sektörün, büyük hacimlerde kullanılacağı bir sektör olması tercih sebebidir. Bu sebeple inşaat sektörü en tercih edilen sektörlerden biridir çünkü inşaat sektöründe kullanılan malzeme miktarları oldukça yüksek hacimlidir. Örneğin, 2006 verilerine göre, Amerika Birleşik Devletleri'nde 6,4 milyon kilometre karayolu vardır. Üstelik bu yollara her 2-5 yılda bir bakım onarım çalışmaları yapılmaktadır ve bu yollar her 20-40 yılda bir değiştirilmektedirler (Carpenter vd., 2007). Dolayısı ile, atıkların inşaat sektöründe değil sadece yol ve dolgu inşasında kullanılması bile, atıkların geri kazanılmasında önemli rol oynayacaktır. Literatürde bulunan çalışmalar da atıkların inşaat sektöründe kullanımının oldukça önemsenmekte olduğunun bir göstergesidir (Bilgen, 2011; Cetin vd., 2006; Komonweeraket vd., 2015).

Literatürdeki çalışmalarda kullanılan atıklar, genelde malzeme özelliğini iyileştirme amacı ile kullanılmaktadır. Çimento gibi, beton gibi malzemelerin yanında, yapı-zemin etkileşimi, temel projelendirilmesi gibi konularda ön plana çıkan zemin kavramı, aynı zamanda bir inşaat malzemesi olarak da ele alınmaktadır. Bu açıdan, atıkların zemin sorunlarının giderilmesi, zemin iyileştirme kapsamında ele alınan bir konu başlığını oluşturmaktadır.

Zemin iyileştirme çalışmalarında, en ayırıcı etmenin zemin sınıfı olduğu görülmektedir. Geoteknik açıdan zeminlerin sınıflandırılmasında farklı sistemler kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan sınıflandırma sistemlerinden biri "Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma" (USCS) sistemidir. Bu sistemde zeminler, dane çapları esas alınarak sınıflandırılırlar. Çapları 0,075 ila 76,2 mm olan zeminler "iri" veya "kohezyonsuz", 0 ila 0,075 mm arası olanlar ise "ince" veya "kohezyonlu" olarak adlandırılırdılar. İri zeminler, aralarında çakıl (4,75 ila 76,2 mm arası çapa sahip danelerden oluşan zeminler) ve kum (0,075 ila 4,75 mm arası çapa sahip danelerden oluşan zeminler) olarak iki gurubu ayrılır. İri daneli zeminler genel olarak yol ve dolgu çalışmalarında kullanım için istenen geoteknik özellikleri açısından yeterlidir ve "standartlara uygun agrega" olarak değerlendirilirler. Killi ve siltli zeminler ise genel olarak yol ve dolgu çalışmalarında kullanım için standartlarca belirlenmiş olan geoteknik özellikleri taşımazlar. Bu sebeple, ilgili çalışmalarda iyileştirme yapılmadan kullanılmasına izin verilmeyen zeminler olarak değerlendirilirler (Tunç, 2001; Altuntaş & Bilgen, 2022). Uzun yıllar boyunca, yol inşası esnasında iyileştirme ihtiyacı olan killi zeminler ile karşılaşıldığında, bu zayıf zeminler sökölüp uzaklaştırılarak yerine iri daneli zeminlerin yerleştirilmesi uygulanmıştır (Bilgen, 2004, 2020b). Ancak, istenen boyutlarda çakıl ve kum temini için taş ocaklarının kullanılıyor olması başka bir deyişle doğal kaynakların azalması, farklı malzeme arayışlarına sebep olmuştur. Böylece yol yapım inşasında atıkların alternatif bir malzeme olarak kullanılması konusu gündeme gelmiştir.

Sunulan bu çalışma kapsamında, atıkların, inşaat sektöründe yeniden kullanımı yolu ile bertaraf edilmesi konusu ele alınmıştır. Ele alınan konu geoteknik uygulamalar çerçevesinde irdelenmiş ve atıkların yeniden kullanımı üzerine yapılmış olan literatür çalışmaları, yönetmelikler ve standartlar taranmıştır. Çalışmanın amacı, konu kapsamında ele alınan atıkların genel özelliklerini ana hatlarıyla ortaya koymak ve atıkların puzolanik etkileri bilgi vermektir.

2. ATIKLAR İLE İLGİLİ İSTATİSTİKSEL VERİLER

Atık kelimesi, herhangi bir ürünün elde edilmesi için üretim aşamasından başlayan ve tüketim esnasına kadar olan süreçte kullanılmış olan ancak artık işe yaramayan ve çevresel açıdan zararları bulunan tüm maddelere verilen bir isimdir (Bilgen, 2021). Atık kelimesi, 1900'lü yıllara kadar, "çöp" kelimesi ile aynı anlamda kullanılabilmekte iken, 2000'li yıllarda farklı bir boyut kazanmıştır. Bunun nedeni şu şekilde özetlenebilir: Doğa, sistemi gereği, atık durumunda olan maddeleri (çöpleri) bünyesine alarak, onu gübre veya benzeri şekillere dönüştürerek yeniden kullanmaktadır. Ancak, çöp miktarları ve organik olmayan çöplerin çeşitliliği, doğanın kendi kendine geri dönüştürebilme limitlerini aşırı derece aşmış olduğundan, doğa bu atıklar ile baş edemez hale gelmiştir. Böylece dünya, atık sorunu, küresel ısınma, temiz su kaynaklarının azalması gibi daha öncesi olmayan evrensel yeni sorunlarla muhatap olmaya başlamıştır (Solak & Pekküçükşen, 2018). Dünya bankası raporlarına göre 2050 yıllarına ait tahmin edilen atık miktarlarını miktarı 3,40 milyar ton olarak belirlenmiştir (Kaza vd., 2018). Environmental Protection Agency- Çevreyi Koruma Ajansı (EPA), atıkları, kentsel katı atıkları, tehlikeli atıklar, endüstriyel tehlikesiz atıklar, tarımsal ve hayvansal atıklar, tıbbi atıklar, radyoaktif atıklar, inşaat ve yıkım molozları, çıkarma ve madencilik atıkları, petrol ve gaz üretim atıkları, fosiller, yakıt yakma atıkları ve kanalizasyon çamuru gibi birçok farklı türde sınıflandırmaktadır (EPA, 2022). Bu çalışma kapsamına giren atıklar, literatürde, inşaat sektöründe kullanımı üzerinde çalışma yapılan atıklardır.

İstatistiksel veriler, inşaat sektöründe kullanılmak üzere en çok çalışma yapılan atıklar arasında beton geri dönüşüm agregası (RCA), asfalt geri dönüşüm yol kaplama agregası (RAP), asfalt yol yapım çakılı atıkları (RAS), kauçuklu beton kaplama (RCP), tuğla atıkları (REB), Cam atıkları (RGA) gibi malzemeler bulunduğunu göstermektedir (Arulrajah vd., 2013; Bilgen, 2020a; Houlihan vd., 2021; Liu vd., 2020; Sharma Ravi Kumar Sharma, 2020). Literatürde bulunan verilere göre dikkat çekici olan cam atığı miktarının oldukça yüksek olmasıdır. Zira, dünya çapında en büyük hacimli katı atıklar sıralamasında cam atıkları, plastik, ambalaj kâğıdı ve metal atıklarından sonra dördüncü sıra bulunmaktadır (Bilgen, 2020b, 2020c, 2022; Hamza & Ahmed, 2020). 2015 yılında dünyadaki sadece cam konteyner üretiminin 50.63 milyon ton civarına ulaştığı ve 2022 yılına kadar 65.42 milyon ton civarında ola-

çağı tahmin edilmektedir (Lu vd., 2021; Vinci vd., 2019).

Geri dönüşümü veya yeniden kullanımı sağlanamayan atıkların büyük miktarlardaki hacimlerinin azaltılması amacı ile yakım işlemi gerçekleştirilmekte ve enerji elde edilmektedir. Ancak, atıkların yakılması yerine sıkıştırılması veya geri dönüştürülmesi bu enerji tasarrufunun 5 kat daha arttırılabileceği de savunulan fikirler arasındadır. Öte yandan, Fransa, en geç 2023 yılına kadar restoranlarda yeniden kullanılabilir cam ürünleri (tabak, bardak vd), çatal bıçak ve ambalaj kullanımını zorunlu kılmıştır (Fakhar & Jiang, 2020).

3. ATIKLARDA GEOMETRİK BOYUT ETKİLERİ

Geri dönüştürülmüş malzeme olarak değerlendirilen atıklar geoteknik açıdan ele alındığında, granülometre (dane dağılımı) etkili bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Araştırmalar bazı atıkların farklı granülometrilerdeki durumlarının zemin iyileştirmede farklı amaçlara hizmet edebileceğini göstermektedir. Bu konuda yapılan araştırmalar fiziksel yöntemler ve kimyasal yöntemler olarak iki farklı şekilde ele alınmıştır.

Fiziksel yöntemler olarak sınıflandırılan kategoride, atıkların, beton ve benzeri inşaat malzemeleri üretiminde agrega olarak kullanım çalışmaları yapılmaktadır. Literatürde beton yapımında ve asfalt yapımında agrega olarak RCA kullanımının uygun olduğu savunulan çalışmalarda, malzemelerinin hava içeriği, birim ağırlığı, gerilme ve eğilme mukavemetleri gibi özelliklere etkileri ele alınmaktadır (Aly vd., 2011; Dash & Hussain, 2012; Xu & He, 2021). Atık camların inşaat sektöründe kullanımı ile ilgili olarak yapılan çalışmalar, camın, beton agregası, filtrasyon malzemesi, seramik ve tuğla yapımında bağlayıcı, metal döküm işleri ve çimento üretiminde katkı maddesi gibi farklı alanlarda gerçekleştirilmekte olup, kullanılan cam boyutu azaldıkça, camın doğal agregaya yakın özellikler sergilediğini belirtmektedirler (Aliabdo vd., 2016; Patel vd., 2019).

Kimyasal yöntemler olarak sınıflandırılan kategoride ise, atık malzemelerin öğütülerek toz haline getirdikten sonra, katkı malzemesi olarak kullanılması şeklinde çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Toz haline getirildikten sonra katkı olarak kullanımı üzerine en yoğun çalışmaların yapıldığı atık malzemeler, yüksek fırın curufu, çelikhane curufu, atık cam ve uçucu kül olarak sıralanabilir (Chen vd., 2009; Fredericci vd., 2000; Adediran vd., 2021). Kimyasal yöntemlerde atıklar, agrega olarak değil, puzolanik etki yapan bir malzemesi olarak değerlendirilmektedir. İyileştirme amacı ile katkı malzemelerinin kullanılabilirliğini savunan pek çok çalışma, konuyu geoteknik parametrelerde meydana gelen değişimlere göre irdelenmektedir. Katkı malzemesi, farklı zeminler ile harmanlanmakta, daha sonra katkılı ve katkısız numuneler üzerinde yapılan deneysel sonuçlara göre katkıların zeminin geoteknik özelliklerine etkileri belirlenmektedir. Literatürdeki bu tip çalışmalar-

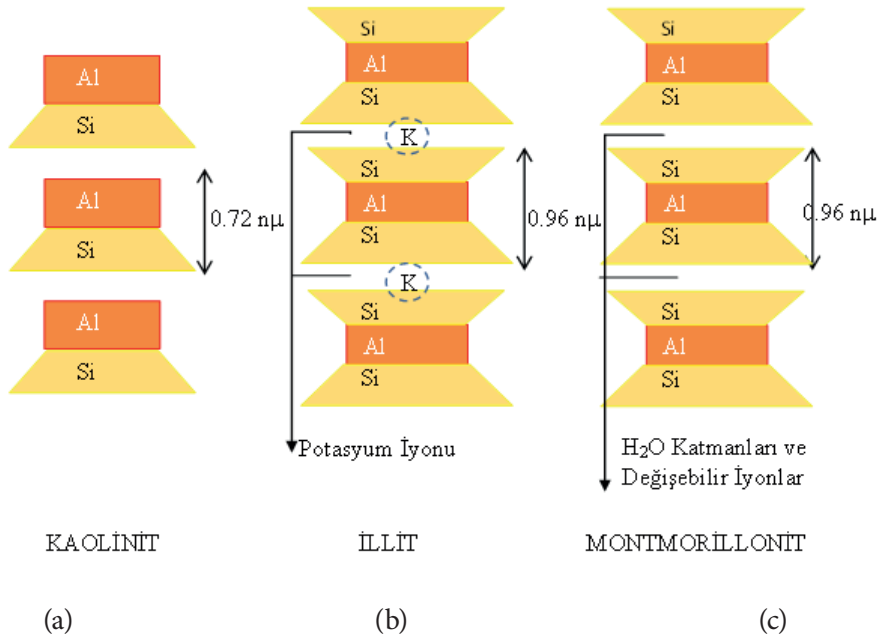
da atıkların puzzle etkisinin nasıl gerçekleştiği mikro yapısal incelemeler ile de desteklenmektedir (Aksoy & Bilgen, 2022; Aksoy & Gor, 2017; Arulrajah vd., 2015).

4. KİLLERİN MİKRO YAPISI

Killi zeminler, farklı disiplinlerde farklı bakış açıları ile ele alınmaktadır. Geoteknik mühendisliği disiplininde konuya makro açıdan yaklaşılmakta ve zeminin taşıma gücü, işlenebilirlik gibi özellikleri ele alınmaktadır. Malzeme bilimi gibi disiplinlerde ise killer, mineralojik olarak mikro açıdan incelenmekte, elementsel dizilimleri ve bu elementlerin birbirleri ile etkileşimleri irdelenmektedirler. Zeminlerin karakteristik özelliklerinin belirlenmesi, zemin iyileştirme mekanizmasının açıklanması ve sebep sonuç ilişkilerinin kurulabilmesi için, farklı disiplinlerdeki bu yaklaşımların birlikte ele alınması gerekmektedir.

Geoteknik mühendisliğine göre, ince daneli zeminler 75 mikrometreden küçük granülometriye sahiptir. 2 ila 75 mikron aralığındaki zeminler silt, 0 ila 2 mikrometre aralığındaki (fraksiyonundaki) zeminler ise kil olarak adlandırılır. Killi zeminler, suyu bünyesine çeken (su emme özelliğinin yüksek), dolayısı ile su geçirgenliği (permeabilitesi) oldukça düşük, şişme potansiyelleri yüksek, topaklanma eğilimleri fazla zeminler olarak tanımlanır (Edil vd., 2006). Ayrıca, kohezyona bağlı bir taşıma gücü bulunan killi zeminler, su muhtevası arttıkça plastikleşir ve kuruma sonucu sertleşirler (Sharma vd., 2012).

Kil mineralleri, düşük basınç ve düşük sıcaklıkta, silikatların ayrışması sonucu oluştuğundan pulcuklar halindedir ve Şekil 1 ve Şekil 2 de görüldüğü gibi yapıları tabakalı ve yaprakçıklıdır. Bu yaprakçıklar 2, 3 veya 4 tabakadan meydana gelmektedirler. En yaygın kil mineralleri Şekil 1 de görülen Kaolinit, İllit ve montmorillonittir. Şekil 1 (a) da görülen kaolinit, silis ve alüminyum levhacıklarının sıralanması ile meydana gelen iki tabakadan oluşmaktadır ve 1 gramında 80 m² iç yüzey alanına (özellik yüzeye) sahiptirler. Şekil 1 (c) de görülen montmorillonit, silis levhacıkları arasında alüminyum olarak 3 tabakadan meydana gelmektedir ve 1 gramında 800 m² iç yüzey alanına sahiptirler. Bir diğer yaygın olarak bulunan kil minerali olan illit, montmorillonit'e benzemek ile birlikte Şekil 1 (b) görüldüğü gibi silis levhacıkları arasında potasyum iyonları içermektedir (Holtz vd., 1981)

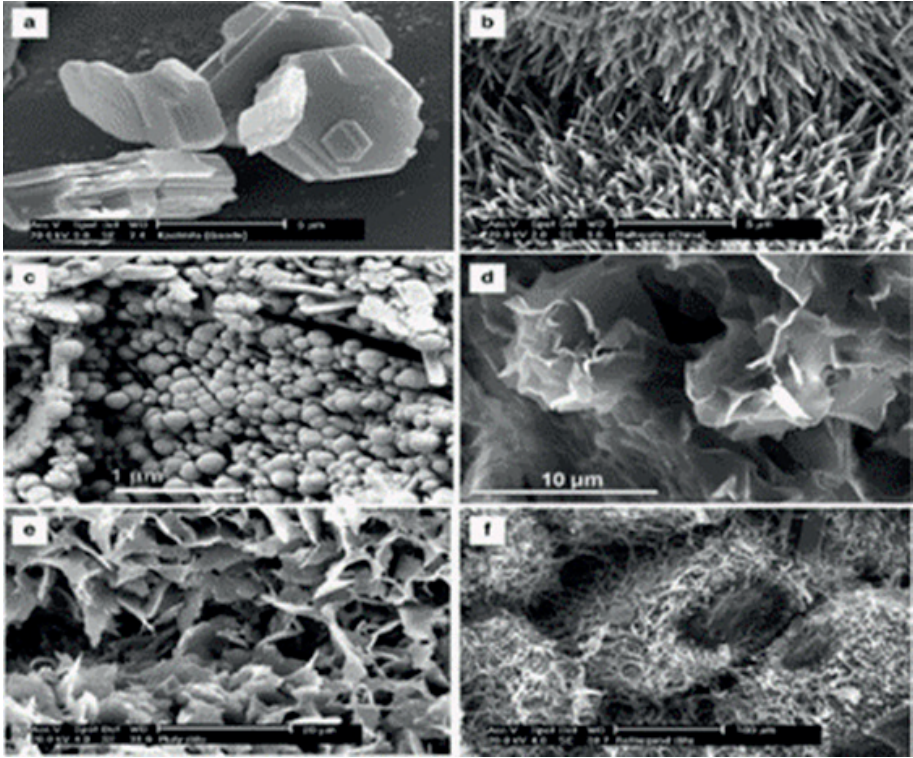


Şekil 1. Yaygın kil minerallerinin yapıları

Kil minerallerinin tabakalanmaları ve atomik yapıları, geoteknikte “su emme” olarak adlandırılan özelliği açıklamaktadır. Zira iç yüzey alanı büyüdükçe kil mineralleri daha çok su emmektedir. Bu sebeple, montmorillonit gurubundaki killi zeminlerin (bentonit) su emme oranı diğer killere göre daha fazladır. Öte yandan, geoteknik mühendisliğinde killi zeminlere neden kohezyonlu zeminler denildiği ve kohezyonun, mineraller arası oluşan elektriksel çekimden kaynaklandığı bu bilgi ışığında anlaşılmaktadır. Ek olarak bentonit kilinin yüksek su muhtevalarında plastik kıvama gelirken, kaolin kilinin düşük su muhtevalarında likit limitin üzerine çıktığının sebepleri de yine bahsedilen gerekçeler ile açıklanabilir. Görüldüğü gibi XRD, SEM, Raman gibi mikro yapısal analizler ile elde edilen veriler, killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin açıklanmasına ışık tutmaktadır.

Kil minerallerine element bazında bakıldığında, Şekil 2 de görülen tetrahedral ve oktahedral tabakaların farklı kombinasyonlarda bir araya gelerek farklı kil minerallerini meydana getirdiği görülmektedir (Basar vd., 2017). Şekil 2 (a) da görüldüğü üzere, tetrahedrallar bir silisyum katyonunu çevreleyen dört oksijen anyonundan oluşmuştur. Şekil 3 (b) de görülen oktahedrallar ise 6 köşesinde oksijen (O) veya hidroksil (OH) molekülleri ve merkezinde Al elementi bulunan bir yapıya sahiptirler. Tetrahedron yapıda, her oksijen atomunun valans elektron kabuğunda 8 yerine 7 elektronu bulunur. Silisyum atomunun ise 4 valans elektronu vardır. Oksijen iyonunun bu elektron noksa-

nını gidermek için, her oksijen ikinci bir silisyum ile bir çift elektron paylaşarak (SiO_4) nötr duruma gelir veya Na, K, Ca, Be, Li gibi katyonlar boşluklara yerleşerek elektrikçe nötr silikatlar meydana getirirler. Dolayısı ile, iyonlar arasında kuvvetli bir yapı oluşur. Böylece, bünyesinde bahsedilen elementlere sahip olan geri dönüştürülmüş malzemeler, katyon değişim kapasiteleri yüksek olan bu killi zeminlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde etkili olmaktadır.

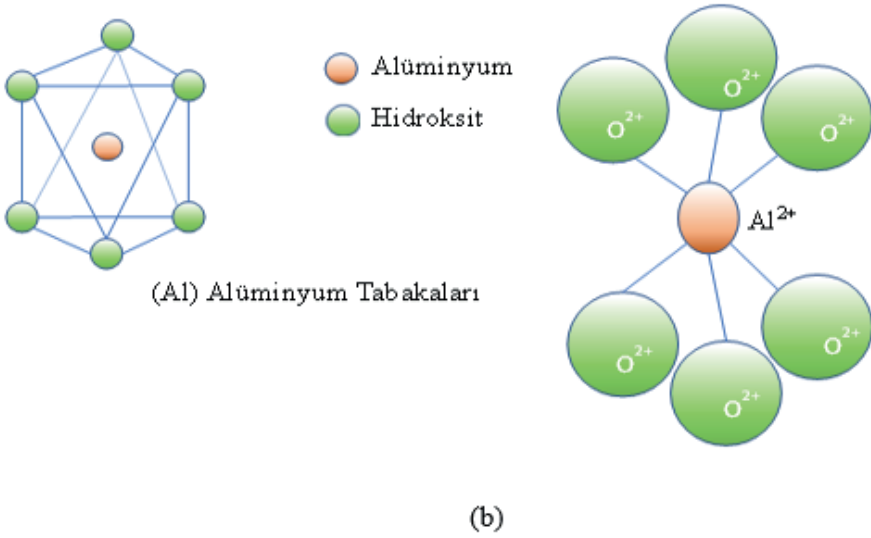
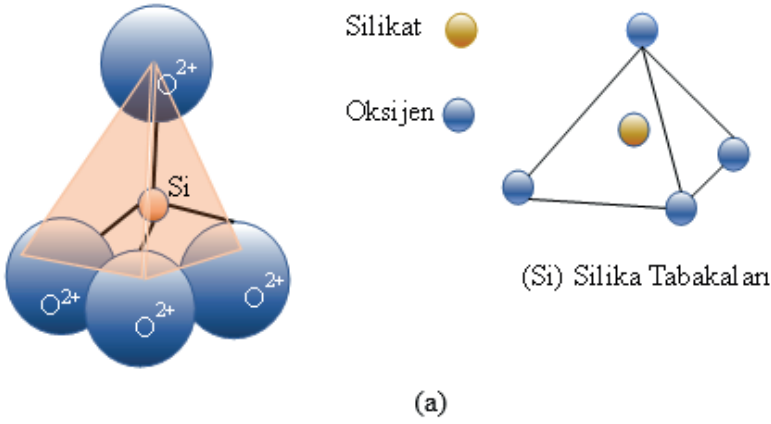


Şekil 2. Bazı kil minerallerinin SEM görüntüleri (Basar vd., 2017) (Fesharaki et al., 2007; Yeşrem 2020)

5. ATIKLARIN KİREÇ İLE BİRLİKTE KULLANIMI

Literatürde, kullanılan malzemelerden biri olan kireç ile killi zeminler arasındaki etkileşimin yüzyılı aşkın süredir incelendiği ve iyileştirme mekanizmasının puzolanik etkisinin çok farklı şekillerde ele alındığı görülmektedir (Abdi vd., 2021). Bölüm 1 de bahsedilen atıkların, agrega olarak kullanımının yanı sıra, zemin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak kullanımı da irdelenen konular arasındadır. Kirece göre, çok yeni bir malzeme olan atıkların, katkı malzemesi olarak kullanımı ile ilgili literatür verileri genel olarak sadece geoteknik deneyleri ile kurgulanarak yapılmıştır. Bilgen ve Al-

tuntaş (2023)'de kireç ile killi zeminler arasındaki etkileşimin, mikro yapı analizleri sonucu aydınlatıldığı ve geoteknik özelliklerdeki değişimin detaylı olarak açıklandığı görülmektedir (Bilgen & Altuntas, 2023). Örneğin, kirecin, killi zeminin plastisitesini ve şişme potansiyelini anında azaltma sebebi, kireç (Kalsiyum hidroksit- Ca(OH)_2) ile kilin girmiş olduğu reaksiyon esnasında, sodyum (Na^+) ve potasyum (K^+) katyonlarının kalsiyum (Ca^{+2}) veya magnezyum (Mg^{+2}) ile yer değiştiriyor olması şeklinde açıklanmaktadır. Aynı şekilde, kireç stabilizasyonunun en büyük kuru birim hacim ağırlığını düşürmesi, killi zeminin pH değerini ve optimum su muhtevasını yükseltmesinin sebebi, sülfat kontaminasyonu nedeniyle olmaktadır. Kirecin, farklı mineral yapıdaki killer ile etkileşimlerine de ışık tutulmuştur. Örneğin, kireç ile kaolinit kilinin reaksiyonunun, geçici olarak kalsiyum silika- hidratlar olarak tanımlanan yeni kristal fazların oluşumuna yol açtığını; bu reaksiyonun, bir kaolinit çekirdeği etrafında oluşan yeni bir faz ile kaolinit çekirdeğinin kenarlarına yerleşen kireç tarafından gerçekleştiğini; kireç içerisindeki kalsiyum (Ca), kaolinit parçacıklarının kenarlarına yerleştikçe zeminin yapısı güçlendiğini ve böylece taşıma gücünün artmaya başladığını belirtmektedir (Bilgen, 2022). Literatürde, kirecin killi zeminler üzerindeki puzolanik etkisi detaylı olarak şu şekilde açıklanmaktadır: Kireç, kille optimum su içeriğinde karıştırıldığında, kil ile kireç arasında bir reaksiyon meydana gelir. Kireçteki kalsiyum iyonları, zamanla sertleşen reaktif sulu silikalar ve/veya alüminatlar ile birleşerek çimentolu jelin oluşumuna yol açar. Bu nedenle kirecin killi zeminlerde puzolanik etkisi vardır (Ciancio vd., 2014; Javed vd., 2020). Değişik süreçlerde güncellenmiş olmakla beraber, kirecin katkı olarak kullanımı ile ilgili standartlar da hazırlanmıştır (ASTM C593, 2000).



Şekil 3. (a) Silika tetrahedronu (dört yüzü silika), (b) Alümina oktahedral (sekiz yüzü alümina)

6. İLGİLİ STANDARTLAR VE ANALİZLER

Atıkların yeniden kullanımı ile ilgili çalışmalarda kullanılan standartlar ve ilgili deneyler şu şekilde sıralanmaktadır: Killi zeminlerin endeks özellikleri tanımlamak adına; kullanılan killer üzerinde USCS ye göre (ASTM D2487-11, 2006) ve Amerikan Karayolları Sınıflandırma Sistemine (AASHTO M145, 2015) göre sınıflandırma deneyleri; (ASTM D4318, 2010) ye göre likit limit (LL), plastik limit (PL), plastisite indeksi (PI) değerlerinin belirlenmesi için kıvam limitleri (Atterberg limitleri); organik madde miktarının

belirlenmesi için organik madde tayini (ASTM D2974, 2002); katkılar dahil kullanılan tüm malzemelerin dane birim hacim ağırlıklarının belirlenmesi için spesifik gravite deneyi (ASTM D854, 2000) standartları tanımlanmaktadır. İkinci aşamada, karışımların dayanım deneyi numunelerinin hazırlanmasında kullanılmak üzere ve su-yoğunluk ilişkilerinin belirlenmesi için Proctor deneyi (ASTM D1557, 2003), dayanım değerlerinin belirlenmesi için serbest basınç deneyi (USC) (ASTM D2166, 2013) ve Kaliforniya taşıma gücü deneyi (CBR) (ASTM D1883, 2007) yapılmaktadır.

Atıkların yeniden kullanımının mikro boyutta açıklanması aşamalarında ise, SEM, XRD ve Raman analizlerinin uygulandığı görülmektedir. SEM, 3-boyutlu cisimlerin mikro yapısının incelemesi için kullanılan bir elektron mikroskobu tipidir. Odaklanmış bir elektron demeti aracılığı ile numune yüzeyi taranır. Tarama sonucu cismin yüzeyindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgi veren görüntülerin elde edilmesini sağlar. Böylece, malzemenin 10-10 metre mertebesine kadar incelenebilmesine imkân verir). Araştırmada kullanılacak numunelere ait SEM görüntüleri, killi zeminin montmorillonit, illit vb. gibi farklı kategorilerdeki kil mineralojilerinden hangisine sahip olduğunun belirlenmesinde ve katkılarının bu yapılarda yapmış olduğu değişimlerin açıklanmasında kullanılmaktadır. Aynı anda yapılacak EDX ölçümleriyle killi zemindeki elementlerin alansal değişimi incelenecek ve zemindeki kimyasal değişimler tanımlanmaya çalışılmaktadır. SEM analizi bir malzemenin atomik yapısını görüntülemeye yardımcı olurken, bilinmeyen yapıların belirlenmesi veya yapısal parametrelerin tayin edilmesi için ışın kırınım yöntemlerine ihtiyaç duyulur. Numunelerin kristal yapılarını incelemek için en çok kullanılan kırınım tekniği X-ışını kırınımı XRD dir. Çalışmalarda, kullanılan katkılarının killi zeminlerde meydana getirdiği yapısal değişimlerin ve mineralojik yapıdaki farklılaşmaların belirlenmesi için XRD deney sonuçlarından faydalanılmaktadır. Numuneler üzerinde, Rietveld Metoduyla Kantitatif Mineral Analizi yapıldığı görülmektedir. Bu analizde, kil örneklerinin ısı (2°-30° arası) işlem çekimleri yapıldıktan sonra, ASTM Standartlarına ve hazırlanmış olan veri tabanlarına göre mineralojik tanımlamaları yapılmaktadır.

Raman ışın saçılımı aracılığı ile moleküllerin titreşimi sonucunda bir molekül veya bileşik yapısında bulunan bağlar hakkında bilgi toplanır. Raman spektrometresi son yıllarda yer bilimlerinde özellikle mineraloji ve gemoloji çalışmalarında mineral tayinine yönelik yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılacak numuneler üzerinde yapılacak Raman analizleri yolu ile katkılarının kil minerallerinde meydana getireceği atomik bağlar ile ilgili bilgiler hem yüzeysel ve hem de derinlik boyutunda toplanmaktadır. Bu işlem için her bir karışım için 0.5-4 cm çapında makro örnekleme yapılmaktadır. Örnek hazırlandıktan sonra, örneğin üzerinde seçili bir noktanın tanımlaması yapılarak, mineral tayini gerçekleştirilmektedir.

7. GEOTEKNİK DENEYLER

İyi bir inşaat planlaması yapmak ve imalatı gerçekleştirmek için zemine ait verilerin eksiksiz ve doğru olmasına ihtiyaç duyulur. Veriler laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneyler yoluyla toplanmalıdır. Laboratuvar deneyleri ile zeminin fiziksel ve mekanik özellikleri elde edilir. Bu deneyler, zeminin fiziksel yapısı, dane büyüklüğü ve zeminin plastisite indisinden tespit edilen zemin sınıfı ve aynı şekilde zeminin dinamik ve statik yüklere maruz kaldığında gösterdiği direnci ifade eden zemin taşıma kapasitesi gibi mekanik özellikleri hakkında fikir verir. Zemin taşıma kapasitesi özelliklerine ait parametrelerden ikisi Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımı (UCS) değerleridir.

CBR, 5 cm çapında standart bir çubuğun zemine batırılması ile zeminin batma direncinin belirlendiği bir deneydir. CBR deneyi laboratuvar ekipmanları ile laboratuvar ortamında yapılırken, arazi ekipmanları ile istenilen bir arazi ortamında da gerçekleştirilebilen bir deneydir. Laboratuvarda gerçekleştirilecek CBR deneyinde Proktor (standart veya modifiye) deneyleri sonucunda elde edilen en uygun (optimum) su içeriği kullanılabilir. Aynı şekilde optimum su muhtevası dışında, istenilen herhangi bir su içeriği de numune hazırlamada kullanılabilir.



Şekil 4. Geoteknik çalışmalarında kullanılan numune örnekleri

Hazırlanan zemin numunesinden ortalama 6 kg kullanılır. İstenilen yoğunlukta standart bir kalıpta (152 cm) sıkıştırılan numune, 96 saat boyunca belirli bir yük altında doyurulur (suda bekletilir). Doyurma esnasında kullanılan yük, zeminin arazide maruz kalacağı yüklemeye göre seçilebilir. Uygun hale gelen numune, CBR cihazında deneye tabi tutulur. Standart bir CBR cihazında, 49.63 mm (1,954 in) çapında bir piston bulunur. Bu piston, CBR kalıbında bulunan doyurulmuş zemin numunesine dakikada 1,27 mm (0,05 in/dk) batacak şekildeki bir hızla batırılır. Deney sonucunda, pistonun numunenin içine 2,54 mm ve 5,08 mm batması için gerekli basınç hesaplanarak CBR değeri belirlenmiş olur.

Serbest basınç deneyi, zeminin serbest basınç dayanımını bulmayı amaçlayarak, belirli bir hızda ve sürede verilen statik gerilmeye karşı zeminin dayanımını test eder. Şekil 4'te serbest basınç deneyi numuneleri görülmektedir. Zeminin yenildiği andaki maksimum yük değeri, zeminin serbest basınç dayanımı değeri (qu olarak gösterilen bu değer, çalışmada UCS ile ifade edilmiştir) olarak yorumlanır.

8. SONUÇ

Gerçekleştirilen çalışmada, atıkların yeniden kullanımı konusunun çevresel, geoteknik, istatistiksel, mikro yapısal olarak farklı boyutları olduğu görülmektedir. Elde edilen veriler, pek çok atığın yol ve dolgu çalışmalarında kullanılabileceğini savunmaktadır. Ancak, ilgili çalışmaların büyük kısmının, çok küçük boyutlu örnekler üzerinde, standartlara uygun şekilde hazırlanmış laboratuvar ortamında ve standartlara uygun şekilde yapılan deneysel çalışmalar ile gerçekleştirildiği görülmektedir.

Araştırmalardan elde edilen verilerde atıkların zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği savunulmaktadır. Ancak, mevcut çalışmalarda, arazi uygulamalarının azlığı göze çarpmaktadır. Dolayısı ile gerçek koşullardaki sonuçlar, atıkların yeniden kullanımı konusunda daha gerçekçi bilgiler verecektir. Arazi uygulama çalışmalarının az olma sebepleri arasında, deneysel amaçla kullanılacak alan bulunamaması, uygulama ekipmanlarının temin edilemedeki güçlükler ve maddi yetersizlikler gibi sebepler olduğu düşünülmektedir. Zira, gerçek hava şartları ve gerçek yüklemeler altında yapılacak incelemeler, literatüre ve atıkların zemin stabilizasyonunda kullanımına önemli katkılar sunacaktır.

KAYNAKÇA

- AASHTO M318. (2015). *Standard specification for glass cullet use for soil-aggregate base course standard*. American Association of State Highway and Transportation.
- Abdi, M. R., Ghalandarzadeh, A., & Shafiei Chafi, L. (2021). An investigation into the effects of lime on compressive and shear strength characteristics of fiber-reinforced clays. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(4), 885-898. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.008>
- Adediran, A. A., Akinwande, A. A., Balogun, O. A., Adesina, O. S., & Olayanju, A. (2021). Experimental study on the mechanical behaviour of fired sand-clay and glass powder-clay bricks. *Acta Metallurgica Slovaca*, 27(1), 4-10. <https://doi.org/10.36547/ams.27.1.622>
- Aksoy, H. S., & Bilgen, G. (2022). Kohezyonsuz Zeminlerde İyileştirme Yöntemleri. İçinde C. Özalp & N. Akçakale (Ed.), *Mühendislik Alanında Teori ve Araştırmalar* (ss. 49-61). Serüven Yayınevi. www.seruvenyayinevi.com
- Aksoy, H. S., & Gor, M. (2017). High-speed railway embankments stabilization by using a plant based biopolymer. *Fresenius Environmental Bulletin*, 25(12), 7626-7633.
- Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, A. E. M., & Aboshama, A. Y. (2016). Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 866-877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016>
- Altuntaş, Ö. F., & Bilgen, G. (2022). Katkılı Zeminlerde Taşıma Gücünün İstatistiksel Yöntemlerle Tahmini. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 8(1), 13-23. <https://doi.org/10.29132/IJPAS.993022>
- Aly, M., Hashmi, M. S. J., Olabi, A. G., Messeiry, M., & Hussain, A. I. (2011). Effect of nano clay particles on mechanical, thermal and physical behaviours of waste-glass cement mortars. *Materials Science and Engineering A*, 528(27), 7991-7998. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.058>
- Arulrajah, A., Disfani, M. M., Haghghi, H., Mohammadinia, A., & Horpibulsuk, S. (2015). Modulus of rupture evaluation of cement stabilized recycled glass/recycled concrete aggregate blends. *Construction and Building Materials*, 84, 146-155. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.048>
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M. M., & Bo, M. W. (2013). Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8), 1077-1088. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000652](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000652)
- ASTM C593. (2000). Fly ash and other pozzolans for use with lime. İçinde *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- ASTM D854. (2000). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. İçinde *ASTM, west Conshohocken, 19428-2959 USA* (Sayı C). West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA. <https://doi.org/10.1520/D0854-14>

- ASTM D1557. (2003). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. İçinde *ASTM International, West Conshohocken, PA* (C. 3).
- ASTM D1883. (2007). Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. İçinde *ASTM, west Conshohocken, 19428-2959 USA*. https://doi.org/10.1520/D1883_21
- ASTM D2166. (2013). Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. İçinde *ASTM International, West Conshohocken, PA* (Sayı 1).
- ASTM D2487-11. (2006). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). *ASTM International, West Conshohocken, PA* (C. 04). [http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Standard+practice+for+classification+of+soils+for+engineering+purposes+\(unified+soil+classification+system\)#1](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Standard+practice+for+classification+of+soils+for+engineering+purposes+(unified+soil+classification+system)#1)
- ASTM D2974. (2002). Standard Test Methods for Determining the Water (Moisture) Content, Ash Content, and Organic Material of Peat and Other Organic Soil. *ASTM, west Conshohocken, 19428-2959 USA*. <https://doi.org/10.1520/D2974-20E01>
- ASTM D4318. (2010). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. İçinde *ASTM International, West Conshohocken, PA* (C. 04). <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Standard+Test+Methods+for+Liquid+Limit+,+Plastic+Limit+,+and+Plasticity+Index+of+Soils#1>
- Basar, H. M., Gozel, B., Erdogan, P. O., & Tolun, L. (2017). Determination of the environmental effects of Turkey's marine dredged materials prior to beneficial use: Commercial ports & fishery harbours. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(4), 1063-1076. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.369389>
- Bilgen, G. (2004). *Soil Stabilization with Blast Furnace Slag (in Turkish)*. Kocaeli University.
- Bilgen, G. (2011). Öğütülmüş çelikhane cürufu, kireç ve deniz suyun killerin iyileştirilmesinde kullanımı. Kocaeli Üniversitesi.
- Bilgen, G. (2020a). Effect of Recycled Concrete Aggregate (RCA) on Mechanical Properties of a Low Plasticity Clay. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 1714-1719. <https://doi.org/10.21597/jist.685938>
- Bilgen, G. (2020b). Utilization of powdered glass as an additive in clayey soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(3), 3163-3173. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01215-7>
- Bilgen, G. (2020c). Utilization of powdered glass in lime-stabilized clayey soil with sea water. *Environmental Earth Sciences*, 79(19). <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09195-w>
- Bilgen, G. (2021). Sürdürülebilir Çevre Kavramı Çerçevesinde İnşaat Ve Yıkım Atıkları. *Mühendislik ve Multidisipliner Yaklaşımlar* (ss. 403-434).

- Bilgen, G. (2022). Long-term compressive strength and microstructural appraisal of seawater, lime, and waste glass powder-treated clay soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(9). <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10167-6>
- Bilgen, G., & Altuntas, O. F. (2023). Sustainable re-use of waste glass, cement and lime treated dredged material as pavement material. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01815. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01815>
- Carpenter, A. C., Gardner, K. H., Fopiano, J., Benson, C. H., & Edil, T. B. (2007). Life cycle based risk assessment of recycled materials in roadway construction. *Waste Management*, 27(10), 1458-1464. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.007>
- Cetin, H., Fener, M., & Gunaydin, O. (2006). Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material. *Engineering Geology*, 88(1-2), 110-120. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGE0.2006.09.002>
- Chen, Y., Li, Z., & Wang, X. (2009). Research on rapid curing technology of lime-fly ash-cement stabilized macadam. *ICCTP 2009: Critical Issues in Transportation Systems Planning, Development, and Management-ASCE*, 357-364.
- Ciancio, D., Beckett, C. T. S., & Carraro, J. A. H. (2014). Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth. *Construction and Building Materials*, 53, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.077>
- Dash, S. K., & Hussain, M. (2012). Lime stabilization of soils: Reappraisal. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(6), 707-714. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000431](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000431)
- Edil, T. B., Acosta, H. A., & Benson, C. H. (2006). Stabilizing Soft Fine-Grained Soils with Fly Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(2), 283-294. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2006\)18:2\(283\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2006)18:2(283))
- EPA. (2022, Aralık 25). *Environmental Protection Agency, Wastes*. <https://www.epa.gov/report-environment/wastes#:~:text=Many%20different%20types%20of%20waste,fossil%20fuel%20combustion%20waste%2C%20and>
- Fakhar, H., & Jiang, J. (2020). A zero-waste approach to blast furnace slag by synthesis of mesoporous nanosilica with high surface area. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(1), 309-318. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02492-3>
- Fredericci, C., Zanutto, E. D., & Ziemath, E. C. (2000). Crystallization mechanism and properties of a blast furnace slag glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 273, 64-75.
- Hamza, A. A., & Ahmed, O. A. (2020). Seasonal Variation of Solid Waste Components in Ranya District, Iraq. *Journal of University of Raparin*, 7(2), 416-434. [https://doi.org/10.26750/vol\(7\).no\(2\).paper18](https://doi.org/10.26750/vol(7).no(2).paper18)
- Holtz, R., Kovacs, W., & Sheahan, T. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering Second Edition*. Pearson.
- Houlihan, M., Bilgen, G., Dayioglu, A. Y., & Aydilek, A. H. (2021). Geoenvironmental evaluation of RCA-stabilized dredged marine sediments as embankment

- material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(1), 4020435. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003547](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003547)
- Javed, U., Khushnood, R. A., Memon, S. A., Jalal, F. E., & Zafar, M. S. (2020). Sustainable incorporation of lime-bentonite clay composite for production of ecofriendly bricks. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121469. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121469>
- Kaza, S., Yao, L., Bhanda-Tata, P., & Woerden, F. V. (2018). *What a waste 2.0: A Global snapshot of solid waste management to 2050*. Woldr Bank Group. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Komonweeraket, K., Cetin, B., Aydilek, A. H., Benson, C. H., & Edil, T. B. (2015). Geochemical Analysis of Leached Elements from Fly Ash Stabilized Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(5), 4015012. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001288](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001288)
- Liu, L., Li, Z., Cai, G., Liu, X., & Yan, S. (2020). Humidity field characteristics in road embankment constructed with recycled construction wastes. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120977. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120977>
- Lu, Y., Liu, S., Zhang, Y., Yang, M., Fu, Z., & Wang, L. (2021). Sustainable reuse of coarse aggregates in clay-based impervious core: Compactability and permeability. *Journal of Cleaner Production*, 308, 127011. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127011>
- Patel, D., Tiwari, R. P., Shrivastava, R., & Yadav, R. K. (2019). Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement in making paste and mortar. *Construction and Building Materials*, 199, 406-415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.017>
- Sharma, N. K., Swain, S. K., & Sahoo, U. C. (2012). Stabilization of a Clayey Soil with Fly Ash and Lime: A Micro Level Investigation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(5), 1197-1205. <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9532-3>
- Sharma Ravi Kumar Sharma, A. (2020). Strength and Drainage Characteristics of Poor Soils Stabilized with Construction Demolition Waste. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 4753-4760. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01324-3>
- Solak, S. G., & Pekküçükşen, S. (2018). Türkiye’de kentsel katı atık yönetimi: Karşılaştırmalı bir analiz. *Manas Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 7(3), 653-683.
- Tunç, A. (2001). *Yol malzemeleri ve uygulamaları*. Atlas Yayınevi.
- Vinci, G., D’Ascenzo, F., Esposito, A., Musarra, M., Rapa, M., & Rocchi, A. (2019). A sustainable innovation in the Italian glass production: LCA and Eco-Care matrix evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 223, 587-595. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.124>
- Xu, Y., & He, T. (2021). Effect of mitigating strength retrogradation of alkali accelerator by the synergism of sodium sulfate and waste glass powder. *Journal of Renewable Materials*, 9(11), 1991-1999. <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.015931>

Bölüm 3

GİYİLEBİLİR TEKNOLOJİLERİN İNSAN SAĞLIĞINA VE PERFORMANSINA ETKİLERİ: YENİ YÖNELİMLER VE ARAŞTIRMALAR

Osman ŞAHİN¹

Halil ÖZDOĞAN²

Okan BİNGÖL³

1 Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, ORCID: 0000-0003-3998-162X

2 Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, ORCID: 0000-0003-0969-4996

3 Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, ORCID: 0000-0001-9817-7266

1. Giriş

Giyilebilir teknoloji, insanların aksesuar olarak kullanabilecekleri, giysilerine yerleştirebilecekleri veya hatta ciltlerine yerleştirebilecekleri elektronik cihazlar kategorisinde yer alır. Bu cihazlar, kullanıcılar tarafından pratik bir şekilde kullanılabilir ve mikro işlemcilerle desteklenirler. Ayrıca, internet üzerinden veri gönderme ve alma özellikleri de bulunur. Giyilebilir teknolojilerin hızlı bir şekilde benimsenmesi, nesnelerin interneti (IoT - internet of things) kavramının da öne çıkmasına neden olmuştur. Bu cihazlar, internet protokolü (IP) kullanarak, dünya çapındaki bilgisayarlarla iletişim kurabilmektedir. Nesnelerin interneti, gerçek zamanlı haberleşme olanağı sağlayabilen ve istenilen bilgileri daha hızlı bir şekilde sunabilen sistemlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu teknolojilerin temel amacı, insan müdahalesine bağlı sistemlerden daha hızlı ve verimli bir şekilde çalışabilen cihazlar geliştirmektir. Bu sayede, insanlar daha kolay bir şekilde hayatlarını idare edebileceklerdir (Kenton, 2019).

(Liu, 2019) yaptığı çalışmasında Dünyadaki giyilebilir cihazların bağlanabilirliği 2023 yılına gelindiğinde 1milyar adedi geçeceğini ifade etmektedir. Giyilebilir ağlar, tüketici teknolojilerinin bir alt kümesi olarak, ağ cihazlarını taşınabilir aksesuarlara, örneğin saatlere, giysilere ve gözlüklere entegre ederek veri toplama, etkinlik izleme ve kullanıcı deneyimlerini özelleştirme amacını taşırlar. Giyilebilir teknolojiler, IoT' nin en hızlı büyüyen segmentlerinden biridir ve özellikle kişisel güvenlik, sağlık, zindelik, iletişim, kişisel organizasyon ve moda gibi alanlarda toplumsal etkilere sahip olma eğilimindedir. Örneğin, FitBit gibi fitness izleyici ve takip ürünleri, günlük fitness aktivitelerinin sürekli olarak ölçülmesine ve paylaşılmasına olanak tanıyarak bireylerin sonuçlarını izole etmelerine ve iyileştirmelerine yardımcı olur. Gelişmiş giyilebilir sağlık cihazları, kullanıcıların çeşitli koşulları izlemelerine ve hatta teşhis etmelerine yardımcı olarak ilaç tedavilerinde destekleyici olmayı veya tıp uzmanlarına erişim kolaylığı sağlayabilir. İmplant edilebilir “dayanıklı” cihazlar, “akıllı” kontakt lensler ve gözlükler gibi diğer deneylerle yapılan dokunsal ağa bağlı yamalar ve kumaşlar, kan şekeri seviyeleri, kan basıncı, beyin aktivitesi ve stres gibi hayati organları ucuz ve sorunsuz bir şekilde izlemeyi amaçlamaktadır (Thierer ve O’Sullivan, 2015).

Giyilebilir teknolojiler, vücutta takılabilen elektronik cihazlar ya da giysilerin bir parçası olarak kullanılan aksesuarlar olarak tanımlanır. Birçok farklı giyilebilir teknoloji ürünü mevcuttur, içlerinden en popüler olanları ise etkinlik izleyiciler ve akıllı saatlerdir. Bu teknolojilerin en önemli özelliği, internete bağlanabilme ve ağ ile cihazlar arasında veri alışverişi yapabilme kabiliyetidir. Bu, giyilebilir teknolojilerde nesnelerin interneti kavramının kullanılmasına olanak tanır. Giyilebilir teknolojiler, elektronikleri günlük aktivitelerimize entegre ederek değişen yaşam tarzlarımıza uymayı ve vücudun herhangi bir yerine takılabilmeye özelliğine sahip olmayı amaçlar. Tüke-

ticilerin satın alım türlerine göre pazar, akıllı saat, başa takılan ekran, akıllı kıyafetler, kulağa takılan cihazlar, spor kıyafetleri, spor izleyicileri, vücuda giyilen kameralar, dış iskeletler ve tıbbi cihazlar gibi farklı ürün türlerine göre ayrılmaktadır (Anonim a, 2023)

Giyilebilir teknolojinin popülaritesi, farklı sektörlerdeki IoT teknolojisine olan talebin artmasıyla artmaktadır. IoT ve giyilebilir teknolojinin birleşimi, işletmelerin kullanıcı merkezli verileri kullanarak yeni nesil katma değerli hizmetler geliştirmesine ve uygulamasına yardımcı olabilir. Ancak, giyilebilir cihazların kurumsal sistemlere eklenmesiyle birlikte veri güvenliği endişeleri artmaktadır. BT sistemlerindeki artan karmaşıklık, bu cihazların büyümesini sınırlayabilir (Anonim b, 2015).

Giyilebilir teknolojiler son yıllarda birçok ekonomik sektörde büyük bir etkiye sahip olmuştur. Özellikle fitness, sağlık, eğlence, medya, iletişim ve perakende sektörleri, giyilebilir teknolojiler için en büyük fırsatları sunmaktadır.

Fitness ve sağlık hizmetleri alanları, giyilebilir teknolojilerin en yaygın kullanıldığı sektörlerdir. Fitness izleme cihazları, nabız ölçümü, adım sayma, uyku izleme ve kalori sayma gibi özellikleriyle tüketicilere sağlıklı yaşam tarzlarını takip etmeleri için yardımcı olmaktadır. Sağlık sektörü de giyilebilir teknolojileri benimseyerek hastaların sağlık durumlarını takip etmelerine yardımcı olmaktadır. Giyilebilir tıbbi cihazlar, tansiyon ölçümü, kan şekeri takibi, kalp ritmi ölçümü ve diğer tıbbi ölçümleri gerçekleştirerek hastaların sağlık durumlarını izlemelerine yardımcı olmaktadır.

Eğlence, medya ve iletişim sektörleri de giyilebilir teknolojileri benimsemektedir. Sanal gerçeklik (VR) ve artırılmış gerçeklik (AR) teknolojileri, giyilebilir cihazlarla birlikte kullanılarak tüketicilere oyunlar, filmler ve etkileşimli deneyimler sunmaktadır. Giyilebilir teknolojiler ayrıca tüketicilere mobil cihazlarla entegre edilerek sosyal medya güncellemeleri ve mesajlaşma gibi aktiviteleri gerçekleştirmelerine olanak sağlamaktadır.

Perakende sektörü de giyilebilir teknolojileri benimsemektedir. Giyilebilir cihazlar, müşterilerin mağaza içinde hareketlerini takip ederek, müşteri davranışlarını analiz etmek ve alışveriş deneyimini geliştirmek için kullanılabilir. Müşteriler, giyilebilir cihazlarla mağaza içindeki ürünler hakkında bilgi edinebilir ve indirimler ve özel teklifler gibi promosyonlar hakkında bilgilendirilebilir (Anonim c, 2020).

2. TARİHÇE

Giyilebilir teknoloji, hayatımızın vazgeçilmez bir parçasıdır ve kökleri 13. yüzyılda gözlüklerin icadına kadar uzanmaktadır. Daha sonra, 16. yüzyılda, portatif ve giyilebilir saatler olan Nürnberg yumurtaları popüler hale geldi. Giyilebilir ilk bilgisayar, 1960'larda matematik profesörü olan Edward

Thorp tarafından geliştirildi. Modern giyilebilir teknolojinin popülerleşmesinde birkaç cihaz önemli rol oynadı. İlk hesap makinesi kol saati 1975 yılında piyasaya sürüldü ve dört yıl sonra Sony Walkman ile müzik dinleme deneyimi değişti. İlk dijital işitme cihazları 1980’lerde piyasaya sürüldü. Edward Thorp’un deneyi, giyilebilir teknolojinin yeni bir form kazanmasına öncülük etti ve günümüzde kullandığımız ürünlere ilham kaynağı oldu. (Kılıç, 2017).

Giyilebilir teknoloji, insanların hayatında vazgeçilmez bir yere sahip olan bir inovasyondur. 13. yüzyılda gözlüklerin icadıyla birlikte giyilebilir teknolojik ürünler, 16. yüzyılda portatif saatlerle daha da gelişme göstermiştir. 1970’lerde ise, ilk hesap makinesi kol saati olan “Pulsar Hesap Makinesi Kol Saati” piyasaya sürülmüş ve matematik meraklıları ile fen meraklıları arasında yaygın bir kullanım elde etmiştir. Pulsar hesap makinesi kol saati Şekil 1’de verilmiştir. Bu akıllı saatler, 1980’lerin ortalarına doğru daha fazla bir başarı elde etmiş ve popülerlikleri ivme kazanmıştır.

Giyilebilir teknolojinin tarihi ve gelişimi hakkında yapılan birçok araştırmada, günümüzdeki giyilebilir teknolojik cihazlarının öncüsü olarak Edward Thorp’un tasarladığı ilk giyilebilir bilgisayar gösterilmektedir. Bu bilgisayar, ayakkabıya yerleştirilen bir cihazdı ve blackjack oyunu oynamak için kullanılmaktaydı.

Giyilebilir teknoloji cihazları, özellikle sağlık ve fitness sektörleri gibi çeşitli sektörlerde kullanımı artmaktadır. Giyilebilir cihazların kullanımı, sağlık sektöründe özellikle kişiselleştirilmiş sağlık uygulamaları geliştirmek için bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu alanda yapılan araştırmalar, giyilebilir cihazların, hastalıkların önlenmesi ve yönetilmesinde önemli bir rol oynayabileceğini ortaya koymuştur (Kılıç, 2017).



Şekil 1. Pulsar Hesap Makinesi Kol Saati (Anonim d, 2015)

1984 yılında, Seiko firması tarafından piyasaya sunulan UC 2000 ve UC 2100 modelleri ile uyumlu olan bilek bilgisayarı, giyilebilir teknolojinin bir örneği olarak ortaya çıkmıştır. Bir model örneği Şekil 2’de verilmiştir. Hem saat hem de bilgisayar özelliği taşıyan bu ürün, taşınabilir bilgisayarların yeni yeni geliştirildiği bir dönemde piyasaya sürülmüştür (Ercan, 2020).



Şekil 2. UC 2100 Bilek Bilgisayarı (Anonim e, 2015)

Giyilebilir teknoloji, Bluetooth kulaklıkla popülerlik kazanarak 2002 yılında dikkat çekmiştir. İkonik giyilebilir cihazlar Nike + Fitbit ve Google Glass, 2006 ve 2013 yılları arasında piyasaya sürülmüştür. 2014 yılı, çeşitli medya kuruluşları tarafından “Giyilebilir Teknoloji Yılı” olarak adlandırılmıştır ve bu dönemde Apple Watch gibi birçok giyilebilir cihaz piyasaya sunulmuştur. Şekil 3’ de Apple Akıllı kol saati verilmiştir. (Aydın, 2019).



Şekil 3. Apple Akıllı Saat (Anonim f, 2023)

3. Giyilebilir Teknoloji Nedir

Giyilebilir teknoloji, insanların giydiği ve taşıdığı cihazlar aracılığıyla teknolojinin entegre edilmesini ifade eder. Giyilebilir cihazlar, yüksek teknoloji sensörler, işlemciler, veri depolama birimleri ve iletişim sistemleri kullanarak kullanıcının hareketlerini, sağlık durumunu, fiziksel performansını ve diğer verileri ölçer ve analiz eder. Bu teknoloji sayesinde, kullanıcılar günlük hayatlarında çeşitli amaçlarla kullanabilecekleri kişisel bir dijital yardımcıya sahip olurlar. Giyilebilir teknolojinin tarihi, ilk olarak 13. yüzyılda gözlüklerin icadı ile başlar ve 16. yüzyılda Nürnberg yumurtaları olarak bilinen giyilebilir saatlerin ortaya çıkmasıyla devam eder. Ancak, giyilebilir teknolojinin modern hali, 1960'ların ortalarında matematik profesörü Edward Thorp tarafından yaratılan giyilebilir bilgisayar ile ortaya çıkmıştır.

Bugün giyilebilir teknoloji, fitness takip cihazları, akıllı saatler, akıllı gözlükler, akıllı bileklikler, giyilebilir kameralar ve giyilebilir tıbbi cihazlar gibi birçok çeşitli cihazda mevcuttur. Bu cihazlar, kullanıcıların sağlık durumlarını izlemelerine, günlük aktivitelerini takip etmelerine, hava durumunu kontrol etmelerine, mesajlarına yanıt vermelerine ve hatta bir dizi diğer işlemi gerçekleştirmelerine olanak tanır.

Bu teknolojiler, endüstri, sağlık, spor, eğlence ve askeri alanlar da dahil olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. Bu teknolojinin önemi, geliştiricilerin cihazların veri toplama ve analiz kapasitelerini artırması ve bu sayede kullanıcılara daha iyi hizmetler sunması ile artmaktadır.

Bu cihazlar, gerçek zamanlı veri takibi ve analizi için kullanılabilir. Hareket sensörleri sayesinde, günlük aktivitelerin anlık görüntüsünü kaydederek, bu verileri mobil cihazlarla veya dizüstü bilgisayarlarla senkronize ederler. Giyilebilir teknolojiler, akıllı telefonların icadından sonra teknoloji dünyasında büyük bir yenilik olarak kabul edilir. Giyilebilir cihazlar tüketici pazarına girmeden önce, öncelikle askeri alanda kullanılmıştır. Aslında, bu cihazlar, askeri, tıp ve sağlık sektöründe bir bütün olarak ele alınmıştır. Örneğin, hastalıkların izlenmesi ve gerçek zamanlı bilgi gönderimi için giyilebilir anakartlar veya akıllı gömlekler bu cihazların bir parçasıdır (Anonim g, 2019).

Günümüzde ise, giyilebilir teknolojilerin hızla gelişen tüketici pazarı, güçlü sensörlerle donatılmış ve çevresindeki bilgileri toplayıp sunabilen birçok cihaz geliştirilmesiyle, fitness takipçileri, sağlık uzmanları ve teknoloji meraklıları arasında popüler hale gelmiştir (Heitner, 2016).

Giyilebilir teknolojinin bir alt kategorisi olan elektronik tekstiller (e-tekstiller) veya akıllı tekstiller kavramı, son zamanlarda giyilebilir bilgisayarların giyim ve konfeksiyonla entegrasyonu konseptinden ortaya çıkmıştır. Bu kavram, giyilebilir cihazlarının giyilebilirlik özelliklerine daha fazla

odaklanmıştır ve ürünlerin giyim rahatlığına uygun şekilde tasarlanmasını amaçlamaktadır.

4. Nasıl Çalışır?

Giyilebilir teknolojiler, sensörler, bağlantı ve kontrol katmanı, ve bulut tabanlı veri işleme katmanı olmak üzere üç katmandan oluşur.

- Sensörler, giyilebilir cihazların ilk katmanını oluşturur ve vücuda en yakın şekilde yerleştirilirler. Bu sensörler, örneğin sıcaklık, hareket ve nabız gibi çeşitli fiziksel özellikleri izler ve verileri diğer katmanlara iletir.

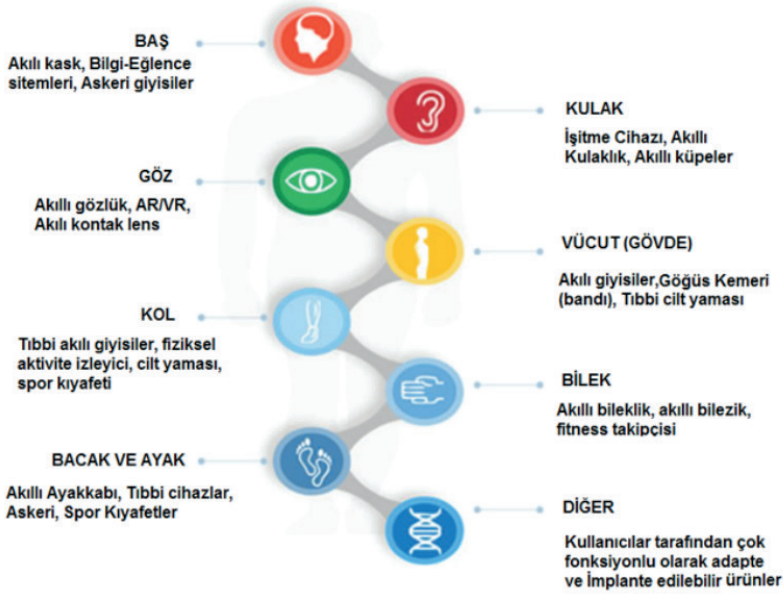
- İkinci katman bağlantı ve kontrol katmanıdır. Bu katman, giyilebilir cihazların akıllı telefonlara veya ev ağlarına bağlanmasını sağlayan bir dizi teknoloji ve protokol içerir. Bluetooth Düşük Enerji (BLE) protokolü, giyilebilir cihazlar arasında en yaygın olanıdır.

- Üçüncü katman ise bulut tabanlı veri işleme katmanıdır. Bu katman, giyilebilir cihazların sağladığı verileri işleyen ve depolayan bir bulut altyapısını içerir. Bu veriler daha sonra analiz edilebilir ve kullanıcılara geri bildirim sağlamak için kullanılabilir.

Giyilebilir teknolojilerin bu üç katmanı, giyilebilir cihazların sağladığı faydalı bilgilerin toplanması, işlenmesi ve kullanıcılara sunulması için önemlidir. Ayrıca, giyilebilir teknolojilerin uygulama alanlarına yönelik araştırmalar ve geliştirmeler, giyilebilir teknolojilerin etkinliğini ve kullanımını artırmak için önemlidir. (Otto, 2005)

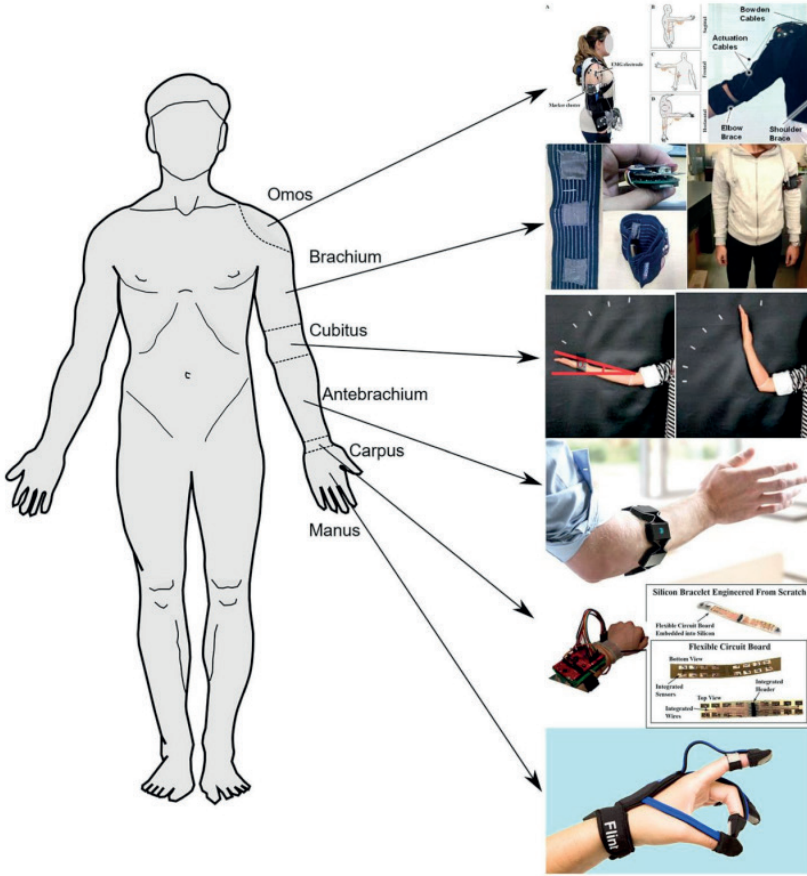
5. İlişkili Faktörler

Giyilebilir teknoloji ürünleri, sadece bir moda aksesuarı olmaktan öte, yeme alışkanlıklarınızı takip etmek, kalp atış hızınızı ölçmek, stres seviyenizi izlemek ve iletişim kurmanızı kolaylaştırmak gibi birçok fonksiyonu yerine getirmektedir. Bu ürünlerin imalatı, elektronik bileşenlerin minyatürize edilmesi, iletişim protokollerinin geliştirilmesi, coğrafi konumlandırma ve veri yönetimi yazılımının ilerlemesi gibi teknolojik gelişmelerle mümkün hale gelmiştir. Giyilebilir teknoloji, mobil cihaz endüstrisinde yeni bir aşamaya işaret ederek, ilk aşamadaki sosyal iletişim sağlama işlevinden daha kişisel bir alana doğru evrim geçirmektedir. Giyilebilir teknolojilerin en büyük farkı, ellerin serbest kalmasını sağlayarak, kullanıcılara daha fazla hareket özgürlüğü sunmasıdır. Şekil 4'te verildiği gibi bazı cihazlar cilt üzerinde bile kullanılabilir.



Şekil 4. Vücut Üzerindeki Konumlarına Göre Giyilebilir Teknoloji Ürünleri (Kılıç, 2017)

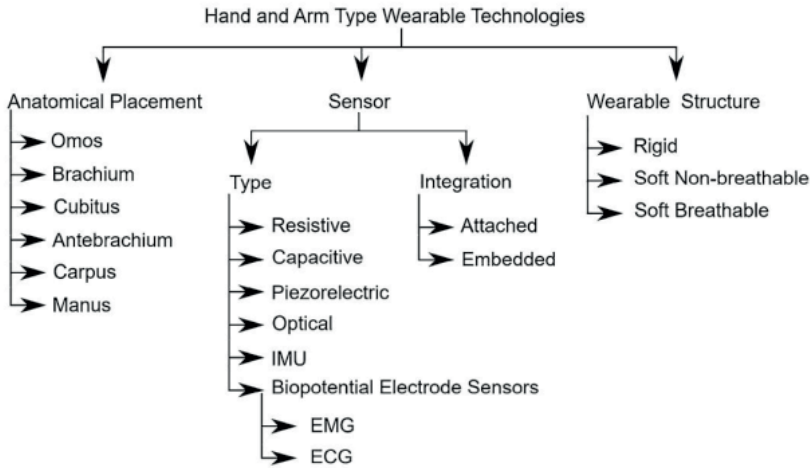
İnsan vücudu anatomik olarak 4 bölüme ayrılmıştır. Bu bölümler Caput-Collum (baş-boyun), truncus (gövde), membrum superius (üst ekstremité) ve membrum inferius (alt ekstremité)'dir. Üst ekstremité ise kendi içinde 6 bölüme ayrılır: Omos, Brachium, Cubitus, Antebrachium, Carpus ve Manus olan bu bölümler Şekil 5'te gösterilmiştir. İnsanların günlük aktiviteleri içerisinde üst ekstremité bölgesi kas ve iskelet sistemi açısından son derece hareketli ve önemli bölgedir. Doğrudan ve dolaylı olarak fiziksel aktivitelerin gerçekleştiği vücut bölgesi üst ekstremitedir.



Şekil 5. Üst Ekstremitte Bölgeleri (Seçkin, 2022)

Üst ekstremitte bölgesinde gerçekleşen insan-makine etkileşimlerinin yapılabilmesi için çeşitli sensörlere ihtiyaç vardır. Optik sensörler uygulanabilirlik ve kullanım açısından diğer sensörlere kıyasla daha avantajlıdır. Sensörler ve yerleşim yerleri Şekil 6'da gösterilmektedir. Giyilebilir teknolojide optik sensörler (OS) farklı dalga boylarında yaydıkları ışıkların yansımalarının neden olduğu değişimleri algılayarak çalışır. Bu algılama için günümüzde hem ışık yaymak hem de ölçmek için çoğunlukla yarı iletken ve optik tabanlı teknolojiler kullanılmaktadır. Optik sensörlere örnek olarak LED'ler, fiber optikler, LDR'ler ve fotodiyotlar verilebilir. Biyomedikal sensörlere bakıldığında ise Kızılötesi (IR) ve Fiber Optik (FO) sensörler diğer sensörlere göre daha fazla tercih edilmektedir. Fiber optik sensörler (FOS) bükülebilir veya kıvrılabilir özellikteki bölgelere sahiptir. Yani ışık bu alanlarda kırılır. Kırılan ışığın dalga boyu ve ışık yoğunluğu ölçülerek, kırılan bölgedeki basınç, kalp hızı, solunum hızı gibi parametreler ölçülmüş olur. Bu sayede de uyku apnesi, ani bebek ölümü sendromu, astım gibi hastalıklar teşhis edilerek ta-

kibi kolaylaştırılmaktadır. Kızılötesi sensörler (IRS) ise yaydığı ışığın yansıması ile oluşan ışık yoğunluğunu ölçmeye dayanan sensörlerdir. Bu sensörler sayesinde kandaki oksijen miktarı ve solunum hızının ölçülmesi sağlanabilmektedir. Ataletsel Ölçüm Birimi (IMU) birden fazla sensörün bir arda kullanılması ile oluşan mikroeletrom mekanik sensörlerdir. IMU'lar üzerinde bulunan jiroskop, ivme ölçer ve pusula sensörü sayesinde ölçümler yaparak düşme tespiti, uyku izleme ve fiziksel rehabilitasyon gibi alanlarda terapistler tarafından sıkça kullanılmaktadır. (Seçkin, 2022)



Şekil 6. El-Kol Tipi Giyilebilir Teknolojiler ve Yerleşim Yerleri
(Seçkin, 2022)

6. Kullanım Alanları

Giyilebilir teknoloji ürünleri, birçok sektörde kullanım imkânı sağlayarak yeni bir pazar oluşturmuştur. Bu sektörler arasında çizelge 1’ de sağlık, spor ve fitness, bilgi alışverişi ve eğlence, eğitim, endüstri, turizm, askeri ve moda gibi alanlar yer almaktadır (Anonim c, 2020).

Spor ve Fitness: Giyilebilir teknoloji ürünleri, düzenli egzersiz ve spor yapan kişilerin faaliyetlerini takip etmek için kullanılır. Bu sayede atıkları adım, yaktıkları kalori, egzersiz yoğunluğu gibi fiziksel faaliyetlerini takip ederek diyet ve spor programlarının düzenlenmesine yardımcı olurlar. Ölçülen sonuçlar egzersiz sonrasında müşteriler tarafından kontrol edilebilir veya dünya çapında motivasyon sağlamak amacıyla paylaşılabilir. Ayrıca bu sonuçlar, doktorlar veya uzmanlar tarafından analiz edilerek gelecekteki teşhis ve tedavilerinde, araştırma ve geliştirmelerinde kullanılabilir.

Eğlence: Giyilebilir teknoloji ürünleri, eğlence sektöründe de kullanılır. Örneğin, Google Glass gibi cihazlar oyunu teknoloji ile entegre ederek taraftarlara farklı bir bakış açısı kazandırabilir. Sensörler ve haptikler gibi

gelişmeler de film ve müzikleri yeniden tanımlayabilir. Akıllı gözlükler (HMD'ler), akıllı gözlükler ve heads-up ekranlar (HUD'lar) olarak da bilinen akıllı gözlükler, hem gerçekçi bir dünya ortamında dijital görüntülerin üst üste yerleşmesini sağlar hem de gerçek dünyadan izole edilerek oyun deneyimini artırabilir.

Eğitim: Giyilebilir teknoloji ürünleri, eğitim sektöründe de kullanılmaktadır. Örneğin, öğrencilerin dikkatini çekmek için interaktif dersler sunmak, öğrencilerin öğrenme becerilerini geliştirmek için artırılmış gerçeklik teknolojisini kullanmak mümkün olabilir. Öğretmenler, öğrencilerin canlı dersleri daha verimli ve ilgi çekici hale getirmek için giyilebilir teknoloji ürünlerini kullanabilirler. Ayrıca, öğrencilerin derslerde aktif katılımını sağlamak için takip edilen aktivite, kalori, nabız ve uyku verileriyle diğer öğrencilerle yarışmalar düzenleyebilirler.

İş ve Endüstri: Giyilebilir teknoloji ürünleri, iş ve endüstriyel sektörlerde de kullanılmaktadır. Örneğin, işletmeler, çalışanların performansını ve üretkenliğini izlemek ve artırmak için giyilebilir teknoloji ürünleri kullanabilirler. Ayrıca, bu ürünler çalışanların iş güvenliğini artırmak için de kullanılabilir. Örneğin, bir giyilebilir teknoloji ürünü, bir işçinin kalp atış hızını izleyerek, tehlikeli bir seviyeye yükseldiğinde otomatik olarak alarm verebilir veya çalışanın yorgunluk seviyesini ölçerek, düzenli molalar vermesi gerektiğinde uyarı verebilir.

Moda: Giyilebilir teknoloji ürünleri, moda endüstrisinde de kullanılmaktadır. Bu ürünler, kıyafet ve aksesuarlara entegre edilerek, kullanıcılara giyim tarzlarını yenilikçi ve teknolojik bir şekilde ifade etme imkanı sunarlar. Örneğin, akıllı saatler, akıllı gözlükler, akıllı bileklikler, akıllı kolyeler gibi ürünler, modayla birleşerek birer moda ikonu haline gelebilirler.

Akıllı saatlerin diğer bir kullanım alanları ise, uyku düzenini takip etme ve izleme yetenekleridir. Akıllı saatler, sensörler ve algoritmalar kullanarak toplam uyku süresi, uyku verimliliği ve her uyku aşamasında (hafif, derin ve hızlı göz hareketi (REM) uykusu) harcanan süre gibi temel uyku parametrelerini doğru bir şekilde ölçebilir. Ayrıca akıllı saatler, kalp atış hızı, nefes alma hızı ve vücut hareketleri gibi diğer fizyolojik parametreleri de takip ederek uyku düzenleri ve uykuyu bölen davranışlar (ör. horlama, uyku apnesi) hakkında kapsamlı bir genel bakış sunar.

Akıllı saatlerin uyku izleme özellikleri son yıllarda popüler hale geldi ve birçok kişi bu cihazları kullanarak uyku kalitesini takip ediyor. Bu alanda birçok akademik araştırma yapıldı ve akıllı saatlerin uyku izleme özelliklerinin doğruluğu ve etkililiği hakkında farklı sonuçlar elde edildi.

Günümüzde akıllı saatler, sağlık ve egzersiz takibinin yanı sıra uyku takibi için de kullanılmaktadır. Bu cihazlar, kullanıcının uyku kalitesi ve süresi

hakkında veriler toplar ve analiz eder, böylece kullanıcının sağlıklı bir uyku rutini oluşturmaya yardımcı olur.

Uyku takibi, insanların sağlıklı bir yaşam sürdürmeleri için son derece önemlidir. Akıllı saatler, insanların uyku alışkanlıklarını izlemelerine, uyku kalitelerini ve sürelerini analiz etmelerine ve uyku bozukluklarını tespit etmelerine yardımcı olabilir. Bununla birlikte, literatürde, akıllı saatlerin uyku takibi konusunda doğrulukları ve etkileri hakkında farklı sonuçlar bulunmaktadır.

Uyku takibi ve akıllı saatlerin kullanımı üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Örneğin, Zambotti vd., (2015) çalışmalarında, Fitbit ve Jawbone gibi akıllı saatlerin uyku kalitesinin ölçümü için uygun oldukları bulunmuştur.

İspirli Turan, A. ve Doğanalp Çoban, S. (2023) çalışmalarında, akıllı saatlerin uyku takibi konusunda oldukça doğru olduğu sonucuna varılmıştır. Araştırmacılar, cihazların uyku sürelerini ve uyku kalitelerini doğru bir şekilde tespit ettiğini belirtmişlerdir.

Uygulama Alanı	Örnek Ürünler
Sağlık ve Medikal	Tansiyon Aleti Kan Şekeri Ölçüm Cihazı Kalp Ritmi Düzenleyici EKG Görüntüleyici İşitme Cihazları
Spor	Kalp Atış Hızı Ölçüm Cihazı Adımsayar Akıllı Saatler Uyku Sensörleri
Bilgi ve Eğlence	Bluetooth Kulaklık Akıllı Gözlükler Akıllı Saatler
Endüstriyel	Giyilebilir Terminal Akıllı Gözlükler Akıllı Giysiler
Askeri	Giyilebilir Terminal Akıllı Giysiler Baş üstü Göstergesi

Çizelge 1. Giyilebilir Teknoloji Uygulama Alanları ve Örnek Ürünler

7. Karşılaşılan Engeller

Giyilebilir teknoloji ürünleri, sağlık, spor ve fitness, bilgi alışverişi ve eğlence, eğitim, endüstri, turizm, askeri ve moda gibi pek çok alanda kullanılabilen ürünlerle yeni bir pazar oluşturmuştur. Ancak, bu alanda devam eden yenilikçi kapasiteyi sürdürmek ve artırmak için, farklı uygulama alanlarındaki sınırlılıkların ortadan kaldırılması için araştırma ve geliştirme çabalarının yoğunlaştırılması gerekmektedir.

Bu bağlamda, donanım yenilikleri öncelikli olarak ele alınmalıdır. Çünkü giyilebilir cihazların performansı, işlevselliği ve üretkenliği gibi benimsenmeyi engelleyen pek çok faktör donanım kalitesiyle doğrudan ilişkilidir. Bileşen entegrasyonu, bağlanabilirliğin güvenilirliği, enerji depolama verimliliği, güç yönetimi çözümleri, kullanıcı arayüzleri ve veri güvenliği gibi unsurlar, giyilebilir teknolojilerin yaygınlaşmasına engel olmaktadır. Bu sorunların aşılması, yeni işletmelerin ortaya çıkmasına ve mevcut şirketlerin konumunu geliştirmesine yardımcı olacaktır.

Bununla birlikte, donanım sorunlarına ek olarak, diğer teknik sorunlar da mevcuttur. Kesintisiz donanım-yazılım entegrasyonu, uygulama geliştirme için standart API'lerin geliştirilmesi, açık işletim sistemleri ve çoklu platformlar, güvenliği ve gizliliği sağlayan açık iletişim protokolleri ve yapay ve sanal gerçeklik uygulamaları için yeni iletişim sistemlerinin geliştirilmesi gibi konular, giyilebilir teknolojilerin gelişimini hızlandırmak için ele alınmalıdır (Anonim c, 2020).

Bu sorunlar baz alındığında ürün gelişimini ve pazarda başarılı bir şekilde yer edinmesini hızlandırmak için, bu alanlarda koordineli bir şekilde ilerleme kaydedilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, farklı uygulama alanlarındaki sınırlılıkların ortadan kaldırılması ve donanım, yazılım ve diğer teknik sorunların ele alınması gerekmektedir.

Sonuç

Genel olarak giyilebilir teknoloji ürünleri, pek çok sektörde farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Bu ürünlerin kullanımı gelecekte daha da yaygınlaşacağı ve hayatımızın pek çok alanında önemli bir rol oynayacağı öngörülmektedir. Özellikle spor ve sağlıklı yaşam ile alakalı kısımlarda giyilebilir teknolojiler hızla gelişmekte ve yaygınlaşmaktadır. Bir diğer nokta ise insanları uyku durumlarına karşı olan merakları sonrası uyku takibi yapmak istemleri. Spor durumunda da ölçümlenen nabız ve kandaki oksijen miktarı gibi veriler ile uyku durumunun incelenmesi insanlar için bir alışkanlık ve ihtiyaç haline gelmiştir. Bu alanda yapılan yenilikler gün geçtikçe daha çok insana ulaştıkça ivmelenerek artışını sürdürecektir olduğu görülmektedir. Bu gelişimler ile giyilebilir teknoloji günün her anında insan ile olmaya devam ederek kişisel bir sağlık asistanına dönüşmesi öngörülebilmektedir. Uyku sorunlarının tespiti ve bu sorunların çözümüne yönelik adımların kolaylaşması insanların zaman ve para tasarrufu yapmalarının önünü açtığı görülmektedir. Bu durumlarda gelişen bu teknolojinin daha cazip hale geldiği anlaşılmaktadır. Uyku dışında günlük hayatta kişinin sağlığının izlenmesi de insanlar için uyku takibi kadar ilgi çekmekte olduğu görülmüyor. Uzun süre oturmak, hareketsiz kalmak ve anlık veya sürekli olarak yüksek stres seviyesinde olma durumunda akıllı saatlerden gelen uyarılar sağlık ve zindelik açısından artık takip edilebilir olduğundan akıllı saatler ve türevleri açısından ciddi potansiyel görülmektedir.

Sonuç olarak akıllı saatler, sağlık ve zindelik için çok sayıda potansiyel uygulama ile hızla büyüyen bir alandır. Fiziksel aktiviteyi, kalp atış hızını, uyku düzenini ve stres seviyelerini izleme yeteneği, bireyin genel sağlık ve esenliği hakkında daha kapsamlı bir anlayışa olanak tanır. Bununla birlikte, bu cihazlardan elde edilen verilerin doğruluğu ve geçerliliği ile bunların sağlık davranışları ve sonuçları üzerindeki potansiyel etkileri hakkında her geçen gün daha fazla çalışmalar yapılmaktadır.

KAYNAKÇA

- Kenton, W. (2019). The Internet of Things (IoT). Investopedia. <https://www.investopedia.com/terms/i/internet-things.asp>
- Liu, S. (2019). Wearable technology - Statistics & Facts. Statista. <https://www.statista.com/topics/1556/wearable-technology/>
- Thierer, A., & O'Sullivan, A. (2015). Projecting the Growth and Economic Impact of the Internet of Things. Technology Innovation and Policy Briefs.
- (Anonim a, 2023). Mordor Intelligence, SMART WEARABLE MARKET SIZE & SHARE ANALYSIS - GROWTH TRENDS & FORECASTS (2023 - 2028)
https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/smart-wearables-market?gclid=EAIAIQobChMI7N7ip4z-5QIVF-DtCh3QZgthEAAAYAAEgII1PD_BwE
- (Anonim b, 2015). Enterprise Wearable Market Analysis By Technology (IoT, Bluetooth, BLE), By Product (Wrist-Wear, Foot Wear, Eye Wear), By Application (Infotainment, Healthcare, IT & Telecom), By Region, And Segment Forecasts, 2018 - 2025
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/the-global-enterprise-wearables-market>
- Massimiliano de Zambotti, PhD, Fiona C. Baker, PhD, Ian M. Colrain, PhD, Validation of Sleep-Tracking Technology Karşılaştırmalı Polisomnografi, Uyku , Cilt 38 , Sayı 9, Eylül 2015, Sayfa 1461-1468, <https://doi.org/10.5665/sleep.4990>
- (Anonim c, 2020). Bilgi ve Teknoloji Kurumu (BTİK). (2021). Giyilebilir Teknolojiler Araştırma Raporu. <https://www.btk.gov.tr/uploads/pages/arastirma-raporlari/giyilebilir-teknolojiler-arastirma-raporu.pdf>
- Kılıç, H. Ö. (2017). Giyilebilir teknoloji ürünleri pazarı ve kullanım alanları. Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 9(4), 99-112.
- Mine Seçkin, Ahmet Çağdaş Seçkin, Çetin Gençer (2022), Biomedical Sensors and Applications of Wearable Technologies on Arm and Hand, <https://doi.org/10.1007/s44174-022-00002-7>
- (Anonim d, 2015). National Museum of American History. https://americanhistory.si.edu/collections/search/object/nmah_1173543
- Ercan, İ. P. (2020, Haziran). Giyilebilir Teknoloji Girişimlerinin Ürün Geliştirme Süreçlerinde Endüstriyel Tasarımın Yeri: Türkiye'deki Teknoloji Geliştirme Bölgeleri Üzerine Bir Araştırma. Doktora Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aydın, N. (2019). Giyilebilir Sağlık Teknolojisinin Geleceği. XI. IBANESS Kongreler Serisi – Tekirdağ / Türkiye.
- (Anonim e, 2015). National Museum of American History. (n.d.). Seiko UC-2100 keyboard. Smithsonian Institution. Retrieved February 22, 2023, from <https://>

americanhistory.si.edu/collections/search/object/nmah_714000

(Anonim f, 2023) Apple Inc. (n.d.). Apple Watch. Retrieved February 22, 2023, from <https://www.apple.com/tr/watch/>

(Anonim g, 2019). Happiest Minds (2019). Wearable Technology. Available: <https://www.happiestminds.com/Insights/wearable-technology/>

Heitner, D. (2016). 6 Reasons Why Wearables Are the Future of Fitness. Inc. Retrieved February 22, 2023, from <https://www.inc.com/darren-heitner/6-reasons-why-wearables-are-the-future-of-fitness.html>

Otto C., Milenkovic A., Sanders C. and Jovanov E., "System architecture of a wireless body area sensor network for ubiquitous health monitoring", Journal of Mobile Multimedia, 1(4): 307-326, (2005).

İspirli Turan, A. ve Doğanalp Çoban, S. (2023). Dijital yaşam teknolojileri bağlamında akıllı saat kullanıcılarının deneyimleri üzerine nitel bir çalışma. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi SBE Dergisi 13(1), 531-551.

Bölüm 4

GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNİN KURULUMUNDA FİZİKİ VE FİNANSAL DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ

Abdulsamed GÜNEŞ¹

1. Giriş

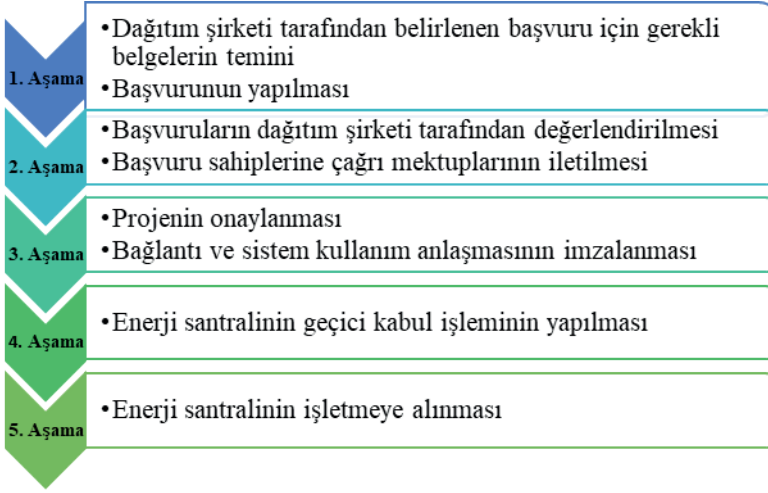
İklim değişikliği, iklim parametrelerinde gözlenen uzun süreli değişimlerdir. Fosil yakıtların kullanımı, ormanların yok edilmesi, tarım ve sanayi gibi beşeri faaliyetler karbondioksit ve metan gibi sera etkisi yaratan gazların atmosferdeki yoğunluğunu artırmaktadır. Atmosferde hapsolan enerji, yeryüzünün ısınmasına, buzullarının erimesine, kar ve buz tabakasının azalmasına, deniz seviyesinin yükselmesine, yağış rejimlerinin değişmesine, kuraklık ve fırtınalar gibi olumsuz hava olaylarının şiddet ve sıklıklarının artmasına sebep olmaktadır (Şen, 2013).

2017 yılı için tespit edilen ortalama küresel sıcaklık, 1951-1980 yıllarındaki ortalama sıcaklığa kıyasla yaklaşık 0,9 °C artış göstermiştir. Buna ek olarak 2015, 2016 ve 2017 yılları gözlemlenen en sıcak üç yıl olarak kayıtlara geçmiştir. İklim değişikliğinin bu etkileri hem doğal hem de beşeri ortamları tehdit etmektedir (Nasa, 2018).

Küresel ısınma ile mücadele konusunda anlaşmaya varmış ülkeler tarafından imzalanan Paris İklim Anlaşması, küresel ısınmayı en fazla 2°C ile sınırlandırma hedefi koymuştur. Bu sıkı hedefe ulaşmak için düşük karbonlu sanayileşme ve mevcut endüstrileri düşük karbonlu salınımaya yönlendirme şarttır. Sera gazlarının kontrol altına alınması, uluslararası anlaşmalar kadar ülke içinde yapılacak tanıtım ve kampanyalara ek olarak vatandaşlara yapılacak teşviklerle mümkün olacaktır. Fotovoltaik güneş enerji sistemleri ile kaynağı güneş olan temiz enerji üretiminin artması sera gazı salınımı azaltır. Bu sayede fosil kaynaklara olan bağımlılığı azaltarak küresel ısınma ile mücadeleye çok önemli bir katkı sağlamış olur.

2. Güneş Enerji Santrallerinde Projenin Fiziksel Gelişim Süreci

Güneş enerjisi projesi geliştirilirken esas 3 aşama takip edilmektedir. Bu basamaklar; bölgenin ilgili elektrik dağıtım şirketi tarafından belirlenen başvuru evraklarının hazırlanarak başvurunun yapılması, dağıtım şirketi tarafından alınan başvuruların değerlendirilerek çağrı mektubunu verilmesi, projenin onaylanması ve kabul işlemlerinin ardından işletmenin devreye alınması şeklindedir. Bu süreç ile ilgili takip edilecek adımlar Şekil 1’de özetlenmiştir.



Şekil 1. Güneş Enerjisi Yatırımlarında Süreci Başvuru Aşamaları

Başvuru sürecinde çağrı mektubu için ticaret odasından alınmış şirket durum bilgisi ve ticaret sicil gazetesi, tek hat şeması, ilgili devlet kurumlarından alınan uygunluk belgeleri, yetkililere ait imza sirküleri, vergi levhası, başvuru ücretinin yatırıldığına dair dekont, tesisin kurulumunun yapılacağı bölgeye ait kroki, tapu veya kira sözleşmesi, tek gerekli evrak listesi sıralanmıştır. Bu evrakların aslı veya aslına denk nitelikte olması gerekmektedir.

2.1. Başvuru Değerlendirme

Tesisin kurulumunun yapılacağı bölgeye ait elektrik dağıtım şirketine yapılan başvurunun ardından değerlendirme süreci başlar. İlgili dağıtım şirketi her takvim ayı içerisinde yapılan başvuruları derleyerek başvuruyu takip eden ayın ilk 20 günü içinde topluca değerlendirmeye alır. Başvurular, şirket tarafından kurulan komisyon tarafından incelemeye alınır. Bu komisyon en az 3 kişiden oluşur ve oy çokluğu ile karar alır. İnceleme sonucunda eksik veya yanlış evrak tespiti halinde başvuru sahiplerine değerlendirme sonuçlarının takip eden 3 iş günü içerisinde bu eksiklikler ile ilgili bildirimde bulunulur ve eksiklerin 10 iş günü içerisinde tamamlanması istenir. Bu süre içinde eksik belgelerin tamamlanması halinde başvuru reddedilir.

2.2. Saha Verileri

Projenin inşa edileceği alanın topoğrafik özellikleri, sahanın eğimi, lokasyonun güneşe olan yakınlığı, güneş ışınlarını alışı açısı ve projenin başarılı bir şekilde uygulanması çok önemli faktörlerden biridir. Güneş ışınım verilerinin proje öncesi elde edilmesi projenin genel verimliliği açısından önemli bir diğer faktördür.

Küresel yatay ışınlam (global horizontal irradiance), yeryüzüne düşen güneş ışınlarının ortalama yoğunluğunu ifade eder. Bu yoğunluk değeri güneşin yeryüzündeki konumuna ve atmosferdeki partikül, bulut, gazların varlığına göre değişir. Küresel yatay ışınlam değeri belirlenen bölgede güneş enerjisinden fotovoltaik paneller ile enerji üretimi veya kolektörler ile ısı üretiminde üretim kapasitesinin ne kadar olacağına dair yüksek doğrulukta tahminler yapılmasını sağlar. Bu sebeple küresel yatay ışının değeri yapılacak yatırım öncesi bölgede analizi yapılması gereken çalışmalardan birisidir. Güneş enerjisi üretimi için en uygun bölgeler, yüksek küresel yatay ışınlam değerlerine sahip bölgelerdir. Bu bölgelerde yapılacak güneş enerjisi yatırımları daha verimli olmaktadır (Pearsall, 2016).

Doğrusal normal ışınlam (direct normal irradiance) da yine verimlilik faktörünü etkileyen diğer bir parametredir. Güneş enerjisi güneşten elektromanyetik ışınlam formunda hareket eder ve atmosferin üst tabakalarından geçerek yeryüzüne ulaşır. Bu ışınlamın bir bölümü doğrusal normal polarizasyona sahiptir. Polarize edilmiş güneş ışığı yüzeylerdeki yansıma ve kırılmalardan dolayı polarizasyon özelliğini kaybetmiş olabilir. Ancak yansıtıcı olmayan yüzeylerde veya optik filtrelerde doğrusal normal polarize ışık kullanılarak güneş enerjisi kullanılabilir. Örneğin, güneş panelleri güneş ışığını doğrusal normal polarize edilmiş ışık olarak kullanır ve elektrik enerjisine dönüştürür. Silikon yüzeyli güneş panelleri düzgün polarize edilmiş ışığı daha iyi emer ve elektrik enerjisine dönüştürür. Ayrıca, güneş enerjisi uygulamalarında polarizasyon filtreleri de kullanılabilir. Bu filtreler, yansıma veya kırılma nedeniyle polarize olmayan güneş ışığını doğrusal normal polarize eder ve güneş panellerinin daha fazla enerji üretimini sağlar (Haydaroglu, 2016).

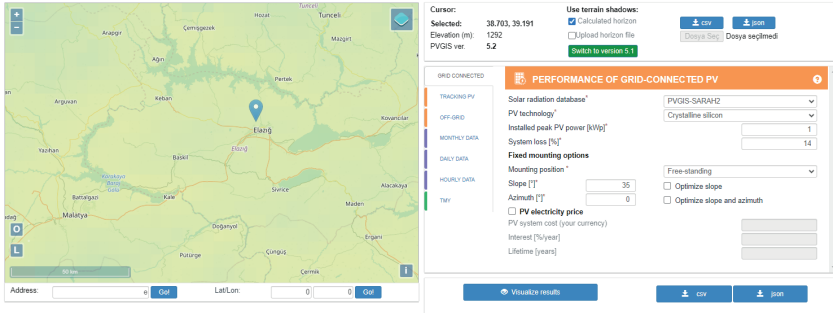
Sonuç olarak, doğrusal normal ışınlamın yüksek olması, güneş enerjisi sistemlerinin yüksek verimde enerji üretmesine ve daha fazla enerji üretmesine olanak tanır. Bu nedenle, güneş panellerinin kurulduğu bölgelerde güneş ışığının optimal açıda gelmesi için dikkatlice planlama yapılmalıdır.

Dağınık yatay ışınlam (diffuse horizontal irradiance), güneş enerjisi sistemlerinin performansını etkileyen bir diğer önemli parametredir. Güneş enerjisi panelleri, doğrudan güneş ışığına ek olarak dağınık yatay ışınlamı da kullanır. Bu ışınlam, güneş ışığının gökyüzünden her yöne dağılması sonucu yeryüzüne eşit olarak ulaşmayan bir enerji kaynağıdır. Güneş panelleri, bu dağınık yatay ışınlamı da toplayarak enerji üretirler. Ancak çeşitli faktörler, dağınık yatay ışınlam miktarını etkiler. Bulutlar, binalar ve ağaç gibi nesneler güneş ışığını saçabilir veya engelleyebilir, bu da dağınık ışınlamın miktarını değiştirir. Bu nedenle, güneş panellerinin yerleştirileceği konum ve açı dağınık yatay ışınlamın maksimum verimlilikle kullanılmasını sağlamak için dikkatlice seçilmelidir (Amillo, 2021).

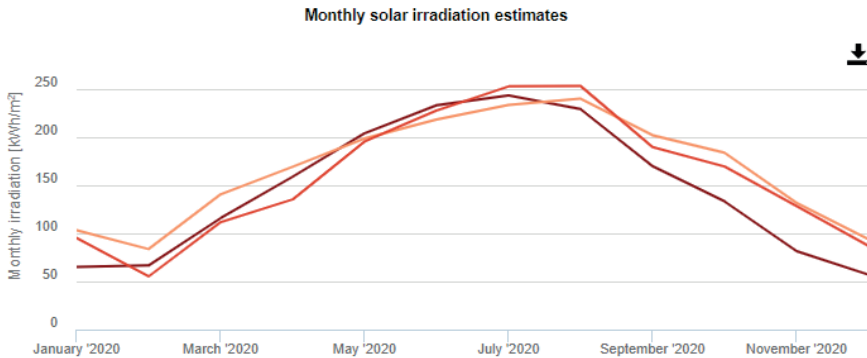
Dağınık yatay ışıının güneş enerji santrallerinde projelendirme aşamasında dikkate alınması güneş enerjisi sistemlerinin performansının optimize edilmesi için kritik bir adımdır. Bu sayede güneş enerjisi sistemleri, daha fazla enerji üretebilir ve daha verimli çalışabilir.

Güneş enerjisi, sınırsız bir temiz enerji kaynağı olmasına rağmen, güneş panellerinin verimliliği doğrudan güneş ışığına erişime bağlıdır. Ancak, bu verimliliği artırmak için birçok gelişme kaydedilmiştir. Dağınık yatay ışıının gibi faktörler, güneş enerjisi üretimini olumsuz etkileyebilir, ancak teknolojik ilerlemeler ve akıllı tasarım çözümleri ile bu etkileri minimize etmek veya aşmak mümkündür. Dağınık yatay ışıının olumsuz etkileri güneş enerjisi endüstrisinde daha az önemli hale gelmektedir çünkü teknolojik ilerlemeler ve tasarım iyileştirmeleri, güneş enerjisi üretiminin daha güvenilir ve verimli olmasını sağlamaktadır (Akcan, 2020).

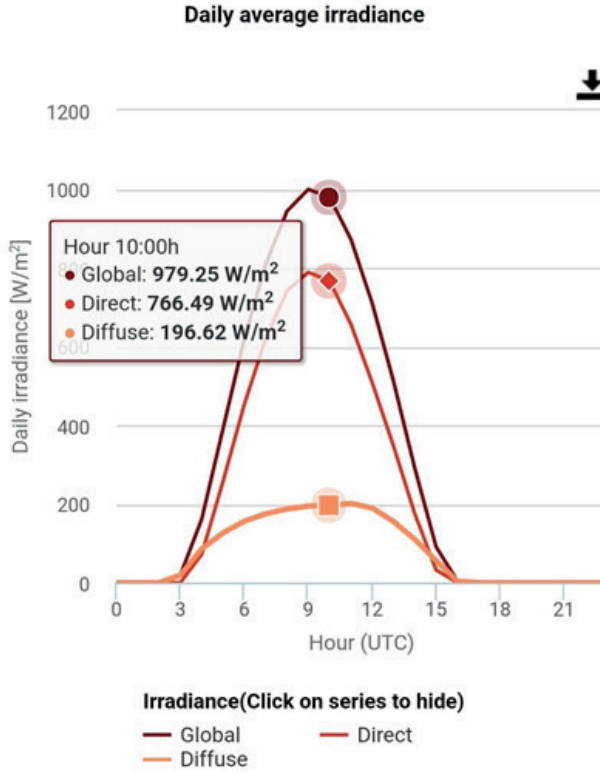
Isıma etkilerini gösterme ve fikir vermesi açısından Elazığ ili için yapılan analizlerde Photovoltaic Geographical Information System görseli Şekil 2’de, aylık solar ışıma grafiği Şekil 3’de ağustos ayındaki günlük ortalama solar ışıma grafiği ise Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 2. Photovoltaic Geographical Information System Görseli



Şekil 3. Aylık Solar Işıma Grafiği



Şekil 4. Günlük Ortalama Solar Işıma Grafiği

2.3. Meteorolojik Veriler

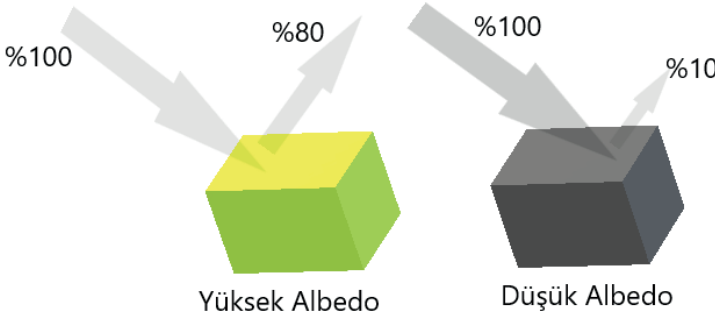
Güneş santrallerinde üretilecek enerji miktarı direkt olarak ışıınım değeri ile orantılıdır. Sahadaki ışıınım değerini doğru şekilde hesaplanması sahanın performans ölçümü için çok önemlidir. Piranometre cihazı sayesinde ışıınım değerini ölçülebilmektedir. Ölçülen ışıınım değeri sayesinde sahanın mevcut ışıınım değeri ile üretmesi gereken enerji miktarı tespit edilebilmektedir. Böylece üretilen enerji ile üretilmesi gereken enerji arasında kıyaslama yapılabilecektir. Verilerin karşılaştırılması sonucu sahada herhangi bir kayıp olup olmadığı kolaylıkla tespit edilebilecektir. Bu tespit ve gözlemler sonucunda verim düşük gerekli düzeltmeler yapıp önlemler alınabilecektir (Pfeifroth, 2019).

Güneş enerji santrallerinde girdi güneşten gelen ışıınım, çıktı ise üretilen elektrik enerjisidir. Dolayısıyla tesise ait performans değerinin tespit edilmesi için girdi değerini bilinmesi gerekir. Veri olmayan hiçbir sistemde perfor-

mans değerlendirmesi yapılamaz. Bu sebeple sürekli veri almamızı sağlayan piranometre cihazı santralin performans yeterliliğini kontrol etmek için sistem performansını etkileyen bütün parametrelerin takibinin yapılabilmesini sağlar. Güneş santrallerinin en önemli girdisi olan ışıınım değerinin takibini ancak piranometreler ile yapılabilmektedir.

Santral bölgesine tesis edilecek solar panellerin üretim kapasitesinin takip edilmesi ve gerekli simülasyon çalışmalarının yapılabilmesi için piranometre ve albedometre cihazları ile ölçümlerin alınması gerekir. Bu ölçümlerin santralin çalıştığı süre boyunca belirli periyotlarda kontrol ve bakımının yapılması çalışma verimi ve vereceği bilgilerin doğruluğu açısından çok mühim bir meseledir.

Bir yüzeyin üzerine düşen elektromanyetik enerjiyi yansıtma kapasitesi, yani yüzeyin yansıtma gücü albedo olarak adlandırılır. Cisimlerin albedoları o cisimlerin yüzey alanına, dokusuna ve rengine bağlı olarak değişmektedir. Beyaz görünen bir cisim, yüksek bir albedoya sahip olup ona çarpan ışığın çoğunu yansıtırken, koyu renkte görünen bir cisim, düşük bir albedosu olduğundan çarpan ışığın çoğunu emer (Perkins, 2019). Yüksek ve düşük albedo özellikli cisimlerin davranışları Şekil 5’de gösterilmiştir.



Şekil 5. Yüksek ve Düşük Albedo Özellikli Cisimlerin Davranışları

Bir güneş santralinde üretimi belirleyen, projeye özgü en önemli meteorolojik parameter güneş ışımasıdır. Enerji üretimi hava sıcaklığına ek olarak nem ve bulutluluk faktörü gibi değerlere de bağlıdır. Bu özellikler bir fotovoltaiik sistemin performansını, kullanılabilirliğini ve yaşlanma hızını etkiler.

3. Güneş Enerji Santrallerinde Projenin Finansal Gelişim Süreci

Kurulumu yapılacak olan enerji santralinin teknik fizibilite çalışmasındaki enerji üretimi ve tüketilen enerji miktarındaki mahsuplaşma işlemi yapılır. Bu çalışmaya ek olarak tesisdeki gider kalemleri aşağıda verilmiştir. Lisanslı veya lisanssız elektrik üretim yönetmeliği kapsamında yapılacak olan

enerji santrallerindeki fiyatlandırmalar ilgili bakanlığın ilgili güncel yönetmelik ve mevzuatlardaki bedellere göre hesaplanacaktır.

3.1. Satış ve Dağıtım Bedeli

Elektrik satış bedeli biresyel hanelerde olduğu gibi ticari işletmelerde de elektrik faturasında belirtilmektedir. Dağıtım bedeli, elektrik tüketiminde veya üretiminde tek veya çift terimli sınıfa tabi olan aboneler için uygulanan birim fiyatı ifade eder. Bu birim fiyat, dağıtım sisteminden çekilen elektrik miktarı ve üreticilerin dağıtım sistemine verdiği enerji miktarı üzerinden hesaplanır ve kWh cinsinden belirlenir. Tek veya çift terimli tarife; elektrik tüketimi için kullanılan bir fiyatlandırma sistemini temsil eder. Genellikle enerji dağıtım şirketleri veya devlet politikası tüketicilere iki farklı opsiyon sunmaktadır. Tek terimli tarife enerji tüketimi için sabit bir birim fiyat iken çift terimli tarife ise enerji tüketimi ve zamana bağlı olarak değişen birim fiyattır. Bu ücretlendirme elektriğin üretim yerinden tüketiciye kadar iletilmesi, altyapı sistemleri ve bu iletim hatların bakım ve onarımı için temin edilmektedir. Bu bedel de aktif enerji ücretinde olduğu gibi EPDK tarafından yapılır ve yılda 4 defa olmak üzere güncellenir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023).

Dağıtım bedeli aktif enerji tüketim tutarına endeksli olacak şekilde oransal olarak hesaplanır. Bu sebeple faturalandırmada bu tutar sabit olmayıp tüketim arttıkça artan bir değer olmaktadır. Bir değer verilirse bu ücret fatura miktarının yaklaşık 5 de 1'ini oluşturur. Ayrıca daha önceden faturalandırma sisteminde yer alan iletim bedeli, perakende satış bedeli ve kayıp kaçak bedeli gibi kalemler artık dağıtım bedeli içerisinde yer almaktadır. Bu sebepler bu değerler faturalarda tekrardan belirtilmemektedir.

2022 yılı için orta gerilim kullanan ticarethaneler için ücretlendirme kilovatsaat başına birim fiyat 3,14 TL'dir. 01.07.2023 tarihi itibarıyla ticarethaneler yeni adıyla kamu ve özel hizmetler sektöründeki işletmeler için ücretlendirme 2,19 TL/kWh olarak düzenlenmiştir.

3.2. Enerji Fonu ve TRT Payı

Enerji fonu Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından alt yapı giderlerine harcanmak üzere enerji tüketim tutarı üzerinden 2021 yılından önce %1 olarak tahsil edilen tutar 2021 yılından sonra % 0,7'ye düşmüştür. TRT payı ise TRT Gelirleri Kanunlarına istinaden tüketicilerden tüketilen enerji bedeli üzerinden %2 oranında alınan ve TRT'ye aktarılan bedeldir. Sanayi sektöründeki sanayi sicil belgesi olan tüketicilere ve organize sanayi bölgesinde faaliyet gösteren sanayiciler bu bedelden muaftır. 01.01.2022 tarihinden itibaren enerji fonu ve TRT payı bedelleri faturalara yansıtılmamaktadır.

3.3. Operasyonel Giderler, Sigorta ve Temizlik

Santralin devreye alınma aşamasının ardından elektrik enerjisinin üretimi ve şebeke bağlantısı gerçekleştikten sonra tesiste işletme dönemi başlamış olur. İşletme dönemindeki sürekliliğinin sağlanması için büyük önem arz etmektedir. Bu hususta santralde tesis teknik bakım işlemleri, teknik bakım sözleşmesi, tesis çevresel bakımı, panel temizliği, yazılım güncellemeleri ve yedek parça temini gibi operasyonel olarak yapılması gerekmektedir. Ayrıca santralin sorunsuz ve sürekli olarak çalışması ve olabilecek olumsuz durumlara karşı en kısa sürede müdahale edilmesi amacıyla tesise uzaktan izleme alt yapısının kurulması önemlidir. Bu sistem ile tesisin sürekli olarak takip edilmesi ile verimliliğinin sürekli olarak üst seviyede kalması sağlanmış olur.

Santral bölgesinde meydana gelebilecek doğal afetler, ağır hava koşulları, hırsızlık gibi istenmeyen olaylara karşı santralin korunabilmesi için tesisin sigortalanması önerilir. Aynı zamanda tesis için performans garantisi veren sigorta seçenekleri de bulunmaktadır. Bu seçenek tesisten ve birbirinden bağımsız olarak istenmeyen durumlar (doğal afet, olumsuz hava koşulları, aşırı bulutluluk gibi) sonucunda yıllık ortalama beklenen enerji üretimi miktarının %90'ın altına düşmesi durumunda kayıp bedelinin karşılamaktadır.

3.4. Finansal Analiz

Güneş enerji santralleri için geri ödeme süresi (payback period) ve başa baş noktası (break-even point) genellikle projenin özelliklerine ve yerel koşullara bağlı olarak değişebilir.

Geri ödeme süresi tesis kurulumundan itibaren yatırım maliyetinin ne kadar sürede kapatılması ve kar elde etmeye başlanma süresini ifade eder. Bu sürenin 10 yıl veya daha kısa olması istenir. Geri ödeme süresi tesis maliyeti, güneş ışığına maruz kalma süresi, enerji fiyatları ve diğer olumlu-olumsuz durumlara bağlı olarak değişir. Geri ödeme süresinin kısa olması yatırımın yüksek kazançlı olduğu anlamına gelir.

Baş baş noktası güneş enerji santrali yatırımının maliyetini karşılamaya başladığı ve net kara geçildiği zamanı ifade eder. Baş baş noktası yatırım maliyeti ile üretilen enerjiden elde edilen gelirlerin eşit olduğu zamandır. Yapılan yatırımın ne zaman kar etmeye başladığı zamanı gösterir ve maliyetin tesis geliri tarafından karşılandığı dönem başlangıcını ifade eder.

Güneş enerji santrali yatırımları için geri ödeme süresi ve başa baş noktası, yatırımın büyüklüğü, üretim kapasitesi, tesis verimliliği, finansman koşulları, yerel enerji piyasası, satış ve temin fiyatları gibi farklı parametrelere bağlıdır. Bu nedenle bu hesaplamalar tüm bu tesisler için özeldir ve ayrı ayrı analiz edilmelidir. İdeal bir yatırım analizi güneş enerji santrali projenizin geri ödeme süresi ve başa baş noktasının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- C. Haydaroglu ve B. Gümüř, “Dicle Üniversitesi Güneş Enerjisi Santralinin Pvsyst ile Simülasyonu ve Performans Parametrelerinin Değerlendirilmesi”, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, c. 7, sayı 3, ss. 491-500, Aralık 2016.
- Pfeifroth U., Trentmann J., Kothe S. Validation report Meteosat Solar Surface Radiation and Effective Cloud Albedo Climate Data Record. SARAH-2.1 climate data records (2019)
- E. Akcan, M. Kuncan, ve M.R. Minaz, “ Pvsyst Yazılımı ile 30 kW Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi ve Simülasyonu”, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, c. 18, ss. 248-261, Mart-Nisan 2020
- A.M. Gracia Amillo, N. Taylor, A.M. Martinez, E.D. Dunlop, P. Mavrogiorgios, F. Fahl, G. Arcaro, I. Pinedo, Adapting PVGIS to Trends in Climate, Technology and User Needs, Proc, 2021. 38th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, p. 907-911, DOI: 10.4229/EUPVSEC20212021-5BO.6.1
- Atmospheric Reanalysis ERA5 products. Copernicus Climate Change Service (C3S) at the European Centre for Medium-Range Weather Forecast
- NASA, “Long-term warming trend continued in 2017: NASA, NOAA,” 18 Ocak 2018. Çevrimiçi: <https://climate.nasa.gov/news/2671/long-term-warming-trend-continued-in2017-nasa-noaa>.
- Ö. L. Şen, “A holistic view of climate change and its impacts in Turkey,” Sabancı Üniversitesi, İstanbul Politikalar Merkezi, 2013.
- T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, URL: <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/23.aspx> (Erişim zamanı; 05, 29, 2023).
- N. Pearsall, The Performance of Photovoltaic (PV) Systems: Modelling, Measurement and Assessment, Woodhead Publishing, UK, 2016.
- Perkins, S. (2019). “Albedo is a simple concept that plays complicated roles in climate and astronomy”. Proceedings of the National Academy of Sciences, 116(51): 25369-25371. doi: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1918770116>.

Bölüm 5

FELDİSPATIN UYGULAMA ALANLARI VE ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Zehra ÇETİNKAYA¹

¹ Öğr. Gör. Dr. Zehra Çetinkaya, Çukurova Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı, ORCID
ID: 0000-0002-0553-0102

1. GİRİŞ

Feldispatlar, yer kabuğunun önemli bileşenlerinden biridir ve birçok endüstriyel uygulama için büyük bir öneme sahiptir. Feldispat sodyum, potasyum, kalsiyum ve bazen de baryum, sezyum ve bu minerallerin izomorf kompozisyonundan meydana gelen alüminyum silikat grubu bir mineraldir (Heyes vd., 2013; Zhang ve vd., 2018). Bunlar, tetrahedral (dört köşeli) yapıdaki SiO_4 grupları ile çevrelenmiştir. Feldispatlar beyaz, krem, pembe, kırmızı, yeşil, mavi, kahverengi, gri renklerde. Mohs sertlik değeri 6,0-6,5, yoğunluğu ise 2,50-2,76 g/cm^3 'dür (URL-1) Feldispatlar, magmatik, sedimenter ve metamorfik kayalarda bulunabilirler (URL-2). Genellikle granit, bazalt ve pegmatit gibi magmatik kayalarda yoğun olarak bulunurlar (Lin ve ark. 2008; Schaef ve ark. 2011)

Feldispatlar, seramik, cam, boya, porselen yapımı gibi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (URL-1). Feldispat mineralleri, hem jeolojik hem de endüstriyel açıdan büyük bir öneme sahiptir. Kimyasal bileşimleri, renkleri ve sertlikleri, bu minerallerin tanınmasını kolaylaştırır. Endüstriyel uygulamalardaki geniş kullanım alanları, feldispatların ekonomik açıdan da büyük bir değere sahip olduğunu göstermektedir.

2. FELDİSPAT MİNERALLERİ

Feldispatlar kimyasal bileşim ve yapılarına göre iki ana gruba ayrılmaktadırlar. Bazı feldispat minerallerine ait görüntü Şekil 1'de, Feldispat minerallerinin birbirleriyle olan ilişkileri ve feldispat türleri ise Şekil 2'de verilmiştir. Ortoklaz, Albit ve Anortit ticari öneme sahip feldispat mineralleridir (Yıldız, 2014).

➤ Plajiyoklas feldispatlar

- Albit $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
- Oligoklaz (Na, Ca) AlSi_3O_8
- Andezin (Na, Ca) AlSi_3O_8
- Labrador (Na,Ca) AlSi_3O_8
- Bitovnit (Na,Ca) AlSi_3O_8
- Anortit $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

➤ K-Feldispatlar veya alkali feldispatlar

- Mikroklin KAlSi_3O_8
- Sanidin KAlSi_3O_8
- Ortoklaz KAlSi_3O_8



Şekil 1. Çeşitli Feldspat Minerallerine Ait Görüntüler (MMO, 2010)

3. TÜRKİYE’DE FELDİSPAT YATAKLARININ DURUMU

Türkiye, feldspat mineralleri açısından zengin bir ülkedir ve bu minerallerin çeşitli bölgelerde büyük miktarlarda bulunmaktadır. Feldspat yataklarının durumu Türkiye’nin jeolojik yapısı ve coğrafi bölgeleri göz önüne alındığında oldukça çeşitlidir. Ülkemizdeki başlıca feldspat yatakları Çine (Aydın), Demirci (Manisa), Simav (Kütahya), Milas (Muğla) Kırşehir, Yozgat ve Artvin ile Ardahan yöresindedir. Türkiye’nin feldspat rezervi dünya rezervinin %10’u kadardır (URL-3). Ülkemizde varlığı tespit edilen feldspat yataklarının bulunduğu bölgeleri gösteren harita Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Feldspat Yataklarının Bulunduğu Bölgeler (MTA, 2021)

4. FELDİSPATIN KULLANIM ALANLARI

Feldispat mineralinin çeşitli endüstriyel ve ticari kullanım alanları vardır. Feldispatın başlıca kullanım alanları aşağıda sunulmuştur.

Seramik Üretimi: Feldispatlar, seramik ve porselen üretiminde temel bir malzemedir. Bu mineraller, seramiklerin pişirme sıcaklığını düşürerek enerji tasarrufu sağlar ve seramiklerin daha iyi şekil almasına yardımcı olur (URL-1). Feldispat mineralinin cam sanayisindeki kullanımı hakkında bazı bilgiler aşağıda sunulmuştur:

- Feldispat, cam seramiklerin (cam seramik kaplamalar) temel bileşenlerinden biridir (Orbay, 2004). Cam seramikler, yüksek sıcaklıklara dayanıklı, sert ve çizilmeye karşı dirençli seramik ürünlerdir. Elektronik yalıtım, fırın üstleri, inşaat malzemeleri, dişçilik ve vücut protezleri gibi ürünlerde kullanılırlar (Vogel, 1994).

- Feldispat, porselen seramiklerin yapımında da yaygın olarak kullanılır. Porselen, seramik ürünlerin yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı ve beyaz renkli olmasıyla bilinir. Feldispat, porselen seramiklerin sertliğini artırmak için kullanılır (URL-4).

- Feldispat, seramik fritlerin üretiminde kullanılır. Arcasoy ve Başkıran'ın (2020), ifadesine göre, frit çeşitli amaçlar için kullanılır, bunlar arasında suda çözünen maddelerin suda çözünmez silikatlara dönüştürülmesi, zehirli maddelerin diğer maddelere bağlanarak zararsız hale getirilmesi, sırların daha düşük pişirme sıcaklıklarında kullanılmasının sağlanması, renk veren oksitlerin sır içinde daha homojen dağılmasının sağlanması ve boyama gücünün artırılması gibi amaçlar bulunmaktadır.

- Seramik karoların üretiminde de feldispat kullanılabilir (Tarhan ve Tarhan, 2019). Feldispat, karoların sertliğini ve dayanıklılığını artırarak, yüzeylerinin daha kolay temizlenmesini ve uzun ömürlü olmasını sağlar (Mohamad ve ark., 2014).

Cam Üretimi: Feldispat Ülkemizde seramik sektörünün gelişimi ve dünyada seramik sektöründeki yerini koruması açısından önemli olmakla birlikte cam sektöründe kullanımı da ivme kazanmıştır. (Kahraman ve Yapıcı, 2023). Cam üretiminde feldispatın kullanımı, camın özelliklerini iyileştirmek ve istenilen kaliteyi elde etmek için önemlidir. Feldispat cam üretiminde alümina kaynağı olarak kullanılırlar. Camın erime sıcaklığını düşürerek camın daha kolay şekil almasına ve mukavemetini artırmasına katkı sağlar (URL-1). Feldispat mineralinin cam sanayisindeki kullanımı hakkında bazı bilgiler aşağıda verilmiştir:

- Feldispat, camın termal genleşmesini kontrol etmek için kullanılır. Bu, camın sıcaklık değişikliklerine karşı daha dayanıklı olmasını sağlar. Özellikle

sıcaklık farklarına maruz kalan cam ürünleri için önemlidir (URL-1). Ayrıca feldispat, camın kimyasal dayanıklılığını artırmak için de kullanılabilir (Meechoowas ve ark., 2013).

Kaynak Elektrodların Üretimi: Kaynak elektrodları, feldispatlar için geleneksel son kullanım alanlarıdır, çünkü bu malzemelerin eritici özellikleri, elektrot kaplama malzemesi üretiminde ideal bir bileşen olmalarını sağlar. Feldispatın karışıma eklenmesi, iki önemli işlevi yerine getirir: birincisi, arkı stabilize eder, ikincisi ise kaynak çukurunu korur. Arkı stabilize etmek için kullanılan malzemeler arasında feldispatın yanı sıra potasyum ve sodyum silikat, kil, talk, nikel ve demir tozları gibi metalik katkı maddeleri bulunur. Bu katkı maddeleri, düşük iyonlaşma potansiyeline sahip elementler oluşturarak arkı istikrarlı bir şekilde tutarlar. Özellikle alternatif akım uygulamalarında, potasyum silikatlar ark stabilizasyonu için uygundur çünkü potasyum iyonları, akım kesildiğinde bile arkı yeniden tutuşturabilirler. Öte yandan sodyum silikatlar, doğru akım uygulamalarında daha etkilidirler. Bunun yanı sıra, kullanım kolaylığı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda yüksek ark stabilitesi sunar ve daha düşük maliyetli ekipmanlarla çalışma olanağı tanır. Kaynak çukuru doldurulduğunda, erimiş katı bariyerler gibi materyaller, kaynak çukurunu ve yeni kaynaklanmış metali korur (URL-1).

Boya Üretimi: Boyalar genellikle bir pigment (renk verici), bir bağlayıcı madde ve bir inceltici içerir. Pigmentlere ek olarak, birçok boya türü, üretim maliyetlerini azaltmak veya daha pahalı pigmentleri kısmen yerine koymak için dolgu maddeleri veya uzatıcılar eklemek suretiyle geliştirilir. Ayrıca, bu ek katkılar, boyanın kuruma süresi, yapışma özelliği gibi çeşitli işlevsel özelliklerini etkileyebilir. Feldispat dolgu maddesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Feldispatlar, barit ve kalsiyum karbonat gibi geleneksel boya dolgularına kıyasla, daha yaygın bir şekilde kullanılmak üzere alternatif bir seçenek haline gelmektedir. Özellikle dış cephe boyaları, korozyona karşı dayanıklı boyalar, sıva ve alçı gibi asitlere karşı dayanıklı ürünlerde, kalsiyum karbonatın yerine tercih edilmektedir. Bu, dış etkenlere karşı renk stabilitesinde avantaj sağlar (URL-5).

Feldispat minerali, boyaların kalitesini artırmak, istenilen rengi elde etmek ve uygulanabilirliği iyileştirmek için kullanılan çok yönlü bir malzemedir. Boya endüstrisi, feldispatın çeşitli tiplerini ve özelliklerini dikkate alarak farklı uygulama gereksinimlerine uygun olarak kullanır. Bu nedenle, feldispatın boya üretiminde önemli olduğu söylenebilir.

Plastik Üretimi: Katkı maddesi olarak kullanılan endüstriyel mineraller, plastik üretiminde büyük bir pazar oluşturur. Bu mineraller, dolgu maddeleri, uzatıcılar, renk vericiler ve yangın geciktiriciler olarak çeşitli alanlarda kullanılır. Kalsiyum karbonat gibi geleneksel dolgu maddelerinin aksine feldispat daha az miktarlarda kullanılır. Feldispat minerali, bazı plastiklerin dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Plastik ürünlerin mukavemetini artırmak ve daha düşük maliyetli hale getirmek amacıyla kullanılabilir (URL-1).

Feldispatın plastik sanayisindeki kullanımı sınırlıdır, plastiklerin ana bileşenleri polimerler ve katkı maddeleridir (MEGEP, 2006). Plastiklerin üretimi ve formülasyonu, ürünün özelliklerine, uygulama alanına ve gereksinimlere bağlı olarak büyük ölçüde değişir. Feldispatın plastiklerdeki kullanımı, özel uygulamalar ve belirli gereksinimler için sınırlı bir şekilde tercih edilebilir.

5. FELDİSPATIN ZENGİNLEŞTİRİLME YÖNTEMLERİ

Feldispat zenginleştirme işlemi, farklı feldispat türlerini ve minerallerini ayırmak için özel teknikler gerektirebilir, çünkü feldispatlar karmaşık bir mineral grubunu temsil eder. Bu işlem, endüstriyel ürünlerin kalitesini artırmak ve çeşitli uygulamalarda kullanılan feldispatların uygunluğunu sağlamak için önemlidir.

Kaliteli feldispat minerallerinden albitler, maden yataklarından çıkarıldıktan sonra doğrudan veya basit yıkama ve eleme işlemleri sonrasında kullanılmak üzere uygundur. Ancak, feldispatlar cevherin tenörü, kalitesi ve diğer özelliklerine bağlı olarak flotasyon, manyetik ayırma, elektrostatik ayırma ve yoğunluk farkına dayalı zenginleştirme yöntemleri kullanılarak içerdikleri safsızlıklardan arındırılırlar. Feldispatların zenginleştirilmesi için en yaygın olarak kullanılan yöntem flotasyondur ve yaklaşık olarak feldispat cevherlerinin %70'i bu yöntemle işlenir (Yıldız, 2014).

5.1. Feldispatın Elle Ayıklama ile Zenginleştirilmesi

Minerallerin renk, parlaklık, flüoresans, radyoaktivite, özgül ağırlık ve genel görünüm farklılıklarını kullanarak, elle seçerek birbirinden ayrılmasına dayanan bir zenginleştirme yöntemi, ülkemizde cam, seramik ve porselen sanayi alanlarında faaliyet gösteren birçok şirketin hala tercih ettiği bir metottur. Ancak bu yöntem, ince boyutta (<5 cm) dağılım gösteren minerallerin cevherlerine uygulanamaz. (Çobanoğlu, 2009).

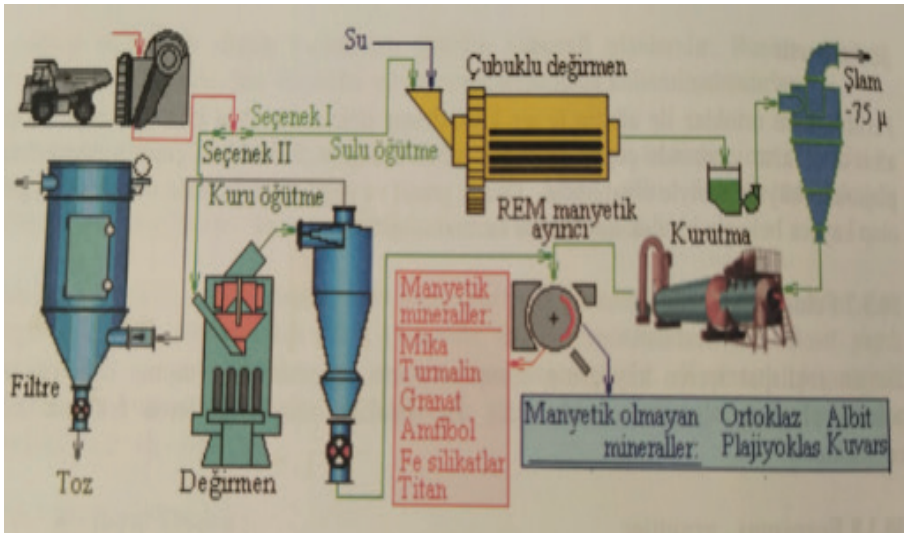
5.2. Feldispatın Boyuta Göre Sınıflandırma ile Zenginleştirilmesi

Mineral zenginleştirme süreci, cevherin boyutlarına bağlı olarak farklı büyüklük ve şekillerde kırılabilen minerallerin yapısal özelliklerine, dayanıklılık, kırılma şekli, dilinim ve ısıya karşı tepkileri gibi faktörlere dayanmaktadır. Bu süreçte, bazen değerli mineral iri taneli kalırken değersiz mineral daha küçük parçalara ayrılabilir, bazen de bu durumun tam tersi meydana gelebilir. Her iki durumda da, boyuta göre sınıflandırma kullanılarak değerli mineral belirli bir derecede zenginleştirilebilir (Önal, 1985).

5.3. Feldispatın Manyetik Yöntem ile Zenginleştirilmesi

Manyetik ayırma, feldispatları diğer minerallerden ayırmak için minerallerin manyetik özelliklerine dayanır. Feldispat mineralleri genellikle düşük manyetik özelliklere sahipken, bazı demir içeren mineraller yüksek manyetik özelliklere sahiptir. Bu farklılıklar, manyetik ayırma işlemi için temel oluşturur

(Biedermann ve ark., 2016). Feldispat cevherinin zenginleştirilmesinde REM olarak ifade edilen Rear Eart Magnetic yüksek gradyanlı sabit mıknatıslı rulo-lu kuru manyetik ayırıcılar kullanılmaktadır Bu ayırıcılarla -75 μ boyutundaki feldispatın içerdiği manyetik mineralleri ayırabilmektedir. Ortamda iri boyut-lu cevher olması durumunda statik elektriğin etkisi ile küçük taneler büyük tanelerin üzerine yapışmakta bu da ayırmayı olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun önlenmesi amacıyla manyetik ayırıcılara dar boyut aralığında mal-zeme beslenmesi, zenginleştirilecek malzemenin statik elektriğinin alınması gerekmektedir. Ancak her feldispat cevheri için manyetik zenginleştirme ile istenilen sonuç alınamamakta, çözüm için flotasyon kaçınılmaz olmaktadır. Şekil 3'de feldispat cevherinin içerdiği manyetik olan ve olmayan minerallerin ayrılması için seçenekli iki devre gösterilmiştir (Yıldız, 2014).



Şekil 3. Feldispat Cevherinin Manyetik Ayırıcı İle Zenginleştirilmesi (Yıldız, 2014).

5.4. Feldispatın Flotasyon Yöntemi ile Zenginleştirilmesi

Flotasyon, feldispat minerallerini diğer minerallerden ayırmak için yüzey kimyası prensiplerine dayanır. Bu yöntemde feldispat mineralleri ve diğer mineraller farklı hidrofobik (su itici) ve hidrofilik (su çekici) özelliklere sahip olurlar. Feldispatı, beraberindeki silikat mineralleri ve metal oksitlerden ayırmak amacıyla yaygın bir şekilde kabul gören ve uygulanan bir yöntem olan kademeli flotasyon yöntemi kullanılır. Flotasyon işlemine başlamadan önce, şlam boyutlu malzeme uzaklaştırılır, böylece bu boyuttaki demir ve kil minerallerinin neden olduğu olumsuz etkilerin flotasyon verimliliğini düşürmesi önlenir. Şekil 1'de feldispat flotasyonunda uygulanan geleneksel flotasyon akış şeması gösterilmektedir (URL-6). Temel akış aşağıdaki gibidir.

- Öğütme: Cevher 850-500 μ civarında çubuklu değirmenlerde öğütül-

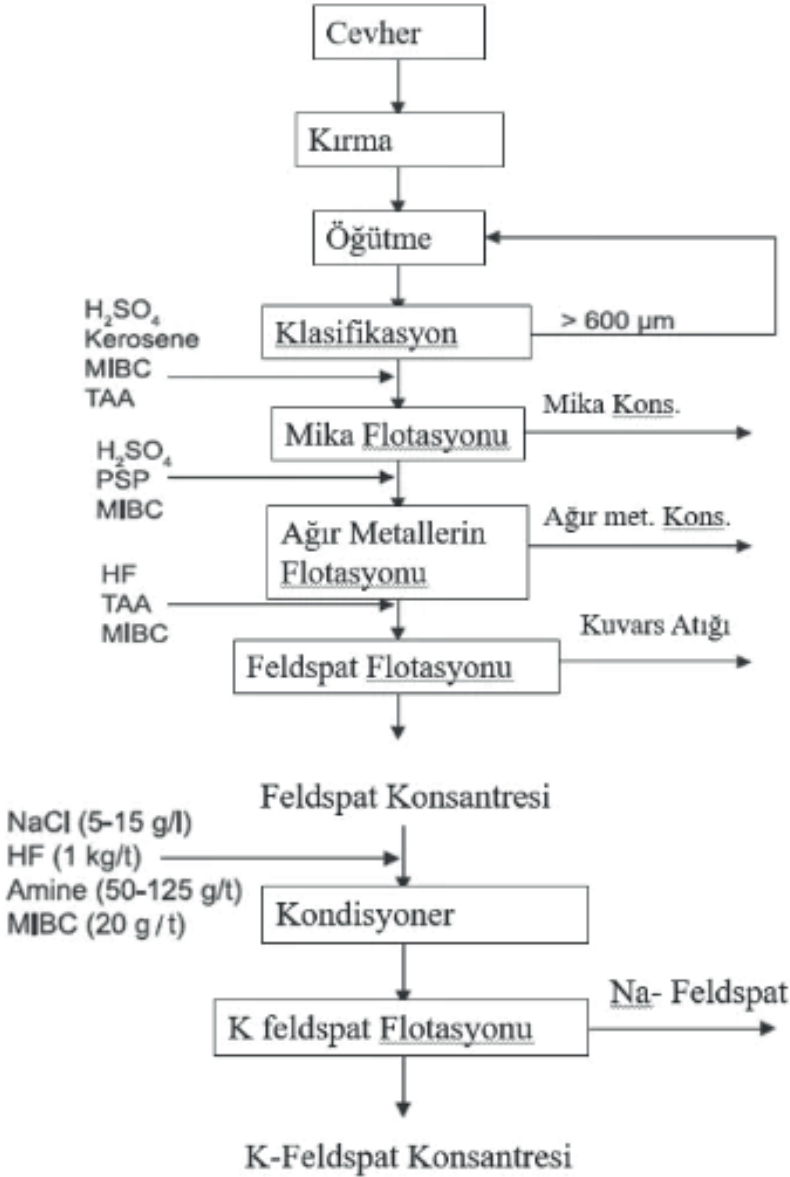
mektedir. Öğürülmüş cevherin-75 μ boyutu hidrolik sınıflandırıcı ya da siklonlarla şlam olarak atılmaktadır.

- Mika flotasyonu: Sülfürik asit ilavesi ile pH değeri 4-5 olan yüksek yoğunlukta pülpe amine tuzları ve fuel-oil ilave edilerek flotasyona hazırlanmaktadır. Çam yağı kullanılarak mika yüzdürülmektedir. Yüzdürülen mikanın pazarlanma olanağı varsa mika birkaç kademe flotasyonla daha yüzdürülerek temizlenmektedir.

- Ganet, turmalin, hornblend gibi temel silika flotasyonu: Sınıflandırıcı veya siklonla mika flotasyonunda batan kısım koyulaştırılarak flotasyon kimyasallarından temizlenmektedir. Koyulaştırılmış ve temizlenmiş malzemeden pH değeri 3-4 olan yoğunluğu yüksek pülp hazırlanıp uzun zincirli sulfo-nat-fuel oil karışımı ilave edilerek flotasyon için tanklarda karıştırılmaktadır. Çam yağı ile temel silika mineralleri yüzdürülmektedir. Flotasyonda yüzen kısım atılmaktadır.

- Feldispat flotasyonu: Flotasyonda sınıflandırıcı veya siklonda batan kısmın koyulaştırılıp yıkanarak flotasyon kimyasallarından temizlenmektedir. Koyulaştırılmış ve temizlenmiş malzemeden pH değeri 2.3-3.0 olan yoğunluğu yüksek pülp hazırlanıp amina oil karışımı ilave edilmektedir. Flotasyonla feldispat yüzdürülmektedir (Yıldız, 2014).

Genel olarak 3 kademedan oluşan feldispat flotasyonun ilk kademesinde mika, ikinci kademede demir oksitler, titanyum gibi renk verici mineraller ile ağır mineraller uzaklaştırılmaktadır. Son aşamada da feldispat ile kuvars ayrılmaktadır. Cevher içinde mika minerallerinin az olması durumunda birinci aşama uygulanmayarak, mika mineralleri ağır minerallerle birlikte yüzdürülebilmektedir (Yıldız, 2014). Flotasyon, feldispat mineralinin verimli bir şekilde ayrıştırılmasını sağlar ve endüstriyel ürünlerin kalitesini artırır. Elde edilen yüksek kaliteli feldispatlar, seramik, cam ve porselen üretimi gibi birçok uygulamada başarıyla kullanılır.



Şekil 4. Feldispatın Flotasyon Yöntemi İle Zenginleştirilmesinin Akım Şeması (URL-6).

5.5. Feldispatın Elektrostatik Yöntem ile Zenginleştirilmesi

Feldispat yataklarında kuvarsla birlikte bulunan demir, titan, krom, magnezyum ve mangan gibi safsızlıkları elektrostatik yöntemle ayırma olanağı vardır. Ancak feldispatın kuvarstan ayrımı bu iki mineralin düşük iletkenlik özelliği yüzünden zordur. Uygulamadaki teknik zorluklar ve sınırlı kapasite

nedeniyle elektrostatik yöntemle feldispat kuvarstan ancak laboratuvar ve pilot tesis ölçeğinde ayrılmış, endüstriyel boyutta yöntem uygulanamamıştır. Laboratuvarda ayırma genellikle yaklaşık 1 mm ile 40 mikron aralığında olumlu sonuç vermiştir. Daha küçük boyuttaki tanelerde fiziksel ve yüzeylerinde kimyasal değişiklikler gözlenmiştir. Feldispat ve kuvarsın elektrostatik yöntemde birbirlerinden farklı davranış göstermeleri için ısıtma işlemi ve HF gibi kimyasal katkıları kullanılmaktadır (Yıldız, 2014).

6. ÜRÜN STANDARTLARI

Seramik ve cam endüstrisinde kullanılan albit, potasyum feldispat, nefelinli siyenit ve pegmatitler hakkında genel bir çizelge verilmiştir. Ancak, standartlar ürün türüne ve kullanım amacına göre değişebilir. Keramik ve cam sektöründe tüketilen albit, potasyum feldispat, nefelinli siyenit ve pegmatitlerin üretim standartları Çizelge 1’de, TSE’nin Feldispat cevheri Sınıflandırması ise Çizelge 2’de sunulmuştur (URL-1).

Feldispatların kimyasal bileşimleri, ürünlerin kullanım alanlarına bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bu nedenle, feldispat ürünleri için kimyasal analizler, belirli standartlar çerçevesinde yapılır ve feldispatın bileşimi bu standartlara uygun olmalıdır. Partikül boyutu ise, ürünün işlenmesi ve karışımının homojenliği açısından önemlidir. Feldispat ürünlerin partikül boyutu ve dağılımı da belirli standartlarla düzenlenir. Feldispatların içerdiği mineral türleri ve miktarları, kullanım alanına bağlı olarak değişebilir. Standartlar, belirli mineral bileşenlerinin mevcut olması veya belirli sınırlar içinde kalması gerektiğini belirler. Renk ve genel görünüm, estetik ve uygulama gereksinimleri için önemlidir. Bu nedenle, standartlar feldispatların renk ve görünümünü sınıflandırır.

Feldispat ürünleri, aşağıda belirtilen standartlara uygun olmalı ve belirli uygulamalara göre optimize edilmelidir. Bu standartlar, ürünün kullanım amacına uygun olmasını ve endüstriyel gereksinimlerin karşılanmasını sağlar.

Çizelge 1. Türkiye Feldispat Cevherlerinin Üretim Standartları (URL-1).

	NEFELİNLİ SİYENİT	MASSELİK STAN- ALBİT	CAM VE FRİT	EKSTRA FLOTE ALBİT	MASSELİK K-FELDİSPAT	POTASYUM-2 EMAYE	SIRLIK POTASYUM-1	PEGMATİT MASSELİK
SiO ₂	60-70	68-69	68-69	68-69	63-64	64-65	63-64	68-70
Al ₂ O ₃	16.50	18-20	18-20	19-20	18-20	18-20	20-21	15-16
Fe ₂ O ₃	2.00	0.20	max 0.10	Max 0.05	max 0.4	max 0.4	Max 0.3	max 0.8
TiO ₂	0.30	0.20	max 0.15	Max 0.12	max 0.3	max 0.3	Max 0.1	max 0.5
CaO	0.70	0.2-0.4	0.2-0.4	0.5-1.0	1-1.5	1-1.5	1-1.5	0.7-0.8
MgO	0.50	0.3-0.5	0.3-0.5	0.3-0.4	0.5-0.6	0.6-0.8	0.5-0.7	0.5-1.0
Na ₂ O	5-6	min 8-8.5	min 9.0	Min 9.5	3-4	2-3	2.5-3.5	3-3.5
K ₂ O	6-6.5	max 0.3-0.4	0.3-0.4	Max 0.2	7-7.5	min 8.0	Max 8.5	2-2.5
AZ	0.20	0.2-0.3	0.2-0.3	0.2-0.3	0.2-0.3	0.2-0.3	0.2-0.3	0.2-0.3
Parça Boyutu	Tüvenan	-5 cm Tüvenan	-1 mm	-74 mik/ -63 mik	Tüvenan/-10 cm	-64 mik/-63 mik	-74.mik/-63 mik	Tüvenan
Pişme Testi	Krem/ pembe	Krem	Beyaz	Beyaz	Krem/pembe	Krem/pembe	Beyaz	Pembe

Çizelge 2. TSE'nin Feldispat Cevheri Sınıflandırması (TS-11325).

Bileşim	%					
	I. Sınıf		II. Sınıf		III. Sınıf	
K ₂ O+Na ₂ O	10.00	-	9.00	-	8.00	-
K ₂ O	9.0	-	7.0	-	-	-
Na ₂ O	-	3.00	-	3.5	-	-
Fe ₂ O ₃	-	0.10	-	0.2	-	0.5
TiO ₂	-	0.15	-	0.3	-	0.4
CaO+MgO	-	1.00	-	1.2	-	1.6
TiO ₂ +CaO+MgO	-	1.15	-	1.5	-	2.00

7. SONUÇ

Türkiye, feldispat mineralleri açısından zengin bir ülkedir. Feldispat minerali, cam, seramik, boya ve plastik endüstrileri gibi birçok sektörde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Feldispat minerallerinin bu geniş yelpazede kullanım alanları, bu hammaddenin jeolojik olarak zengin olduğu bölgelerde endüstriyel ve ticari faaliyetlerin gelişmesine katkı sağlamaktadır. Ancak, doğal olarak oluşan feldispat cevherleri genellikle kil, kuvars ve diğer kontaminantlarla karışık bir şekilde bulunmaktadır. Bu nedenle, feldispat cevherle-

rini zenginleştirmek, ticari değerlerini artırmak ve istenilen kaliteyi sağlamak için önemli bir adımdır. Feldispat cevherlerinin zenginleştirilmesi, bu değerli mineralin endüstriyel uygulamalar için uygun hale getirilmesini sağlar ve hammaddenin kalitesini artırır. Feldispat zenginleştirme işlemleri, sektörler arasında önemli bir rol oynamaya devam etmektedir ve bu sürekli büyüyen talepleri karşılamak için daha da geliştirilmelidir.

KAYNAKÇA

- BIEDERMANN, A. R., PETTKE, T., ANGEL, R. J., HIRT, A. M., 2016. Anisotropy of magnetic susceptibility in alkali feldspar and plagioclase. *Geophysical Journal International*. doi: 10.1093/GJI/GGW042
- ARCASOY, A., BAŞKIRKAN, H., 2020. Seramik teknolojisi. Literatür Yayıncılık.
- ÇOBANOĞLU, G., 2009. Anyonik ve Katyonik Kolektörler ile Feldspat Şlamından Na-Feldspat Kazanımı. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya.
- HEYES, G. W., ALLAN, G. C., BRUCKARD, W. J., SPARROW, G. J., 2013. Review of flotation of feldspar. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 121(2), 72-78.
- KAHRAMAN, E., YAPICI, N., 2023. Türkiye’de Feldspat Üretimi, Rezervi, İhracatı ve Radyoaktivite Özellikleri. 5. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi, 445-453.
- LIN, H., FUJII, T., TAKISAWA, R., TAKAHASHI, T., HASHIDA, T., 2008. Experimental evaluation of interactions in supercritical CO₂/water/rock minerals system under geologic CO₂ sequestration conditions. *J. Mater. Sci.* 43(7), 2307-2315.
- MEECHOOWAS, E., TAPASA, K., NAKNIHAM, U., JIWATCHARAKOMOL, T., 2013. Modified glass batch can have increased alumina content by using feldspar to improve glass properties. *Suranaree J. Sci. Technol.* 20(4): 309-315.
- MEGEP, 2006. Plastik Teknolojisi, Polimerlerin Fiziksel Özellikleri 2, http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Polimerlerin%20Fiziksel%20%C3%96zellikleri%202.pdf Erişim Tarihi: 11.10.2023
- MMO, 2010, Feldspat Raporu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 40s, Ankara.
- MOHAMAD, H., ANASYİDA, A. S., LONG, G. W., 2014. Effect of Feldspar Content on Electric Arc Furnace Slag (EAFS) Added Tiles. *Advanced Materials Research*, doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.1024.235
- MTA, 2021, https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/images/b_h/feldspat.jpg, Erişim Tarihi: 02.10.2023
- ORBAY, B., 2004. Potasyum Mikası ve Kordierit İçeren İşlenebilir Cam Seramiklere Çekirdeklenme Katalisti (TiO₂) İlavesinin Kristalizasyon Davranışı ve Elektriksel Özellikler Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü-Yüksek Lisans Tezi, 66s.
- ÖNAL, G., 1985. Cevher Hazırlamada Flotasyon Dışındaki Zenginleştirme Yöntemleri, 2. Baskı, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.
- SCHAEF, H. T., MCGRIL, B. P., OWEN, A. T., 2011. Basalt reactivity variability with reservoir depth in supercritical CO₂ and aqueous phases. *Energy Procedia* 4, 4977-4984.
- TARHAN, M., TARHAN, B., 2019. Sırlı Porselen Karo Üretimi için Alternatif Ham-

madde Olarak Eşme/Uşak Feldispatı, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi. 19, 429-438.

TS11325, Türk Standartları, 1994, Feldspat Seramik Sanayinde Kullanılan, TSE, Ankara.

VOGEL, V., 1994. Glass Chemistry, Springer-Verlag, Berlin.

YILDIZ, N., 2014. Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme. Ertem Basım.

ZHANG, Y., HU, Y., SUN, N., LIU, R., WANG, Z., WANG, L., SUN, W., 2018. Systematic review of feldspar beneficiation and its comprehensive application. Minerals Engineering, 128, 141-152.

(URL-1) <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/Feldispat.pdf>, Erişim Tarihi: 02.10.2023

(URL-2) <https://study.com/academy/lesson/types-feldspar-minerals-crystals.html#:~:text=Feldspars%20are%20the%20most%20abundant%20rock%2Dforming%20mineral%20group%20in,%2C%20calcium%2C%20and%20sodium%20content.> Erişim Tarihi: 02.10.2023

(URL-3) <https://www.imib.org.tr/links/29maden/FELDİSPAT.pdf>, Erişim Tarihi: 02.10.2023

(URL-4) <https://tr.wikipedia.org/wiki/Porselen>, Erişim Tarihi: 10.10.2023

(URL-5) <https://www.alsekimyamineral.com/b/feldspat-33.html>, Erişim Tarihi: 11.10.2023

(URL-6) <https://www.turkchem.net/feldspat-minerallerinin-zenginlestirilmesinde-kullanilan-alternatif-yontemler.html>, Erişim Tarihi: 11.10.2023

Bölüm 6

PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLARINDA KALIP İÇİ TAKVİYE ELEMANI DİZGİ SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

Mustafa SOYLAK¹

¹ Doç. Dr. Mekatronik Laboratuvarı, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Erciyes Üniversitesi,
Kayseri, Türkiye, soylakm@erciyes.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-5617-5913

Giriş

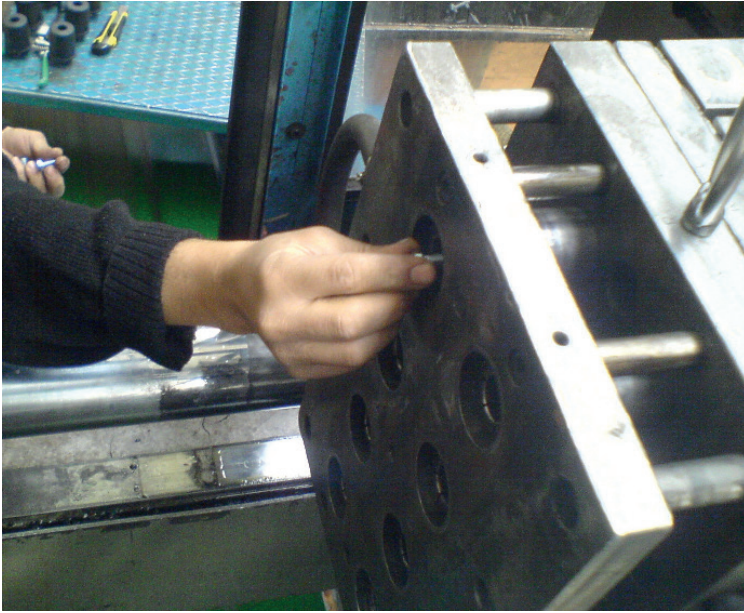
Plastik enjeksiyon kalıpcılığı reçinenin kalıp boşluğuna doldurulması esasına göre çalışan bir imalat yöntemidir [1]. Enjeksiyonla kalıplama, birçok farklı uygulama için geniş bir yelpazede karmaşık plastik parçalar üretmek için en yaygın kullanılan süreçtir ve plastik endüstrisinde kullanılan birçok makine ve cihaz bu süreçle ilişkilidir [2]. Plastik enjeksiyon kalıpları enjeksiyon sisteminin vazgeçilemez bir parçasıdır ve plastik enjeksiyon kalıpcılığı konusunda literatürde bilimsel çalışmaların bir çoğu bu konu başlığı ile ilgilidir. Phatchani ve ark. (2023) çalışmalarında plastik enjeksiyon makinesi, kalıp ve plastik malzeme olmak üzere üç faktörün etkisini Taguchi yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Çalışma, her aşamada erime sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, doldurma basıncı ve soğuma süresi gibi plastik enjeksiyon kalıplama parametrelerinin kontrol edilmesi üzerine odaklanmıştır. Plastik akış simülasyonu oluşturulmuş ve test edilmiştir [3]. Li ve ark. (2022), çalışmalarında plastik enjeksiyon kalıplarında kullanılan mikro yapıdaki yüzeylerin fonksiyonel özelliklerini incelemişler, uygun maliyetli ve mikroyapı temelli fonksiyonel yüzeylerin seri üretimi ile ilgili yol gösterici önerilerde bulunmuşlardır [4]. Gim & Turng (2022) gerçekleştirdikleri çalışmada enjeksiyonla kalıplamanın; karmaşık geometriye sahip, standart kalitede ve düzgün yüzey formuna sahip parçaların seri üretimi için verimli bir üretim süreci olduğunu vurgulamışlardır. Yüksek yüzey kalitesi için enjeksiyonla kalıplama yönteminin kapsamlı incelemesini sunmuşlardır [5]. Fellahi ve ark. (1995) çalışmalarında enjeksiyon kalıplama ürünlerinin çoğunda oluşan kaynak çizgilerinin kaçınılmaz olduğu tespitinde bulunmuşlar ve kalıp boşluğuna enjekte edilerek üretilen parçalardaki kaynak çizgileri hakkında yayınlanan literatürü incelemişlerdir [6]. Tsou ve ark. (2022) çalışmalarında enjeksiyon basıncı ve kalıp sıcaklığı gibi işlem değişkenlerine dayalı olarak ürün kalitesini izleme amacıyla %98.5 doğruluk oranında çalışan kalıp yan duvarı konumunu ölçen bir sensör sistemi geliştirmişlerdir. Önerdikleri sensör montaj yöntemi ile işlem değişkenlerine karşı hassasiyetin artırılabilir olduğunu ve bu nedenle işlem verimliliğinin artırılabilir olduğunu, buna bağlı olarak gereksiz üretim atığının azaltılabilir olduğunu tespit etmişlerdir [7].

İlgili kalıpları kullanarak plastik esaslı yarı mamul ürünlerinin üretimini ve tedarik işlerini gerçekleştiren çok sayıda üretici kuruluş bulunmaktadır. Üretim miktarının yoğunluğu; iyi bir zaman etüdü, esnek imalat ve otomasyon sistemlerinin kullanımını gerekli kılmaktadır. Esnek imalat ve otomasyon sistemlerinin kullanımı ile standart kalitede üretim ve üretim verilerinde sayısal artış oluşmaktadır. Aynı zamanda çalışanın kalifiye olmasını gerektirmeyen bir süreç yaşanmaktadır. Kalıpların çalışması esnasında karşılaşılan kayıp zamanlar ve insan sağlığı için risk oluşturan unsurlar olmak üzere iki önemli parametrenin kontrol altına alınması öncelikle ele alınması gereken konulardır. Kayıp zamanların ve risklerin eş zamanlı olarak minimize edil-

mesi gerekmektedir. Sadece üretim sayısını arttırmak hedefi bedeli zaman içinde ödenen yanlış bir seçimdir.

Plastik esaslı mamül ve yarı mamül ürünlerde bazen ürün mukavemetini arttırmak bazen de ürünün montajına kolaylık sağlamak için takviye elemanları (civata, somun, braket, mukavemet arttırıcı metal levha, vb.) ürünün enjeksiyonla üretimi öncesi plastik enjeksiyon kalıbı içine yerleştirilmektedir. Bu ön işlem esnasında çalışan, hem son derece riskli bir bölgede çalışmakta, hem de çok büyük zaman kaybı oluşmaktadır.

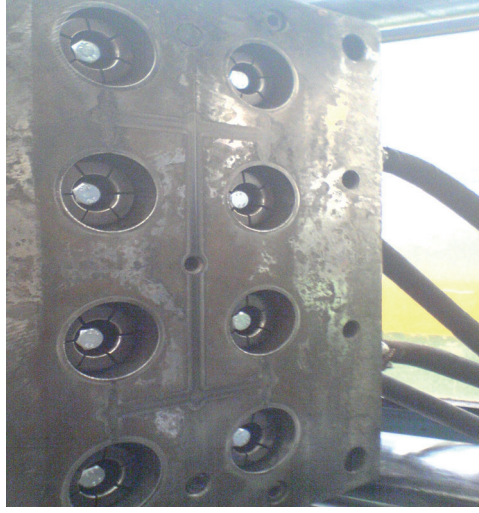
Plastik enjeksiyon kalıpcılığında kayıp zaman ve iş güvenliği açısından risklerin takviye elemanlarının kalıp bloğunda gerekli konumlara yerleştirilmesi esnasında yoğun şekilde meydana geldiği görülmektedir (Şekil.1).



Şekil 1. Plastik Enjeksiyon İşleminde Takviye Elemanı Yerleştirme

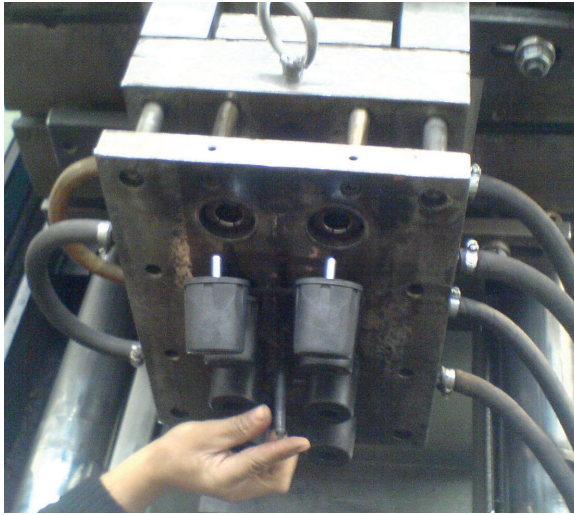
Şekil.1' de gösterilen mevcut durumda çalışma şu şekilde gerçekleşmektedir;

Kalıp bloğu içinde civata, somun vb., takviye elemanlarının yerleştirilmesi için gerekli boşluklar bulunmaktadır. Bu boşluklara tek tek tüm takviye elemanları yerleştirilmekte, bu yerleştirme esnasında konumlandırmalar operatör tarafından yapılmaktadır. Plastiğin enjeksiyonu işlemi öncesi kalıp boşluklarına tüm takviye elemanları yerleştirilmektedir (Şekil.2).



Şekil 2. *Takviye Elemanları Yerleştirilmiş Kalıp Bloğu (Enjeksiyon İşlemi Öncesi)*

Kalıp kapanmakta ve enjeksiyon işlemi gerçekleşmektedir (Şekil.3).



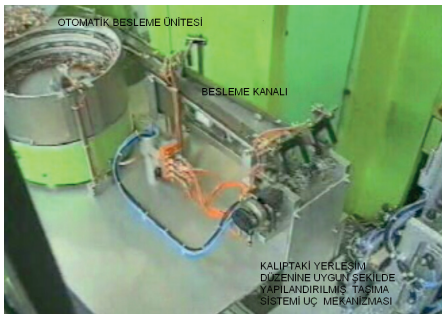
Şekil 3. *Takviye elemanı ilavesi ile plastik enjeksiyon işlemi.*

Operatör, bu elemanların konumlandırılması esnasında tehlike oluşturabilecek bir çalışma gerçekleştirmekte, çok fazla kayıp zaman oluşmakta, standart kalite elde edilememektedir. Kalıplama sistemleri büyük kuvvetler üretebilecek makinalardır. Bu makinaların hareketli olan bölgesinde operatörün sürekli çalışıyor olması bir süre sonra sık tekrarlanan işlerin ortaya çıkardığı riskleri oluşturmaktadır. Sık tekrarlanan işlerde operatör emniyet faktörünü ihmal etme

eğilimindedir [8]. Kalıp bloğunun planlanandan farklı bir zamanda kapanması vb. gibi bir durumun oluşması durumunda operatör için hayati tehlikeler oluşmaktadır. Kalıp ünitesi ve enjeksiyon makinelerinin tekrar çalışmayacak derecede zarar görebilmesi ile sonuçlanabilecek iş kazaları oluşabilmektedir. Türkiye’de Sosyal Güvenlik Kurumu 2014 yılı verilerine göre, Kauçuk ve Plastik Ürünlerin İmalatı sektöründe 6895 sigortalı çalışan iş kazası geçirmiştir [9]. Hem işçi sağlığının korunması hem de kayıp zamanların en aza indirilmesi için endüstriyel uygulamalar ticari firmalar tarafından geliştirilmiştir [10-11]. Robot teknolojisindeki gelişmeler ve beraberinde sektörel gereklilik bir araya geldiğinde insan sağlığını koruyucu ve aynı zamanda kayıp zamanları en aza indirerek üretim adedini arttıran, standart kalitede üretim imkanı sağlayarak tekrar üretim miktarının en aza indiren çözümler geliştirilmektedir. Bu çalışma kapsamında ilgili hedefler doğrultusunda elektromekanik bir sistem tasarlandı, üretildi ve test edildi. Elde edilen sonuçlar sunuldu.

Materyaller ve metotlar

Bu çalışma kapsamında enjeksiyon kalıplarında kalıp içi takviye elemanı dizgisi için; değişken tasarımları olan kalıp bloklarında seri çalışma gerçekleştirebilecek, farklı fiziki boyut ve şekle sahip takviye elemanı ile gerçekleştirilen uygulamalarda kullanılabilecek, arıza durumunda uyarı mekanizmasına sahip, bilgisayar kontrollü ve servomotorlarla tahrik edilen esnek bir otomasyon ve imalat sistemi tasarımı yapılmış, imal edilmiş ve deneysel olarak incelenmiştir. Geliştirilen sistemin sağladığı kazanımlar deneysel olarak tespit edilmiştir. Çalışmamız kapsamında geliştirilen sistem, enjeksiyon makinesi kalıp boşluğunda istenen konumlamayı gerçekleştirebilen konumlama sistemi, farklı tip takviye elemanlarının seri şekilde beslemesinin yapılması için otomatik besleme ünitesi ve kontrol ekipmanlarından oluşmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Takviye Elemanı Dizgi Sistemi

Sistemin çalışma aşamaları;

1. Aşama: Otomatik Besleme Ünitesi ile besleme kanallarına malzeme akışı sağlanmaktadır.

2. Aşama: Besleme kanalındaki malzeme ara taşıma elemanları vasıtası ile taşıyıcı sistem uç elemanındaki tutuculara aktarılmaktadır.

3. Aşama: Taşıyıcı sistem kalıp içi boşluklara takviye elemanı yerleştireceği konuma getirilmektedir.

4. Aşama: Kalıp içindeki boşluklara takviye elemanları bırakılmaktadır (pnömatik tahrik ile).

5. Aşama: Sistem yeniden başlangıç noktasına gitmekte, kalıp boşluktan uzaklaşmakta ve enjeksiyon işlemi gerçekleşmektedir.

Sistemde operatör müdahalesi olmadığı için işçi sağlığını korumakta, çalışma hızı yüksek olduğu için verim artmaktadır, ürün kalitesi standart hale gelmektedir.

Bu çalışmada işlem sıralaması şu şekilde gerçekleşti;

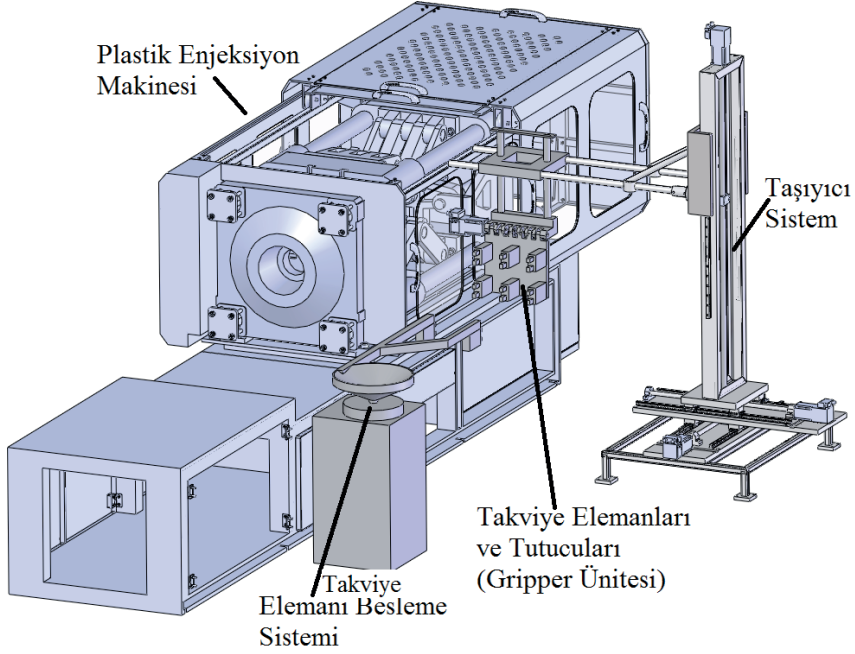
Tasarım: Çalışma kapsamında gerçekleştirilen sistemin tasarımı 3 boyutlu olarak gerçekleştirildi.

Simülasyon: Sistem ünitelerinin ayrı ayrı ve birlikte çalışma simülasyonu gerçekleştirildi (Şekil 5).

DeneySEL Sistem Üretimi: Mekanik sistem ve elektronik sistem kurulumu yapıldı.

Test İşlemleri: Test çalışmaları ile farklı takviye elemanları üzerinde çalışma gerçekleştirildi.

Tüm sistemde AC servomotor tahrikli (0,75 kW ve 1 kW ‘lık servomotorlar kullanıldı), hassas konumlama imkanına sahip (farklı eksenlerde eksen uzunluğuna bağlı vida adımları seçildi) bilyalı vidalı taşıma sistemleri kuruldu, lineer ve açısal hareketler (Kartezyen koordinatlarda ve tutucu ünitesinin açısal hareketinde) tanımlı hale getirildi. Tüm proses esnek yapısı ile değişken şekillerde kullanılabilecek ve operatör olmaksızın çalışmasını devam ettirebilecek şekilde oluşturuldu. Arıza durumunda uyarı mekanizması oluşturularak acil durumlarda sistemin çalışmasının sonlanması sağlandı (Şekil 5).



Şekil 5. Takviye Elemanı Otomatik Dizgi Sistemi

Deneyisel çalışma esnasında karşılaşılan titreşim kaynaklı konumlama hataları oluştu. Çözüm olarak lineer kızaklama ünitesi kızak ve araba sayısı arttırıldı. Böylece yük dağılımı dengelendi ve her bir taşıyıcı arabaya gelen yük azaltıldı. Benzer problem yaşanan takviye elemanı taşıyıcı sistemde ise çözüm olarak bilyalı kalıp burçları yerleştirilerek yataklamanın sorunsuz olması sağlandı. Sistemin son durumu Şekil 6' da sunulmuştur.

1. Kontrol sistemi kullanılarak sistemin kalıba uygun şekilde programlaması gerçekleştirildi.

2. Titreşimli besleme ünitesi kullanılarak iki kanallı kalıp içine yerleştirilecek malzeme beslemesi gerçekleştirildi.

3. Son işlemci olan ve ilave malzemenin kalıp bloğuna taşınmasını sağlayan ünite, tanımlı hareketleri gerçekleştirerek tutucular vasıtası ile malzemeleri üzerine aldı.

4. Tüm tutucular üzerinde besleme tamamlandı.

5. Kartezyen eksen takımı harekete ederek son işlemciyi tezgah seviyesinin üzerine çıkardı ve kalıp boşluğuna girmesini sağladı.

6. İlave malzeme beslemesi kalıp üzerindeki istenen boşluklara gerçekleştirildi.

7. Sistem görevini tamamladı ve enjeksiyon işlemi öncesi çıkış işlemi başlatıldı.



Şekil 6. Deneysel çalışma kapsamında gerçekleştirilen elektro-mekanik sistem ve çalışma aşamaları.

Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında plastik enjeksiyon kalıpları takviye elemanı dizgisine yönelik bir elektromekanik sistem tasarımı yapıldı ve imal edildi. Çalışma sonucunda işçi sağlığını koruyucu tehlikeli çalışma bölgesinde operatör çalışmasını gerektirmeyen sistem oluşturuldu. Çalışma hızı kalıp türüne bağlı değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada 8 gözlü, içinde takviye elemanı olan kalıp kullanıldı. Sistem bu kalıba göre düzenlendi. 8 gözlü bir kalıpta bu sistemle çalışmada zaman kazancının el ile (manuel) çalışılan kalıplarla kıyaslandığında 1/4 oranına indiği tespit edildi.

KAYNAKÇA

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Injection_moulding
- [2] Saeed Farahani, ark. (2022), A data-driven predictive maintenance framework for injection molding process, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 80, Pages 887-897, ISSN 1526-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.013>].
- [3] Phatchani Srikhumsuk, ve ark. (2023), Study on injection molding parameters on PET with bio-plastic material and hot runner mold, *Materials Today: Proceedings*
- [4] Dongya Li ve ark. (2022), “Injection moulding of mechanical micro-manufactured structures for optically encoding plastic surfaces”, *Optical Materials*, Volume 123, 111822, ISSN 0925-3467, <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111822>
- [5] Jinsu Gim ve Lih-Sheng Turng (2022), “A review of current advancements in high surface quality injection molding: Measurement, influencing factors, prediction, and control”, *Polymer Testing*, Volume 115, 107718, ISSN 0142-9418, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107718>.
- [6] Fellahi, S. ve ark. (1995), Weldlines in injection-molded parts: A review. *Adv. Polym. Technol.*, 14: 169-195. <https://doi.org/10.1002/adv.1995.060140302>
- [7] Hao-Hsuan Tsou, vd., (2022), “Design and validation of sensor installation for online injection molding sidewall deformation monitoring, *Measurement*, Volume 205, 112200, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112200>
- [8] Soylak (2020), “Human Factor in Engineering,” 3. International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology (IMSMATEC’20) , Nevşehir, Turkey, pp.267-270.
- [9] Özen (2016), “Plastik Ambalaj Ürün İmalatında İş Kazalarının İrdelenmesi”, T.C. Çalışma Ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi ANKARA
- [10] <https://www.hktn.com.tr/plastik-enjeksiyon-robotlar>
- [11] <https://www.asmetal.com.tr/tr/urunlerimiz/robotik-ve-otomasyon>

Bölüm 7

İŞARET DİLİ İÇİN AKILLI ELDİVEN TASARIMLARI

Serhat KÜÇÜKDERMENCİ¹

¹ Doç. Dr.; Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü.
kucukdermenci@balikesir.edu.tr ORCID No: 0000-0002-6421-7773

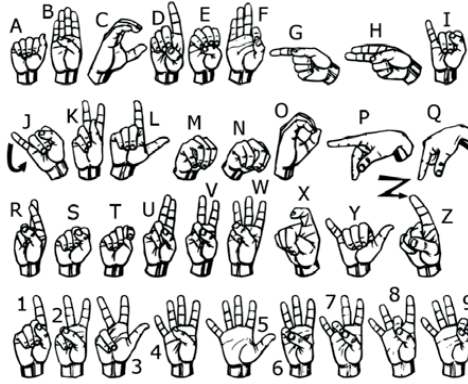
GİRİŞ

İşitme ve konuşma kaybı, bireyler için günlük hayatta önemli iletişim sorunlarına yol açmaktadır. Bu durumdaki çoğu kişi normal bireylerle iletişim kurmak için işaret dilini kullanmaktadır. İnsanlar işaret dillerini bir iletişim ve mesaj iletme aracı olarak kullanmışlardır. İşaret dilini kullanarak bir konuşmacının düşüncelerini aktarmak için el şekilleri, el yönü ve hareketi ve yüz ifadelerinin tümü aynı anda kullanılabilir. Öte yandan bu yöntem birçok birey tarafından anlaşılamamakta ve sadece işitme ya da konuşma engelli bireylerle sınırlı kalmaktadır. İşitme engellilere işaret dilini öğretmek, dil öğrenme süreçlerini kolaylaştırabilir. İşaret dili, işitme engelli toplulukların kendi kültürel kimliklerini oluşturmalarına ve paylaşmasına katkıda bulunur. İşaret dili konuşan topluluklar kendi sanatları, hikayeleri ve gelenekleri gibi özel kültürel özelliklere sahip olabilirler.

Gündelik hayatta işaret dilini bilen çok az kişi vardır. Bu nedenle, işaret dilini düzenli bir iletişim biçimi olarak kullananlar, başkalarıyla sohbet etmekte veya görüşlerini başkalarına ifade etmekte zorlanabilirler. Teknolojinin hızla ilerlemesinin bir sonucu olarak, işitme engelli toplulukların başkalarını duymasını veya başkalarıyla konuşmasını sağlayan araçlar geliştirilmiştir. İşitme engelliliğine ve diğer iletişim bozukluklarına yardımcı olmak için kulak arkası, kulak içi ve kanal cihazları da dahil olmak üzere çeşitli işitme cihazları mevcuttur. İşitme cihazları faydalı olsa bile, bu cihazlardan birini kullanmak kullanıcının kendini rahatsız hissetmesine veya arka plandaki gürültüyü duymasına neden olabilir. Sonuç olarak, bilim insanları işaret dili hareketlerini tercüme edebilecek çok sayıda teknik üzerinde çalışmaktadır. Bunun için iki ana teknik görüş tabanlı sistemler ve giyilebilir teknolojidir. Görme tabanlı sistemler, ellerin ve parmakların hareketlerini belirlemek için görüntü işleme tekniklerini kullanır. Giyilebilir cihazda bir mikrodenetleyiciye bağlanacak akıllı eldivenle işaret dilini yazılı veya sözlü kelimelere çevirmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

Her ülkenin veya bölgenin işaret dili, kendi özel dil kurallarına ve gramatik yapılarına sahiptir. Örneğin, Amerikan İşaret Dili (ASL) farklı kuralara sahiptir ve İngilizceden tamamen farklı bir dil olarak kabul edilir. ASL, temelde ABD ve Kanada'nın İngilizce konuşulan bölgelerinde İşitme engelli ve konuşma engelli insanlar tarafından iletişim kurmak için kullanılan karmaşık bir dildir. ASL 19. yüzyılda Amerikan işitme engelliler okulunda icat edilmiş ve işitme engelliler topluluğu içinde hızla yayılmıştır. ASL tarafından İngilizce dilinin alfabeleri için kullanılan semboller Şekil 1'de gösterilmiştir (Anilkumar vd., 2022). İşaret dili işitme engelli insanlar için etkili bir iletişim çözümü olmakla birlikte, işitme engelli olmayan bireylerin İşitme engelli bireyleri anlayabilmeleri ve onlarla iletişim kurabilmeleri için bu dili öğrenmeleri gerekmektedir. Ancak, yeni bir dil öğrenmek pek çok kişi için zorlayıcı olabilir, bu nedenle bir işaret dilini metne veya sese dönüştürerek işitme

engellileri iletişim konusunda destekleyebilecek sistemlerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır.



Şekil 1: ASL tablosu

İŞARET DİLİNE İLİŞKİN GELİŞEN TEKNOLOJİLER

El hareketlerini tanımak için elektromiyografi (EMG), bilgisayar görüşü ve sensör entegre eldivenler gibi çeşitli yöntemler araştırılmıştır. EMG tabanlı yöntemde, kas aktivitesini algılamak için bazı sensörler doğrudan vücuda bağlanmıştır. EMG sinyalleri, elektromiyogram adı verilen el ve bilek protezlerine takılan sensörlerden çıkarılmıştır. Elin hareketi, deri yüzeyine tutturulan iletken elektrotlar aracılığıyla tespit edilmiştir (Gu vd., 2022). Bu yeni bir teknik olmasına rağmen, çok zayıf sinyal, dış etkilere duyarlılık ve sınıflandırma zorluğu gibi bazı sınırlamaları vardır.

Bilgisayarla görme yöntemi, elin hareketini yakalamak ve kaydetmek için bir 2D veya 3D kamera kullanmayı içerir ve daha sonra görüntüler görüntü işleme algoritmaları ve makine öğrenme teknikleri kullanılarak analiz edilir (X. Chen vd., 2023). Bu yöntemde görüntü alma, görüntü segmentasyonu ve görüntü tanımlama olmak üzere üç aşama vardır. Araştırma grupları, el hareketini tespit etmek için kompakt bir sistem oluşturmaya odaklanmaktadır. Ancak, bu yöntemin kamera türüne (2D, 3D) bağlı olarak doğruluk, pahalı ve karmaşık bir sistem kurulumu ve büyük alan gereksinimleri gibi bazı dezavantajları vardır. Görüntü tabanlı teknikler daha gerçekçi olmakla birlikte, özellik çıkarma ve görüntü işleme gibi karmaşık süreçler gerektirmektedir. Ayrıca, arka plan ve kameranın konumu bu teknik için çok önemlidir. Buna karşın, eldiven tabanlı teknik daha az hesaplama karmaşıklığı, hızlı tepki ve taşınabilirlik ile karakterize edilir. Genel olarak, her iki teknik de işaret dilini izole kelimeler veya sürekli kelimeler şeklinde yorumlamak için kullanılır (İbrahim vd., 2018).

Eldiven tabanlı yaklaşımda, elin ve parmakların farklı hareketlerini tanımak için bir eldiven aracılığıyla ele farklı sensörler takılmıştır (Baktash vd., 2021). El hareketinin yönü ivmeölçer, jiroskop ve dokunma sensörleri aracılığıyla algılanırken, manyetik sensörler, esnek sensörler ve gerinim sensörleri gibi parmakların kıvrılmasını algılamak için sistemde kullanılabilecek birçok sensör türü vardır (Nhu vd., 2021). Bunlar arasında, iyonik sıvı gerinim sensörü, iyi bir potansiyel gösteren ve son yıllarda araştırma ilgisi kazanan geniş aralıklı bir gerinim ölçer olarak kullanılmıştır (Zhou vd., 2022).

SignAloud adlı bir girişim, işitme engellilerin işaret dili kullanarak iletişim kurmalarını sağlamak için özel bir eldiven sistemi geliştirmiştir. Bu eldivenler, işaretleyicinin el hareketlerini algılar ve bir bilgisayar programı tarafından metne veya konuşmaya dönüştürülür. GloveAI, işaret dilini kullanarak konuşma metnine çeviren bir eldiven sistemi geliştiren bir başka girişimdir. Eldivenler, işaretleyicinin el ve parmak hareketlerini tanır ve bu bilgileri bir mobil uygulama aracılığıyla metin olarak sunar. UNI, işitme engelliler için geliştirilen bir işaret dili çeviri eldiveni projesidir. Bu eldivenler, işaretleyicinin hareketlerini sensörlerle izler ve bir mobil uygulama kullanarak işaretleri metin veya konuşmaya dönüştürür. BrightSign Glove, işaret dili eldivenleri geliştiren bir başka proje örneğidir. Eldivenler, işaretleyicinin hareketlerini algılar ve bu bilgileri bir bilgisayar programı aracılığıyla metin veya konuşma olarak sunar.

AKILLI ELDİVENLERDEKİ ELEKTRONİK BİLEŞENLERE ÖRNEKLER

Akıllı eldiven tasarımlarında Raspberry Pi gibi bilgisayarlar, PIC ve Arduino gibi mikro denetleyiciler, esnek sensörler, analog dijital dönüştürücüler (ADC) ve ses kayıt ve oynatma entegre çipi dahil olmak üzere çok çeşitli elektronik bileşenler kullanılabilir.

Kontrol birimi: Farklı mikrodenetleyici kartları ve Raspberry Pi, hobciler, geliştiriciler ve yenilikçiler tarafından farklı alanlardaki sorunlara çözüm geliştirmek için prototip olarak kullanılmaktadır. Sistem tasarımlarından (Ferdoush & Li, 2014), donanım iletişimine (Gad & Gad, 2015), endüstriden (İlten & Demirtaş, 2016), (İlten & Demirtaş, 2018), sağlık hizmetlerine (Majee, 2016), eğitime (Schelly vd., 2015), kontrole (İlten, 2022), madencilğe (Kim vd., 2020) ve Braille klavye (Küçükdermenci, 2023b) tasarımına kadar mikrodenetleyiciler prototip oluşturma çözümleri için popüler bir seçim olmaya devam etmektedir.

Arduino, açık kaynak bir elektronik prototip platformudur. Bu platform, mikrodenetleyici tabanlı projelerin geliştirilmesini ve prototiplemesini kolaylaştırmak için tasarlanmıştır. Arduino hem donanım hem de yazılım bileşenlerini içerir ve elektronik projelerin hızlı bir şekilde oluşturulmasını sağlar. Arduino ailesinin en popüler örneği Arduino UNO'dur (bkz. Şekil 2). Bu

mikrodenetleyicinin dahili arayüzü altı analog pin ve on dört dijital pinden oluşur. Bu devrenin ana kartı 328P modeline sahip ATmega ailesine aittir ve veri iletişimini gerçekleştirmek için giriş/çıkış portu başına 20mA akımı destekleyebilir. ATmega tabanlı mikrodenetleyicinin 328P modeli, 2KB Rastgele Erişim Belleği (RAM) ile 32KB belleğe sahiptir. Bu, 0 ila 1024 arasında bir değer aralığına sahip on bitlik bir mikrodenetleyicidir ve 16MHz frekansında çalışır. Robotik, tıbbi, biyometrik ve gömülü sensör tabanlı prototipler gibi birçok uygulama, sensör iletişimi için bu mikrodenetleyiciyi kullanır.



Şekil 2: *Arduino Uno kartı*

Arduino Nano, Arduino ailesinin üyesi olan bir mikrodenetleyici kartıdır. Bu kart, diğer Arduino modellerine benzer şekilde, mikrodenetleyici tabanlı projelerin geliştirilmesini ve prototipleme süreçlerini kolaylaştırmak amacıyla tasarlanmıştır. Arduino Nano, kompakt boyutları ve düşük güç tüketimi ile öne çıkar ve birçok farklı projede kullanılır. Şekil 3'teki Arduino Nano, bir Mini-B USB konektörüne ve bağlanmasını kolaylaştıran pin başlıklarına sahiptir.



Şekil 3: *Arduino Nano kartı*

PIC mikrodenetleyicileri Assembly, C veya ikisinin bir kombinasyonunda programlanabilir (L. Chen vd., 2013). Diğer yüksek seviyeli programlama dilleri de kullanılabilir ancak gömülü sistem yazılımları öncelikle C dilinde yazılır. Esnek sensörlerden üretilen tüm çıkış sinyalleri analog formdadır ve bu sinyallerin kodlayıcıya iletilmeden önce sayısallaştırılması gerekir. PIC-

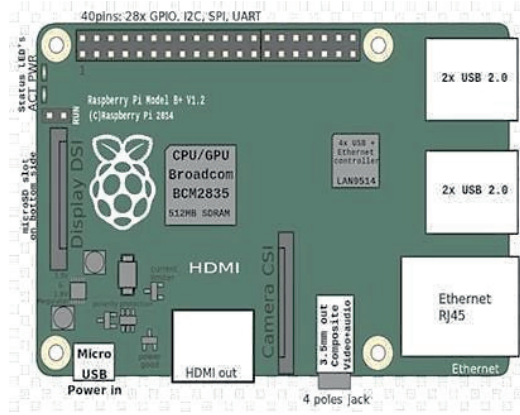
16F877A mikrodnetleyici entegresi Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu mikrodnetleyici sensörlerden gelen tüm analog sinyalleri sayısallaştıran dahili ADC modülüne ve sensör sinyali seçimi için dahili çoklayıcıya sahiptir ve hem seri hem de paralel iletişim olanaklarını destekler.



Şekil 4: PIC16F877A mikrodnetleyicisi

Raspberry Pi, İngiltere merkezli bir kurum olan Raspberry Pi Vakfı (raspberrypi.org) tarafından geliştirilen düşük maliyetli bir bilgisayar kartıdır. İlk kez 2012 yılında piyasaya sürülmesinden bu yana, üç farklı modelde kategorize edilebilecek birkaç nesil Raspberry Pi bilgisayarını piyasaya sürülmüştür: Raspberry Pi A, B ve Zero (dördüncü bir model olan ComputeModule, çoğunlukla endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır). Bu üç modelin temelleri oldukça benzerdir, her biri bir CPU (merkezi işlem birimi) ve yonga üstü grafik işlem birimi (GPU), yerleşik bellek ve 5 V DC güç girişinden oluşan bir yonga üstü sisteme sahiptir. Tüm modellerde ayrıca özel bir kamera bağlamak için bir portun yanı sıra LED'ler ve düğmelerden servolara ve motorlara, güç rölelerine ve sensörlere kadar çok çeşitli elektronik cihazlarla iletişim kurmak için kullanılabilen bir dizi genel amaçlı giriş/çıkış (GPIO) pini bulunur. GPIO pinlerine bağlanan ve üstüne takılan özel genişletme kartları, güç yönetimi, radyo frekansı tanımlama (RFID), motor kontrolörleri ve yüksek kaliteli ses kaydı gibi daha fazla işlevsellik sağlayabilir. Çoğu modelde ayrıca Ethernet bağlantısı ve kablosuz (Wi-Fi ve Bluetooth) bağlantı özelliği bulunur; bunlar GPIO bağlantı noktaları ile birlikte Raspberry Pi'ye çok yönlülük kazandırır. Raspberry Pi, standart bir bilgisayarın tüm işlevlerine sahiptir. Raspberry Pi'ler, otomatik veri toplama ve daha büyük, daha kapsamlı ve tutarlı veri setlerinin elde edilmesi açısından bilim insanlarına fayda sağlayabilir ve böylece zamansal ve uzamsal yetersiz örneklemenin üstesinden gelmeye yardımcı olabilir. Birçok araştırmacının bütçesinin yetmediği pahalı araştırma ekipmanlarına oldukça uygun fiyatlı bir alternatif sunan çözümlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır (Dolgin, 2018).

Raspberry Pi 3 Raspberry Pi serisinin üçüncü nesil bir versiyonudur (bkz. Şekil 5). Raspberry Pi 3, özellikle öğrenme, prototipleme, robotik, IoT (nesnelerin interneti) ve diğer elektronik projeler için kullanışlıdır. Bu güçlü kredi kartı boyutundaki tek kartlı bilgisayar birçok uygulama için kullanılabilir ve orijinal Raspberry Pi Model B+ ve Raspberry Pi 2 Model B'nin yerini alır. Raspberry Pi 3 Model B, popüler kart formatını korurken birinci nesil Raspberry Pi'den 10 kat daha hızlı, daha güçlü bir işlemci sunar.



Şekil 5: Raspberry Pi 3 görünümü

Analog dijital dönüştürücüler: Raspberry Pi'nin kendisi analog girişlere sahip değildir. Ancak Raspberry Pi üzerine bir ADC ekleyerek analog girişlere sahip hale getirilebilir. Birçok üçüncü taraf üretici, Raspberry Pi'ye entegre edilebilen ADC kartları veya modülleri sunar. Bu modüller, Raspberry Pi'ye analog giriş yeteneği eklemenizi sağlar. Örneğin MCP3008 (bkz. Şekil 6) tipik bir ADC entegresidir. MCP3008 entegresi 10 bit çözünürlük, sekiz tek uçlu kanal, SPI arayüzü, ± 1 LSB DNL, ± 1 LSB INL, 5V'da 200 kps örneklem hızı özelliklerine sahiptir.



Şekil 6: MCP3008 entegresi

Ses kayıt/tekrarlama entegresi: APR9600 (bkz. Şekil 7), flash analog depolama tekniği ile birlikte düşük maliyetli, yüksek performanslı bir ses kayıt/tekrarlama entegre devresidir (IC). Kaydedilen ses, güç kaynağı modülden çıkarıldıktan sonra korunur ve çalınan ses, düşük gürültü seviyesi ile yüksek kalite sergiler. Örneklem hızı 60 saniyelik bir kayıt süresi için 4.2kHz'dir ve bu da 20Hz ila 2.1kHz'lik bir ses kayıt/tekrar oynatma bant genişliği sağlar. Osilasyon direncini değiştirilerek 8.0kHz'e kadar yüksek bir örneklem hızı elde edilebilir. Bu da toplam ses kayıt süresini 32 saniyeye indirir. Toplam ses kayıt süresi, tek bir direncin değeri değiştirilerek 32 saniyeden 60 saniyeye

kadar değiştirilebilir. IC iki moddan birinde çalışabilir: seri mod ve paralel mod. Seri erişim modunda, ses 256 bölüm halinde kaydedilebilir. Paralel erişim modunda ses 2, 4 veya 8 bölüme kaydedilebilir. IC sadece basmalı düğme tuşları kullanılarak kontrol edilebilir. IC'yi mikro denetleyiciler ve bilgisayarlar gibi harici dijital devreler kullanarak kontrol etmek de mümkündür.



Şekil 7: APR9600 entegresi

Esnek sensör: Şekil 8’de gösterildiği gibi bir esnek sensör, ne kadar sapma veya alternatif olarak bükülme meydana geldiğini ölçen bir sensör türüdür. Bu sensörü oluşturmak için plastik ve karbon gibi malzemeler kullanılabilir. Karbon yüzeyi tutan plastik şerit yana çevrildiğinde sensörün direnci değişecektir. Sensörün bir tarafına polimer mürekkep içine gömülü iletken parçacıklar basılmıştır. Parçacıklar, sensör dik durumdayken mürekkebe yaklaşık 30k Ohm’luk bir direnç kazandırır. Sensör mürekkepten uzağa doğru eğildikçe iletken parçacıklar birbirinden uzaklaşır ve bu direnç artar. Sensör tekrar düzleştğinde direnç ilk değerine geri döner. Sensörün ne kadar büküldüğü direnç ölçülerek hesaplanabilir. Bu sensörü bir voltaj bölücüde kullanmak bir tasarıma dahil etmek için en basit yaklaşımdır. Gerilim bölücü gerekli direnç 10K ile 100K arasında seçilebilir.

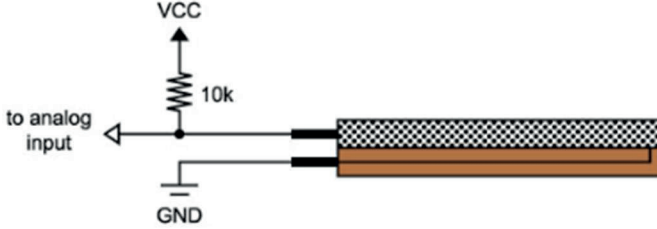


Şekil 8: Flex sensör

Boyutlarına göre bu sensörler iki kategoriye ayrılabilir: 2,2 inç esnek sensörler ve 4,5 inç esnek sensörler. Çalışma prensibi dışında, bu sensörlerin boyutları ve dirençleri farklıdır. Bu tür sensörler için uygulamalar arasında bilgisayar arayüzü, rehabilitasyon, servo motor kontrolü, güvenlik sistemleri, müzik arayüzü, yoğunluk kontrolü bulunur. Bu sensör, bir cihazın veya aletin ne kadar büküldüğünü, esnediğini veya açısını değiştirdiğini belirlemek için

gerekli olan her yerde kullanılır. Esnek sensörler güvenilir, doğru, çok yönlü ve uygun maliyetlidir. Sapma, ivme ve hareket aralığının doğru bir şekilde ölçülmesi ve algılanması gereken uygulamalar için en iyi çözümü sunar.

Esnek sensörün bir pinini toprağa, diğerini V_{cc} 'ye ve analog girişe bağlamak için 10K pull-up direnci kullanılabilir (bkz. Şekil 9).



Şekil 9: Flex sensörle gerilim bölücü konfigürasyonu

Esnek sensörler, eşitlik 1'e göre bükülmeyi algılamak için 10kΩ direnç ile birlikte voltaj bölücü devresinde kullanılır.

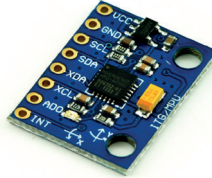
$$V_{out} = V_{cc} \frac{R_{flex}}{R_{flex} + 10k\Omega} \quad (1)$$

Esnek sensör ve direnç birlikte bir voltaj bölücü oluşturur. Çıkış voltajı, 10K direnç ve 30K esnek sensör nedeniyle sensör düz olduğunda analog çıkış V_{cc} 'nin kabaca yüzde 75'i olacaktır. Sensör büküldüğünde voltaj V_{cc} 'nin kabaca yüzde 83'üne yükselecektir. V_{cc} için 5V kullanırken, sensör düz olduğunda 3,75V ve sensör 90° büküldüğünde 4,17V gözlemlenebilir. Bu rakamlar her sensör için farklılık gösterecektir. Çalışılmadan önce sensörlerin değerleri ölçülmelidir.

İvmeölçer: İvme ölçerler, bir cihazın hızlanma, titreşim, eğim ve hareket gibi değişkenleri ölçmek için kullanılır. Bu sensörler, birçok farklı uygulama alanında kullanılır ve genellikle mikrodenetleyiciler veya diğer elektronik sistemlerle entegre edilir. İvme ölçerlerin temel görevi, bir nesnenin ivmesini belirlemek ve bu ivme verilerini dijital veya analog bir çıkışla iletmektir. İvme ölçerler, genellikle 1 ila 3 eksenle ivmeyi ölçebilirler. Örneğin, üç eksenli bir ivme ölçer, x, y ve z eksenlerindeki ivmeyi ölçebilir. Dijital (genellikle I2C veya SPI gibi iletişim protokollerini kullanarak) veya analog çıkışlar üretebilirler. Genellikle hassasiyetlerini ifade eden bir birimde ölçüm yaparlar (örneğin, g kuvveti cinsinden). Bu, belirli bir aralıkta ivme ölçebilme yeteneklerini gösterir. Belirli bir frekans aralığında ivme ölçebilirler. Bu, titreşim analizi

gibi uygulamalar için önemlidir. Birçok ivme ölçer, küçük boyutlarda ve taşınabilir cihazlarda kullanmak için tasarlanmıştır. İvme ölçerler cep telefonları ve tabletlerde ekranın otomatik döndürülmesi işlevi, otomobil airbaglarının devreye girmesi için çarpışma algılaması, insan hareketi izleme sistemleri (örneğin, fitness bileklikleri), sanal gerçeklik ve oyun kontrol cihazları, endüstriyel otomasyon ve makine sağlığı izleme sistemi gibi birçok farklı alanda kullanılır.

MPU-6050 (bkz. Şekil 10) yaygın olarak kullanılan bir IMU (İleri İvmeölçer ve Gyroskop) sensör modülüdür. Bu modül, hareket ve eğilme gibi hareketle ilgili verileri ölçmek ve algılamak için kullanılır. MPU-6050, x, y ve z eksenlerindeki ivmeyi ölçebilir. Bu, cihazın hangi yönde hareket ettiğini veya eğik olduğunu algılamak için kullanılır. Cihazın dönme hızını ölçebilen bir jiroskopa sahiptir. Bu, cihazın dönme hareketini algılamak için kullanılır. Genellikle I2C veya SPI gibi dijital iletişim protokollerini kullanarak dijital çıkışlar sağlar. Bu, mikrodenetleyiciler veya diğer dijital cihazlarla entegre etmeyi kolaylaştırır. Hassas ölçüm yapma yeteneğine sahiptir ve genellikle çok düşük hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılır. Sıcaklık ölçümü için entegre bir sensöre sahiptir, bu sayede sıcaklık değişikliklerini izlemek mümkündür. Robotik, dronlar, giyilebilir teknolojiler, hareketli oyuncaklar, oyun kumandaları, dengeleme robotları ve diğer birçok uygulama için yaygın olarak kullanılan bir sensör modülüdür. Bu tür uygulamalarda, sensörlerin sağladığı hareket ve eğilme verileri, cihazların hareketini izlemek, dengesini sağlamak ve yönlendirmek için kullanılır.

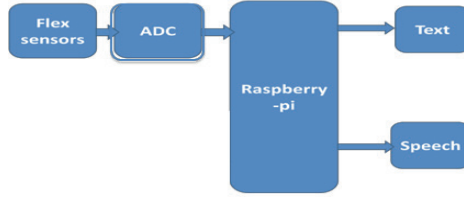


Şekil 10: MPU-6050 ivmeölçer sensörü

ENGELLİ BİREYLERİÇİNİŞARETDİLİNEYÖNELİKTEKNOLOJİK TASARIM ÖRNEKLERİ

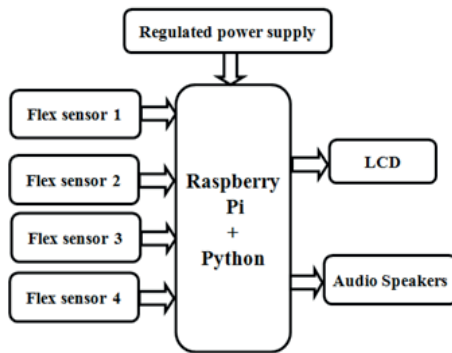
Örnek bir çalışmada (Narsale vd., 2020), elin yönünü ve dönme hareketini tespit etmek için bir MPU-6050 (üç eksenli ivmeölçer ve jiroskop) ile birlikte her parmağın ne kadar büküldüğünü ölçmek için dört Spectra Symbol Flex-Sensör kullanan bir cihaz tasarlanmıştır. Sensörleri okumak, ortalama-sını almak ve paketler halinde düzenlemek için bir Raspberry Pi kullanılır. Esnek, temaslı ve ivmeölçer sensör kombinasyonu kullanılarak ASL alfabesi yüzde 100 doğrulukla tanınmıştır. Deney 10 kez yapıldığında ortalama başarı

oranı yüzde 91,54 olmuştur. Kurulumun blok diyagramı Şekil 11’de görülmektedir.



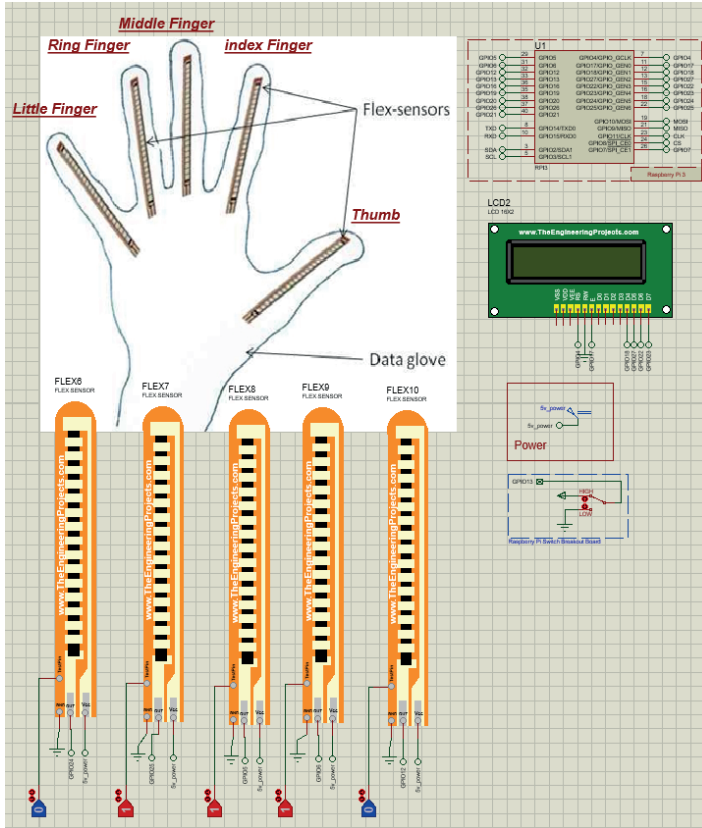
Şekil 11: Kurulumun blok diyagramı (Narsale vd., 2020)

Başka bir tasarımda (Nirosha & Dr Velmani, 2020) 4 esnek sensör, ses hoparlörleri, bir Raspberry Pi 3 b+ modeli ve düzenlenmiş bir güç kaynağı kullanan bir sistem önerilmiştir. Programlama Python dili kullanılarak yapılmıştır. Esnek sensör büküldüğünde aktif hale gelir ve bu süreçte bir analog sinyal üretilir. Bu sinyal mikroişlemciye giriş olarak gider ve sinyalin geldiği parmağa ve python programına bağlı olarak LCD ekranda bir çıkış mesajı görüntülenir. 4 esnek sensör için 4 karşılık gelen mesaj vardır. Ses üretmek için 3,5 mm’lik bir ses jakı kullanılır. Raspberry Pi kontrollü sistemin blok diyagramı Şekil 12’de verilmiştir. Önerilen işaret dönüştürme sistemi hem donanım hem de yazılım ile entegre edilmiştir. Bu sistemde dört adet flex sensör, ses hoparlörleri ve Raspberry Pi 3 b+ model mikroişlemci, python programlama kullanılarak işaret dönüştürme sistemi için düzenlenmiş güç kaynağı bölümü kullanılmıştır.



Şekil 12: Raspberry Pi kontrollü sistemin blok diyagramı (Nirosha & Dr Velmani, 2020)

Raspberry Pi, beş esnek sensör, bir anahtar ve LCD ekranlı bir tasarımda (Küçükdermenci, 2023a) oluşturulan sistemdeki her parmak hareketi kombinasyonu ayrı bir karakteri veya cümleyi temsil eder.

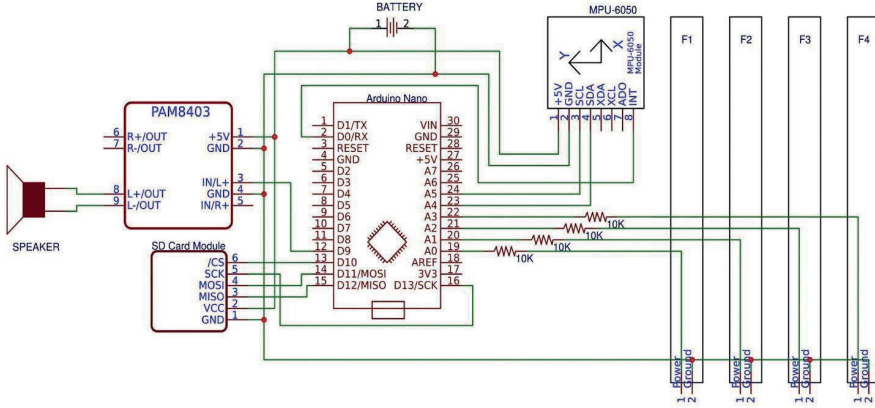


Şekil 13: Raspberry Pi kontrollü sistemin genel görüntüsü (Küçükdermenci, 2023a)

Dijital elektronikte bu kombinasyonlar lojik 0 ve lojik 1'den oluşan dijital kümelerdir. Çalışmada kullanılacak karakter veya cümlelere karşılık gelen parmak sinyalleri geliştirilen sisteme verilir. Sensör çıkışı Raspberry Pi kullanılarak dijital forma dönüştürülür ve veriler işlendikten sonra gTTS kullanılarak ses çıkışı oluşturulur. Kullanıcı tarafından yapılan her parmak hareketi kombinasyonu için sisteme sunulan bir karakter veya cümle LCD ekrana aktarılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, işaret dili kullanıcıları ile işaret dili konuşmayanlar arasındaki iletişim boşluğunu doldurmaya yardımcı olmaktır.

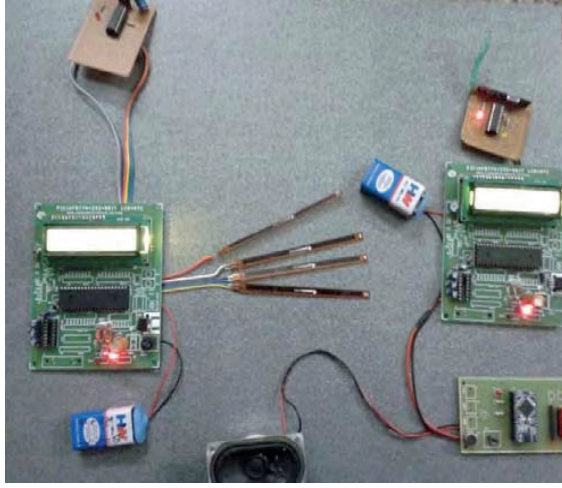
Benzer bir çalışmada (Yasin vd., 2019) sistem bir Arduino Nano, dört esnek sensör, bir jiroskop sensörü, bir SD kart, bir ses amplifikatörü ve hoparlör kullanılmıştır. Esnek sensörler eldivenlerin parmaklarına gömülüdür. Doğru el pozisyonunu tespit etmek için bir jiroskop kullanılmıştır. Jiroskop, cihaz aktivitesini ölçen ve esnek sensörleri kontrol eden doğru el pozisyonu

sağlar. Esnek sensörler farklı hareketleri uygulamak için kullanılır. Burada on hareket için jiroskop ve esnek sensörler tarafından belirlenen kendine özel bir şekil ve el pozisyonu vardır. Ses çıkışı sağlamak için bir PAM8403 ses amplifikatörü kullanılmıştır. Bu ses amplifikatörü harici bir hoparlöre bağlanmıştır ve ses dosyaları bir SD karta kaydedilir. Arduino Nano kontrollü sistemin basitleştirilmiş devre şeması Şekil 14’ de gösterilmiştir.



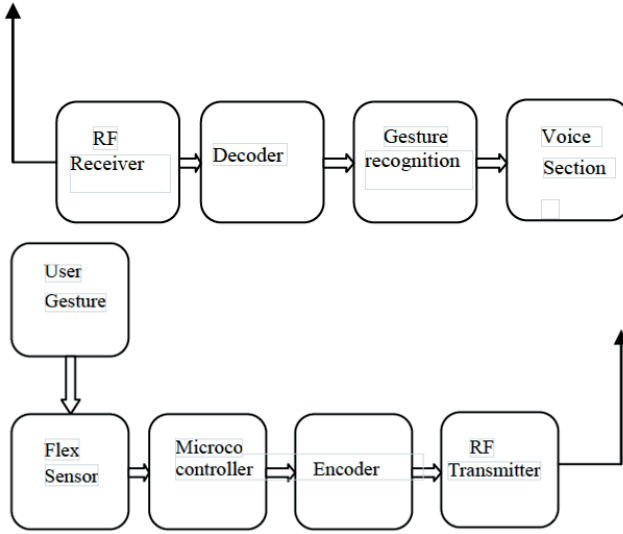
Şekil 14: Arduino Nano kontrollü sistemin basitleştirilmiş devre şeması (Yasin vd., 2019)

Bir diğer tasarımda (Gunasekaran & Maniknandan, 2013) veri eldiveni tekniğini kullanan bir sistem önerilmiştir. Sistem parmak hareketlerini algılamak ve bilgileri bir PIC mikrodenetleyicisine iletmek için kullanılan esnek sensörlerden oluşur. Ayrıca el hareketinin yönüne karşılık gelen bir sinyal sağlamak için gyro sensörleri kullanılmıştır. PIC mikrodenetleyici kullanıcının hareketini işler ve harekete karşılık gelen ses dosyasını çalar. Ses sinyalleri APR9600’de saklanır. APR9600 yüksek kaliteli ses kaydını ve uçucu olmayan flash belleği depolamak için kullanılan tek bir çiptir, 40 ila 60 saniye oynatma kapasitesine sahiptir. APR rastgele ve sıralı çoklu mesajlar sağlar ve tasarımcılar kullanıcı ihtiyaçlarına bağlı olarak depolama süresini ayarlayabilir. Temel olarak, verici ile alıcı tarafı arasındaki iletişim için RF modülünü kullanılmıştır. Sistemin genel görüntüsü Şekil 15’te gösterilmiştir.



Şekil 15: PIC mikroişlemcili sistemin genel görüntüsü (Gunasekaran & Maniknandan, 2013)

Alternatif bir sistem (Verma, 2019), kullanıcının hareketini yakalamak için esnek sensörlere sahip bir çift eldiveni kullanır (bkz. Şekil 16).



Şekil 16: PIC kontrollü akıllı eldiven sistemi blok diyagramı (Verma, 2019)

Esnek sensörler yardımıyla, parmakların, başparmağın ve kolun derecesi gerilim bölücü ile hesaplanır. PIC mikrodeneleyici, esnek sensörlerden gelen verilerin analogdan dijitala dönüştürülmesi gibi çeşitli işlevler için kullanılır. Daha sonra sayısallaştırılmış veriler kodlayıcıda kodlanır ve iletilir. Alınan

veriler kod çözücü tarafından çözülür ve hareket tanıma sistemi gelen verileri önceden beslenen verilerle eşleştirir. Veri eşleşirse, ses bölümü kullanılarak konuşmacıya verilir. Elde edilen jest dizisi RF vericisi ve alıcısı kullanılarak iletilir. Tanınan hareketler önceden tercih edilen verilerle eşleştirilir. Eşleşme durumunda ses katı kullanılarak dışa aktarılır.

SONUÇ

İşaret dili için akıllı eldiven tasarımlarındaki temel amaç, jestlerdeki değişimi tespit etmek ve bunları insanların anlayabileceği şekle dönüştürerek işitme engelliler ile işitme yetisine sahip insanlar arasındaki iletişim boşluğunu doldurmaktır. Sistem diğer işaret dillerini de çevirecek şekilde modifiye edilebilir ve işitme engelli toplumun dünyanın dört bir yanındaki insanlarla kolayca iletişim kurabilmesi için bir dilden diğerine çeviri özelliği de eklenebilir,

Gelecekte, jestler aracılığıyla iletişimin doğruluğunu ve hassasiyetini artırmak için sofistike sensörler yerleştirilebilir ve tasarım kelimeleri İngilizce'den diğer dillere çevirmek için yeniden düzenlenebilir. İşaret dilinin işaretleri genellikle iki el gerektirir ve bazıları herhangi bir duyguyu iletmek için yüz ifadelerini kullanır. Sonuç olarak, projenin önemli eklentilerinden biri, yüzdeki duyguları toplamak için sensörler veya kameralar kullanmak olabilir. Gelecekte doğruluğu artırmak için farklı tipte sensörler eklenebilir. Ayrıca, bir başka eklenti de Raspberry Pi ve mobil uygulamaların makine öğrenimi için programlanması olabilir, bu da sistemi daha kullanıcı dostu ve gelişmiş hale getirecektir.

KAYNAKÇA

- Anilkumar, G., Fouzia, M. S., & Anisha, G. S. (2022). Imperative Methodology to Detect the Palm Gestures (American Sign Language) using Y010v5 and MediaPipe. *2022 2nd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/CONIT55038.2022.9847703>
- Baktash, A. Q., Mohammed, S. L., & Jameel, H. F. (2021). Multi-Sign Language Glove based Hand Talking System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1105(1), 012078. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1105/1/012078>
- Chen, L., Wang, F., Deng, H., & Ji, K. (2013). A Survey on Hand Gesture Recognition. *2013 International Conference on Computer Sciences and Applications*, 313–316. <https://doi.org/10.1109/CSA.2013.79>
- Chen, X., Su, L., Zhao, J., Qiu, K., Jiang, N., & Zhai, G. (2023). Sign Language Gesture Recognition and Classification Based on Event Camera with Spiking Neural Networks. *Electronics*, 12(4), 786. <https://doi.org/10.3390/electronics12040786>
- Dolgin, E. (2018). How to start a lab when funds are tight. *Nature*, 559(7713), 291–293. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-05655-3>
- Ferdoush, S., & Li, X. (2014). Wireless Sensor Network System Design Using Raspberry Pi and Arduino for Environmental Monitoring Applications. *Procedia Computer Science*, 34, 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.07.059>
- Gad, H. E., & Gad, H. E. (2015). Development of a new temperature data acquisition system for solar energy applications. *Renewable Energy*, 74, 337–343. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.006>
- Gu, Y., Zheng, C., Todoh, M., & Zha, F. (2022). American Sign Language Translation Using Wearable Inertial and Electromyography Sensors for Tracking Hand Movements and Facial Expressions. *Frontiers in Neuroscience*, 16. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.962141>
- Gunasekaran, K., & Maniknandan, R. (2013). Sign Language to Speech Translation System Using PIC Microcontroller. *International Journal of Engineering and Technology*, 5, 1024–1028.
- Ibrahim, N. B., Selim, M. M., & Zayed, H. H. (2018). An Automatic Arabic Sign Language Recognition System (ArSLRS). *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 30(4), 470–477. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2017.09.007>
- Ilten, E. (2022). Conformable fractional order controller design and optimization for sensorless control of induction motor. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 41(5), 1528–1541. <https://doi.org/10.1108/COMPEL-09-2021-0334>
- Ilten, E., & Demirtas, M. (2016). Off-Line Tuning of Fractional Order PI? Controller by Using Response Surface Method for Induction Motor Speed Control. *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, 18, 20–27. <https://api.>

semanticscholar.org/CorpusID:217182143

- İlten, E., & Demirtaş, M. (2018). Fractional Order PI λ Controller Application for Limited Memory System. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(1), 237–242. <https://doi.org/10.31202/ecjse.356652>
- Kim, S.-M., Choi, Y., & Suh, J. (2020). Applications of the Open-Source Hardware Arduino Platform in the Mining Industry: A Review. *Applied Sciences*, 10(14), 5018. <https://doi.org/10.3390/app10145018>
- Küçükdermenci, S. (2023a). Sign language voice convertor design using Raspberry pi for impaired individuals. *1st International Conference on Recent and Innovative Results in Engineering and Technology*.
- Küçükdermenci, S. (2023b, August 10). Raspberry Pi based braille keyboard design with audio output for the visually challenged. *1st International Conference On Modern And Advanced Research ICMAR 2023*. <https://doi.org/10.59287/ic-mar.1306>
- Majee, A. (2016). IoT Based Automation of Safety and Monitoring System Operations of Mines. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 3(9), 17–21. <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V3I9P103>
- Narsale, S., Bhore, P. S., Londhe, N. D., Patel, P. S., & Thanambir, D. (2020). Smart Gloves for Deaf and Dumb Students. *International Journal of Progressive Research in Science and Engineering*, 1(8), 30–40.
- Nhu, C. T., Dang, P. N., Thanh, V. N. T., Thuy, H. T. T., Thanh, V. D., & Thanh, T. B. (2021). A Sign Language Recognition System Using Ionic Liquid Strain Sensor. *2021 3rd International Symposium on Material and Electrical Engineering Conference (ISMEE)*, 263–267. <https://doi.org/10.1109/ISMEE54273.2021.9774139>
- Nirosha, G., & Dr Velmani, R. (2020). Raspberry Pi based Sign to Speech Conversion System for Mute Community. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 981(4), 042005. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/981/4/042005>
- Schelly, C., Anzalone, G., Wijnen, B., & Pearce, J. M. (2015). Open-Source 3-D Printing Technologies for Education: Bringing Additive Manufacturing to the Classroom. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3331158>
- Verma, P. (2019). *Design of Smart Gloves*.
- Yeasin, M., Nath, S. K., Patwary, M. I. H., Hossain, S., Hossain, S., Ahmed, R., Ahmed, S. R., & Azad, M. H. (2019). Design and Implementation of Bangla Sign Language Translator. *2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, 815–820. <https://doi.org/10.1109/ICAEE48663.2019.8975458>
- Zhou, Y., Fei, X., Tian, J., Xu, L., & Li, Y. (2022). A ionic liquid enhanced conductive hydrogel for strain sensing applications. *Journal of Colloid and Interface Science*, 606, 192–203. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.07.158>

Bölüm 8

DENİZALTI TAHRİK SİSTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Aleyna ULUCUTSOY¹

Betül SARAÇ²

Erhan AKSU³

1 Arş.Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Gemi Makinaları İşletme Mühendisliği Bölümü, Çamburnu-Sürmene, Trabzon,Türkiye; aleyناولucutsoy@ktu.edu.tr.

2 Doç. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Çamburnu-Sürmene, Trabzon,Türkiye; bsarac@ktu.edu.tr..

3 Dr.Öğretim Üyesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Çamburnu-Sürmene, Trabzon,Türkiye; eaksu@ktu.edu.tr.

GİRİŞ

Denizaltılar, tarih boyunca savaş stratejilerinde önemli bir rol oynamıştır. Sualtında hareket edebilme ve gizlenme yetenekleri, denizaltıları düşman gemilerine karşı etkili bir silah haline getirmiştir. Gizlilikleri ve istihbarat toplama yetenekleri sayesinde, denizaltılar donanmaların en büyük ve gizli güç unsurlarıdır. Denizaltıların özellikle İkinci Dünya Savaşı'nda ortaya koyduğu etki, geleneksel savaş taktik ve stratejilerin tamamen değişmesine yol açmıştır.

Denizaltılar uzun süre sualtında kalarak yürüttükleri operasyonları gizlilik içerisinde gerçekleştirir. Ancak denizaltılar su yüzeyine çıktıklarında gizlilik ilkesinin tehlikeye atarak kolayca hedef olabilirler. Bu nedenle belirli aralıklarla su yüzeyine çıkmak zorunda olmaları, uzun süre sualtında kalabilme yetenekleri için en büyük riski oluşturur. İkinci dünya savaşından günümüze kadar denizaltıların sualtında kaldığı süreyi azaltmak amacıyla farklı denizaltı tahrik sistemlerini üzerine çalışmalar devam etmektedir.

İkinci Dünya Savaşıyla birlikte gelişen denizaltı tahrik teknolojileri günümüzde “Konvansiyonel Tahrik Sistemleri ve “Havadan Bağımsız Tahrik Sistemleri” olmak üzere iki ana başlık altında sınıflandırılabilir.

Konvansiyonel tahrik sistemli denizaltılar, geleneksel güç üretim yöntemlerini kullanan sistemleri içerir. Bir diğer tahrik sistemi olan Havadan Bağımsız Tahrik (AIP) sistemleri denizaltılarda kullanıma uygun hale getirilmesi ile denizaltıların sualtı operasyonlarının sürelerini arttırmıştır. Bu süreç, Walter türbinlerinden başlayarak AIP ve nükleer reaktörlere kadar olan dönemdeki çalışmalar, güç ve tahrik sistemleri teknolojisini bugünkü seviyeye taşıma da önemli bir deneyim kaynağı olmuştur (Nilsson, n.d.).

1. Denizaltı Tahrik Sistemleri

Denizaltı tahrik sistemleri, enerji kaynağı ve güç üretimi için oksijen ihtiyacına göre konvansiyonel tahrik sistemleri ve havadan bağımsız tahrik sistemli denizaltılar olmak üzere iki grupta sınıflandırılırlar.

1.1. Konvansiyonel Tahrik Sistemli Denizaltılar

Konvansiyonel tahrik sistemleri, geleneksel güç üretim yöntemlerini kullanan sistemlerdir. Bu sistemlerde sistemin çalışması için oksijene ihtiyaç vardır. Nükleer tahrik sistemleri, oksijene ihtiyaç duymasalar da güç üretim sisteminin geleneksel olması nedeniyle konvansiyonel sistemler olarak kabul edilir. Bu gruba Walter türbinleri, nükleer tahrik sistemli denizaltılar ve dizel-elektrik denizaltılar girmektedir.

1.1.1. Dizel-Elektrik Motorları

Denizaltıların tahrik sistemleri, denizaltıların etkili bir şekilde ilerlemelerini sağlayan güçlü motorlara sahip olmalıdır. Dizel-elektrik motorlar, de-

nizaltılarda yaygın olarak kullanılan bir hibrit tahrik sistemidir. 1930’lu yıllarda ABD Donanması, Dizel motorları bataryaları şarj edebilecek ve elektrik motorlarını çalıştırabilecek şekilde tasarlayarak daha iyi performans elde edilmesini sağlamışlardır. Bu farklı tasarım ile dizel-elektrik denizaltılarında kullanılan içten yanmalı dizel motorlarında oksijen ve yakıt yanmasıyla üretilen enerji alternatöre iletilir ve alternatörden üretilen elektrik, pervanenin hareketi ve denizaltı bataryalarının şarj edilmesi için kullanılmaktadır (E.”-Pete” Perez-Vergara, Jr. Commander & A, 1999).

Dizel-elektrik motorları, denizaltı tahrik sistemleri arasında düşük üretim ve işletme maliyetleri nedeniyle en çok tercih edilen sistemlerden biridir. Dizel-elektrik motorları diğer sistemlere göre daha küçük boyutlarda olması sebebiyle denizaltı iç hacminde az yer kaplar Akustik açıdan düşük iz oranı sayesinde, dizel-elektrik denizaltılar akustik radarlar tarafından tespit edilmesi zor hale gelir. Denizaltılar, su üstünde ya da şnorkel ile hava alabildikleri durumlarda dizel motorları kullanarak yakıt tüketebilirler (Ådnanes, 2003). Dizel-elektrik denizaltılarda genellikle kurşun-asit bataryalar, daha gelişmiş teknolojiye sahip denizaltılarda ise kurşun-iyon bataryalar kullanılmaktadır. Dizel-elektrik sistemli denizaltılarda elektrik enerjisini depo etmek için kullanılan bataryalar denizaltı sualtı durumundayken denizaltının sevk sistemi-ne, havalandırma sistemine ve elektronik sistemlerine gerekli enerjiyi sağlar (Williams & Folbert, n.d.). Günümüzde gelişen teknoloji ile daha verimli batarya sistemleri kullanılarak, denizaltıların performansının ve menzilin artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Denizaltının bataryalarını şarj edebilmesi için dizel motorlarının çalıştırılması gerekir. Dizel motorlarının çalıştırılmasında oksijene ihtiyaç olduğundan, Şnorkel ile atmosferden oksijen alan bir denizaltı gizlilik prensibini riske atarak diğer deniz platformlarının radarları tarafından tespit edilme tehlikesi ile karşı karşıya kalır. Her ne kadar modern şnorkeller, radar emici boya ile kaplanmış ve gizli bir şekilde şekillendirilmiş olsa da yine de yüksek çözünürlüklü radarlar tarafından tespit edilebilir. Ayrıca bir denizaltı şnorkel ile hava alırken, denizaltıların dizel jeneratörlerinin egzoz emisyonlarını tespit edebilen “dizel koklayıcı” adı verilen sensörler ile denizaltının egzoz emisyonlarından tespiti yapılabilir. Tüm bu durumlar denizaltının gizlilik yeteneğini azaltırken bir yanda da denizaltının oksijen alabilmek için su üzerine çıkma zorunluluğunun bir sonucunu doğurmaktadır (Reader & Hawley, n.d.).

1.1.2. Nükleer Denizaltı Tahrik Sistemleri

Denizaltıların gerçek anlamda denizin altında bağımsız olarak hareket edebilmesi, AIP (Hava Bağımsız Tahrik) sistemlerinden çok daha önce nükleer reaktörlerin geliştirilmesiyle mümkün hale gelmiştir. Nükleer denizaltıların çalışma prensibi genel olarak Rankine çevrimine dayanır. Bu denizaltılarda bulunan nükleer reaktörler, uranyum-235 yakıtının fizyon tepkimeleri sonucunda yüksek miktarda ısı enerjisi açığa çıkar. Fizyon tepkimesi sonu-

cunda açığa çıkan ısı enerjisi ile elde edilen kızgın su buharı türbinlere gönderilir. Türbinlerde ise denizaltının hareketi için güç üretilerek havalandırma, tatlı su üretimi gibi alt sistemler için de gerekli güç üretilmiş olur.

Denizaltı reaktörleri yüzde 20'nin üzerinde bir oranda yüksek zenginlikte nükleer yakıt kullanmaktadır. Bu sayede karadaki versiyonlarına göre daha küçük bir reaktörden uzun süre ikmal gerekmeksizin enerji sağlanabilmektedir. Bu denizaltılar nükleer yakıtlarını zarar görmeden 30 yıl boyunca taşıyabilmektedir (STM,2021)

Bununla birlikte, olası reaktör arızaları gibi durumlar için denizaltılarda acil durumda kullanılmak üzere dizel jeneratörler bulunmaktadır. Nükleer denizaltılar, büyük avantajları olan yüksek hız ve dayanıklılığın yanı sıra kapatılması zor olan güç reaktörleri ve hizmet sonrası nükleer atık ve gövde depolama gibi çeşitli dezavantajlara sahiptir. Nükleer denizaltıların büyük boyutları ve manyetik izleri, sığ sularda diğer konvansiyonel denizaltılara göre daha kolay tespit edilmelerine yol açar. Ayrıca, nükleer reaktörlerin yaydığı yüksek sıcaklık da bir dezavantaj olarak ortaya çıkar. (Anonim 2022).

Günümüzde dünya üzerinde aktif olarak ABD, Rusya, İngiltere, Fransa ve Çin olmak üzere 5 ülke denizaltılarında nükleer tahrik sistemini kullanmaktadır. Ayrıca Hindistan, Rusya'dan kiralanan Charlie sınıfı nükleer denizaltıyı kullanmak için araştırma ve personel yetiştirme çalışmalarını sürdürürken, Brezilya, Pakistan ve Arjantin gibi çeşitli ülkelerde ekonomik zorluklara rağmen nükleer denizaltı programları yavaş ilerliyor olsa da devam etmektedir (Alagöz Z. 2009).

1.1.3. Walter Türbinleri

Walter türbinleri sualtında uzun süreli dayanıklılık sağlamak amacıyla geliştirilen bir teknoloji olup, özellikle İkinci Dünya Savaşı sırasında tasarlanan ve havaya doğrudan ihtiyaç duymadan çalışan bilinen en eski alternatif denizaltı tahrik sistemidir. Bu sistem geleneksel denizaltılara göre seyir hızlarında 6-8 knot arasında bir artış meydana getirdiği (WALTER, 1954) tarafından bildirilmiştir. İkinci Dünya Savaşı döneminde Denizaltıların hızını büyük ölçüde artıran bu sistemin temel ilkesi, havanın yerine hidrojen peroksit kullanarak dizel yakıtı sisteme vererek yanmanın gerçekleşmesini sağlamaktır. Yanma işlemi, türbinlerin çalışmasını sağlar ve denizaltının hızını artırır. Yüksek sıcaklıkta su buharına ihtiyaç duyulan bu sistemde, hidrojen peroksit, potasyum permanganat temelli bir katalizörle tepkimeye girerek su buharı ve oksijen karışımına ayrışır. Buhar ve gaz karışımı türbine gönderilir, su yoğunlaştırıcısı ile buhar ayrıştırılırken açığa çıkan CO₂ egzoz gazları denize atılır.

Walter Türbinleri, döneminin teknolojilerine kıyasla önemli avantajlar sunmuştur. H.Walter'ın 1940'larda gerçekleştirdiği testlerde, konvansiyonel

denizaltıların hız sınırlarını aşarak 28.1 knot gibi yüksek hızlara ulaşabilen bu sistem, denizaltıların manevra kabiliyetini artırmış ve operasyonel etkinliklerini yükseltmiştir (WALTER, 1954). Ancak, hidrojen peroksit kullanımı, metaller üzerinde bozucu etkiye sahip olduğundan, H. Walter tarafından gerçekleştirilen testlerde hidrojen peroksitin depolandığı çeliğin aşınması sonucu tanktan sızan hidrojen peroksitin alev alması, sistemin olası patlama tehlikeleriyle de karşı karşıya olduğunun bir kanıtıdır. Hidrojen peroksitin dezavantajları ve güvenlik riskleri nedeniyle günümüzde denizaltılarda kullanılmamaktadır.

1.2. Havadan Bağımsız Tahrik Sistemli Denizaltılar

Havadan bağımsız tahrik sistemleri olarak adlandırılan AIP (Air Independent Propulsion) sistemleri yakıttan enerji üretirken oksijene bağımlı olmayan sistemlerdir. Bu sistemler, modern denizaltı tahrik sistemleri olarak kabul edilir. Denizaltının gizlilik yeteneğini azaltan ve denizaltının oksijen alabilmek için su üzerine çıkma zorunluluklarından kaynaklı dizel-elektrik sistemlerinin bu yetersizliklerinin önüne geçmek amacıyla Havadan Bağımsız Tahrik sistemleri geliştirilmiştir (Brighton et al., 1994). Havadan Bağımsız Tahrik Sistemleri olarak adlandırılan AIP sistemler bu noktada denizaltının oksijene olan bağımlılığının önüne geçerek denizaltının oksijene ihtiyaç duymadan alternatif yöntemler ile güç üretmesine olanak sağlayan sistemlerdir. Havadan Bağımsız Tahrik Sistemleri sınıfına giren 5 farklı çalışma prensibi; Walter Türbinleri, Kapalı Çevrim Dizel Motorlar, Kapalı Çevrimli Buhar Türbinleri, Stirling Motorları ve Yakıt Pilleridir.

1.2.1. Kapalı Devre Dizel Motorlar

Kapalı Devre Dizel Motorları (KDDM), normal dizel motorlarından farklı bir çalışma prensibine sahiptir. KDDM, denizaltının içinde bulunduğu sualtı durumuna bağlı olarak farklı şekillerde çalışır. Yüzeyde veya şnorkel ile seyir halindeyken normal bir dizel motor gibi çalışır ve çevredeki havayı yakıtı yakmak için kullanır. Ancak dalış sırasında, denizaltının içinde bulunduğu sualtı ortamında çalışmak için özel bir yöntem kullanır. Tihonov, Bazykin, & Mukhanov, 2019).

Bu özel yöntemle göre, denizaltının içinde bulunduğu sualtı durumuna uygun bir suni hava oluşturulur. Bu suni hava, sıvı oksijen ve bir asal gazın (genellikle argon, nadiren helyum veya ksenon) karışımıyla elde edilir. KDDM, bu suni havayı yakıtın yanması için kullanır. Motorun yanma süreci sonucunda ortaya çıkan gazlar soğutulur ve ayrıştırılır. Bu ayrıştırma işlemi sonucunda argon gazı tekrar kullanılmak üzere alınır ve emme devresine yönlendirilir. Aynı zamanda karbondioksit ve diğer atık gazlar suyla karıştırılarak denizaltı dışına atılır. KDDM sistemi, denizaltının su yüzeyinde veya dalış sırasında farklı hava koşullarına uyum sağlamasını sağlayan özel bir motor türüdür. Bu sayede denizaltı, etkili bir şekilde farklı durumlarda çalış-

şabilir (Whitman, 2013).

Kapalı devre dizel çevrimi sisteminin ilk uygulamaları Sovyet Donanması tarafından gerçekleştirilmiştir; ancak sıvı oksijenin depolanmasındaki kısıtlamalar ve güvenlik sorunları sebebiyle 1970lere gelindiğinde Sovyetler çalışmalarını durdurmak zorunda kalmıştır. 1989'dan 1993'e kadar olan sürede Kapalı Devre Dizel Çevrimi sistemi Alman Donanmasının ilgisini çekmiş ve Alman firma Thyssen Nordseewerke GmbH, Kapalı Devre Dizel çevrim sistemini geliştirerek eski Klasse 205 U-botu üzerinde başarıyla test etmiştir. KDD sistemleri yıllarca Sovyetler, Almanya, İngiltere, Hollanda ve İtalya'daki bazı şirketler tarafından yoğun olarak araştırılmışsa da bilinen tek örneği 1993 senesinde hizmet dışına çıkarılmış eski bir Alman denizaltısına yerleştirilen 300 beygirlik deneysel sistem haricinde modern bir askeri denizaltıda kullanılmamıştır. Geçmiş yıllarda, İngiliz Marconi şirketi kendi geliştirdiği bir KDD sistemi ile Tip 209 denizaltılarının modernizasyonu için Güney Kore'ye satışını yapmaya çalışmış; fakat bu çaba başarılı olamamıştır (Lee & Shay, 2018).

1.2.2. Kapalı Çevrim Buhar Türbinleri (MESMA)

Kapalı Çevrim Buhar Türbin sistemi denizaltılarda “MESMA (Module d'Énergie Sous-Marine Autonome)” olarak adlandırılan Fransız Mühendisler tarafından geliştirilen havadan bağımsız bir denizaltı tahrik sistemidir. Mekanismada, nükleer tesislerde kullanılan (Fransız denizaltıları ve uçak gemileri tarafından kullanılan) ve nükleer olmayan sistemlere uyarlanmış bir buhar döngüsüdür. Sistem Etanol ile sıvı oksijenin yakılmasıyla oluşan su buharının türbinden geçirilerek tahrik sağlandığı kapalı devre buhar türbin çevrimine dayanır. (Oliveira Da Silva, n.d.).

Kapalı Çevrim Buhar Türbin sisteminin (MESMA) çalışma prensibi nükleer denizaltılarla oldukça benzerdir. Nükleer denizaltılar su buharı oluşturmak için nükleer enerjiden faydalanırken MESMA sisteminde su buharı sıvı oksijen ve etanolün reaksiyonları sonucu elde edilir. (Buckingham J.n.d. 2008)

Her iki sistemdeki amaç buhar türbini için buhar üretebilmektir. Sistemin çalışması için gerekli olan oksijen sıvı oksijen formunda 60 atm basınç altında Lox (sıvı oksijen) tanklarında denizaltı içerisinde depolanarak sistemin dışarıdan hava alma ihtiyacını ortadan kaldırılmıştır (Oliveira Da Silva, n.d.).

Düşük basınç (2-10 bar) ve düşük sıcaklıkta (-185°C) depolanan sıvı oksijen kriyojenik pompalar ile sisteme gönderilir. Pompa ile gönderildiği sırada basıncının yükselerek 60 bara çıkmasıyla oksijen gaz forma geçer. Gaz haline gelen oksijen yanma odasında yakıt ile karışarak yanma olayını gerçekleştirir. Bu olay sonucu oluşan gazlar yüksek sıcaklık (700°C) ve yüksek basınca

(60 bar) ulaşır. Yüksek sıcaklık ve basınçtaki bu gazlar buhar jeneratörüne gönderilir. Gazların sahip olduğu bu yüksek basınçtan dolayı sistemde bir kompresöre ihtiyaç duyulmaz. Bu sıcak gazlar, denizaltı dışına tahliye edilmeden önce buhar jeneratörüne ve ardından bir soğutucuya geçer. Buhar jeneratörünün çıkışında bu gazların bir kısmı alınır ve sıcaklığını düzenlemek için yanma odası duvarlarına gönderilir. Çevrimin birinci kısmı böylece tamamlanmış olur. Çevrimin ikinci kısmı temiz hava kullanılan konvansiyonel Rankine çevrimine aittir. Üretilen buhar, tekrar buhar jeneratörüne yönlendirilmeden önce bir türbine ve ardından bir Türbinler, denizaltıyı doğru akımla besleyen bir alternatör-doğrultucuyu çalıştırır kondansöre gönderilir. (Kerros -c Inizan -id Grousset, n.d.).

MESMA diğer AIP sistemlerle sağladığı tahrik gücü açısından kıyaslandığında daha yüksek çıkış gücü sunabilse de verimliliği diğer dört AIP sistem adayı arasında en düşük olanıdır. Oksijen tüketimi açısından da diğer AIP sistemler ile de kıyaslandığında en yüksek oksijen tüketimini gerçekleştiren sistemdir (Whitman, 2013).Günümüzde Fransa tarafından Pakistan donanmasına üretilen Agosta B sınıfı denizaltılarının oksijensiz enerji üretim ihtiyacı MESMA ile sağlanmakta olup kurulum ve işletim maliyetleri dolayısıyla bu sistem denizaltılarda çok yaygın olarak kullanılmamaktadır (Se & Lus, n.d.).

1.2.3. Stirling Çevrimi

Stirling motoru, sıcak hava motoru olarak da bilinen dışarıdan ısı verilerek çalışan bir ısı üretim makinasıdır. Bu motor, Carnot çevriminin gerçek dünyadaki uygulamasıdır ve ısıyı mekanik enerjiye dönüştürmede ideal verime yakın bir performans sağlar. Kapalı bir döngüde çalışır ve sürekli olarak kullanılan bir çalışma akışkanı içerir. Pistonun hareketini oluşturan bu akışkan, motora güç sağlar. Bu akışkanı ısıtmak için enerji kullanılır. Denizaltılarda, Stirling motorunun çalışması için genellikle dizel yakıt ve bu yakıtı yakmak için suni hava (genellikle argon ile karıştırılmış sıvı oksijen) kullanılır. Denizaltıda, ek olarak depolanan sıvı oksijen ve özel bir yakıt olan düşük sülfür içerikli ligroin ile mevcut dizel yakıt bir yanma odasında ve basınç altında yakılır. Bu yakma işlemiyle üretilen ısı, Stirling motorlarına bağlı alternatörler aracılığıyla mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürür. Elde edilen elektrik, doğrudan ana elektrik motorunu çalıştırmak veya aküleri şarj etmek için kullanılır. (Nilsson, n.d.)

Motorun şaftının bir jeneratöre bağlanması sonucu üretilen elektrik; denizaltının hareket etmesi, bataryaların şarj edilmesi ve diğer elektrik ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılır. Oluşan atık gazlar, basınçlı bir kompresör gerektirmeden ayrıştırılarak deniz suyuna verilir.

Aynı zamanda Stirling motorları, MESMA ve Kapalı Devre Dizel Çevrimi sistemine kıyasla daha sessizdir. Whitman, E. C. (2013).

Stirling motorlarında sürekli bir yanma işlemi kullanılarak ısı sağlanır, bu nedenle yakıtın yanmamış kalma oranı önemli ölçüde düşürülür. Bu motorlar, benzer diğer motor türlerine göre daha az yağlama ve bakım gerektirir. Ayrıca, diğer eşdeğer motorlara kıyasla daha basit bir yapıya sahiptirler ve valfe ihtiyaç duymazlar. Yakıt ve iç sistemleri daha basittir. Düşük işletme basıncında çalışabilirler, bu da tipik buhar makinelerine göre daha güvenlidir. Bu düşük basınç, daha hafif ve dayanıklı olmayan silindirlerin kullanımına olanak tanır.

Stirling motorları sessiz çalışır, çevreye daha az zararlıdır, yüksek verim sunar ve güvenilirlerdir. Ayrıca, daha az titreşim üreterek daha rahat bir çalışma sağlar ve patlama riski daha düşük olan yakıt türlerini kullanabilme avantajına sahiptirler.

1.2.4. Yakıt Pilleri

Yakıt pilleri, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Temel olarak, bir anot (negatif elektrot), bir katot (pozitif elektrot) ve elektrolit adı verilen bir iletken ortamdan oluşurlar. Yakıt pillerinde genellikle hidrojen gazı kullanılır. Hidrojen, anotta pozitif ve negatif iyonlara ayrışır. Elektrolit sıvısı, sadece pozitif yüklü iyonların geçişine izin verirken, bu iyonlar katot kısmına hareket ederler. Anot bölgesinde kalan elektronlar, pozitif iyonlarla yeniden birleşmeye eğilimli oldukları için bu elektronlar, harici bir devre boyunca katota doğru akışını sağlarlar. Bu akış süreci, harici devre üzerinden akan elektron hareketiyle elektrik üretimini gerçekleştirir. Katota geçen elektronlar, pozitif iyonlar ve hava ile reaksiyona girerek saf suyu oluştururlar.

Birden çok alternatif yapıda üretilen yakıt pilleri (yakıt hücreleri) kullandıkları elektrolit sıvısına ve elektrot yapısına göre sınıflandırılırlar. Denizaltılarda PEM adı verilen “Polimer Elektrolit Membran” olarak adlandırılan yakıt pillerinin kullanımı tercih edilir. Polimer elektrolit yakıt hücreleri düşük ağırlık, yüksek güç yoğunluğu ve düşük maliyet sunan sistemlerdir. Hareketsizleştirilmiş elektrolit membran sızdırmazlığı kolaylaştırır, korozyonu azaltır ve daha uzun hücre ve yığın ömrü sağlar. PEM yakıt pilleri düşük sıcaklıkta çalışır, daha hızlı başlangıçlara ve güç talebindeki değişikliklere anında yanıt vermesine olanak tanır. PEM yakıt pilleri elektrolit olarak proton değişim membranı kullanılır. PEM sisteminde korozyon riski söz konusu değildir çünkü sistem içerisindeki tek sıvı “su” olduğundan anot ve katot için korozyon etkisi taşımaz (Mench M., 2008). Geleneksel olarak güç üreten sistemlerden olan dizel makineler ya da Stirling makineleri gibi hareketli aksam ve parçalar içermediğinden titreşim ve gürültü problemlerini minimize eden hatta yok eden yapıları sayesinde akustik iyileştirmeler sağlayarak özellikle askeri denizcilik sektöründe oldukça tercih edilirler. Ayrıca klasik makinelerde olduğu gibi herhangi ateşleme ya da yanma işlemi gerçekleştirme-

diğinden bu sistemler çevreci ve ekolojik dengeyi olumsuz olarak etkilemeyen eşsiz bir sistemdir.

Günümüzde ilk kez AIP sistemleri kullanılarak geliştirilen denizaltı Alman Thyssen Krupp Technologies'in alt firması olan Howaldtswerke-Deutsche Werft firması tarafından geliştirilen Tip 212A sınıfı denizaltılarıdır. Kullandıkları AIP sistemlerden yakıt pilleri akustik izlerinin oldukça düşük olması sayesinde dünyanın en sessiz denizaltıları kabul edilir. Ayrıca dalış durumunda şnorkel kullanmadan haftalarca sualtı seyri imkânı sağlarken, hidrojen yakıtlı olması sebebiyle egzoz gazı oluşturmadığından termal izi asgari düzeydedir. Bu denizaltılar Siemens tarafından geliştirilen 306 kW güce sahip PEM yakıt pillerini kullanmaktadır. Oksijen ve hidrojen silindirik basınçlı tanklar vasıtasıyla denizaltılarda muhafaza edilmektedir. Diğer bir yakıt AIP sistem kullanan denizaltılardan biri olan Alman yapımı Tip-214 sınıfı denizaltılar da Siemens tarafından geliştirilen PEM yakıt pilini kullanarak iki hafta boyunca su yüzeyine çıkma ihtiyacı duymadan görev yapabilmektedir. 240 kW güce sahip iki adet Siemens PEM yakıt pili içeren Tip 214 denizaltıları günümüzde Gölcük tersanesinde ASELSAN, HAVELSAN ve TÜBİTAK firmaları yükleniciliğinde Howaldtswerke-Deutsche Werft firmasıyla birlikte üretilmektedir (Alagöz Z. 2009).

Yakıt pillerinin performanslarının iyileştirilmesi adına günümüzde araştırma ve geliştirme çalışmaları hala devam etmektedir. Özellikle yakıt pili yığınlarında oluşan ısıнын termal yönetimi pillerin uzun süreli kullanımı sırasındaki performansları için kritik bir öneme sahiptir (Jaeyoung Han, Jaesu Han, Hyunjin Ji, 2020).

Yakıt pilleri dalış basıncına bakılmaksızın denizaltının akustik izini olumsuz yönde etkilemeyen en etkili AIP sistemidir. (Anonim,2023).

Tüm bu özellikleri göz önüne alındığında gerekli performans ve maliyet iyileştirmelerinin ardından havadan bağımsız tahrik sistemleri içerisinde yakıt pillerinin gelecek vaat eden sistemlerden biri olacağı öngörülmektedir.

2. Denizaltı Tahrik Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları

Tablo.1 Konvansiyonel Denizaltı Tahrik Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları

KONVAŞİYONEL TAHRİK SİSTEMLERİ		
	AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
Dizel-Elektrik Motorları	- Sessiz çalıştırlarından düşük akustik ize sahip oldukları için radarlarca tespiti zordur. - Düşük bakım ve onarım maliyetlerine sahiptir. - İşletim ve operasyon faaliyetlerini personele kolay kullanım avantajı sağlar. - Sistem denizaltı iç hacminde az yer kaplar.	- Sistem çalışmak için oksijene ihtiyaç duyduğundan belli aralıklarla su üzerine çıkma zorunluluğu vardır. - Bu zorunluluktan dolayı denizaltının tespiti kolaylaşır.
Nükleer Tahrik Sistemleri	- Yüksek hız ve dayanıklılık sağlarlar. - Denizaltı su üzerine çıkmadan uzun süre sualtı pozisyonunda kalabilir. - Sistemdeki nükleer reaktörler 20 yıl gibi sürelerle kadar yakıt ikmali olmadan kullanılabilir.	- Bakım, üretim ve işletim maliyetleri oldukça fazladır. - Personel eğitimi diğer denizaltılardan daha hayati bir öneme sahiptir. - Reaktörün deniz suyuna yaydığı yüksek ısı sebebiyle termal radarlarca tespiti kolaylaştırır. - Denizaltı kullanım ömrünü doldurduktan sonra atıkların ve denizaltı gövdesinin imhası oldukça zordur. - Gövdeleri oldukça büyüktür, çalışmaları oldukça gürültülüdür ve tespit edilmelerini kolaylaştırır
Walter Türbinleri	- Döneminin ötesinde bir teknoloji olarak temel hedefi sualtında uzun süreli dayanıklılık sağlama amacına ulaşmıştır. - Dönemindeki denizaltı hızlarında büyük oranda iyileştirmeler sağlamıştır.	- Hız olarak iyileştirmeler sağlasa da sistemdeki hidrojen peroksitin patlama riski ve metallerdeki yüksek aşındırma riski söz konusudur. - Denizaltılarda derinlik ve sürat değişken olduğundan dolayı bu denli hassas bir kimyasal çevrimin kontrolü oldukça zordur

Tablo.2 Havadan Bağımsız Tahrik Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları

HAVADAN BAĞIMSIZ TAHRİK SİSTEMLERİ		
	AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
Kapalı Devre Dizel Çevrim	Denizaltının dizel makinelerini çalıştırmak için gerekli olan oksijeni alması için devamlı su yüzeyine çıkma ihtiyacını teorik olarak azaltmıştır.	- Enerji verimliliği oldukça düşüktür. - Teorik olarak başarılı olsa da uygulama esnasında karşılaşılan sorunlardan dolayı günümüzde uygulanabilir örneği yoktur. - Çevrimde kullanılan sıvı oksijenin sınırlı depolanma dayanıklılıkları, sistem arızaları ve güvenlik sorunları sistem tercih edilmemiştir.
Yakıt Pilleri	- Sessiz çalıştırlarından akustik radarlara takılma olasılıkları düşüktür. - Çalışma verimleri yüksek olduğundan Uzun süreli operasyonlarda yüksek dayanım sağlar. - Çevre dostudur, co2 emisyonuna sebep olmadığından oldukça güvenli bir sistemdir.	- Üretim maliyetleri yüksektir. - Bir enerji üretim tesisi değil bir enerji dönüştürme tesisidir - Sistemde enerji üretimi için kullanılan gazların depolanma ihtiyacından dolayı denizaltı iç hacminde önemli ölçüde yer kaplar.
MESMA	- Sistemin çalışma prensibi nükleer sisteme benzerlik gösterse de denizaltının türbini döndürmek için nükleer bir güce olan bağımlılığını önler. - Diğer AIP sistemlerle karşılaştırıldığında yüksek çıkış gücü sunmaktadır.	- Sistemi oluşturan komponentlerin oldukça karmaşık yapıda olmasından dolayı bakım onarım maliyetleri yüksektir., - Sistem hareketli parçalar içerdiğinden gürültü seviyesi yüksektir.
Stirling Motoru	- Diğer motorlara göre bakım masrafları daha azdır bakım sıklığı daha düşüktür. - Yakıt ve iç sistemleri daha basit olarak tasarlanmıştır. Oldukça düşük basınçta çalışabilirler ve bu özellikleri tipik buhar makinelerine göre daha fazla emniyet sağlar. - Sessiz, çevreye daha az zarar veren, yüksek verimli ve güvenilirler. Basit parçalardan oluşan yapıları ve yanma sistemleri sayesinde bu avantajları elde ederler. Ayrıca, titreşimi daha azdır ve patlama riski düşüktür. Bu motorlar aynı zamanda daha az yakıt tüketimi sağlama kabiliyetine sahiptirler.	- En büyük dezavantajı, çok sayıda hareketli parça bulunması nedeniyle Yakıt Hücrelerine kıyasla nispeten gürültülü olmalarıdır - Çalışma derinlikleri sınırlıdır.

SONUÇ

İkinci Dünya savaşından itibaren hız kazanarak devam eden, ülkeler arasındaki denizaltı teknolojileri alanındaki yarıştan doğan rekabet sonucu yeni teknolojiler geliştirilmiştir. Geliştirilen bu teknolojilerin çeşitli avantaj ve dezavantajları dolayısıyla hepsinin günümüze kadar aktif olarak denizaltılarda kullanılması mümkün olmamış bu teknolojilerin bir kısmı yetersizliklerinden dolayı günümüzde yerini farklı teknolojilere bırakmıştır.

Walter türbinleri ile başlayıp günümüzde Havadan Bağımsız Tahrik sistemleri ile devam eden denizaltılarda alternatif sevk sistemi teknolojileri dezavantajları karşılaştırıldığında; Walter Türbinlerinin çeşitli patlama riskleriyle karşı karşıya olduğu, nükleer güç sistemlerinin operasyon ve işletim risklerinin yüksek olması, dizel-elektrik sistemlerin belli aralıklarla oksijen almak için su yüzeyine çıkma zorunluluğu, Kapalı Devre Dizel çevriminin enerji veriminin düşük olması, Stirling Motorlarının ise hareketli parça içermesinden dolayı yüksek akustik iz değerlerine sahip olduğu sonuçlarına varılmıştır.

Tüm bu sistemler içerisinde Yakıt Pillerinin; düşük gürültü, yüksek enerji üretimi, hidrojen kaynaklı yakıt tüketimi ve emisyonu sebep olmaması nedenleriyle geleceğin Havadan Bağımsız Sevk Sistemi olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKÇA

Ådnanes, A. K. (2003). *Abb 2003-04-22*.

ALAGÖZ Zekariye (2009). YAKIT PİLLERİNİN DENİZALTI UYGULAMALARI YÜKSEK LİSANS TEZİ ENERJİ SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI TEZ DANIŞMANI.

Brighton, D. R., Mart, P. L., Clark, G. A., Science, D., & Organisation, T. (1994). *The use of fuel cells to enhance the underwater performance of conventional diesel electric submarines*. 51, 375–389.

Buckingham, J., Mimeche, C., Hardy, T., & Mimarest, C. (2008). Submarine Power and Propulsion – Application of Technology to Deliver Customer Benefit. UDT Europe 2008, (June), 1–17.

E.”Pete” Perez-Vergara, Jr. Commander, U. S. N. R., & A. (1999). *NAVAL WAR COLLEGE Newport, R.I. The Diesel-Electric Submarine Threat: Ignore, Engage or Avoid?*

Jaeyoung Han, Jaesu Han, Hyunjin Ji, 2020 “Model-based” design of thermal management system of a fuel cell “air-independent” propulsion system for underwater shipboard

International Journal of Hydrogen Energy Volume 45, Issue 56, 13 November 2020, Pages 32449-32463

Kerros -c Inizan -id Grousset, P. (n.d.). *MESMA AIP system for submarines DGA-DCN-INDKET FRANCE A h h d-=MA-0-work together for studying a MESMA version for conventional submarines*.

Lee, J.-C., & Shay, T. (2018). ANALYSIS OF FUEL CELL APPLIED FOR SUBMARINE AIR INDEPENDENT PROPULSION (AIP) SYSTEM. *Journal of Marine Science and Technology*, 26(5), 657–666. [https://doi.org/10.6119/JMST.201810_26\(5\).0005](https://doi.org/10.6119/JMST.201810_26(5).0005)

Mench M. 2008 Fuel Cell Engines Matthew M. Mench John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Nilsson, H. (n.d.). *Submarine power systems using the V4-275R Stirling engine*.

Oliveira Da Silva, A. (n.d.). *ANÁLISE TERMODINÂMICA DE CICLOS DE PROPULSÃO INDEPENDENTE DE AR PARA SUBMARINOS*.

Reader, G. T., & Hawley, J. G. (n.d.). *PROBLEMS ASSOCIATED WITH THE USE OF SYNTHETIC ATMOSPHERE DIESELS IN NAVAL SUBMARINES*.

Se, C. D., & Lus, M. E. T. (n.d.). SUBMARINE HYBRID PROPULSION SYSTEMS. In *Journal of Kones. Combustion Engines*.

STM 2021 STM Thinktech Teknolojik Düşünce Merkezi, Yeni Nesil Denizaltılarda Enerji Kaynakları Ve Batarya Sistemleri, Trend Analizi Mayıs 2021

WALTER, H. (1954). Experience with the Application of Hydrogen Peroxide for Production of Power. *Journal of Jet Propulsion*, 24(3), 166–171. <https://doi.org/10.2514/6.1954-166>

org/10.2514/8.6484

Whitman, E. C. (2013). *AIP-The Early History AIR-INDEPENDENT PROPULSION AIP Technology Creates a New Undersea Threat*. http://www.navy.mil/navydata/cno/n87/usw/issue_13/propulsion.htm

Williams, D., & Folbert, A. (n.d.). *Energy Considerations for a Long Range Diesel Electric Submarine*.

(Anonim 2022). <https://mavivatan.net/denizaltilar-ve-tahrik-sistemleri-3-nukleer-tahrikli-denizaltilar/> 06.07.2023 tarihinde erişildi.

(Anonim 2023) <https://www.thyssenkrupp-marinesystems.com/en/products-services/innovations/hdw-fuel-cell-aip-system> 09.08.23 tarihinde erişildi.

Tihonov, E., Bazykin, V., & Mukhanov, N. (2019). Opportunity of external combustion engines usage in forestry complex. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 316(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012072>

Bölüm 9

**MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMLERİ
KULLANARAK ORTA VE YÜKSEK GERİLİM
UYGULAMALARINDA KULLANILAN
XLPE İZOLELİ KABLOLARDA MEYDANA
GELEN ELEKTRİKSEL AĞAÇLANMA
UZUNLUKLARININ ANALİZİ**

Mustafa KARHAN¹

¹ Mustafa KARHAN, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Çankırı, Türkiye,
ORCID ID: 0000-0001-6747-8971, mustafakarhan@karatekin.edu.tr

1.GİRİŞ

Çapraz bağlı polietilen (XLPE), elektriksel, fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı orta ve yüksek gerilim kablolarında yaygın olarak kullanılan bir elektriksel yalıtım malzemesidir. Çapraz bağlı polietilen yalıtkanlı kablolar, bu üstün özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir (Al-Arainy v.d., 2007; Karhan, 2017; Malik v.d., 2012). Çapraz bağlı polietilen malzeme her ne kadar üst seviyede dielektrik özelliklere sahip olsa dahi hizmet süresi boyunca çalışma koşulları bakımından bazı yaşlanma olaylarının meydana gelmesi kaçınılmazdır. Çapraz bağlı polietilen malzemenin yaşlanmasında birçok faktör etkili olabilmektedir (Karhan, 2017; Karhan v.d., 2021).

Polimerik malzemelerin fiziksel ve/veya kimyasal yaşlanması kaçınılmaz bir durumdur. Yalıtkanlarda bir elektrik alanının varlığıyla başlayabilen ve büyüeyebilen elektriksel yaşlanma olayları meydana gelebilir. Polimerik yalıtkanlarda sulu ağaçlanma, elektriksel ağaçlanma ve dielektrik bozulma gibi üç ana yaşlanma süreci gözlemlenebilir. Bu olayların herhangi biri meydana gelmeden önce bile polimerik yalıtkanların elektriksel yaşlanmaya maruz kaldığı görülebilir (Lanca, 2002; Karhan v.d., 2021).

Elektriksel ağaçlanma, polimer bozulmasının yaygın bir şeklidir (Patsch, 1992; Danikas ve Tanaka, 2009; Wutzel v.d., 2015; Su v.d., 2020;). Yalıtkan malzemelerin hazırlanması sırasında ortaya çıkabilecek yabancı maddeler, kabarcıklar veya çapaklar, uygulanan bir elektrik alanı altında elektrik alan şiddetinin yoğunluğuna yatkındırlar (Varlow ve Auckland, 1996; Bozzo v.d., 1998; Chen ve Tham, 2009). Elektrik alan şiddeti belirli bir değere ulaştığında, kusurda kısmi deşarj meydana gelecek, bu da elektriksel ağaçlanmanın oluşmasına ve büyümesine yol açacak ve yalıtkan geri dönüşü olmayan hasara ve hatta ciddi durumlarda yalıtkan arızalarına neden olabilecektir (Xie v.d., 2009; Sun v.d., 2022).

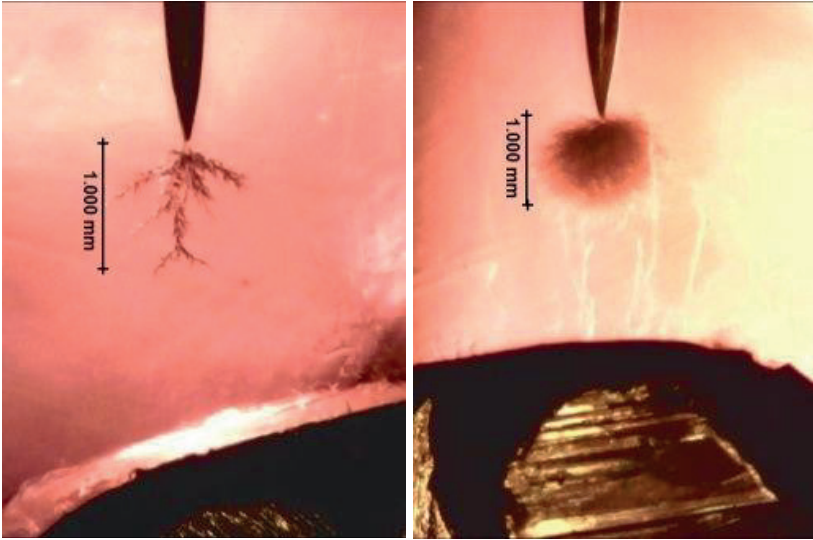
Yalıtkan yaşlanmasının hem nedeni hem de etkisi olan kısmi deşarj aktivitesi, dielektriğin bütünlüğünü giderek bozarak yalıtkan ömrünü ciddi anlamda azaltmaktadır (Montanari, 2008). Elektriksel ağaçlanma yüksek lokal gerilim olan bölgelerde başlayabilir, ancak sonunda büyüme durabilir ve süreç farklı aşamalarda çok sayıda ağaç oluşumu ile sonuçlanabilir (Kitchin ve Pratt, 1958). Elektriksel ağaçlanmanın büyümesi, gaz halindeki kanallar içinde oluşturulan basınç, saptanan kısmi deşarjların sayısı ve boşluk ucunun

yarıçapı ile ilişkilidir. Boşluk oluşumu aynı zamanda ağaçlanmada da etkin bir faktördür (Shibuya v.d., 1977; Laurent v.d., 1981).

Bu çalışmada elektriksel ağaçlanmada etkin birer parametre olan gerilim, frekans ve yaşlandırma süreleri verileri kullanılarak yüksek gerilim uygulamalarında meydana gelen önemli yaşlanma olaylarından biri olan elektriksel ağaçlanmanın analizine yönelik makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur.

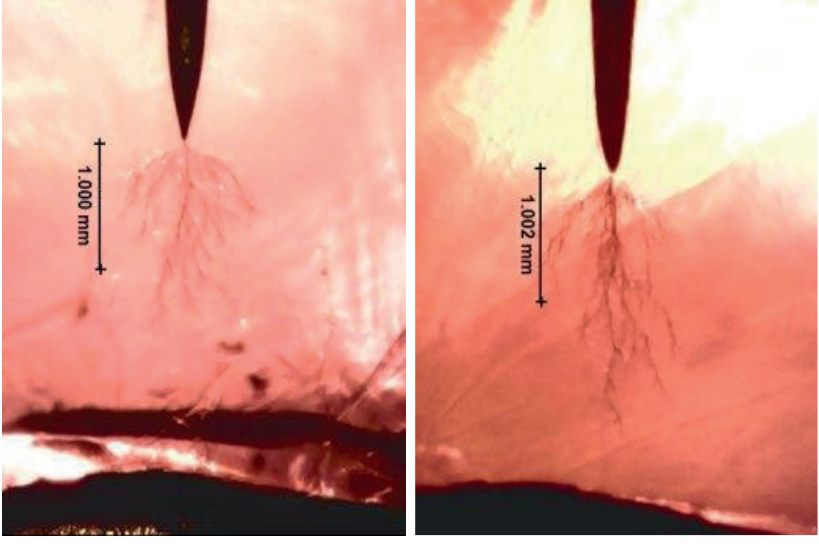
2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışma kapsamında, Thiamsri ve ark. (2011) tarafından yayımlanan ‘22 kV XLPE izoleli kablolarda uygulanan gerilim ve frekansın elektrik ağaçlanma üzerine etkisi’ adlı çalışmadaki elde edilen veriler kullanılmıştır. Elektriksel ağaçlanmada etkin birer parametre olan gerilim, frekans ve yaşlandırma sürelerinin dahil edildiği veriler kullanılmıştır. Thiamsri ve ark. (2011), elektriksel ağaçlanma oluşturmak için farklı yaşlandırma süreleri (t_{ageing}) için 50, 100, 500, 1000 ve 2000 Hz olmak üzere çeşitli frekanslarda 8 kV AC rms gerilim uygulamışlardır. Elde edilen elektriksel ağaçlanma mikroskop görüntülerinden ağaçlanma uzunluk ölçümleri yapmışlardır. Şekil 1’de farklı yaşlandırma süreleri ve farklı frekanslar için elde edilen elektriksel ağaçlanma mikroskop görüntülerine yer verilmiştir.



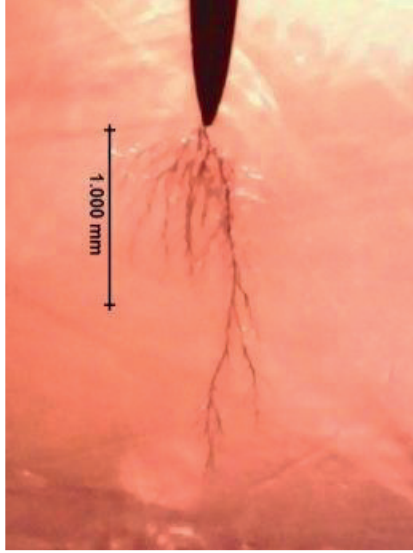
a)

b)



c)

d)

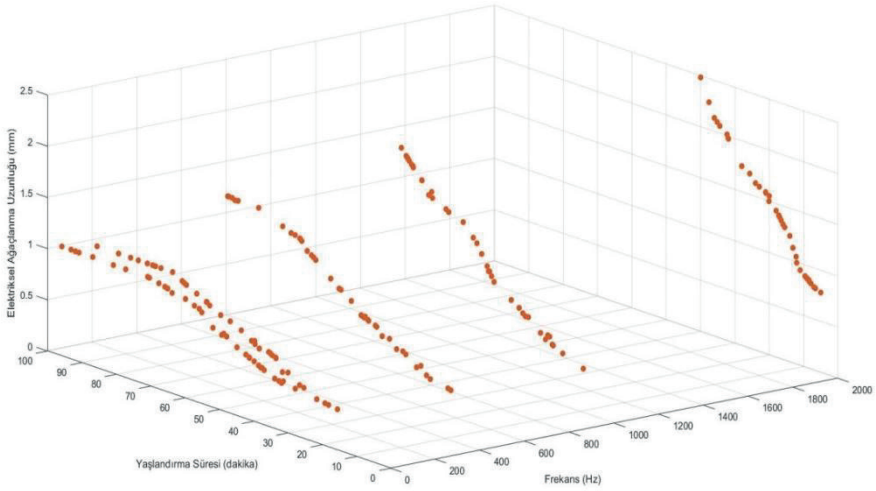


e)

Şekil 1. a) $f=50$ Hz & $t_{ageing}=99$ dk., b) $f=100$ Hz & $t_{ageing}=92$ dk., c) 500 Hz & $t_{ageing}=80$ dk., d) 1kHz & $t_{ageing}=62$ dk., e) 2 kHz & $t_{ageing}=40$ dk. için elde edilen elektriksel ağaçlanma mikroskop görüntüleri (Thiamsri v.d., 2011)

2.1. Veri Seti Düzenlenmesi ve Oluşturulması

50 Hz, 100 Hz, 500 Hz, 1kHz ve 2 kHz frekans ve farklı yaşlandırma süreleri için elde edilen elektriksel ağaçlanma mikroskop görüntülerinden ölçülen uzunluk değerleri makine öğrenmesi ve veri madenciliğinde etkin ve önemli veri ön işleme/örnekleme algoritmalarından biri olan Sentetik Azınlık Aşırı Örnekleme Tekniği (Synthetic Minority Over-sampling Technique - SMOTE) (Chawla v.d., 2002) yardımıyla arttırılmıştır. Toplamda 188 adet elektriksel ağaçlanma uzunluğu $0 < I. SINIF \leq 0,75$ mm, $0,75 < II. SINIF \leq 1,50$ mm ve $1,5 < III. SINIF \leq 2,50$ mm olmak üzere 3 farklı sınıfa ayrılmıştır. Şekil 2’de elektriksel ağaçlanma uzunluğunun yaşlandırma süresi ve frekansa bağlı olarak saçılım grafiğine yer verilmiştir.



Şekil 2. Elektriksel ağaçlanma uzunluğu saçılım grafiği

2.2. Makine Öğrenmesi

Bu bölümde elektriksel ağaçlanma uzunluklarının sınıflandırılmasına yönelik kullanılan makine öğrenmesi algoritmalarından bahsedilmiştir.

Sınıflandırma ve regresyon uygulamalarında kullanılan k-en yakın komşu (K-Nearest Neighbor, k-NN) algoritması, makine öğrenmesi tabanlı sınıflandırma yaklaşımlarından birisidir (Temiz, 2022). Sınıf bilgisinin belli olduğu veri setine, yeni bir verinin eklenmesiyle bu yeni verinin hangi sınıfa

ait olduğunun tespiti için kullanılan bir algoritmadır (Cover ve Hart, 1967; Temiz, 2022). Yeni verinin veri setindeki diğer verilere olan uzaklığını (Öklid, Manhattan, Chebyshev, Minkowski vb. uzaklık ölçütleri) hesaplayarak sınıf bilgisine ulaşmayı sağlamaktadır (Temiz, 2022).

Denetimli bir sınıflandırma yöntemi olan Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines – SVM) istatistiksel tabanlı bir öğrenme yaklaşımıdır. Eğitim safhasında, eğitim veri setindeki veri ve etiketler arasındaki ilişkiyi öğrenmektedir. SVM, sınıflandırılacak gruplar arasına bir ayırma çizgisi tanımlayıp çizerek grupları ayırt etmektedir (Ay ve Yolaçan, 2022; Temiz, 2022). SVM, farklı sınıflar altında bulunan örnekleri ayıran bir ayırma çizgisini tanımlamaya çalışan bir yöntemdir (Ay ve Yolaçan, 2022).

Temelinde olasılık hesaplama bulunan Naive Bayes (NB) algoritmasının karar mekanizması, sınıflandırma aşamasında meydana gelen hataları minimize etmeyi hedeflemektedir. Bu işlemi, sınıflandırılacak veri ile ilgili ön-bilgisi olması hasebiyle yapabilmektedir. Her olasılık hesabında, verileri pek çok kez taramaktadır. Naive Bayes algoritmasının temel olarak çalışma mantığı bir ihtimalin olması durumunda diğer ihtimalin olma olasılığını hesaplamaktadır (Temiz, 2022). Basit bir yapıya sahip olmakla beraber doğruluğu yüksek bir sınıflandırıcı olduğundan birçok alanda tercih edilen bir algoritmadır (Onan ve Korukoğlu, 2016; Uslu ve Akyol, 2021)

Rastgele orman algoritması, Breiman (2001), (Random Forest), yapısında birden fazla karar ağacı bulundurmaktadır. Her bir karar ağacı için n boyutlu eğitim veri kümesinden, n tane eleman yinelemeli seçilir dolayısıyla orijinal eğitim veri kümesinden farklı bir küme ortaya çıkarak, her bir karar ağacı bir tahminde bulunur. Tahminler arasından en yüksek üretilen sonuç tercih edilmektedir (Ay ve Yolaçan, 2022).

Çok Katmanlı Algılayıcı (Multilayer Perceptron - MLP) algoritması girdi, gizli ve çıkış katmanlarından oluşmaktadır. En popüler sinir ağı mimarileri arasında yer alan MLP temel bir sinir ağı ve denetimli öğrenme algoritmasıdır (Baydoğan ve Alataş, 2021). Girdi ve çıktı katmanlarının arasında bulunan gizli katmanın sayısı birden fazla bulunabilir.

2.3. Performans Ölçüm Metrikleri

Elektriksel ağaçlanma uzunluklarının sınıflandırılmasına yönelik performans çıktıları incelenirken birkaç metrik üzerinde durulmuştur.

Sınıflandırma konusunda literatürde de sıklıkla esas alınan ölçütler olan doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), F1-ölçüm ve ROC eğrisi altında kalan alan (Area Under Curve-AUC) değerleridir. ROC eğrisinde, y-ekseni TP_Oranını, x-ekseni FP_Oranı temsil etmektedir. Bu çalışmada kullanılan metriklerin formülleri Eş. 1,2,3,4,5 ve 6'da verilmiştir. Performans ölçüm metrikleri hesaplanmasında kullanılan karmaşıklık matrisi Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. *Karmaşıklık matrisi*

	Tahmin Edilen Değerler	
	Doğru Pozitif (TP)	Yanlış Negatif (FN)
Gerçek Değerler	Yanlış Pozitif (FP)	Doğru Negatif (TN)

$$\text{Doğruluk (Accuracy)} = \frac{\sum(TP + TN)}{\sum(TP + TN + FP + FN)} \quad (1)$$

$$\text{Kesinlik (Precision)} = \frac{\sum(TP)}{\sum(TP + FP)} \quad (2)$$

$$\text{Hassasiyet (Recall)} = \frac{\sum(TP)}{\sum(TP + FN)} \quad (3)$$

$$\text{F1_Ölçüm} = \frac{2 \times (\text{kesinlik} \times \text{hassasiyet})}{\text{kesinlik} + \text{hassasiyet}} \quad (4)$$

$$\text{TP_Oranı} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

$$\text{FP_Oranı} = \frac{FP}{FP + TN} \quad (6)$$

3. BULGULAR

Elektriksel ağaçlanma uzunluklarının sınıflandırılması işlemi için eğitim ve test verilerinin belirlenmesinde veri kümesinin k sayıda eşit boyutlu

parçalara ayrıldığı k-katlamalı çapraz doğrulama (K-fold Cross Validation) yöntemi kullanılmıştır. Tablo 2’de sınıflandırma sonuçları k-katlamalı çapraz doğrulama (5-fold Cross Validation) değerlendirme yöntemi kullanılarak gösterilmiştir. Değerlendirme ölçütlerine göre sınıflandırma doğruluk değerleri sırasıyla SVM, Random Forest, k-NN, Neural Network ve Naive Bayes yöntemleri için elde edilmiştir. Sunulan bu çalışmada sinir ağı tabanlı sınıflandırma işleminde geri-yayılım (backpropagation) algoritması ile çalıştırılan Çok Katmanlı Algılayıcı Sinir Ağı (Multilayer Perceptron Neural Network) kullanılmıştır. Neural Network algoritmasında gizli katmanda 100 nöron kullanılmış ve iterasyon sayısı da 200 olarak belirlenmiştir. k-NN’de Öklid uzaklığı seçilmiş ve komşuluk değeri de 3 olarak belirlenmiştir. Kullanılan makine öğrenmesi yöntemlerinin değerlendirilmesinde en yüksek doğruluk değeri %98,9 ile SVM, en düşük doğruluk değeri %88,3 ile Naive Bayes için elde edilmiştir.

Tablo 2. *Elektriksel ağaçlanma uzunluklarının sınıflandırma sonuçları (5-fold cross validation)*

Model	AUC	Doğruluk	F1	Kesinlik	Hassasiyet
k-NN	0,991	0,984	0,984	0,984	0,984
Naive Bayes	0,976	0,883	0,884	0,893	0,883
Neural Network	0,992	0,941	0,942	0,944	0,941
Random Forest	0,999	0,984	0,984	0,984	0,984
SVM	0,999	0,989	0,989	0,989	0,989

Tablo 3’te sınıflandırma sonuçları k-katlamalı çapraz doğrulama (10-fold Cross Validation) değerlendirme yöntemi kullanılarak gösterilmiştir. Değerlendirme ölçütlerine göre sınıflandırma doğruluk değerleri sırasıyla SVM, Random Forest, k-NN, Neural Network ve Naive Bayes yöntemleri için elde edilmiştir. Kullanılan makine öğrenmesi yöntemlerinin değerlendirilmesinde en yüksek doğruluk değeri %98,9 ile SVM, en düşük doğruluk değeri %90,4 ile Naive Bayes için elde edilmiştir.

Tablo 3. *Elektriksel ağaçlanma uzunluklarının sınıflandırma sonuçları (10-fold cross validation)*

Model	AUC	Doğruluk	F1	Kesinlik	Hassasiyet
k-NN	0,991	0,984	0,984	0,984	0,984
Naive Bayes	0,977	0,904	0,905	0,913	0,904
Neural Network	0,993	0,941	0,942	0,944	0,941
Random Forest	0,999	0,973	0,973	0,974	0,973
SVM	0,999	0,989	0,989	0,989	0,989

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, Thiamsri ve ark. (2011) tarafından yayımlanan ‘22 kV XLPE izoleli kablolarda uygulanan gerilim ve frekansın elektrik ağaçlanma üzerine etkisi’ adlı çalışmadaki elde edilen veriler kullanılmıştır. Elektriksel ağaçlanmada etkin birer parametre olan gerilim, frekans ve yaşlandırma sürelerinin dahil edildiği veriler kullanılmıştır. Makine öğrenmesi ve veri madenciliğinde etkin ve önemli veri ön işleme/örnekleme algoritmalarından biri olan SMOTE yöntemi kullanılarak veri arttırılmıştır. Elektriksel ağaçlanma uzunlukları 0-0,75 (mm), 0,75-1,50 (mm) ve 1,5-2,50 (mm) arası olmak üzere 3 sınıfa ayrılmıştır. Elektriksel ağaçlanma uzunluklarının sınıflandırma işleminde SVM, Random Forest, k-NN, Neural Network ve Naive Bayes yöntemleri kullanılmıştır.

Değerlendirme ölçütlerine göre en yüksek başarımlı oranı SVM için elde edilmiştir. Sınıflandırma için kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri arasında en yüksek doğruluk değeri %98,9 (5-fold Cross Validation & 10-fold Cross Validation) ile SVM, en düşük doğruluk değeri %88,3 (5-fold Cross Validation) ve %90,4 (10-fold Cross Validation) ile Naive Bayes için elde edilmiştir. Yapılan bu çalışma ile yüksek gerilim uygulamalarında meydana gelen yaşlanma olaylarından biri olan elektriksel ağaçlanmanın analizine yönelik makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur. Bu bağlamda elektriksel ağaçlanma uzunluğunun uygulanan frekans ve yaşlandırma süresine bağlı olarak analizi gerçekleştirilebilecektir.

KAYNAKÇA

- Al-Arainy, A., Malik, N. H., Qureshi, M. I., & Al-Saati, M. N. (2007). The performance of strippable and bonded screened medium-voltage XLPE-insulated cables under long-term accelerated aging. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(2), 744-751.
- Ay, A.K., & Yolaçan, E. (2022). Yeniden Örneklemeye Metotlarının Kredi Kartı Sahtecilik Tespiti için Topluluk Öğrenmesine Kapsamlı Analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(5), 1005-1015.
- Baydoğan, V. C., & Alataş, B. (2021). Çevrimiçi Sosyal Ağlarda Nefret Söylemi Tespiti için Yapay Zeka Temelli Algoritmaların Performans Değerlendirmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(2), 745-754.
- Bozzo, R., Guastavino, F., Montanari, G. C. (1998). Electrical tree tests. Probabilistic inference and insulating material evaluation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 5(5), 734-740.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45, 5-32.
- Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. *Journal of artificial intelligence research*, 16, 321-357.
- Chen, G., & Tham, C. H. (2009). Electrical treeing characteristics in XLPE power cable insulation in frequency range between 20 and 500 Hz. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 16(1), 179-188.
- Cover, T., & Hart, P. (1967). Nearest neighbor pattern classification. *IEEE transactions on information theory*, 13(1), 21-27.
- Danikas, M. G., & Tanaka, T. (2009). Nanocomposites-a review of electrical treeing and breakdown. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 25(4), 19-25.
- Karhan, M., (2017). Yüksek gerilim dağıtım kablolarındaki su ağacı olayının görüntü işleme teknikleriyle incelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- Karhan, M., Çakır, M. F., & Uğur, M. (2021). A new approach to the analysis of water treeing using feature extraction of vented type water tree images. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 16, 1241-1252.
- Kitchin, D. W., Pratt, O. S. (1958). Treeing in Polyethylene as a Prelude to Breakdown. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 77(3), 180-185.
- Lanca M.C. (2002). Electrical ageing studies of polymeric insulation for power cables. Thesis (PhD), Universidade Nova De Lisboa.
- Laurent, C., Mayoux, C., Sergeant, A. (1981). Electrical breakdown due to discharges in different types of insulation. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, (1), 52-58.
- Malik, N. H., Qureshi, M. I., Al-Arainy, A. A., Saati, M. N., Al-Natheer, O. A., & Anam, S. (2012). Performance of water tight cables produced in Saudi Arabia

- under accelerated aging. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19(2), 490-497.
- Montanari, G. C. (2008). Envisaging links between fundamental research in electrical insulation and electrical asset management. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 24(6), 7-21.
- Onan, A., & Korukoğlu, S. (2016). Metin sınıflandırmada öznitelik seçim yöntemlerinin değerlendirilmesi. *Akademik Bilişim*.
- Patsch, R. (1992). Electrical and water treeing: a chairman's view. *IEEE transactions on electrical insulation*, 27(3), 532-542.
- Shibuya, Y., Zoledziowski, S., Calderwood, J. H. (1977). Void formation and electrical breakdown in epoxy resin. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 96(1), 198-207.
- Su, J., Du, B., Li, J., & Li, Z. (2020). Electrical tree degradation in high-voltage cable insulation: progress and challenges. *High Voltage*, 5(4), 353-364.
- Sun, W., Zhang, L., Liang, Y., Xu, J., Gao, Y., Luo, J., & Cheng, Y. (2022). Mechanically robust epoxy with electrical breakdown healing capability for power equipment insulation via dynamic networks. *Reactive and Functional Polymers*, 176, 105307.
- Temiz, C.T. (2022).Yüksek Benzerlikli Nesnelerin Makine Öğrenmesi Tabanlı Sınıflandırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi.
- Thiamsri, R., Ruangakajonmathee, N., & Marungsri, A. O. B. (2011). Effect of applied voltage frequency on electrical treeing in 22 kV cross-linked polyethylene insulated cable. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 5(12), 1904-1909.
- Uslu, O., & Akyol, S. (2021). Türkçe Haber Metinlerinin Makine Öğrenmesi Yöntemleri Kullanılarak Sınıflandırılması. *Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi*, 2(1), 15-20.
- Varlow, B. R., & Auckland, D. W. (1996). Mechanical aspects of electrical treeing in solid insulation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 12(2), 21-26.
- Wutzel, H., Jarvid, M., Bjuggren, J. M., Johansson, A., Englund, V., Gubanski, S., & Andersson, M. R. (2015). Thioxanthone derivatives as stabilizers against electrical breakdown in cross-linked polyethylene for high voltage cable applications. *Polymer degradation and stability*, 112, 63-69.
- Xie, A., Li, S., Zheng, X., & Chen, G. (2009). The characteristics of electrical trees in the inner and outer layers of different voltage rating XLPE cable insulation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(12), 125106.