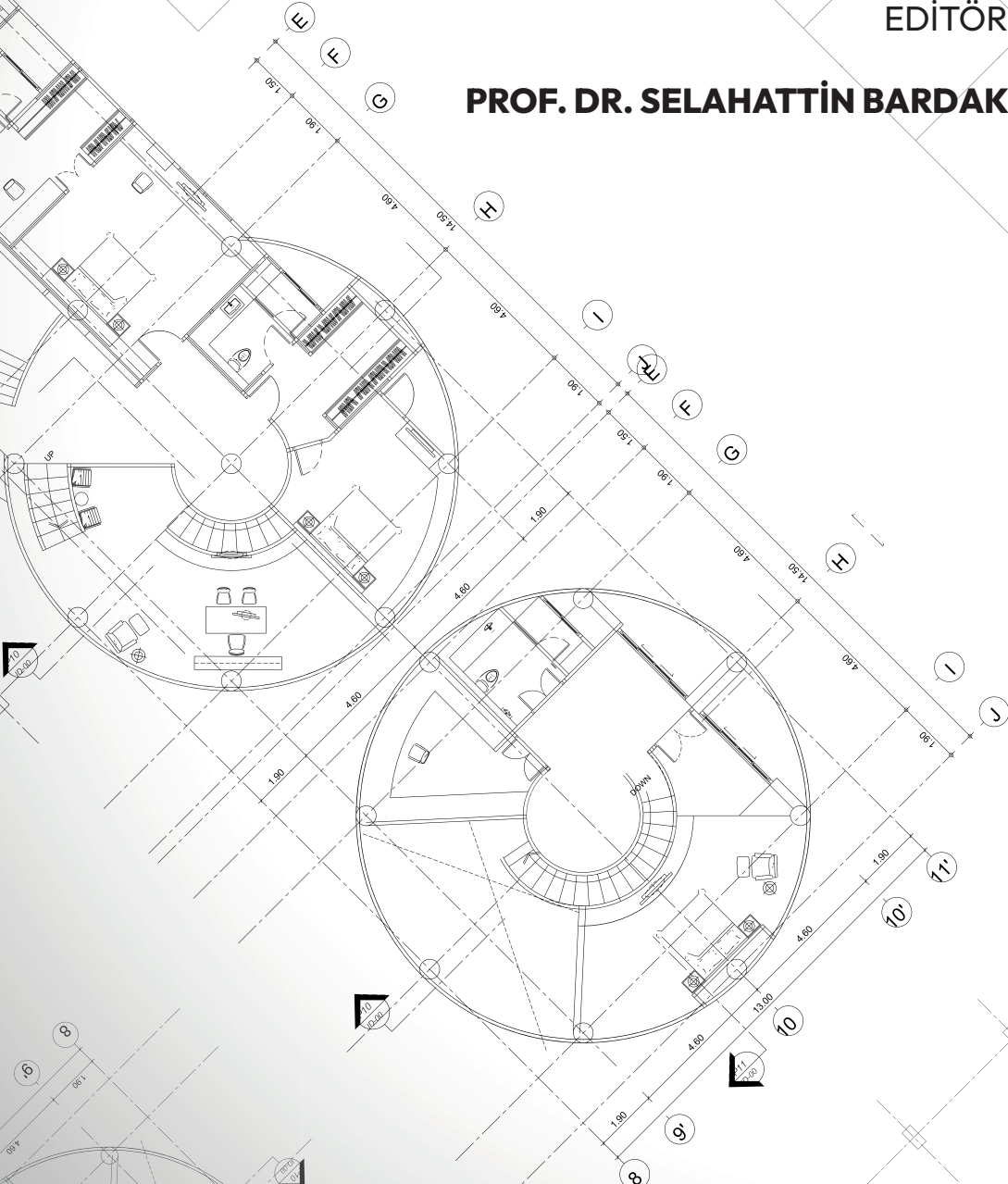


# MÜHENDİSLİK ALANINDA ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

EDİTÖR

PROF. 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 • © MART 2026**

**ISBN • 978-625-8559-75-0**

**© 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.seruyenyayinevi.com](http://www.seruyenyayinevi.com)

**e-mail:** [seruyenyayinevi@gmail.com](mailto:seruyenyayinevi@gmail.com)

**Baskı & Cilt / Printing & Volume**

Sertifika / Certificate No: 47083

# MÜHENDİSLİK ALANINDA ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

EDİTÖR

**PROF. DR. SELAHATTİN BARDAK**



## İÇİNDEKİLER

### BÖLÜM 1

#### SİBER GÜVENLİKTE CVE ÖNCELİKLENDİRMESİ İÇİN RASTGELE ORMAN ALGORİTMASI TABANLI MAKİNE ÖĞRENMESİ YAKLAŞIMI

*Coşkun KUTLUAY* ..... 1

### BÖLÜM 2

#### KÜLTİK KABUĞUNDAKİ DPPH TEMİZLEME AKTİVİTE VE TOPLAM FENOLİK MADDE MİKTARLARININ BELİRLENMESİ VE KARŞILAŞTIRILMALI BİR DEĞERLENDİRİLMESİ

*Çağlar Mert AYDIN* ..... 11

### BÖLÜM 3

#### AĞIRLIK DENGESİ OPTİMİZASYONUNUN UÇUŞ PERFORMANSI VE YAKIT VERİMLİLİĞİNE ETKİSİ

*Hamza CEYLAN* ..... 23

*Eren SEZER* ..... 23

### BÖLÜM 4

#### MANYETO-REOLOJİK FREN SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

*Hasan ÖKTEM* ..... 41

*Nazım İMAL* ..... 41

### BÖLÜM 5

#### SÜT REÇELİ (DULCE DE LECHE): ÜRETİM TEKNOLOJİSİ, KALİTE PARAMETRELERİ VE GÜNCEL GELİŞMELER

*Şenol KÖSE* ..... 55

*İbrahim ALTUN* ..... 55

## BÖLÜM 6

### JEOTEKNİK VE MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ UYGULAMALARINDA KÜTLE HAREKETLERİNİN VE YER ALTI DEFORMASYONLARININ İNKLINOMETRE TABANLI İZLENMESİ VE ANALİZİ

*Veli KESKİN* ..... 69

## BÖLÜM 7

### İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANILAN HAVA FİLTRELERİNİN ÖZELLİKLERİ, FİLTRASYON VE MOTORDAKİ ETKİLERİ

*Dinçer Akal*..... 95



**Bölüm**

**1**

**SİBER GÜVENLİKTE CVE  
ÖNCELİKLENDİRMESİ  
İÇİN RASTGELE ORMAN  
ALGORİTMASI TABANLI  
MAKİNE ÖĞRENMESİ  
YAKLAŞIMI**

“

”

*Coşkun KUTLUAY<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Öğretim Görevlisi, İstinye Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Bilişim Güvenliği Teknolojisi Programı, coskun.kutluay@istinye.edu.tr, ORCID ID: 0009-0003-7522-413X

## 1.GİRİŞ

Siber güvenlik, dijitalleşmenin hızla ilerlediği günümüzde bilgi sistemlerinin ve ağ altyapılarının korunması için vazgeçilmez bir alan haline gelmiştir. İnternet tabanlı saldırıların artması, zararlı yazılımlar, fidye yazılımları ve hedefli saldırılar gibi tehditlerin çeşitlenmesi, güvenlik çözümlerinin karmaşıklığını artırmaktadır. Bu bağlamda, yazılım ve sistemlerdeki zafiyetlerin (vulnerabilities) hızlı, doğru ve etkili bir şekilde tespit edilip önceliklendirilmesi, güvenlik uzmanlarının siber tehditlere karşı proaktif tedbirler alabilmesi için kritik öneme sahiptir.

Ulusal Zafiyet Veri tabanı (National Vulnerability Database- NVD), dünya genelinde yaygın olarak kullanılan ve düzenli olarak güncellenen bir veri kaynağıdır. NVD, Common Vulnerabilities and Exposures (CVE) standartlarına uygun olarak zafiyetlerin kimliklendirilmesini ve tanımlanmasını sağlar. Ayrıca, Common Vulnerability Scoring System (CVSS) aracılığıyla zafiyetlerin temel, istismar ve etki puanlarını hesaplayarak, zafiyetlerin risk seviyelerine göre derecelendirilmesini mümkün kılar. Ancak, NVD'deki veri hacmi ve çeşitliliği göz önüne alındığında, manuel değerlendirme ve analiz süreçleri oldukça zorlaşmakta, bu nedenle otomatik analiz ve önceliklendirme yöntemlerine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır.

Makine öğrenmesi, büyük ve karmaşık veri kümeleri üzerinde örüntü tanıma, sınıflandırma ve tahmin yapma yetenekleri ile siber güvenlik alanında önemli bir çözüm sunmaktadır. Özellikle sınıflandırma algoritmaları, CVE verilerinden elde edilen sayısal ve metinsel özelliklerin analizinde etkin şekilde kullanılmaktadır. Rastgele Orman Algoritması, birçok karar ağacının bir araya gelmesiyle oluşturulan bir ansamble yöntemi olarak yüksek doğruluk, aşırı öğrenmenin engellenmesi ve özelliklerin etkili kullanımı gibi avantajlar sağlamaktadır (Breiman, 2001). Bu özellikleri sayesinde, siber güvenlikte zafiyet önceliklendirmesi için yaygın bir yöntem haline gelmiştir.

Bu çalışmada, NVD'den elde edilen CVE verileri üzerinde Rastgele Orman Algoritması uygulanarak, zafiyetlerin kritik, yüksek, orta ve düşük öncelik kategorilerine ayrılması hedeflenmiştir. Açıklama metinleri TF-IDF yöntemi ile sayısallaştırılmış, CVSS temel puanı, istismar puanı ve etki puanı gibi sayısal özellikler modelde birlikte değerlendirilmiştir. Literatürde benzer yöntemler kullanılmış olsa da bu çalışma NVD 2.0 veri yapısının sunduğu yeni özellikleri kapsamlı biçimde değerlendirerek alana katkı sağlamayı amaçlamaktadır (Bozorgi et al., 2010; Sabottke et al., 2015). Ayrıca, Ulusal Zafiyet Veritabanı (NVD) üzerinden elde edilen Common Vulnerabilities and Exposures (CVE) verileri kullanılarak yazılım zafiyetlerinin otomatik biçimde önceliklendirilmesini amaçlamaktadır. Model performansı çapraz doğrulama ve sınıflandırma raporları ile detaylı biçimde analiz edilmiştir. Çalışma hem metinsel hem de sayısal özelliklerin birlikte değerlendirilmesinin zafiyet

önceliklendirme performansını artırdığını göstermekte, aynı zamanda NVD 2.0 veri yapısının sunduğu zengin içerik ile makine öğrenmesi tabanlı siber güvenlik uygulamalarına katkı sunmaktadır.

### **1.1.Siber Güvenlikte Cve Önceliklendirmesi İçin Rastgele Orman Algoritması Yaklaşımı: Ampirik Literatür Taraması**

Zafiyet önceliklendirme alanında makine öğrenmesi kullanımı, son yıllarda yoğun şekilde araştırılmıştır. Bozorgi ve arkadaşları (2010), zafiyetlerin sınıflandırılması ve istismar edilebilirlik tahmini üzerine kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, özellik çıkarımı ve makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak zafiyetlerin başarılı biçimde sınıflandırılabileceği gösterilmiştir. Benzer şekilde Sabottke ve arkadaşları (2015), sosyal medya verilerini de kullanarak zafiyetlerin istismar edilme olasılığını tahmin etmiş ve erken uyarı sistemleri için değerli veriler sunmuştur.

Rastgele Orman Algoritması, özellikle yüksek boyutlu veri setlerinde etkinliğini kanıtlamıştır. Breiman (2001) tarafından önerilen bu algoritma, birden fazla karar ağacının çıktısını birleştirerek daha stabil ve genelleştirilebilir sonuçlar elde eder. Wang ve arkadaşları (2019) ise makine öğrenmesinin otomatik zafiyet değerlendirme süreçlerinde kullanılmasına dair sistematik bir inceleme yapmış, Rastgele Orman Algoritmasının doğruluk ve hata toleransı açısından ön plana çıktığını belirtmiştir.

CVSS puanlama sisteminin zafiyet önceliklendirmede temel bir referans olduğu literatürde genişçe kabul görmektedir (Mell et al., 2007). Ancak CVSS puanlarının yanı sıra, açıklama metinlerinden elde edilen madencilik tabanlı özelliklerin sınıflandırma başarısını artırdığı görülmüştür. Allodi ve Massacci (2014) tarafından yapılan çalışmada, CVSS puanlarının yanı sıra, zafiyet açıklamalarının ve diğer meta verilerin sınıflandırma ve tahmin modellerinde kullanılmasının etkinliği doğrulanmıştır. Bu bağlamda, CVE verilerinin kapsamlı şekilde incelenip, metin ve sayısal özelliklerin birlikte kullanılması, siber güvenlikte zafiyet önceliklendirme çalışmalarına önemli katkılar sağlamaktadır.

### **1.2.Rastgele Orman Algoritması**

Rastgele Orman (Random Forest) Algoritması, sınıflandırma ve regresyon problemleri için sıkça tercih edilen, topluluk (ensemble) öğrenmeye dayalı güçlü bir makine öğrenmesi yöntemidir. Algoritma, farklı alt veri kümeleri ve rastgele seçilmiş özellik alt uzayları üzerinde eğitilen çok sayıda karar ağacının çıktılarını birleştirerek genelleme hatasını azaltmayı amaçlar (Breiman, 2001). Modeldeki ağaçlar arasındaki çeşitliliği artırmak ve aşırı öğrenmeyi önlemek amacıyla rastgele alt uzay yaklaşımı uygulanır (Ho, 1995). Rastgele Orman Algoritması, özellikle yüksek boyutlu, karmaşık ve dengesiz veri setlerinde yüksek doğruluk, düşük varyans ve güçlü genelleme kapasitesi ile öne

çıkılmaktadır (Rodríguez-Galiano et al., 2012). Sınıflandırma problemlerinde temel çalışma prensibi çoğunluk oylaması ilkesine dayanmaktadır. Her bir karar ağacı gözlem için yeni sınıf tahmini üretilir. Sınıf modelinin içerisinde en fazla oyu alan nihai tahmin olarak kabul edilmektedir. Her ağacın ürettiği tahminlerin ortalaması alınarak regresyon problemlerinde sonuç elde edilir. Böylelikle tek bir modelden kaynaklanabilecek hataların sapmaları azaltılarak güvenilir tahminler üretilmektedir

(James , Witten , Hastie, & Tibshirani, 2021).

Farklı sınıflandırma algoritmalarının karşılaştırıldığı kapsamlı bir çalışmada, Rastgele Orman Algoritması birçok gerçek dünya veri kümesinde en yüksek doğruluk oranlarına ulaşarak en başarılı yöntemlerden biri olarak değerlendirilmiştir (Fernández-Delgado et al., 2014). Ancak modelin karar mekanizmasının açıklana bilirliğinin sınırlı olması ve büyük ağaç sayılarında artan hesaplama maliyeti gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır (Biau, 2012). Siber güvenlik alanında yapılan araştırmalar, bu algoritmanın ağ saldırısı tespiti, kötü amaçlı yazılım analizi ve zafiyet önceliklendirme gibi uygulamalarda yüksek performans gösterdiğini ortaya koymaktadır (Ucci, Aniello, & Baldoni, 2019). Ayrıca, metinsel ve sayısal verilerin birlikte işlenmesine olanak tanıyan esnek yapısı sayesinde, CVE açıklamaları ile CVSS skorlarının birlikte analiz edilmesinde etkili sonuçlar sunmaktadır. Rastgele orman algoritmasının en önemli avantajlarından biri de yüksek boyutlu veri setleriyle verimli ve uyumlu bir biçimde çalışabilmesidir. Aşırı uyum riskine ise görece bir şekilde düşük seviyelere indirebilmesidir. Bu bağlamda, çalışmamızda kullanılan Rastgele Orman Algoritması hem metin madenciliği hem de sayısal özellik mühendisliği yaklaşımlarını birleştirerek yazılım zafiyetlerinin otomatik biçimde önceliklendirilmesinde yüksek doğrulukla çalışmıştır.

## 2. BULGULAR

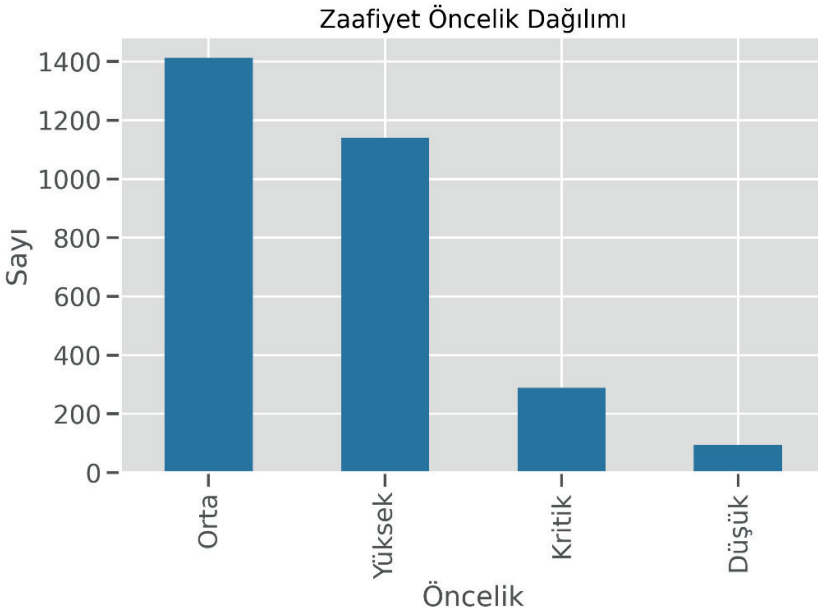
Bu çalışmada zafiyetlerin öncelik seviyelerini tahmin etmek amacıyla makine öğrenmesi yaklaşımı kullanılmış ve sınıflandırıcı olarak Rastgele Orman algoritması tercih edilmiştir. Rastgele Orman yöntemi, birden fazla karar ağacının birlikte çalışması prensibine dayanmakta olup karmaşık veri yapılarında yüksek doğruluk ve güçlü genelleme performansı sunması nedeniyle siber güvenlik alanındaki sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Modelin eğitimi için veri seti %80 eğitim ve %20 test olarak bölünmüş olup, 5 katlı çapraz doğrulama ile model performansı doğrulanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan veri seti, Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü'nün (NIST) Ulusal Zafiyet Veritabanı (National Vulnerability Database-NVD) tarafından sağlanan Common Vulnerabilities and Exposures (CVE) kayıtlarından elde edilmiştir. NVD, siber güvenlik alanında dünya genelinde kabul gören ve CVE kayıtlarını standardize edilmiş biçimde sunan en kap-

samlı ve güncel veri kaynaklarından biridir. Veri seti, 2.0 JSON formatında sağlanmış ve her bir CVE kaydı; zafiyetin kimliği, detaylı açıklaması, çeşitli meta veriler ve Common Vulnerability Scoring System (CVSS) sürüm 3.1 temelinde değerlendirme puanlarını içermektedir.

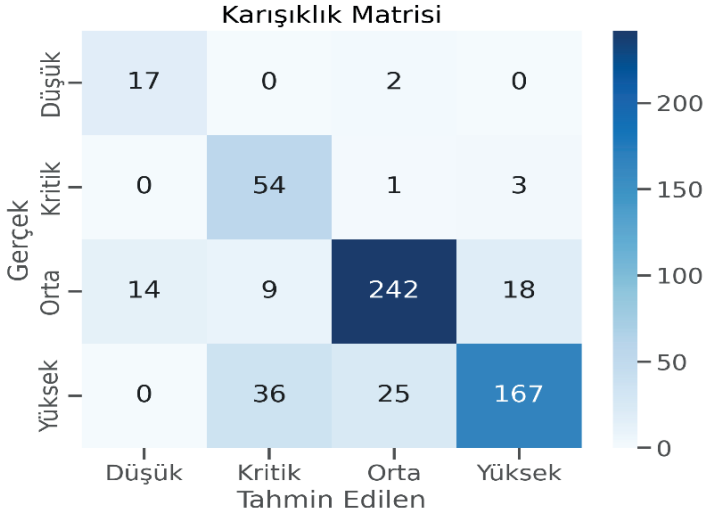
Çalışmada, zafiyetlerin önem dereceleri CVSS temel puanı esas alınarak dört farklı kategoriye ayrılmıştır. Buna göre CVSS temel puanı 9.0 ve üzeri olan zafiyetler kritik, 7.0-8.9 aralığında olanlar yüksek, 4.0-6.9 aralığında olanlar orta ve 4.0'ın altında kalanlar ise düşük öncelik sınıfına dahil edilmiştir. Veri seti incelendiğinde bazı verilerde eksik değerler bulunduğu görülmüş olup bu eksik verilerin modele etkisini önlemek amacıyla ilgili satırlar veri setinden çıkarılmıştır. Böylelikle model eğitiminde yalnızca tam ve tutarlı veri içeren kayıtlar kullanılmıştır.

Modelde kullanılan özellikler hem sayısal hem de metinsel verilerden oluşmaktadır. Sayısal özellikler arasında CVSS temel puanı, istismar edilebilirlik puanı ve etki puanı gibi risk değerlendirme metrikleri yer almaktadır. Bunun yanında zafiyet açıklamalarından elde edilen metinsel veriler TF-IDF yöntemi ile sayısal vektörlere dönüştürülmüş ve bu özellikler sayısal metriklerle birleştirilerek nihai özellik matrisi oluşturulmuştur. Bu yaklaşım sayesinde model yalnızca puanlara dayalı risk değerlendirmesi yapmakla kalmamış, aynı zamanda zafiyet açıklamalarında geçen önemli terimleri de dikkate alarak daha kapsamlı bir analiz gerçekleştirmiştir.



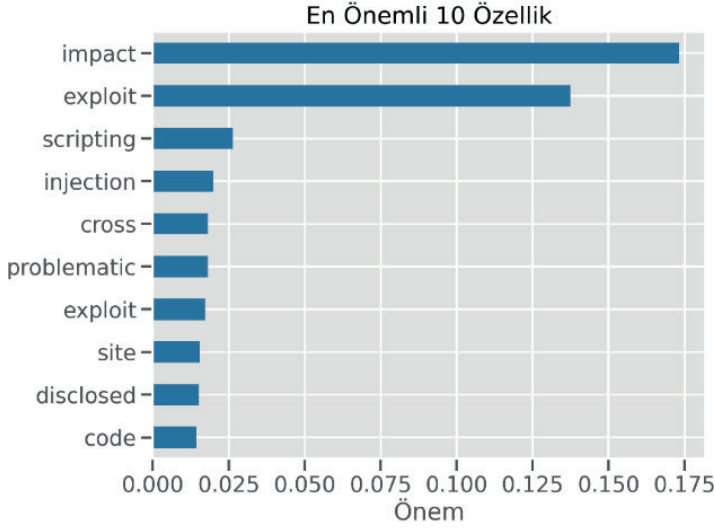
*Tablo 2.1. Zafiyet Öncelik Dağılımı*

Tablo 2.1.Zafiyet Öncelik Dağılımı incelendiğinde veri setinde orta ve yüksek öncelikli zafiyetlerin diğer kategorilere kıyasla daha fazla sayıda olduğu görülmektedir. Buna karşılık düşük ve kritik seviyedeki zafiyetlerin görece olarak az sayıda olması veri setinin sınıf dağılımında belirli bir dengesiz bulunduğunu göstermektedir. Bu durum özellikle kritik seviyedeki zafiyetlerin doğru tespit edilmesini daha önemli hale getirmektedir.



Tablo 2.2. Karışıklık Matrisi

Tablo 2.2. Karışıklık Matrisi incelendiğinde modelin en başarılı olduğu sınıfın orta öncelik kategorisi olduğu görülmektedir. Bu sınıfta yer alan zafiyetlerin büyük bölümü doğru şekilde sınıflandırılmıştır. Bununla beraber bazı orta seviyedeki zafiyetlerin yüksek veya kritik kategorisine yanlış atandığı gözlemlenmektedir. Aynı şekilde yüksek öncelikli bazı kayıtların orta veya kritik sınıfa kaydığı görülmektedir. Buna rağmen genel olarak modelin sınıflar arasında anlamlı bir yarım yapabildiği ve özellikle yüksek ve orta riskli zafiyetleri başarılı biçimde ayırt edebildiği anlaşılmaktadır.



*Tablo 2.3.Özellik Önemi*

Tablo 2.3. Özellik Önemi incelendiğinde, modelin karar sürecinde en etkili değişkenlerin impact, exploit gibi özellikler olduğu görülmektedir. Özellikle sistem üzerindeki etkileri ifade eden impact değişkeninin en yüksek öneme sahip olması, zafiyetlerin sınıflandırılmasında sistem üzerindeki potansiyel etkinin belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Buna karşılık injection, cross veya code gibi bazı terimlerin model üzerindeki etkisinin daha sınırlı olduğu görülmektedir. Bu ise özelliklerin veri setinde daha az ayırt edici bilgi içerdiğini göstermektedir.

	precision	recall	f1-score	Support
<b>Düşük</b>	0.55	0.89	0.68	19
<b>Kritik</b>	0.55	0.93	0.69	58
<b>Orta</b>	0.90	0.86	0.88	283
<b>Yüksek</b>	0.89	0.76	0.89	228
<b>accuracy</b>			0.82	588
<b>macro avg</b>	0.72	0.85	0.76	588
<b>weighted avg</b>	0.85	0.82	0.82	588

*Tablo 2.4.Sınıflandırma Raporu*

Tablo 2.4.Sınıflandırma Raporu, model performansının değerlendirilmesinde doğruluk (accuracy), precision, recall ve f1-skorları incelenmiştir. Test veri seti üzerinde elde edilen sonuçlara göre modelin genel doğruluk değeri 0.82 olarak bulunmuştur. Düşük öncelik sınıfı için precision değeri 0.55, recall değeri 0.89 ve F1-skoru 0.69 olarak hesaplanmıştır. Orta öncelik sınıfında modelin performansının daha yüksek olduğu görülmekte olup precision 0.90, recall değeri 0.86 ve F1-skoru 0.88 olarak elde edilmiştir. Yüksek öncelik kategorisinde ise precision değeri 0.89, recall değeri 0.73 ve F1-skoru 0.80 olarak belirlenmiştir. Tüm sınıflar dikkate alındığında ise ağırlıklı ortalama F1-skoru 0.82 olarak bulunmuştur.

Genel olarak elde edilen bulgular, Rastgele Orman algoritmasının zafiyet önceliklendirme probleminde iyi bir performans sergilediğini göstermektedir. Model özellikle orta ve yüksek seviyedeki zafiyetlerin tespitinde güçlü bir başarı ortaya koymuştur. Bununla birlikte veri setindeki sınıf dengesizliği ve bazı kategorilerdeki sınırlı örnek sayısı, düşük ve kritik sınıflarında precision değerlerinin göreceli olarak daha düşük olmasına sebep olmuştur. Buna rağmen elde edilen sonuçlar, makine öğrenmesi yöntemlerinin siber güvenlik alanında zafiyet önceliklendirme süreçlerini destekleyebilecek önemli bir araç olduğunu göstermektedir.

## 5. SONUÇ

Bu çalışma, NVD veri seti kullanılarak Rastgele Orman Algoritması ile zafiyetlerin önceliklendirilmesini başarılı şekilde gerçekleştirmiştir. Hem CVSS puanları hem de açıklama metinleri modelin karar süreçlerinde etkili olmuştur. Elde edilen sonuçlar, makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımların siber güvenlik risk analizlerinde değerli destek sağladığını göstermektedir. Gelecekte daha geniş veri setleri ve gelişmiş modellerle bu yaklaşımın kapsamının genişletilmesi hedeflenmektedir.

Elde edilen bulgular, veri setinde orta ve yüksek öncelikli zafiyetlerin sayısal olarak daha baskın olduğunu göstermiştir. Buna karşılık kritik seviyedeki zafiyetlerin görece daha az sayıda bulunması, bu kategorinin doğru şekilde tespit edilmesini siber güvenlik açısından daha önemli hale getirmiştir. Geliştirilen Rastgele Orman Algoritması modelinde test veri seti üzerinde yaklaşık %81 doğruluk (accuracy) değeri elde edilmiştir. Sınıflandırma raporu incelendiğinde modelin özellikle orta ve yüksek öncelik seviyelerindeki zafiyetleri başarılı bir şekilde ayırt edebildiği görülmektedir. Orta öncelik kategorisinde yüksek precision ve F1-skoru değerleri elde edilirken, yüksek öncelik sınıfında da modelin dengeli bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Kritik ve düşük öncelik sınıflarında ise veri setindeki örnek sayısının az olması precision değerlerinin daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Bununla birlikte recall değerlerinin yüksek olması, modelin bu sınıflardaki zafiyetleri yakalama konusunda etkili olduğunu göstermektedir.

Karışıklık matrisi sonucu incelendiğinde modelin sınıflar arasında genel olarak tutarlı bir ayırım yapabildiği ve özellikle orta ve yüksek risk kategorilerindeki zafiyetleri büyük ölçüde doğru şekilde sınıflandırdığı görülmektedir. Bununla birlikte bazı yüksek riskli kayıtların orta veya kritik sınıflara kaydığı gözlemlenmiştir. Bu durum, zafiyet açıklamalarındaki metinsel benzerlikler veya veri setindeki sınıf dengesizliği ile ilişkili olabilmektedir.

“Siber Güvenlikte CVE Önceliklendirmesi İçin Rastgele Orman Algoritması Tabanlı Makine Öğrenmesi Yaklaşımı” üzerine yoğunlaşarak, zafiyetlerin etkili bir şekilde sınıflandırılması ve önceliklendirilmesi için bir çözüm sunmuştur. Geliştirilen model, özellikle orta ve yüksek risk seviyelerindeki zafiyetlerin tespitinde etkili bir performans ortaya koymuştur. Bu yaklaşım, güvenlik ekiplerinin sınırlı kaynaklarını daha kritik sistem açıklarına yönlendirmesine yardımcı olabilecek pratik bir karar destek aracı sunmaktadır.

## KAYNAKÇA

- Biau, G. (2012). Analysis of a random forests model. *Journal of Machine Learning Research*, 13, 1063–1095.
- Bozorgi, M., K. Saul, L., Savage, S., & Voelker, G. (2010). Beyond Heuristics: Learning to Classify. Proceedings of the 16th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD), 105–114. doi:10.1145/1835804.1835821
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., & Toutanova, K. (2018). BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. *arXiv preprint arXiv:1810.04805*.
- Fernández-Delgado, M., Cernadas, E., Barro, S., & Amorim, D. (2014). Do we need hundreds of classifiers to solve real world classification problems? *Journal of Machine Learning Research*, 15(1), 3133–3181.
- Ho, T. K. (1995). Random decision forests. *Proceedings of the 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition*, 1, 278–282. <https://doi.org/10.1109/ICDAR.1995.598994>
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). *An Introduction to Statistical Learning*. Springer.
- Mell, P., Scarfone, K., & Romanosky, S. (2007). A Complete Guide to the Common Vulnerability Scoring System Version 2.0. *FIRST*.
- Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J. (2013). Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. *arXiv preprint arXiv:1301.3781*.
- Sabottke, C., Suciu, O., & Dumitraş, T. (2015). Vulnerability Disclosure in the Age of Social Media: Exploiting Twitter for Predicting Real-World Exploits. *24th USENIX Security Symposium*.
- Rodríguez-Galiano, V. F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M., & Rigol-Sanchez, J. P. (2012). An assessment of the effectiveness of a Random Forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002>
- Ucci, D., Aniello, L., & Baldoni, R. (2019). A survey on machine learning techniques for cyber security intrusion detection. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(1), 70–109. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2865896>
- Wang, Y., Yu, T., Zhou, H., & Yin, H. (2019). Vulnerability Prediction Model Based on Random Forest. *Journal of Information Security and Applications*, 45, 43–54.



**Bölüm**

**2**

**KÜLTİK KABUĞUNDAKİ  
DPPH TEMİZLEME AKTİVİTE  
VE TOPLAM FENOLİK  
MADDE MİKTARLARININ  
BELİRLENMESİ VE  
KARŞILAŞTIRILMALI BİR  
DEĞERLENDİRİLMESİ**

*Çağlar Mert AYDIN<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi Tunceli Vocational High School, Food Technology Department, Munzur University, Türkiye cmaydin@munzur.edu.tr; ORCID ID: 0000-0003-4078-7410

## 1. Giriş

Atık yapılar, ihtiyaçlarımızı karşılamak için kullandığımız malzemelerin şu anda kullanılmayan veya kullanımdan sonra atılmayan parçaları olarak tanımlanmaktadır. Atık miktarı ve türü her geçen gün artmakta ve farklı tarımsal atıkların değerlendirilmesi birçok önceki çalışmada incelenmiştir (Chandel vd., 2022; Habbasha vd., 2025; Freitas vd., 2021). Katı atıklar öncelikli çevre sorunlarından biri haline gelmişlerdir. Bu yüzden atıkların değerlendirilmesi önemli konulardan biri olup, yoğun emek ve yüksek maliyetlerle yetiştirilen bitkilerin atık hale geldikten sonra değerlendirilmeleri önem arz etmektedir. Meyve çekirdeği, kabuğu, kökü ve bitki kabuğu gibi bitkisel atıklar yapılarında fazla miktarda biyoaktif madde içeriği barındırmaktadırlar (Chandel vd., 2022). Bu maddelerin endüstriyel uygulamalarda değerlendirilmesi, hem oluşturdukları çevre sorunlarının önüne geçebilecek hem de bu yapılarında barındırdıkları değerli besin maddelerinin kazanımı sayesinde ekonomik katkı sağlayacaktır. Bu besin yapılarının kullanım alanı, son zamanlara dek genellikle hayvan yemi ve gübre ile sınırlı kalmıştır (Ucak ve Khalily, 2022a).

Bitkisel atıklardan kazanımı yapılabilecek en değerli yapılar biyoaktif maddelerdir (Habbasha vd., 2025). Önceki çalışmalarda bitkisel atıklardan pektin, fenolik madde, antioksidatif ve antimikrobiyal madde, flavonoid, esansiyel yağ, vitamin gibi değerli yapıların kazanımı sağlanmıştır (Andres vd., 2024; Ferreira vd., 2018; Güzel ve Akpınar, 2019; Horozic vd., 2020). Bitkisel atıkların endüstriyel bazda kullanımlarında içerdikleri biyoaktif maddelerin miktarı ve kalitesi önem arz etmektedir (Gorinstein vd., 2001; Ucak ve Khalily, 2022b). Endüstriyel uygulamalarda kullanılacak bitkisel atıkların yüksek miktarda biyoaktif madde içeriğine sahip olması istenmektedir (Mendez vd., 2023).

Bitkisel kaynaklardan kazanılan biyoaktif maddeler sahip oldukları sağlığa yararlı etkileri önceki çalışmalarda açıklanmıştır (Freitas vd., 2021; Kaur vd., 2024). Çalışmalarda bu yapıların vücuda alındıklarında antioksidatif, antimikrobiyal ve immüne sistemini geliştirici etki gösterdikleri açıklanmıştır. Özellikle antioksidatif ve fenolik maddeler sahip oldukları önemli fonksiyonlar dolayısıyla biyoaktif madde olarak değerlendirilmektedirler. Antioksidatif maddeler, kararsız radikallerin olumsuz etkilerini önlemektedirler. Kararsız radikaller yapılarında buldukları serbest elektrondan dolayı sabit yapıda değildirler. Sabit yapıya geçmeye çalışırken oluşturdukları etkilerden dolayı sorunlara sebebiyet verebilmektedirler. Bu sorunların başında oksidatif bozulmalar başı çekmektedir. Oksidatif bozulma hücrel makromoleküllerin modifikasyonuna, apoztoz durumuna veya hücre ölümüne sebebiyet vermektedir (Yiğit vd., 2009). Bu bozulmaların önlenmesinde antioksidanlar öne çıkmaktadırlar. Fenolik maddelerin sahip oldukları özellikler yapılarındaki küçük alt gruplara göre değişmektedir. Bu

maddelerin ekstrakte edilmesinde kullanılan parametreler (çözücü, sıcaklık, süre, materyal gibi) kazanımlarının verimini etkilemektedir. Maksimum verim elde edilebilmesi için ekstraksiyonda kullanılan parametrelerin optimize edilmesi gerekmekte olup, her farklı ekstraksiyon için bu parametreler değişim göstermektedir (Horozic vd., 2020; Sen vd., 2021).

Bu çalışmada Kultik kavun kabuğundaki DPPH temizleme aktivite ve toplam fenolik madde miktarlarının tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada biyoaktif madde miktarının optimum şartlarda sağlanabilmesi için ekstraksiyon işlemi üç farklı çözücü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan çözücü çeşitleri; etanol, metanol ve su'dur.

## **2. Materyal ve Metot**

### **2.1 Materyal**

Bu çalışmada 2025 yılında Tunceli ili Ovacık ilçesinde yetiştirilen Kultik kavunundan elde edilen kabuklar kullanılmıştır. Örnekleme homojen olarak gerçekleştirilebilmesi amacıyla farklı yerel üreticilerden Kultik kavunu temin edilmiştir. Kultik kavunları üreticiden temin edildiklerinden hemen sonra Munzur Üniversitesi gıda araştırma laboratuvarına getirilmişlerdir.

Örneklerin hazırlanması önceki çalışmada kullanılan yöntemle gerçekleştirilmiştir (Kamberoğlu vd., 2024). İlk olarak Kultik kavununun kabuk kısmı diğer kısımlardan ayrıştırılmış, daha sonra elde edilen kavun kabuklar etüvde 40°C'de 48 saat bekletilerek sabit tartıma gelinceye dek kurutulmuş, analizler başlanıncaya dek +4°C'de muhafaza edilmiştir.

### **2.2 Metot**

#### **2.2.1 Ekstraksiyon**

Ekstraksiyon işlemi önceki çalışmada uygulandığı şekilde gerçekleştirilmiştir (Çoklar vd., 2016). Ekstraksiyonda çözücü olarak su, methanol ve etanol (1:50) kullanılmıştır. Kurutulmuş Kultik kabukları ekstraksiyonda kullanılması için ev tipi öğütücüyle toz haline getirilmiştir. 5 g toz örneğe 250 mL çözücü eklenerek çözelti hazırlanmıştır. Çözelti karıştırılarak homojen hale getirilmiş ve ekstraksiyon işlemi 30°C'de 30 dakika süreyle yapılmıştır. Ekstraksiyonun tekrarlanabilirliği için üç paralel olarak işlem gerçekleştirilmiştir. Süre bitiminde karışım santrifüjlenmiş ve elde edilen supernant kısmı analizlerde kullanılmıştır.

#### **2.2.2 DPPH Antioksidan Aktivitesi.**

DPPH antioksidan aktivite tayininde Brand-Williams vd. (1995) çalışmalarında kullandıkları yöntem uygulanmıştır. Kalibrasyon grafiklerinin oluşturulmasında trolox'un farklı konsantrasyonları kullanılmış, ve sonuçlar mg trolox eşdeğeri (TE)/ g kuru ağırlık (k.a.) olarak ifade edilmiştir.

### 2.2.3 Toplam Fenolik Madde İçerik.

Toplam fenolik madde tayininde Horozic vd. (2020) çalışmasında kullandıkları yöntem uygulanmıştır. Her bir çözücü çeşidi için ayrı kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur. Kalibrasyon grafiklerinin oluşturulmasında gallik asidin çözücülerle olan farklı konsantrasyonları kullanılmıştır. Sonuçlar mg gallik asit eşdeğeri (GAE)/ g kuru ağırlık (k.a.) olarak ifade edilmiştir.

### 2.2.4 İstatistiksel Analiz.

İstatistiksel analizlerin gerçekleştirilmesinde istatistiksel paket programından (IBM SPSS software version 31) faydalanılmıştır. Sonuçlar değerlendirilirken tanımlayıcı istatistiksel metodlar (Ortalama, Standart Sapma) kullanılmıştır. Tüm analizlerde yanılma düzeyi olarak (Anlamlılık seviyesi) en az  $p < 0,05$  olması kararlaştırılmıştır. Ölçümler üç kere tekrarlanmış ve sonuçlar bu tekrarların ortalaması olarak alınmıştır.

Veriler değerlendirilmesinde parametrik analiz yöntemleri uygulanmıştır. Varyasyon analizinde ANOVA testi ve farklılığın tespitinde duncan post-doc testi kullanılmıştır. Ayrıca veri setleri arasındaki olası korelasyonları değerlendirmede Pearson testinden faydalanılmıştır (Büyüköztürk, 2002).

## 3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada Kultik kavun kabuğundaki DPPH temizleme aktivite ve toplam fenolik madde miktarları tespit edilmiştir. Bu amaçla üç farklı çözücü (metanol, etanol ve su) kullanılmış, ve bu çözücülerin biyoktif maddelerin kazanımına olan etkileri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

Çalışma neticesinde Kultik kavun kabuğundaki DPPH temizleme aktivite ve toplam fenolik madde miktarları Tablo 1'de gösterilmektedir. Tablo 1'de görüleceği üzere örnekteki DPPH temizleme aktivite ve toplam fenolik madde miktarları kullanılan çözücü çeşidine göre önemli düzeyde değişim göstermiştir,  $p < 0,05$ . Örnekteki DPPH temizleme aktivite miktarı  $4,43 \pm 0,23 - 19,11 \pm 0,36$  mg TE/g k.a., toplam fenolik madde miktarı ise  $66,40 \pm 2,60 - 317,88 \pm 3,95$  mg GAE/g k.a. aralığında bulunmuştur. Fenolik madde verimi en yüksek sulu ekstraksiyonunda, en düşük ise metanolik ekstraksiyonda elde edilmiştir. Ancak en yüksek DPPH temizleme aktivitesi etanollü ekstraksiyonda, en düşük ise sulu ekstraksiyonda bulunmuştur (Tablo 1). Bu sonuçlar ekstraksiyonda kullanılan çözücü çeşidinin önemini göstermektedir.

**Tablo 1.** *Kultik kabuğundaki biyoaktif madde miktarı.***Table 1.** *Bioactive substance content in Kultik peels.*

	Etanol	Su	Metanol
<b>DPPH Temizleme Aktivite Miktarı</b> (mg TE/g k.a.)	19,11±0,36a	4,43±0,23c	7,56±0,01b
<b>Toplam Fenolik Madde Miktarı</b> (mg GAE/g k.a.)	192,22±30,87b	317,88±3,95a	66,40±2,60c

Aynı satırdaki rakamlar üzerindeki farklı harfler gruplar arasındaki farkın önemli olduğunu ifade etmektedir ( $p<0,05$ ). Tüm parametreler ortalaması±Std olarak verilmiştir. (n= 3 örnek x 3 tekrür).

*Different letters on the numbers in the same row indicate that the difference between the groups is significant ( $p<0,05$ ). All parameters are given as mean±Std. (n=3 samples x 3 replicates).*

Tablo 1'deki sonuçlara göre Kultik kavun kabuğundaki biyoaktif madde miktarı ekstraksiyonda kullanılan çözücü çeşidine göre önemli düzeyde değişim göstermiştir. Fenolik ekstraksiyon verimi sırasıyla metanol, etanol ve su kullanıldığında artmış, antioksidatif ekstraksiyon verimi ise su, metanol ve etanol kullanıldığında artış göstermiştir,  $p<0,05$ . Güzel ve Akpınar (2019) çalışmalarında 6 çeşit meyveye ait kabuktaki toplam fenolik ve antioksidatif madde miktarları su ve farklı oranlarda su-etanol karışımı çözücüler kullanarak belirlemişlerdir. Çalışma sonucu bu çalışmanın sonucuyla benzerlik göstermiş, meyve kabuklarından kazanılan biyokatif madde miktarları ekstraksiyonda kullanılan çözücü çeşidine göre önemli düzeyde değişim göstermiştir. Ayrıca ekstraksiyonda etanol kullanılması durumunda meyve kabuklarından kazanılan antioksidatif madde miktarlarında artış gözlemlenmiştir. Önceki çalışmalarda incelenen çeşitli meyve kabuklarında Kultik kavun kabuğuna göre daha az antioksidatif madde miktarı tespit edilmiştir (Tablo 2). Ancak beyaz ejderha kabuğunda (16,60±0,86-51,58±0,30 mg TE/g) bu çalışmada kullanılan Kultik kabuğuna göre daha fazla antioksidatif madde miktarı tespit edilmiştir (Nguyen ve Pirak, 2019). Bu durum her bir meyve çeşidinin ve çeşide ait parçaların (çekirdek, kabuk, meyve) sahip olduğu farklı genotip özelliklerinden kaynaklanmıştır (Andres vd., 2024; Korekar vd., 2011).

**Tablo 2.** Çeşitli meyve kabuklarındaki DPPH temizleme aktivite miktarları.  
**Table 2.** Antioxidative compounds in various fruit peels.

Materyal	Çözücü	DPPH Temizleme Aktivitesi (mg TE/g)	Referans
Greyfurt	Etanol, metanol ve aseton	75,93±4,37-107,1512,73	Ucak ve Khalily, 2024a
Mandalina	Etanol, metanol ve aseton	31,11±0,73-106,388,01	Ucak ve Khalily, 2024a
Portakal	Etanol, metanol ve aseton	56,10±1,09-151,924,73	Ucak ve Khalily, 2024b
Limon	Etanol, metanol ve aseton	1,36±1,09-50,8116,74	Ucak ve Khalily, 2024b
Mango	80% Metanol	93,70±14,85-234,3731,33	Andres vd., 2024
Mandalina	Etanol	1,06	Ferreira vd., 2018
Pitaya	80% etanol	1,50	Carpio-Rivas vd, 2025
Jaboticaba	Etanol	4,02±0,01-4,85±0,01	Tainah vd., 2024
Kivi	Su	0,03±0,01	Güzel ve Akpınar, 2019
Kavun	Su	0,02±0,01	Güzel ve Akpınar, 2019
Domates	Su	0,02±0,01	Güzel ve Akpınar, 2019
Elma	Su	0,11±0,01	Güzel ve Akpınar, 2019
Ayva	Su	3,13±0,05	Güzel ve Akpınar, 2019
Beyaz Ejderha	Su	16,60±0,86-51,58±0,30	Nguyen ve Pirak, 2019

Tüm parametreler ortalama±Std olarak verilmiştir.

*All parameters are given as mean±Std.*

Kultik kabuğundaki DPPH temizleme aktivite miktarı ekstraksiyonda kullanılan çözücü çeşidine göre önemli düzeyde değişmiştir,  $p<0,05$ . Bu sonuç, çeşitli meyve kabuklarındaki DPPH temizleme aktivite miktarını inceleyen önceki çalışmaların sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir (Kaur vd., 2024; Ucak ve Khalily, 2022a; Ucak ve Khalily, 2022b). Ayrıca yine bu çalışmalarda çeşitli çözümler kullanılmasına karşın (etanol, metanol, aseton, etanol, hekzan, asetonitril ve etil asetat) en yüksek verim, bu çalışmada da bulunduğu gibi etanolik ekstraksiyonda elde edilmiştir (Kaur vd., 2024; Ucak ve Khalily, 2022a; Ucak ve Khalily, 2022b).

**Tablo 3.** Çeşitli meyve kabuklarındaki toplam fenolik madde miktarları.**Table 3.** Total phenolic content in various fruit peels.

Materyal	Çözücü	Toplam Fenolik Madde İçeriği (mg GAE/g k.a.)	Referans
Greyfurt	Etanol, metanol ve aseton	303,72±17,49-428,60±50,94	Ucak ve Khalily, 2024a
Mandalina	Etanol, metanol ve aseton	124,45±2,91-425,51±32,02	Ucak ve Khalily, 2024a
Portakal	Etanol, metanol ve aseton	33,42±2,96-387,7±9,14	Ucak ve Khalily, 2024b
Limon	Etanol, metanol ve aseton	20,62±0,28-238,1±0,0	Ucak ve Khalily, 2024b
Mangrov	-	0,69	Ranisiska vd., 2024
Limon	-	3,4±2,4-9,4±1,0	Liu vd., 2022
Mango	80% Metanol	2,12±0,1-4,85±0,3	Andres vd., 2024
Pomelo	-	1480±240-2680±190	Yu vd., 2024
Portakal	Etanol, metanol ve aseton	145,79-169,56	Hegazy vd., 2012
Pitaya	80% etanol	1,96	Carpio-Rivas vd., 2025
Mango	60% metanol	13,65±0,29-14,15±0,0	James vd., 2025
Jabuticaba	Etanol	17,85±0,4-51,41±1,37	Tainah vd., 2024
Kivi	Su	38,27±1,04	Güzel ve Akpınar, 2019
Kavun	Su	43,54±0,45	Güzel ve Akpınar, 2019
Domates	Su	39,33±0,15	Güzel ve Akpınar, 2019
Elma	Su	80,59±3,13	Güzel ve Akpınar, 2019
Ayva	Su	74,48±1,04	Güzel vd, 2019

“-“ işareti çalışmada kullanılan çözücü çeşidinin belirtilmediğini göstermektedir.

*The sign “-“ indicates that the type of solvent used in the study was not specified.*

Tüm parametreler ortalama±Std olarak verilmiştir.

*All parameters are given as mean±Std.*

Önceki çalışmalarda incelenen çeşitli meyve kabuklarında Kultik kavun kabuğunda bulunan değerlere yakın ve daha düşük miktarda toplam fenolik madde miktarı tespit edilmiştir (Tablo 3). Bu durum her meyve çeşidinin ve ona ait parçaların sahip olduğu kendilerine has özelliklerden dolayı gerçekleşmiştir (Andres vd., 2024; James vd., 2025). Kultik kabuğundaki toplam fenolik madde miktarı ekstraksiyonda kullanılan çözücü çeşidine göre önemli düzeyde değişmiştir,  $p<0,05$ . Bu sonuç, çeşitli meyve kabuklarındaki toplam fenolik madde miktarını inceleyen önceki çalışmaların sonuçlarıyla benzerlik

göstermektedir (Hegazy vd., 2012; Kaur vd., 2024; Ucak ve Khalily, 2022a; Ucak ve Khalily, 2022b). Ayrıca önceki çalışmalarda çeşitli çözücüler kullanılmasına karşın meyve kabuğundaki fenolik maddelerin kazanımı en fazla sulu ekstraksiyonda kazanılmıştır (Güzel ve Akpınar, 2019; Zoral ve Turgay, 2014). Ancak diğer başka çalışmalarda en yüksek verim etanollü ekstraksiyon neticesinde bulunmuştur (Kaur vd., 2024; Ucak ve Khalily, 2022a; Ucak ve Khalily, 2022b). Bu durum tüm ekstraksiyon parametrelerinin (örnek özellikleri, sıcaklık, zaman, materyal, çözücü çeşidi gibi) fenolik maddelerin ekstraksiyonunda önemli rol oynamasından kaynaklanmıştır (James vd., 2025).

Çalışma neticesinde bulunan değerlerin birbirleriyle olan olası ilişkileri incelenmiştir. Yapılan çalışma neticesinde Kultik kabuğundaki toplam fenolik madde miktarı ile DPPH temizleme aktivite miktarı arasında anlamlı bir korelasyon saptanmamıştır,  $r=-0,202$ . Bu durum, antioksidan kapasitenin yalnızca toplam fenolik miktara bağlı olmadığını, fenolik kompozisyonu, diğer antioksidan bileşikler ve yöntemsel faktörlerden de etkilenebileceğini düşündürmektedir (James vd., 2025; Ranisiska vd., 2024). Benzer sonuç, önceki çalışmalarda çeşitli meyve kabuklarındaki biyoaktif madde miktarlarında da gözlemlenmiştir (Guzel ve Akpınar, 2019; Karakus vd., 2023). Bu da atık meyve kabuklarında değerli antioksidatif özellik gösteren yapıların olduğunu ispatlamaktadır.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada Tunceli ili Ovacık ilçesinde 2025 yılında yetiştirilen Kultik kavununa ait kabuklar kullanılmıştır. Kabuktaki biyoaktif maddelerin miktarı üç farklı çözücü (etanol, metanol, su) kullanılarak tespit edilmiştir. Böylece kullanılan çözücü çeşidinin ekstraksiyondan kazanılan biyoaktif madde miktarına olan etkileri incelenmiştir.

Elde edilen verilere göre Kultik kabuğunda  $4,43 \pm 0,23$ - $19,11 \pm 0,36$  mg TE/g aralığında DPPH temizleme aktivite miktarı ve  $66,40 \pm 2,60$ - $317,88 \pm 3,95$  mg GAE/g aralığında toplam fenolik madde miktarı bulunmuştur. Kultik kabuğunda bulunan bu sonuçlar, Kultik kabuğunun biyoaktif madde miktarı bakımından zengin olduğunu göstermektedir. Ayrıca ekstraksiyonda kullanılan çözücü çeşidi Kultik kabuğundan kazanılan biyoaktif madde miktarını önemli düzeyde etkilemiştir. Ekstraksiyon verimi ekstraksiyonda kullanılan çözücü çeşidine göre sırasıyla su, metanol ve etanol olarak DPPH temizleme aktivitesi artmışken metanol, etanol ve su olarak fenolik ekstraksiyonda artış göstermiştir. Bundan dolayı ekstraksiyonda kullanılan çözücü çeşidi, ekstraksiyon neticesinde kazanılan değerli yapıların miktarını önemli düzeyde etkilemekte olup, uygun şartların tespit edilip kullanılması durumunda ekstraksiyondan maksimum verimin kazanılabileceğini göstermektedir. Bunlardan dolayı bu çalışma sonucunda;

- Ekstraksiyonda kullanılan çözücünün meyve atıklarındaki fenolik ve antioksidatif maddelerin kazanımını etkilediği, bundan dolayı doğru çözücü seçimi önemli olduğu belirlenmiştir.
- Kultik kabuğu tespit edilen yüksek miktardaki biyoaktif madde miktarı, bu materyalin ileriki çeşitli bilimsel çalışmalarda farklı konular için geniş kullanım imkanı olduğunu göstermektedir.

#### **Yazar katkısı (Author contribution)**

Aydin, C.M: Fikir ve kavram, Tasarım ve dizayn, Denetleme ve Danışma, Malzeme tedarik, Veri toplama, Veri işleme, Literatür taraması, Yazım, Eleştirel inceleme, Proje hazırlama.

#### **Teşekkür.**

Çalışmamın gerçekleşmesi için gerekli mekan ve imkanları sunan Munzur Üniversitesine ve değerli yöneticilerine teşekkür ederim.

#### **Finansman beyanı**

Bu araştırma Munzur Üniversitesi bilimsel araştırma projesi (BAP) tarafından desteklenmiştir (No: MFMUB025-10).

#### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

#### **Etik standartlar**

Bu çalışma için Etik Kurul Kararı gerekmemektedir.

## Kaynaklar

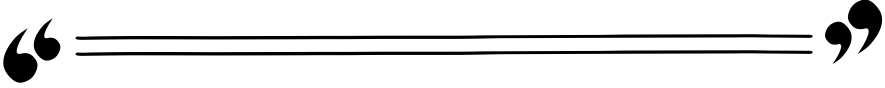
- Andres, A.P., Jaime, L.M., Heredia, J.B., Erick, P.G., Eber, A.Q., Maria, D.M. (2024). Physicochemical characterization of pectin and mango peel (*Mangifera indica* L.) from Mexican cultivars. *Heliyon*, 10, e35184. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35184>.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E. ve Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT*, 28 (1). 25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5).
- Büyüköztürk, Ş. (2002). Sosyal Bilimler İçin Veri Analizi El Kitabı, İstatistik, Araştırma Deseni Spss Uygulamaları ve Yorum, 13 BASKI, Pegem Akademi.
- Carpio-Rivas, V., Rosendo, B., Veronica, A.O., Juan, E.B., Julio, C. T., Guillermo, B. (2025). Characterization of pectin extracted from the peel of dragon fruit (*Selenicereus cf. guatemalensis* Queen Purple). *Polysaccharides*, 6, 98. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6040098>.
- Chandel, V., Biswas, D., Roy, S., Vaidya, D., Verma, A., Gupta, A. (2022). Current advancements in pectin: extraction, properties and multifunctional applications. *Foods*, 11(17), 2683. <https://doi.org/10.3390/foods11172683>.
- Çoklar, H., Akbulut, M. (2016). Alıç (*Crataegus orientalis*) meyvesinin antioksidan aktivitesi ve fenolik bileşiklerinin ekstraksiyonu üzerine farklı çözümlerin etkisi. *Derim*, 33(2), 237-248. <https://doi.org/10.16882/derim.2016.267908>.
- Ferreira, S.S., Silva, A.M., Nunes, F.M. (2018). Citrus reticulata blanco peels as a source of antioxidant and anti-proliferative phenolic compounds. *Industrial Crops and Products*, 111, 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.009>.
- Freitas, C.M.P., Coimbra, J.S.R., Souza, V.G.L., Sousa, R.C.S. (2021). Structure and applications of pectin in food, biomedical, and pharmaceutical industry: a review. *Coating*, 11(8), 922. <https://doi.org/10.3390/coatings11080922>.
- Gorinstein, S., Martin, B.O., Park, Y.S., Haruenkit, R., Lojek, A., Ciz, M., Trakhtenberg, S. (2001). Comparison of some biochemical characteristics of different citrus fruits. *Food chemistry*, 74(3), 309-315. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(01\)00157-1](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00157-1).
- Güzel, M., Akpınar, Ö. (2019). Meyve ve sebze kabuklarının fitokimyasal ve antioksidan özelliklerinin incelenmesi. *GÜFBED/GUSTIJ*. 9 (4), 768-780. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.542458>.
- Habbasha, E.S.E., Abouzeid, R., Ibrahim, F.M., Youssef, A.M., Sara, Z.A.M., Mohamed, A.E. (2025). Developing a novel, low-cost, antimicrobial and biodegradable pectin/HEC/ZnO biofilm for edible food packaging applications. *Biomass conversion and biorefinery*, 15, 6377-6388. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05487-4>.
- Hegazy, A.E., Ibrahim, M.I. (2012). Antioxidant activities of orange peel extracts. *World applied sciences journal*, 18(5), 684-688. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.18.05.64179>.

- Horozic, E., Suljagic, J., Gojkovic, J., Halilcevic, E., Kubicek, D. ve Kozarevic, E. C. (2020). Influence of extraction technique on nutrient content, antioxidant and antimicrobial activity of aqueous extracts of commercial apricot kernels. *International Journal of Advanced Chemistry*, 8(2), 225-229. <https://doi.org/10.14419/ijac.v8i2.31065>.
- James, M., Imathiu, S., Engelsen, S.B., Owino, W. (2025). Impact of extraction techniques and processing conditions on pectin and antioxidant recovery from mango peels. *Discover food*, 5, 132. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00416-4>.
- Kamberoglu, N., Olçeser, C.B., Düzyol, F., Cücen, Z., Hajiyev, V., Uguzdogan, E. (2024). Kuşburnu (*Rosa canina* L.) meyvesi ve atıklarından pektin ekstraksiyonu. Pamukkale üniversitesi mühendislik bilimleri dergisi, 30(1), 109-118. <https://doi.org/10.5505/pajes.2023.93027>.
- Karakus, M.S., Akalan, M., Basyigit, B., Karaaslan, A., Karaaslan, M. (2023). Domates kabuğu fenolikleri: mikrodalga destekli ekstraksiyon koşullarının optimizasyonu ve mikroenkapsülasyonu. *Journal of the Institute of Science and Technology*. 13 (3), 1755-1767. <https://doi.org/10.21597/jist.1290953>.
- Kaur, S., Singh, V., Chopra, H.K., Panesar, P.S. (2024). Extraction and characterization of phenolic compounds from mandarin peels using conventional and green techniques: a comparative study. *Discover food*, 4, 60. <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00139-y>.
- Korekar, G., Stobdan, T., Arora, R., Yadav, A. ve Singh, S. B. (2011). Antioxidant Capacity and Phenolics Content of Apricot (*Prunus armeniaca* L.) Kernel as a Function of Genotype. *Plant Foods Hum Nutr*, 66, 376-383. <https://doi.org/10.1007/s11130-011-0246-0>.
- Liu, N., Yang, W., Li, X., Zhao, P., Liu, Y., Guo, L., Huang, L., Gao, W. (2022). Comparison of characterization and antioxidant activity of different citrus peel pectins. *Food Chemistry*. 386, 132683. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132683>.
- Mendez, D.A., Falco, I., Antonio, M.A., Gloria, S., Amparo, L.P., Maria, J.F. (2023). Sustainable bioactive pectin-based films to improve fruit safety via a circular economy approach. *Food Hydrocolloids*, 137, 108327. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108327>.
- Nguyen, B.M.N. ve Pirak, T. (2019). Physicochemical properties and antioxidant activities of white dragon fruit peel pectin extracted with conventional and ultrasound-assisted extraction. *Cogent food and agriculture*, 5(1), 1633076. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1633076>.
- Ranisiska, R., Pare, S., Langit, E.S., Cahyani, R.T. (2024). A comparative study of pectins from peel and pulp of mangrove apple fruit: the functional properties and bioactivities. *Journal of research in pharmacy*, 28 (6), 2027-2037. <https://doi.org/10.29228/jrp.877>.
- Sen, E., Ozdemir, S., Uğuzdoğan, E. (2021). Meyve kabuğu atıklarından pektin ekstraksiyonu ve karakterizasyonu. *Pamukkale üniversitesi mühendislik bilimleri dergisi*. 27(7), 863-872. <https://doi.org/10.5505/pajes.2021.91033>.

- Tainah, M.B., Fabiana, Q., Santos, J.C.C.D., Maria, L.B.F., Maria, C.E.V.S., Borges, S.V., Jayne, A.F. (2024). Sequential extraction of anthocyanins and pectin from jabuticaba (*Plinia cauliflora*) peel: Peel pretreatment effect and ultrasound-assisted extraction. *An acad bras cienc*, 96(1), e20230174. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202420230174>.
- Ucak, I., Khalily, F. (2022a). Changes in total phenolic content and antioxidant activity of grapefruit and mandarin peels extracted with different solvents. *Eurasian journal of food science and technology*, 6(2), 88-93.
- Ucak, I., Khalily, F. (2022b). Effects of different solvent extractions on the total phenolic content and antioxidant activity of lemon and orange peels. *Eurasian journal of food science and technology*. 6(1), 23-28.
- Yiğit D., Yiğit N. ve Mavi A. (2009). Antioxidant and antimicrobial activities of bitter and sweet apricot (*Prunus armeniaca* L.) kernels. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 42, 346-352. <https://doi.org/10.1590/s0100-879x2009000400006>.
- Yu, Y., Lu, P., Yang, Y., Ji, H., Zhou, H., Chen, S., Qiu, Y., Chen, H. (2024). Differences in physicochemical properties of pectin extracted from pomelo peel with different extraction technique. *Scientific reports*, 14, 9182. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59760-7>.
- Zoral, F. B., Turgay, Ö. (2014). Çeşitli gıda atıklarının toplam fenolik madde içeriğinin, antioksidan ve antimikrobiyal aktivitelerinin araştırılması. *KSÜ doğa bil. Derg.*, 17 (2). 24-33. <https://doi.org/10.18016/ksujns.03907>.



# AĞIRLIK DENGE OPTİMİZASYONUNUN UÇUŞ PERFORMANSI VE YAKIT VERİMLİLİĞİNE ETKİSİ



*Hamza CEYLAN<sup>1</sup>*

*Eren SEZER<sup>2</sup>*

1 Öğr. Gör. Hamza Ceylan, Kapadokya Üniversitesi, Kapadokya Meslek Yüksekokulu, Sivil Hava Ulaştırma İşletmeciliği (İngilizce) Programı 50400 hamza.ceylan@kapadokya.edu.tr ORCID NO: <https://orcid.org/0000-0003-4242-0217>

2 Öğr. Gör. Eren Sezer, Kapadokya Üniversitesi, Kapadokya Meslek Yüksekokulu, Uçak Teknolojisi Programı 50400 eren.sezer@kapadokya.edu.tr ORCID NO: <https://orcid.org/0009-0004-2137-8018>

## 1. Giriş

Havacılık sektörü, yüksek operasyonel hassasiyet ve yoğun maliyet baskısı altında faaliyet gösteren küresel ölçekte rekabetçi bir endüstri olarak performans optimizasyonunu stratejik bir zorunluluk hâline getirmiştir. Özellikle yakıt maliyetlerinin havayolu işletmelerinin toplam operasyonel giderleri içerisindeki payının yüksek olması, uçak performansını etkileyen parametrelerin daha ayrıntılı biçimde analiz edilmesini gerekli kılmaktadır. Güncel ekonomik raporlar, yakıt giderlerinin toplam işletme maliyetlerinin yaklaşık dörtte birine karşılık geldiğini göstermektedir (International Air Transport Association, 2023). Bu nedenle küçük yüzdesel verimlilik artışları dahi filo ölçeğinde önemli ekonomik kazanımlar sağlayabilmektedir.

Uçak performansını etkileyen temel parametreler arasında aerodinamik verimlilik, itki sistemi performansı ve ağırlık yönetimi öne çıkmaktadır. Bu bağlamda ağırlık ve denge yönetimi, çoğu zaman yalnızca operasyonel bir yükleme prosedürü olarak algılsa da gerçekte uçuş mekaniği ve aerodinamik performans ile doğrudan ilişkili kritik bir mühendislik alanıdır. Ağırlık merkezi (Center of Gravity – CG) konumu, kanat tarafından üretilen kaldırma kuvveti ile kuyruk düzlemi tarafından oluşturulan dengeleyici moment arasındaki ilişkiyi belirleyerek longitudinal dengeyi doğrudan etkilemektedir (Anderson, 2017). Bu nedenle CG konfigürasyonu yalnızca stabilite sınırlarını değil aynı zamanda trim gereksinimini ve toplam aerodinamik sürüklemeyi de belirleyen bir parametre olarak değerlendirilmektedir.

Aerodinamik tasarım literatüründe CG konumunun uçuş performansı üzerindeki etkisi uzun süredir incelenmektedir. Özellikle kanat–kuyruk etkileşimi ve moment dengesi üzerine yapılan çalışmalar, CG'nin öne doğru kaymasının yatay stabilize tarafından üretilmesi gereken aşağı kuvveti artırdığını ve bunun toplam kaldırma gereksinimini yükselttiğini göstermektedir (Raymer, 2018; Roskam, 2001). Bu durum literatürde genellikle “trim drag penalty” olarak adlandırılan ek sürükleme bileşeniyle ilişkilendirilmektedir. Trim sürüklemesi, doğrudan yakıt tüketimini etkileyen aerodinamik kayıplardan biri olarak kabul edilmektedir.

Modern uçak tasarım yaklaşımları, aerodinamik verimliliği artırmak amacıyla CG konfigürasyonlarının dikkatle optimize edilmesini önermektedir. Özellikle transport kategorisi uçaklarda izin verilen CG zarfı içerisinde arkaya yakın konfigürasyonların trim gereksinimini azaltarak aerodinamik verimliliği iyileştirebildiği bilinmektedir (Gudmundsson, 2014). Benzer şekilde üretici teknik raporları ve operasyonel analizler, uygun CG dağılımının yakıt tüketiminde %1 ila %2 arasında tasarruf sağlayabildiğini ortaya koymaktadır (Airbus, 2019; Boeing, 2018). Yüzdesel olarak sınırlı görünen bu değerler, yüksek frekanslı ticari operasyonlarda önemli ekonomik sonuçlar doğurabilmektedir.

Öte yandan performans optimizasyonu yalnızca ekonomik değil aynı zamanda çevresel bir gereklilik hâline gelmiştir. Uluslararası havacılık kuruluşları tarafından belirlenen karbon emisyonu azaltım hedefleri, operasyonel verimliliğin artırılmasını temel stratejilerden biri olarak tanımlamaktadır (Airbus, 2022). Uçak tasarımında gerçekleştirilen aerodinamik iyileştirmeler kadar mevcut uçakların operasyonel parametrelerinin optimize edilmesi de sürdürülebilir havacılık hedeflerine katkı sağlayan önemli araçlar arasında yer almaktadır (Young, 2017).

Bu çerçevede ağırlık merkezi optimizasyonu, düşük maliyetli fakat etkili bir performans iyileştirme yaklaşımı olarak dikkat çekmektedir. Ancak CG'nin arkaya doğru kaydırılması durumunda longitudinal stabilite marjının azalması ve kontrol hassasiyetinin artması gibi emniyet riskleri ortaya çıkabilmektedir (Etkin & Reid, 1996). Bu nedenle performans kazanımı ile stabilite gereklilikleri arasında mühendislik temelli bir denge kurulması gerekmektedir. Statik marjin kavramı bu dengenin değerlendirilmesinde kritik rol oynamaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, ağırlık merkezi konfigürasyonunun uçuş performansı ve yakıt verimliliği üzerindeki etkisini aerodinamik ve analitik perspektiften incelemektir. Çalışmada longitudinal moment dengesi ve sürüklenme bileşenleri temel alınarak CG konumunun trim gereksinimi, toplam sürüklenme katsayısı ve yakıt tüketimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Böylece ağırlık ve denge yönetiminin yalnızca operasyonel bir prosedür değil, aynı zamanda performans mühendisliğinin önemli bir bileşeni olduğu ortaya konulmaktadır.

## **2. Literatür Taraması: Ağırlık-Denge ve Performans İlişkisine Yönelik Çalışmalar**

Ağırlık ve denge konusu havacılık literatüründe uzun yıllar boyunca ağırlıklı olarak uçuş emniyeti ve stabilite perspektifinden ele alınmıştır. Erken dönem uçuş mekaniği çalışmaları, ağırlık merkezi konumunun longitudinal stabilite üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymuş ve CG'nin nötr nokta ile olan ilişkisini statik stabilite kriterleri çerçevesinde değerlendirmiştir (Etkin & Reid, 1996; Nelson, 1998). Bu çalışmalar, özellikle kontrol edilebilirlik sınırları, stall karakteristikleri ve uçuş güvenliği bağlamında CG konumunun kritik önem taşıdığını göstermektedir.

Aerodinamik tasarım literatüründe ise CG konfigürasyonu çoğunlukla kanat ve kuyruk düzlemi arasındaki moment dengesi üzerinden analiz edilmektedir. Raymer (2018), longitudinal denge koşulları altında kuyruk düzlemi tarafından üretilen dengeleyici kuvvetin toplam kaldırma gereksinimini artırdığını ve bunun dolaylı olarak sürüklenme katsayısına yansıdığını belirtmektedir. Benzer şekilde Roskam (2001), öne konumlandırılmış bir ağırlık merkezinin daha yüksek trim gereksinimi yaratarak aerodinamik verimliliği düşürdüğünü ve uçuş performansında kayba neden olabileceğini göstermiş-

tir. Uçuş mekaniği literatüründe bu durum genellikle trim sürüklemesi (trim drag) kavramı ile açıklanmaktadır.

Aerodinamik verimlilik ve uçuş performansı arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalar da CG konfigürasyonunun performans üzerindeki dolaylı etkilerini ortaya koymaktadır. Özellikle transport kategorisi uçakların performans analizleri, aerodinamik sürükleme katsayısındaki küçük değişimlerin dahi yakıt tüketimi ve menzil üzerinde önemli etkiler yaratabildiğini göstermektedir (Gudmundsson, 2014; Cook, 2013; Filippone, 2020). Son dönem aerodinamik performans çalışmaları da uçak konfigürasyon parametrelerindeki küçük değişimlerin uçuş verimliliği üzerinde ölçülebilir etkiler oluşturduğunu doğrulamaktadır (Kim & Lee, 2021; Nguyen & Nguyen, 2022). Bu bağlamda uçuş performansı literatürü, aerodinamik yük dağılımının ve kaldırma gereksiniminin uçak performans parametreleri üzerindeki etkisini ayrıntılı biçimde incelemektedir. Drela (2014) tarafından yapılan çalışmalar da aerodinamik kuvvet dağılımındaki küçük değişimlerin indüklenmiş sürükleme bileşenini önemli ölçüde etkileyebileceğini ortaya koymaktadır.

Modern uçak tasarım literatürü, performans optimizasyonunun yalnızca aerodinamik şekil tasarımıyla sınırlı olmadığını, aynı zamanda operasyonel parametrelerin de aerodinamik verimliliği etkileyebileceğini göstermektedir. Bu kapsamda yük dağılımı ve ağırlık merkezi konfigürasyonu, uçak performansını etkileyen önemli operasyonel parametreler arasında değerlendirilmektedir (Kroo, 2001; Stinton, 2001). Özellikle transport uçaklarının tasarım ve performans analizlerine odaklanan çalışmalar, operasyonel parametrelerin aerodinamik performans üzerindeki etkilerinin giderek daha fazla önem kazandığını göstermektedir.

Son yıllarda ticari uçak operasyonlarında CG optimizasyonunun yakıt verimliliği üzerindeki etkisini inceleyen çalışmaların sayısı artış göstermiştir. Yapılan analitik ve operasyonel çalışmalar, CG konfigürasyonunun uçuş performansı ve yakıt tüketimi üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır (Zhang, Sun, & Li, 2021; Wang, Li, & Chen, 2022; Zhao, Zhang, & Wang, 2023). Uçak üreticileri tarafından yayımlanan teknik raporlar, izin verilen operasyonel sınırlar içerisinde arkaya yakın CG konfigürasyonlarının trim sürüklemesini azaltarak yakıt tüketiminde ölçülebilir iyileşmeler sağlayabildiğini ortaya koymaktadır (Airbus, 2019; Boeing, 2018). Benzer şekilde aerodinamik performans ve operasyonel verimlilik ilişkisini inceleyen çalışmalar da aerodinamik verimlilikteki küçük iyileşmelerin uzun menzilli uçuşlarda önemli ekonomik avantajlar yaratabileceğini göstermektedir (Scholz, 2014; Mattingly, 2006).

Havayolu işletmeciliği literatüründe ise konu daha çok operasyonel verimlilik ve maliyet yönetimi perspektifinden ele alınmaktadır. Yakıt maliyetlerinin havayolu işletmelerinin toplam operasyonel giderleri içerisindeki yüksek

payı, performans parametrelerinin mikro ölçekte optimize edilmesini stratejik hâle getirmiştir (International Air Transport Association, 2023). Güncel operasyon araştırmaları, özellikle ağırlık dağılımı ve aerodinamik verimlilik parametrelerinin operasyonel yakıt tüketimi üzerindeki etkisini giderek daha fazla incelemektedir (Scholz & Rivera, 2021; Geyer & Sgouridis, 2022). Bu nedenle operasyonel yük dağılım stratejileri ve dijital yük kontrol sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, ağırlık merkezi yönetiminin uçuş planlama süreçlerine entegrasyonunu giderek daha önemli bir araştırma alanı hâline getirmiştir (Boeing, 2020).

Bununla birlikte literatür genel olarak değerlendirildiğinde ağırlık merkezi konfigürasyonunun uçuş performansı üzerindeki etkisini aerodinamik, operasyonel ve performans boyutlarıyla bütüncül biçimde ele alan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Mevcut çalışmaların önemli bir bölümü ya aerodinamik tasarım perspektifinde kalmakta ya da operasyonel uygulamalara odaklanmaktadır. Bu durum literatürde üç temel araştırma boşluğuna işaret etmektedir.

İlk olarak, CG konfigürasyonunun trim sürüklemesi üzerindeki nicel etkisi çoğu çalışmada kavramsal düzeyde ele alınmakta, ancak bu ilişkinin analitik modelleme yaklaşımıyla sistematik biçimde detaylandırıldığı çalışmalar sınırlı kalmaktadır. İkinci olarak, moment dengesi, kaldırma gereksinimi ve sürüklenme bileşenleri arasındaki ilişkinin yakıt tüketimi üzerindeki etkisini bütüncül bir mühendislik modeli çerçevesinde inceleyen araştırmalar literatürde yeterince yer almamaktadır. Üçüncü olarak ise performans optimizasyonu amacıyla gerçekleştirilen CG konfigürasyonlarının stabilite marjı üzerindeki etkisinin operasyonel perspektifle birlikte değerlendirildiği çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir.

Bu çalışma söz konusu boşlukları ele alarak ağırlık merkezi konfigürasyonunun aerodinamik moment dengesi, trim gereksinimi ve yakıt tüketimi arasındaki ilişkiyi analitik modelleme yaklaşımıyla incelemekte ve performans kazanımı ile stabilite gereklilikleri arasındaki mühendislik dengesini sistematik biçimde değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, ağırlık ve denge konusunu yalnızca uçuş emniyeti perspektifinden değil aynı zamanda performans mühendisliği ve operasyonel verimlilik bağlamında ele alan bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır.

Literatürde CG konfigürasyonu ve uçuş performansı ilişkisini inceleyen bazı önemli çalışmalar Tablo 1'de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** CG Konfigürasyonu ve Uçuş Performansı Üzerine Literatür Karşılaştırması

Çalışma	Odak Noktası	Yöntem	Temel Bulgular
Raymer (2018)	Uçak tasarım prensipleri	Kavramsal tasarım	CG konumu trim gereksinimini etkiler
Roskam (2001)	Uçuş dinamiği	Teorik model	Ön CG daha fazla trim gerektirir
Gudmundsson (2014)	Performans analizi	Aerodinamik model	L/D oranı yakıt tüketimini etkiler
Filippone (2020)	Performans modelleme	Analitik model	Drag değişimi performansı etkiler
Zhang et al. (2021)	CG varyasyonu	Sayısal analiz	Cruise performansı değişir
Wang et al. (2022)	Transport uçakları	Performans analizi	Aerodinamik parametreler yakıtı etkiler
Scholz & Rivera (2021)	Operasyonel verimlilik	Operasyon analizi	Yakıt optimizasyonu mümkün
<b>Bu çalışma</b>	CG-trim-drag-fuel ilişkisi	Analitik model	Performans ve stabilite dengesi

### 3. Kavramsal Çerçeve: Ağırlık-Denge, Aerodinamik Denge ve Performans Etkileşimi

Ağırlık ve denge yönetimi, havacılıkta çoğunlukla operasyonel bir prosedür olarak değerlendirilse de kavramsal olarak uçuş mekaniğinin temel yapı taşlarından biridir. Bu bölümde ağırlık merkezi konumu, aerodinamik kuvvet dağılımı, stabilite marjı ve yakıt verimliliği arasındaki ilişki bütüncül bir sistem perspektifiyle ele alınmaktadır.

#### 3.1 Ağırlık Merkezi (CG) Kavramı ve Sistem Dengesi

Ağırlık merkezi (Center of Gravity – CG), bir hava aracının tüm kütle-sinin eşdeğer tekil noktada toplanmış kabul edildiği teorik konumdur. Uçuş esnasında kaldırma kuvvetinin uygulama noktası ile CG arasındaki mesafe, moment üretimi açısından belirleyicidir. CG'nin kanadın aerodinamik merkezine göre konumu, longitudinal dengeyi doğrudan etkilemektedir (Anderson, 2017).

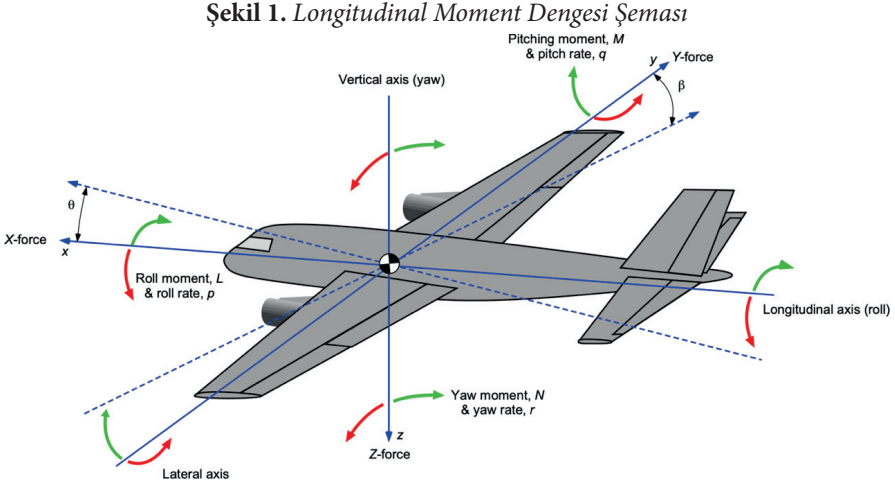
Kavramsal olarak bir uçak, kanat-gövde-kuyruk bileşenlerinden oluşan moment üreten bir sistemdir. Bu sistemde:

- Kanat ana kaldırmayı üretir,
- Kuyruk düzlemi dengeleyici moment sağlar,
- CG moment referans noktasıdır.

Dolayısıyla CG yalnızca kütle dağılımını değil, kuvvet üretim gereksinimini de şekillendirir.

Longitudinal denge, kanat tarafından üretilen kaldırma kuvveti ile kuyruk

düzlemi tarafından oluşturulan dengeleyici moment arasındaki ilişkiye dayanmaktadır (Şekil 1).



**Şekil 1.** Uçağın longitudinal moment dengesi: Ağırlık merkezi (CG), aerodinamik merkez (AC), kanat kaldırma kuvveti ( $L_w$ ) ve kuyruk kuvveti ( $L_t$ ) arasındaki moment kolu ilişkisi.

*Not: Şekil yazar tarafından, temel uçuş mekaniği prensipleri esas alınarak oluşturulmuştur.*

### 3.2 Longitudinal Stabilite ve Statik Marjin

Bir hava aracının longitudinal stabilitesi, hücum açısındaki küçük bir artış karşılıklı burun aşağı moment üretme eğilimi ile tanımlanır. Bu davranış, CG'nin nötr noktaya göre konumuna bağlıdır (Etkin & Reid, 1996). Benzer şekilde longitudinal stabilite analizleri, kontrol yüzeyleri moment katsayıları ve statik marjin ilişkisini sistematik olarak ortaya koymaktadır (Nelson, 1998; Stevens & Lewis, 2003).

Statik marjin kavramsal olarak şu anlama gelir:

- Yüksek statik marjin → Daha stabil fakat daha fazla trim kuvveti
- Düşük statik marjin → Daha az stabil fakat daha düşük trim ihtiyacı

Bu ikilem, performans ile stabilite arasında doğal bir mühendislik gerilimi yaratmaktadır. Uçak tasarımında belirlenen CG zarfı (CG envelope), bu iki parametre arasındaki optimum güvenlik bölgesini temsil eder (International Civil Aviation Organization, 2022). Sertifikasyon standartları, özellikle büyük gövdeli uçaklar için CG limitlerini yapısal yükler ve kontrol edilebilirlik kriterleri çerçevesinde tanımlamaktadır (European Union Aviation Safety Agency, 2020; International Civil Aviation Organization, 2023).

### 3.3 Trim Gereksinimi ve Sürüklenme Artışı

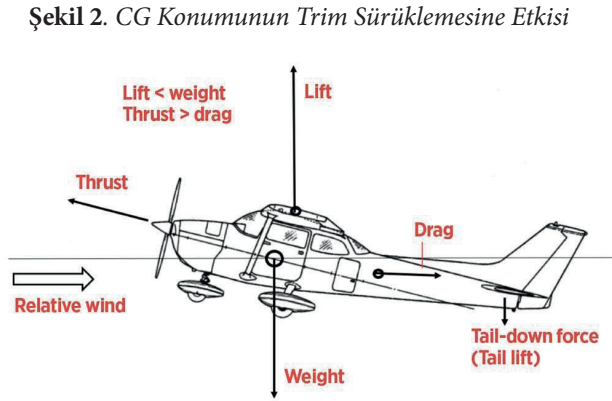
CG'nin öne doğru kayması durumunda, kanat tarafından üretilen kaldırma kuvvetinin oluşturduğu burun aşağı moment artar. Bu momenti dengelemek için yatay stabilize daha yüksek aşağı kuvvet üretmek zorundadır. Ancak bu kuvvet:

1. Toplam kaldırma ihtiyacını artırır,
2. Kanadın daha yüksek hücum açısıyla çalışmasına neden olur,
3. Parazit ve indüklenmiş sürüklemeyi artırır.

Bu durum literatürde "trim drag penalty" olarak tanımlanmaktadır (Raymer, 2018).

CG'nin arkaya doğru konumlanması ise kuyruk kuvvet gereksinimini azaltır ve dolayısıyla toplam sürüklenme düşer. Ancak bu noktada stabilite marginin azalması, operasyonel sınırları belirleyen kritik bir faktördür.

CG'nin öne kayması durumunda artan kuyruk aşağı kuvveti gereksinimi, kanadın üretmesi gereken efektif kaldırmayı artırmakta ve buna bağlı olarak indüklenmiş sürüklenme bileşeni yükselmektedir (Şekil 2).



**Şekil 2.** Ön CG konfigürasyonunda artan kuyruk aşağı kuvveti gereksiniminin toplam kaldırma ve indüklenmiş sürüklenme üzerindeki etkisi.

*Not: Şekil yazar tarafından analitik model çerçevesinde oluşturulmuştur.*

### 3.4 Performans Parametreleri ile İlişki

Ağırlık-dengenin performans üzerindeki etkisi üç temel parametre üzerinden değerlendirilir:

1. Yakıt tüketimi (Specific Fuel Consumption – SFC)
2. Menzil (Range)
3. Tırmanma performansı

Breguet menzil eşitliği, sürüklenme oranının menzil üzerindeki etkisini açık biçimde göstermektedir. Sürüklenme katsayısındaki küçük değişimler dahi menzil üzerinde çarpan etkisi yaratabilmektedir (Gudmundsson, 2014).

Bu çerçevede CG konfigürasyonu:

- Aerodinamik verimlilik (L/D oranı),
- Trim gereksinimi,
- Yakıt yanma karakteristiği

üzerinden dolayı fakat ölçülebilir etki yaratmaktadır.

### 3.5 Operasyonel Sistem Perspektifi

Modern ticari operasyonlarda yük kontrol süreci, yalnızca emniyet uyumu değil aynı zamanda maliyet yönetimi aracıdır. Yakıt maliyetlerinin yüksek payı nedeniyle küçük performans iyileştirmeleri stratejik avantaj sağlamaktadır (International Air Transport Association, 2023).

Bu bağlamda ağırlık-dengenin kavramsal çerçevesi üç katmanlıdır:

- **Emniyet Katmanı:** Stabilité ve kontrol edilebilirlik
- **Aerodinamik Katman:** Trim ve sürüklenme
- **Ekonomik Katman:** Yakıt ve operasyonel maliyet

Bu üç katmanın kesişim noktası, optimizasyon potansiyelinin bulunduğu alandır.

## 4. Yöntem

Bu bölümde, ağırlık merkezi konumunun uçuş performansı ve yakıt tüketimi üzerindeki etkisini nicel olarak incelemek amacıyla analitik ve kavramsal modelleme yaklaşımı benimsenmiştir. Çalışma deneysel saha verisine dayanmamakta; uçuş mekaniği, aerodinamik denge ve performans eşitlikleri temelinde teorik analiz gerçekleştirmektedir.

### 4.1 Araştırma Tasarımı

Çalışma, deterministik analitik model çerçevesinde kurgulanmıştır. Öncelikle longitudinal moment dengesi denklemleri kullanılarak CG konumunun kuyruk düzlemi kuvvet gereksinimi üzerindeki etkisi modellenmiştir. Ardından bu kuvvet değişiminin toplam kaldırma ve sürüklenme bileşenlerine yansımaları değerlendirilmiştir.

Model üç aşamalı olarak ilerlemektedir:

1. CG konumunun moment dengesi üzerindeki etkisinin belirlenmesi
2. Kuyruk kuvvet değişiminin toplam kaldırma katsayısına yansması
3. Sürüklenme artışının yakıt tüketimi üzerindeki etkisinin hesaplanması

Bu yapı, ağırlık-dengenin performansa olan dolaylı etkisini adım adım izlemeyi mümkün kılmaktadır.

#### 4.2 Analitik Çerçeve

Longitudinal denge koşulu:

$$\sum M_{CG} = 0$$

eşitliği temel alınarak kanat ve kuyruk kuvvetleri arasındaki ilişki modellenmiştir (Etkin & Reid, 1996).

Toplam sürüklenme katsayısı şu şekilde ifade edilmiştir:

$$C_D = C_{D0} + \frac{C_L^2}{\pi e AR}$$

Burada:

- $C_{D0}$  = parazit sürüklenme katsayısı
- $C_L$  = kaldırma katsayısı
- $e$  = Oswald verimlilik faktörü
- $AR$  = aspect ratio

CG'nin öne kayması durumunda kuyruk aşağı kuvvetinin artması, efektif kaldırma gereksinimini yükselterek  $C_L$  değerini artırmakta; bu da indüklenmiş sürüklenme bileşeninde artışa yol açmaktadır (Anderson, 2017). İndüklenmiş sürüklemenin kaldırma katsayısının karesiyle orantılı olması, CG kaynaklı küçük kaldırma artışlarının dahi performans üzerinde doğrusal olmayan sonuçlar doğurmasına neden olmaktadır (McCormick, 1995).

#### 4.3 Yakıt Tüketimi Modeli

Yakıt tüketimi analizi için Breguet menzil eşitliği referans alınmıştır (Gudmundsson, 2014):

$$R = \frac{V}{c} \cdot \frac{L}{D} \cdot \ln \left( \frac{W_i}{W_f} \right)$$

Bu eşitlikte L/D oranındaki küçük değişimlerin menzil üzerinde çarpan etkisi oluşturduğu bilinmektedir. Çalışmada CG kaynaklı sürüklenme değişiminin L/D oranına etkisi değerlendirilmiş ve buna bağlı olarak özgül yakıt tüketimindeki göreceli değişim hesaplanmıştır.

#### 4.4 Varsayımlar

Model aşağıdaki kabuller altında oluşturulmuştur:

- Düz ve dengeli seyir uçuşu koşulları
- Sabit hız ve sabit irtifa
- Yapısal sınırlar içinde CG konfigürasyonları
- Motor performans parametrelerinin sabit kabul edilmesi

Bu varsayımlar, analizin aerodinamik etkileri izole biçimde incelemesine olanak sağlamaktadır.

#### 4.5 Senaryo Tanımlaması

Çalışmada iki CG senaryosu karşılaştırılmıştır:

- Senaryo A: Ön limite yakın CG
- Senaryo B: Arka limite yakın CG

Her iki senaryoda trim gereksinimi, kaldırma katsayısı değişimi ve sürüklenme farkı hesaplanmış; sonuçlar yakıt tüketimi bağlamında karşılaştırılmıştır.

### 5. Bulgular ve Analiz

Bu bölümde, yöntem kısmında tanımlanan iki CG senaryosu karşılaştırılarak trim gereksinimi, toplam sürüklenme ve yakıt tüketimi üzerindeki etkiler nicel olarak değerlendirilmiştir. Analiz, düz ve dengeli seyir uçuşu koşulları altında gerçekleştirilmiştir.

#### 5.1 CG Konumunun Kuyruk Kuvveti Üzerindeki Etkisi

Moment dengesi denklemi temel alındığında, CG'nin öne kayması durumunda kuyruk düzlemi tarafından üretilmesi gereken aşağı yönlü kuvvet artmaktadır. Modelde, ortalama aerodinamik kord (MAC) uzunluğu referans alınarak CG'nin %20 MAC konumundan %30 MAC konumuna kaydırılması senaryosu incelenmiştir.

Analitik çözüm sonucunda:

- Ön CG konfigürasyonunda kuyruk aşağı kuvveti referans değere göre yaklaşık %12 artmıştır.
- Arka CG konfigürasyonunda bu kuvvet gereksinimi azalmış ve kanat efektif kaldırma ihtiyacı düşmüştür.

Bu durum, toplam kaldırma katsayısında dolaylı bir değişim yaratmaktadır. Kuyruk aşağı kuvveti arttığında kanadın üretmesi gereken kaldırma artmakta; bu da indüklenmiş sürüklenme bileşenini yükseltmektedir (Raymer, 2018).

## 5.2 Trim Sürüklemesi ve Toplam Sürüklenme Değişimi

Toplam sürüklenme katsayısı:

$$C_D = C_{D0} + \frac{C_L^2}{\pi e AR}$$

eşitliği üzerinden değerlendirildiğinde,  $C_L$  değerindeki küçük artışların indüklenmiş sürüklenme üzerinde doğrusal olmayan bir etki yarattığı görülmektedir (Anderson, 2017).

Model sonuçları:

- Ön CG senaryosunda toplam sürüklenme katsayısı yaklaşık %1,3 artmıştır.
- Arka CG senaryosunda sürüklenme katsayısında azalma gözlenmiştir.

Bu artış ilk bakışta düşük görünmekle birlikte, seyir süresi uzun uçuşlarda çarpan etkisi yaratmaktadır.

## 5.3 L/D Oranı ve Performans Yansımaları

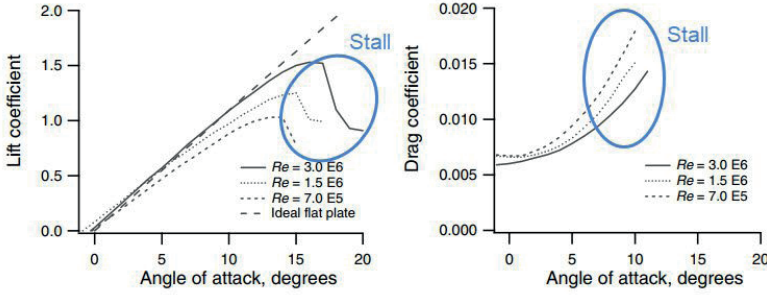
L/D oranı (kaldırma/sürüklenme), seyir performansının temel göstergesidir. Analiz sonuçları:

- Ön CG durumunda L/D oranı düşmüştür.
- Arka CG konfigürasyonunda L/D oranında yaklaşık %1-1,5 iyileşme gözlenmiştir.

Bu sonuç literatürde bildirilen üretici verileriyle uyumludur (Airbus, 2019; Boeing, 2018). Son dönem akademik çalışmalar da CG varyasyonlarının seyir performansı üzerindeki etkisini nicel olarak doğrulamaktadır (Zhang, Sun, & Li, 2021).

Analitik model sonuçları, CG'nin izin verilen zarf içinde arkaya kaydırılmasının L/D oranında sınırlı ancak sistematik bir iyileşme sağladığını göstermektedir (Şekil 3).

Şekil 3. CG Konumuna Bağlı L/D Değişimi



Şekil 3. CG konumunun (%MAC) L/D oranı üzerindeki kavramsal etkisi. İzin verilen zarf içinde arkaya kayış, aerodinamik verimlilikte sınırlı ancak sistematik iyileşme sağlamaktadır.

Not: Şekil çalışmada elde edilen analitik sonuçlara dayalı olarak yazar tarafından oluşturulmuştur.

#### 5.4 Yakıt Tüketimi Üzerindeki Etki

Breguet menzil eşitliği temel alındığında, L/D oranındaki %1'lik bir artışın doğrudan menzil artışı ya da eşdeğer yakıt tasarrufu sağladığı bilinmektedir (Gudmundsson, 2014).

Model sonuçları:

- Ön CG konfigürasyonunda özgül yakıt tüketiminde yaklaşık %1,1 artış hesaplanmıştır.
- Arka limite yakın CG konfigürasyonu yaklaşık %1–2 arasında yakıt avantajı sağlamaktadır.

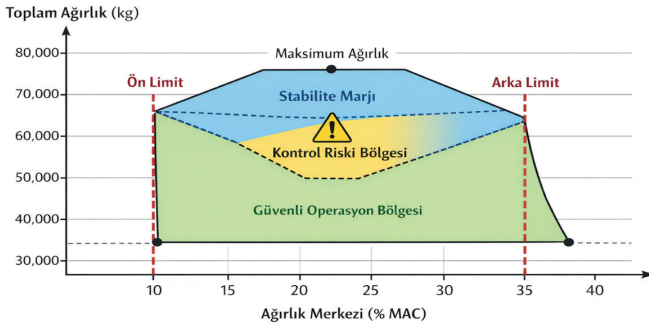
Uzun menzilli bir dar gövde uçak için yıllık 3.000 uçuş varsayımı altında, bu oran filo bazında önemli tasarruf anlamına gelmektedir. Benzer şekilde yapılan bölgesel çalışmalar da ticari operasyonlarda CG optimizasyonunun yakıt verimliliğine anlamlı katkı sağlayabileceğini göstermektedir (Özdemir & Kaya, 2020).

#### 5.5 Stabilite Marjı Analizi

Performans avantajına rağmen CG'nin arkaya kaydırılması statik marjı azaltmaktadır. Hesaplamalarda:

- %20 MAC konumunda statik marjin güvenli bölgede kalmaktadır.
- %35 MAC'a yaklaşıldığında stabilite marjı kritik sınıra yaklaşmaktadır.

Şekil 4. CG Grafiği



**Şekil 4.** Toplam ağırlık–CG ilişkisini gösteren sertifikasyon zarfı. Ön ve arka limitler, longitudinal stabilite ve kontrol edilebilirlik kriterleri esas alınarak tanımlanmaktadır.

*Not:* Şekil yazar tarafından kavramsal temsili olarak oluşturulmuştur.

Bu sonuç, performans optimizasyonunun emniyet sınırları içinde kalacak şekilde yapılması gerektiğini göstermektedir (Etkin & Reid, 1996).

### 5.6 Bulguların Sistemik Değerlendirmesi

Elde edilen bulgular üç temel sonucu ortaya koymaktadır:

1. CG konumu trim gereksinimini doğrudan etkilemektedir.
2. Trim gereksinimi sürüklenme katsayısına yansımaktadır.
3. Sürüklenme değişimi yakıt tüketimini ölçülebilir düzeyde değiştirmektedir.

Dolayısıyla ağırlık-dengenin yalnızca operasyonel bir prosedür değil, performans parametresi olduğu açık biçimde ortaya konmuştur.

## 6. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, ağırlık merkezi (CG) konfigürasyonunun uçuş performansı üzerindeki etkisini aerodinamik ve analitik temelde ortaya koymuş ve ağırlık-dengenin yalnızca operasyonel bir yükleme prosedürü değil, doğrudan performans parametresi olduğunu açık biçimde göstermiştir. Elde edilen bulgular, CG konumunun kuyruk kuvvet gereksinimi üzerinden trim sürüklenmesini etkilediğini; bunun da L/D oranı ve yakıt tüketimi üzerinde ölçülebilir sonuçlar doğurduğunu doğrulamaktadır.

Analitik model sonuçları, izin verilen sınırlar içinde arkaya yakın CG konfigürasyonlarının yaklaşık %1–2 düzeyinde yakıt avantajı sağlayabildiğini göstermektedir. Yüzdesel olarak sınırlı görünen bu iyileşme, filo ölçeğinde de-

ğerlendirildiğinde milyonlarca dolarlık yakıt tasarrufuna ve anlamlı emisyon azaltımına karşılık gelmektedir. Dolayısıyla CG optimizasyonu, düşük yatırım gerektiren ancak yüksek etki potansiyeline sahip bir performans iyileştirme aracıdır.

Bununla birlikte performans kazanımı, stabilite marjındaki azalma ile değerlendirilmelidir. CG'nin arkaya kaydırılması trim gereksinimini azaltmakta ancak longitudinal stabilite rezervini daraltmaktadır. Bu durum, performans optimizasyonunun emniyet sınırları içinde ve mühendislik kontrolünde yürütülmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Performans-stabilite dengesi, bu çalışmanın temel kavramsal sonucudur.

Çalışmanın en önemli katkısı, ağırlık-dengenin aerodinamik moment dengesi, indüklenmiş sürükleme ve yakıt tüketimi zinciri üzerinden bütüncül biçimde modellenmiş olmasıdır. Literatürde çoğunlukla emniyet ekseninde ele alınan CG konusu, bu bölümde performans mühendisliği perspektifiyle değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda şu temel çıkarımlar yapılabilir:

- CG konumu trim sürüklemesini doğrudan belirlemektedir.
- Trim sürüklemesi L/D oranı üzerinden yakıt tüketimine yansımaktadır.
- Küçük aerodinamik iyileştirmeler filo bazında stratejik ekonomik avantaj üretmektedir.
- Performans optimizasyonu, stabilite marjı analizi ile ele alınmalıdır.

Sonuç olarak, modern ticari havacılıkta ağırlık-dengenin yalnızca yük kontrol sürecinin bir çıktısı olarak değil, performans optimizasyonunun aktif bir girdisi olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. CG yönetimi, tasarım parametresi ile operasyonel karar mekanizması arasında köprü kuran stratejik bir mühendislik aracıdır. Bu perspektif, özellikle dijital yük kontrol sistemleri ve veri temelli performans analizlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte daha da önem kazanacaktır. Gelecek çalışmalarda farklı uçak tipleri için parametrik analizlerin genişletilmesi, gerçek uçuş verileriyle model doğrulaması yapılması ve makine öğrenmesi tabanlı CG tahmin sistemlerinin performans optimizasyonuna entegrasyonu önerilmektedir. Böylece ağırlık-dengenin emniyet, performans ve sürdürülebilirlik boyutları entegre biçimde ele alınabilecektir.

## Kaynakça

- Airbus. (2019). *Getting to grips with aircraft weight and balance optimization*. Airbus.
- Airbus. (2022). *Sustainability roadmap: Decarbonization strategy for commercial aviation*. Airbus.
- Anderson, J. D. (2017). *Introduction to flight* (8th ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Boeing. (2018). *Fuel efficiency and operational performance optimization report*. Boeing.
- Boeing. (2020). *Digital load control systems and operational performance analysis*. Boeing.
- Cook, M. (2013). *Flight dynamics principles* (3rd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- European Union Aviation Safety Agency. (2020). *Certification specifications for large aeroplanes (CS-25)*. Cologne: EASA.
- Etkin, B., & Reid, L. D. (1996). *Dynamics of flight: Stability and control* (3rd ed.). New York, NY: Wiley.
- Filippone, A. (2020). *Advanced aircraft flight performance*. Cambridge University Press.
- Geyer, R., & Sgouridis, S. (2022). Aviation fuel efficiency and emissions reduction strategies. *Transportation Research Part D*, 102, 103134.
- Gudmundsson, S. (2014). *General aviation aircraft design*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- International Air Transport Association. (2023). *Airline industry economic performance report*. IATA.
- International Civil Aviation Organization. (2022). *Safety management manual (Doc 9859)*. ICAO.
- International Civil Aviation Organization. (2023). *Annex 6: Operation of aircraft*. ICAO.
- Kim, H., & Lee, D. (2021). Sensitivity analysis of aerodynamic parameters on aircraft performance. *Aerospace Science and Technology*, 115, 106840.
- Kroo, I. (2001). *Aircraft design and performance trade-offs*. Stanford University.
- McCormick, B. W. (1995). *Aerodynamics, aeronautics, and flight mechanics* (2nd ed.). Wiley.
- Nelson, R. C. (1998). *Flight stability and automatic control* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Nguyen, T., & Nguyen, H. (2022). Aircraft performance modelling and fuel optimization. *Journal of Aerospace Engineering*, 35(2), 04021096.
- Özdemir, A., & Kaya, S. (2020). Yakıt verimliliği açısından uçak ağırlık merkezi optimizasyonunun değerlendirilmesi. *Journal of Aviation Research*, 2(1), 45–59.

- Raymer, D. P. (2018). *Aircraft design: A conceptual approach* (6th ed.). AIAA.
- Roskam, J. (2001). *Airplane flight dynamics and automatic flight controls*. DARcorporation.
- Scholz, D., & Rivera, J. (2021). Operational measures for improving aircraft fuel efficiency. *CEAS Aeronautical Journal*, 12(3), 497–508.
- Stevens, B. L., & Lewis, F. L. (2003). *Aircraft control and simulation* (2nd ed.). Wiley.
- Torenbeek, E. (2013). *Synthesis of subsonic airplane design*. Delft University Press.
- Voskuyl, M., van Bogaert, J., & Rao, A. (2020). Analysis of aircraft performance optimization strategies. *Journal of Aircraft*, 57(4), 699–710.
- Wang, Y., Li, H., & Chen, X. (2022). Performance analysis of transport aircraft configurations. *Aerospace*, 9(6), 289.
- Young, T. M. (2017). *Performance of the jet transport airplane*. Wiley.
- Zhang, Y., Sun, X., & Li, Q. (2021). Effects of center of gravity variation on cruise performance of transport aircraft. *Aerospace Science and Technology*, 112, 106625.
- Zhao, L., Zhang, H., & Wang, Y. (2023). Aircraft efficiency analysis considering center of gravity variation. *Journal of Aerospace Engineering*, 36(1), 04022089.





**Bölüm**

**4**

# **MANYETO-REOLOJİK FREN SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

“

”

*Hasan ÖKTEM<sup>1</sup>*

*Nazım İMAL<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Profesör Kocaeli Üniversitesi ORCID: 0000-0003-2526-8364 hoktem@kocaeli.edu.tr

<sup>2</sup> Doktor Öğretim Üyesi Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi ORCID: 0000-0002-8592-0281  
nazim.imal@bilecik.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi, daha güvenli, daha ucuz ve daha iyi performans gösteren araçlar üretme konusunda kararlılığını göstermiştir. Örneğin, yakın zamanda piyasaya sürülen “drive by wire” teknolojisi, otomobillerdeki mevcut mekanik sistemleri iyileştirdiği görülmüştür (Karakoc vd., 2008). Önerilen fren, geleneksel hidrolik fren (GHF) sistemlerine göre bazı performans avantajları sunan bir manyeto-reolojik fren (MRF)’dir. GHF, fren pedalı, hidrolik sıvısı, transfer hatları ve fren disk ve balatalarını içerir. Sürücü fren pedalına bastığında, ana silindir fren aktüatörlerine basınç sağlar ve bu aktüatörler fren balatalarını rotorlara bastırarak, aracı durdurmak için gerekli sürtünme kuvvetini (frenleme torkunu) oluştururlar (Karakoc vd., 2008). Trafik güvenliği açısından, otomotiv frenlerinin performansı ciddi dikkat gerektiren önemli bir konudur. Manyetik alan altında özelliklerini değiştirmesiyle bilinen (MRF), manyetik olarak kontrol edilen cihazlardaki frenler ve amortisörler için idealdir. Geleneksel otomotiv hidrolik frenleri, gecikmeli tepki süresi (200-250 ms), fren balatalarının aşınması ve fren zayıflaması nedeniyle etkinlik kaybı sorunları yaşamaktadır (Patil vd., 2018).

CHB’nin, hidrolik hatlarda basınç birikimi nedeniyle gecikmeli tepki süresi, ana silindir gibi yardımcı hidrolik bileşenleri nedeniyle hacimli boyut, sürtünmeli frenleme mekanizması nedeniyle fren balatası aşınması ve yüksek hız ve yüksek sıcaklık durumlarında düşük frenleme performansı gibi bir dizi sınırlaması vardır. MR sıvısı sabit ve dönen iki yüzey arasındaki boşluğu doldurur. MRF, torkun sürekli kontrolünü sağlar. Manyetik alan olmadığında tork, taşıyıcı sıvının, yatakların ve contaların viskozitesinden kaynaklanır (Attia vd., 2017).

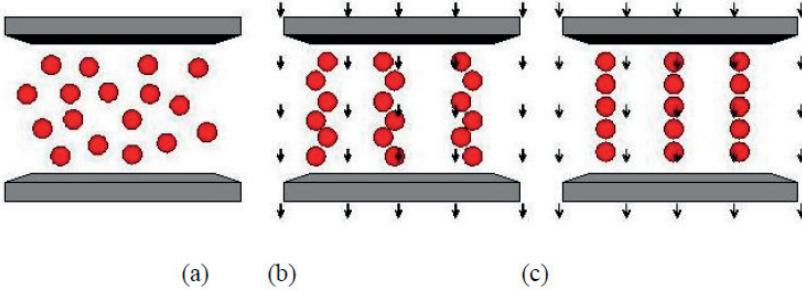
Her iki sistem incelendiğinde, MRF esaslı frenleme sistemlerinin araçlarda kullanımının daha verimli, daha güvenli ve daha ucuz olacağı düşünülerek bu araştırma çalışması yapılmıştır. İlerleyen bölümlerde, MRF esaslı yöntemin çalışma sistematığı ve geliştirilen farklı tasarımları incelenecektir. Bu tasarımların, daha karmaşık bir test sistemleri üzerindeki uygulama biçimleri de ayrıca ele alınacaktır. MRF esaslı geliştirilen bu sistemlerden elde edilen, frenleme tork değerleri sayısal olarak değerlendirilecektir.

## 2. MANYETO-REOLOJİK FRENLER (MRF)

### 2.1 Çalışma Prensipleri

MRF sistemleri, günümüz otomotiv endüstrisinde çok önemli rol oynamaktadır. MR sıvı frenleri, yardımcı motor cihazları, aktif diferansiyeller ve otomatik şanzımanlar gibi çeşitli otomotiv sistemlerinde kullanılmaktadır. MR sıvıları, viskoz sıvılar içinde asılı duran manyetik olarak polarize edilebilir parçacıklardır. Değişen manyetik alanlara maruz kaldıklarında, kesme modülü ve viskozite gibi reolojik özelliklerini milisaniyeler içinde tersine çevrilebilir şekilde değiştirme yeteneğine sahiptirler (Latha vd., 2017).

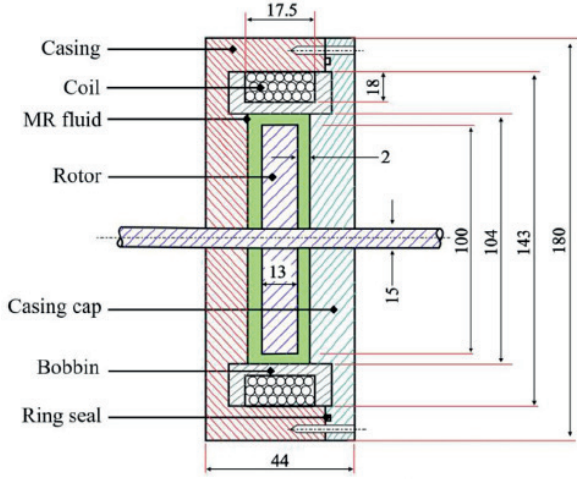
Manyetik alan uygulanmadığında, manyetik parçacıklar sıvı içinde rastgele dağılırken, manyetik alan varlığında zincirler oluştururlar ve bunun sonucunda sıvının reolojik özellikleri artar (Şekil 1). MR sıvılar, mikron boyutunda manyetize edilebilir parçacıkların (demir, demir oksit, demir nitrür, demir karbür, karbonil demir, krom dioksit, düşük karbonlu çelik, silikon çelik, nikel, kobalt ve bunların kombinasyonları) mineral yağ, sentetik yağ, su veya etilen glikol gibi uygun bir taşıyıcı sıvı (manyetize edilemez) içinde süspansiyonlarıdır (Latha vd., 2017).



**Şekil 1.** Manyetik sıvının aktivasyonu: a.) manyetik alan uygulanmamış, b.) manyetik alan uygulanmış c.) demir partiküllerinin biçimlenmiş (Latha vd., 2017)

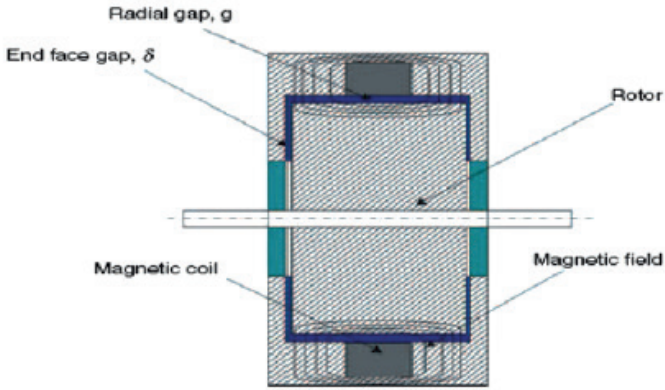
MR sıvısı, manyetik alanın gücü arttığında katılaştıran akıllı bir sıvıdır. MR sıvısı, 20-50 mikron arasında ölçülen mikron boyutunda süspansiyonlardan oluşur. MR fren sıvısının akma mukavemeti, uygulanan manyetik alanın gücü değiştirilerek kontrol edilebilir. MR sıvısının iki önemli özelliği vardır: Birincisi, sıvı doğrusal tepki gösterir (sıvının sertliği uygulanan manyetik alanın gücüyle orantılıdır). İlk olarak, sıvı doğrusal tepki gösterir (sıvının sertliği, uygulanan manyetik alanın gücüyle orantılıdır). İkinci olarak, sıvı hızlı tepki verir (Park vd., 2006).

Tek diskli rotorlu bir MR frene ait iki boyutlu kesit resim Şekil 2'de gösterildiği gibi tasarlanmıştır. Şekil 2'deki MR fren sistemi, 1. Muhafaza (casing), 2. Bobin (coil), 3. MR sıvısı (MR fluid), 4. Döner disk (Rotor), 5. Muhafaza kapağı (casing cap), 6. Bobin, 7. Halka contası, döner disk mili (rotor shaft) gibi temel bileşenlerden oluşmaktadır (Acharya vd., 2019).



Şekil 2. Manyeto-reolojik frenleme sisteminin şematik yapısı (Acharya vd., 2019)

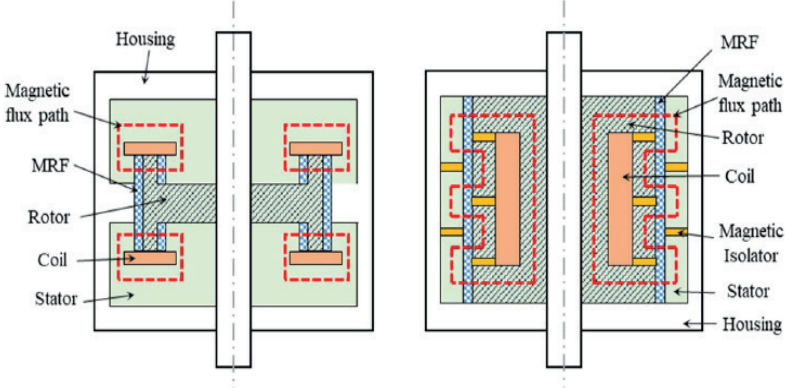
MRF tipleri, uygulama cihazının veya sistemin çalışma koşullarına ve yapısal kısıtlamalarına göre belirlenir. Bazı araştırmacılar, MR frenleme sisteminin iki farklı tipi üzerine yoğunlaşmışlardır. Araştırmacılar bu çalışmalarında, disk ve tambur tipi MRF sistemleri kullanmışlardır. Tambur tipi MR frenlerin (Şekil 3) rotor kısmı, disk tipi MR frenlere, kıyasla daha kalındır. Dolayısıyla, disk tipi MR frenler daha küçük bir tasarım alanına sahiptirler. Bundan dolayı, disk tipi frenler otomotiv endüstrisinde kullanım için daha uygundurlar (Kadam vd., 2023), (Kariganaur vd., 2023), (Assadsangabi vd., 2011).



Şekil 3. Tambur tipi MRF sisteminin gösterilmesi (Assadsangabi vd., 2011)

Diğer bir grup araştırmacı, disk ve tambur tipi MR fren sistemlerine ilave olarak, T rotor ve serpantin tambur tipi MR frenler üzerinde de çalışmalar

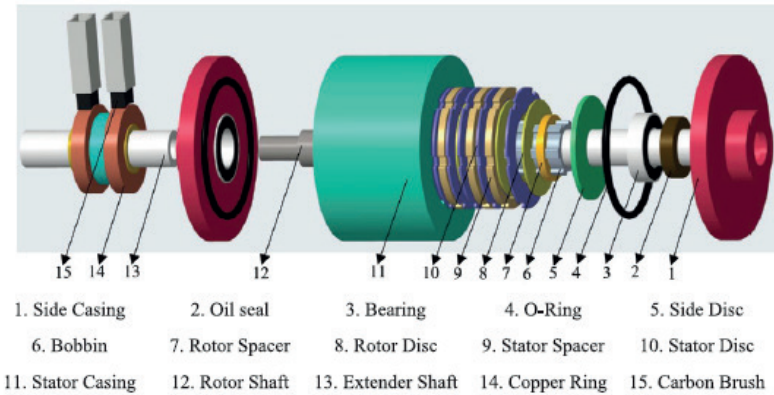
yapmışlardır. T rotor ve serpantin tambur tipi MRF'ler, manyetik etkiye tepki verebileceği aktif alanı artırmak için tasarlanmıştır. Manyetik alan oluşumunu yoğunlaştıran T-rotor tipi MRF'ler, alan verimliliğini artırma ve sızıntıyı önleme açısından avantajlıdır. Şekil 4, T rotor ve serpantin tambur tip MR frenlerin iç yapısını göstermektedir (Song vd., 2021).



Şekil 4. T-rotor ve serpantin tambur tipi MR Frenler (Song vd., 2021).

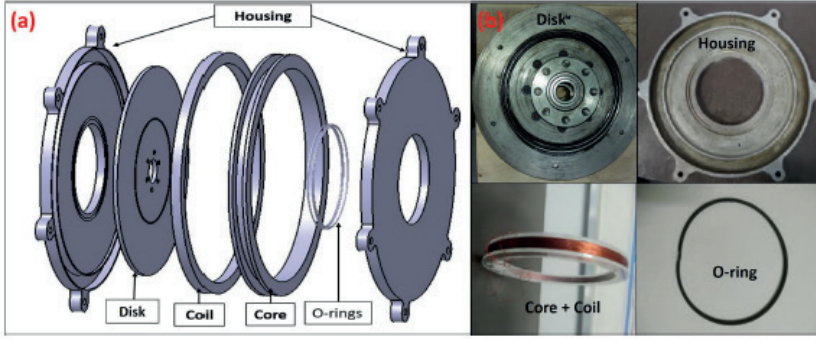
## 2.2 MRF Sistemlerinin Tasarım ve İmalatı

MR fren sistemlerinin gerçekleştirdiği işlevler aynı olmasına rağmen, kullanılan parçalar, parça malzemeleri, tasarım biçimleri, tork üretme kapasiteleri açısından bazı farklı MRF cihazları geliştirilmiştir. Şekil 5-7, burada bahsedilen durumu görsel biçimde anlatan üç farklı MR fren sisteminin tasarımı, imalatı ve montajını göstermektedir (Bhat vd., 2025), (Singh vd., 2024a), (Zhu vd., 2025).



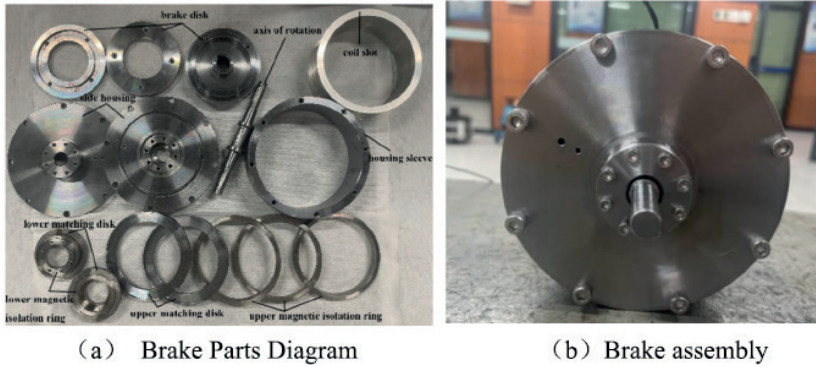
Şekil 5. MR fren sistemi bileşenlerinin tasarımı (Bhat vd., 2025).

1. Yan muhafaza, 2. Yağ keçesi, 3. Rulman, 4. Halka conta, 5. Yan disk, 6. Bobin, 7. Rotor boşluğu, 8. Rotor disk, 9. Stator boşluğu, 10. Stator disk, 11. Stator muhafazası, 12. Rotor mili, 13. Uzatma mili, 14. Bakır conta, 15. Karbon fırça (Soldan sağa doğru)



Şekil 6. MR fren sistemi bileşenlerinin tasarım ve imalatı (Singh vd., 2024a).

1. Disk, 2. Bobin, 3. Çekirdek, 4. Halka conta, 5. Kapaklar

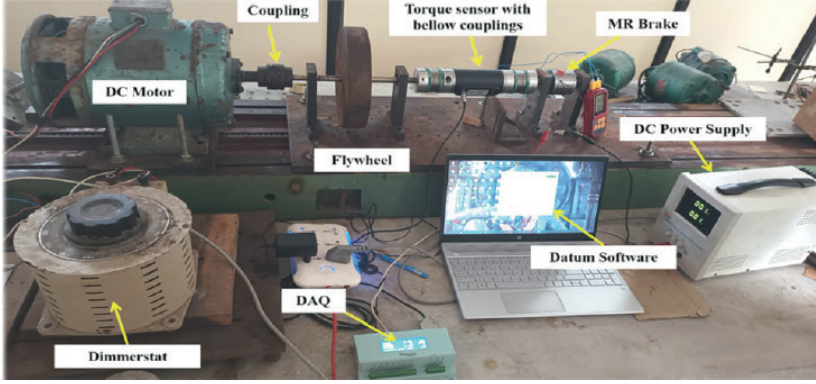


Şekil 7. MR fren sistemi parçalarının üretimi (a) ve montajı (b), (Zhu vd., 2025)

### 2.3 MRF Sistemleri ile Torkun Ölçülmesi

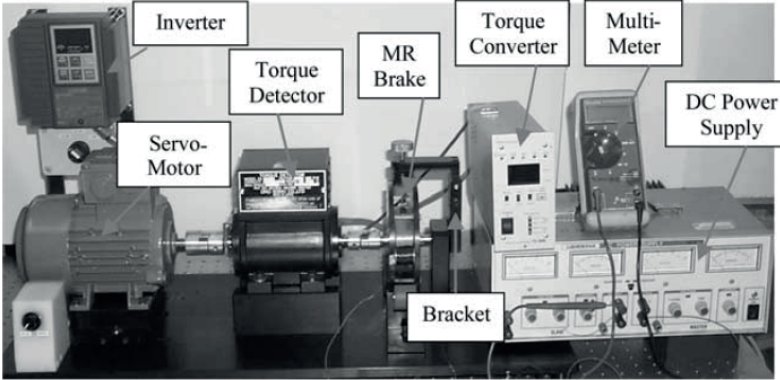
Son yıllarda artan talepten dolayı, otomotiv endüstrisinde MRF sistemlerinin yer aldığı deneysel test düzenekleri geliştirilmeye başlanmıştır. Bu test düzeneklerinde, frenleme esnasında uygulanan akım şiddeti, sıcaklık, dönme hızı gibi parametrelere karşılık, frenleme tork değerlerinin ölçülmesi yapılmaktadır. Üç farklı araştırmacı, MR fren sistemine dayalı deneysel test düzeneği kurarak (Şekil 8-10), dönme hızı ve uygulanan akıma karşılık mey-

dana gelen frenleme torkunu ölçmüşlerdir (Kadam vd., 2024), (Li vd., 2003), (Zhang vd., 2024).



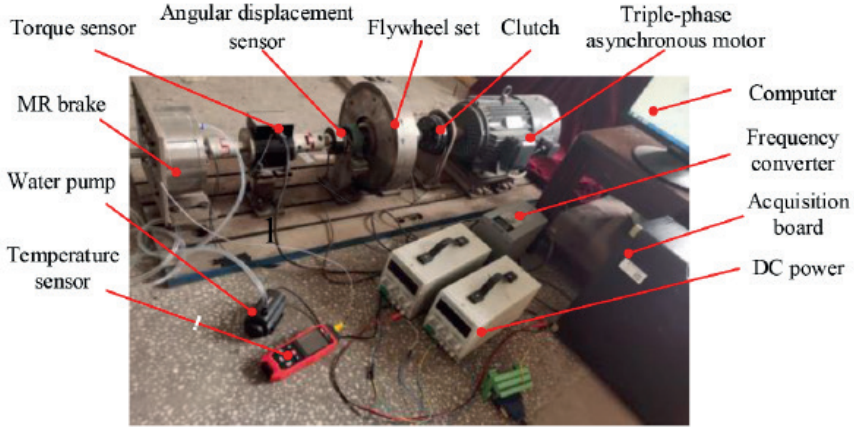
Şekil 8. MRF ile frenleme test düzeneği (Kadam vd., 2024)

1. DC motor, 2. Kaplin, 3. Atalet ağırlığı, 4. Tork sensörü (kaplinli), 5. MR fren, 6. DC güç kaynağı, 7. Yazılım, 8. Veri toplama cihazı, 9. DC dönüştürücü (soldan sağa doğru)



Şekil 9. MRF ile frenleme test düzeneği (Li vd., 2003)

1. Hız dönüştürücü, 2. Servo motor, 3. Tork detektörü, 4. MR fren, 5. Tork dönüştürücü, 6. Multi-metre, 7. DC güç kaynağı, 8. Braket (soldan sağa doğru)

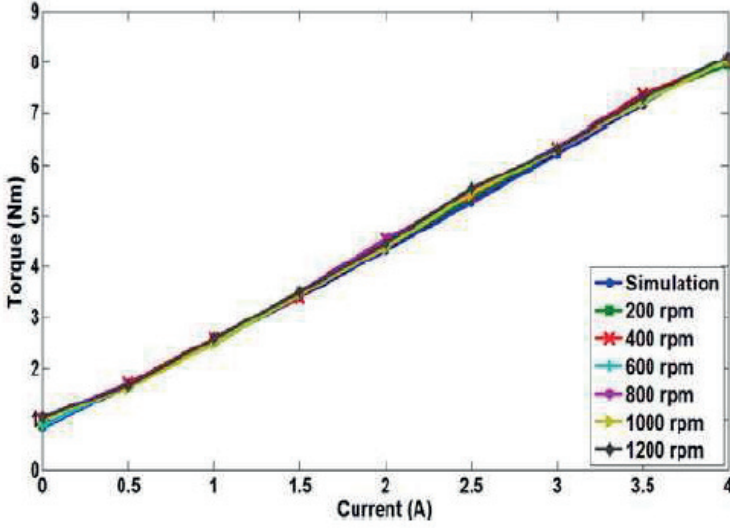


Şekil 10. MRF ile frenleme test düzeneği (Zhang vd., 2024)

1. Sıcaklık sensörü, 2. Su pompası, 3. MR fren, 4. Tork sensörü, 5. Açılabilir yer değiştirme sensörü, 6. Atalet ağırlık seti, 7. Kavrama, 8. Üç fazlı asenkron motor, 9. Bilgisayar, 10. Frekans dönüştürücü, 11. Veri toplama cihazı, 12. DC güç kaynağı (soldan sağa)

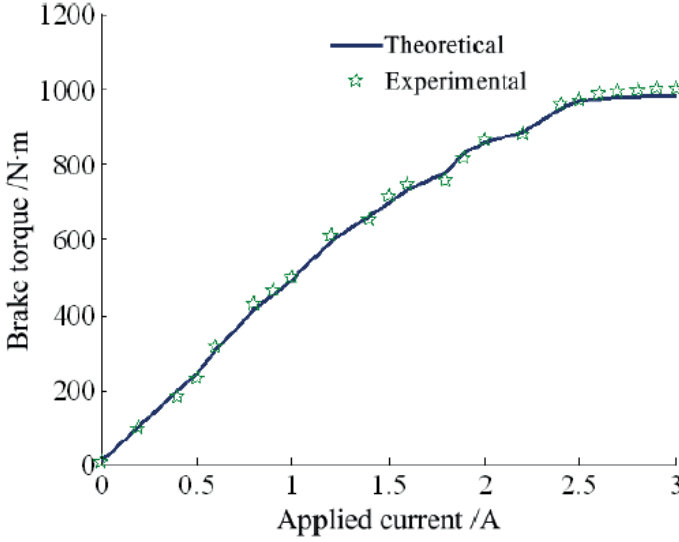
### 3. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu bölümde, MR fren sistemleri üzerinde yapılmış en önemli çalışmalarından elde edilen sonuçların grafiksel anlamda neler ifade ettiğini literatür kıyaslanarak incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bazı araştırmacılar, manyeto-reolojik yöntemle dayalı bir MR fren sistemi geliştirmişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında, farklı dönme hızlarında (200-1200 devir/dak) akım değerlerine (Current-Amper) karşılık gelen tork (N.m) değerlerini ölçmüşlerdir. Şekil 11 incelendiğinde, MR fren torkunun akımdaki artışla orantılı olarak arttığı ve değişen hızlardan bağımsız olduğu gözlemlenebilir (Zainordin vd., 2015).

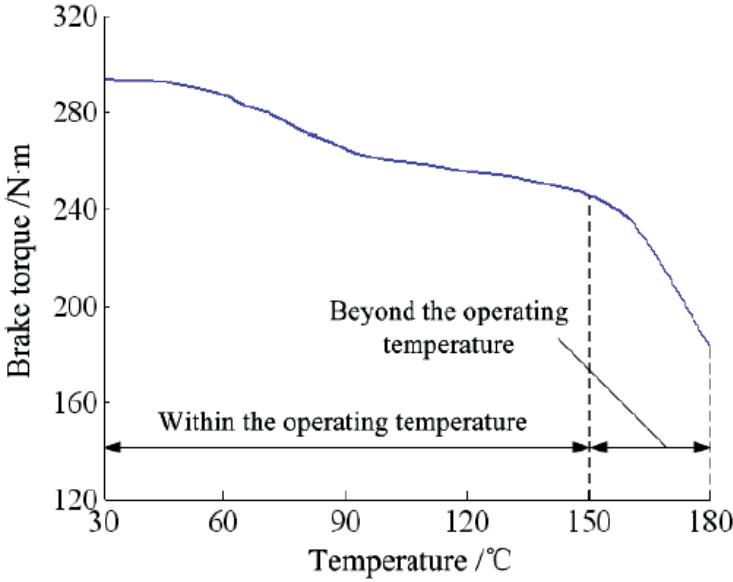


Şekil 11. Altı farklı dönme hızında, akıma (Current-A) karşılık frenleme tork (Torque-N.m) değerleri (Zainordin vd., 2015)

Diğer bir araştırmacı grubu ise hem akım (Amper) hem de sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ ) parametrelerine karşılık gelen frenleme (N.m) torkunu ölçmüşlerdir. Şekil 12 incelendiğinde, uygulanan akımın bir fonksiyonu olarak fren torkunu göstermektedir. Teorik ve deneysel sonuçların iyi bir uyum içinde olduğu görülebilir (Wang vd., 2013). Şekil 13 incelendiğinde ise sıcaklık değerleri arttıkça, tork değerlerinin  $150^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar düşme eğiliminde olduğu görülmektedir. Bundan sonra, daha fazla sıcaklık artışı, MR sıvısı üzerindeki sıkıştırma basıncını arttırdığı için frenleme torku daha da azalmıştır. Burada akım ile frenleme tork değerleri doğru orantılı artarken, sıcaklıkla frenleme tork değerleri ters orantılı olarak azalmıştır (Wang vd., 2013).



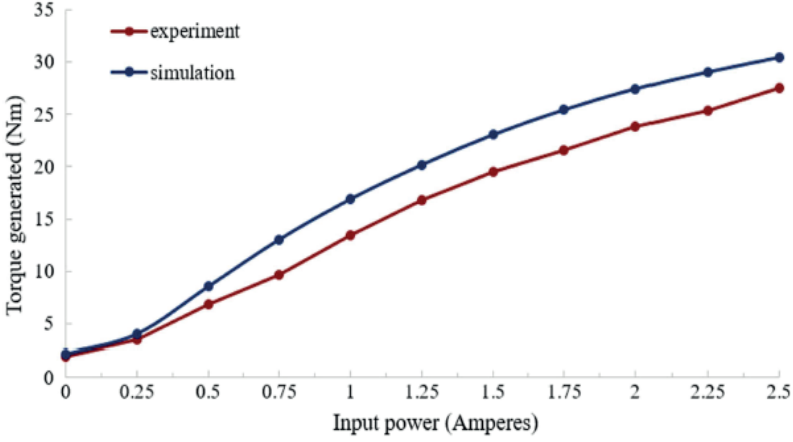
Şekil 12. Uygulan Akıma (Applied current-A) karşılık frenleme Tork (Brake torque-N.m) değerleri (Wang vd., 2013)



Şekil 13. Sıcaklığa (Temperature-°C) karşılık frenleme Tork (Brake torque-Nm) değerleri (Wang vd., 2013)

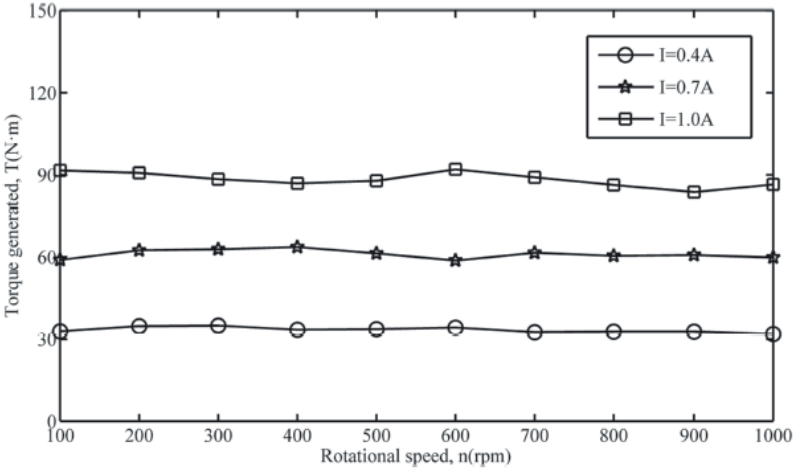
Şekil 14, giriş akım parametresinin ürettiği (Input power-Amperes) frenleme tork değerlerinin (Torque-Nm) deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılmasını göstermektedir. Ayrıca, Şekil 14'ten deneysel sonuçlar ile

simülasyon sonuçlarının birbiriyle çok yakın değerler sergilediği sonucuna varılabilir (Shiao vd., 2016).



Şekil 14. Giriş akımına (*Input power-Amperes*) karşılık Tork değerlerinin (*Torque-Nm*) karşılaştırılması (Shiao vd., 2016).

Şekil 15, üç farklı giriş akım değerinde (0.4 A, 0.7 A ve 1 A), dönme hızına karşılık frenleme torku değerlerinin değişimini göstermektedir. Şekil 15'ten görüldüğü gibi, dönme hızının toplam üretilen tork üzerindeki etkisi minimum düzeydedir. Önerilen MR freni tork sabit özelliği gösterir ve üretilen tork esas olarak giriş akımı ve hız ile ilişkilidir (Wu vd., 2018).



Şekil 15. Üç farklı akımda, dönme hızına (*Rotational speed-devir/dak*) karşılık üretilen Tork değerleri (*Torque-Nm*) (Wu vd., 2018).

#### 4. SONUÇ

Bu derleme araştırma çalışması, otomotiv sektöründeki yeni nesil araçların ihtiyaç duyduğu daha temiz ve düşük maliyetli frenleme sistemlerinin tasarımı, üretimi ve geliştirilmesini incelemiştir. Araştırmanın konusu olan, manyeto-reolojik frenleme işlevini yerine getiren MRF sistemleri irdelenerek aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- MRF sistemleri, manyetik etkiyle çalışan reolojik bir sıvının olmasına göre frenleme yapar.

- Elektromıknatısa akım uygulandığında, MR sıvısı, akma gerilimi uygulanan manyetik alanın bir fonksiyonu olarak değiştiği için katılaştır.

- MRF sistemleri, disklerin farklı hızlarında yüksek frenleme torklarını üretebilecek kapasitedir.

- MRF sistemlerinin bileşenlerinin sayısı azdır, üretimi kolay ve ucuzdur. Bu haliye MRF sistemleri, otomotiv endüstrisindeki araçlar için frenleme işlevlerini kolaylıkla, güvenilir ve ucuz bir şekilde yerine getirebilir.

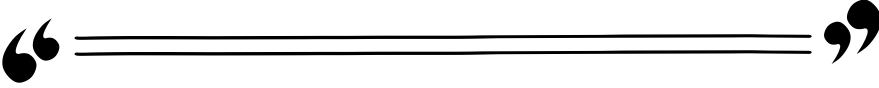
**KAYNAKLAR**

- Acharya, S., Shyam Saini Tak, R., Bhanu Singh, S., & Kumar, H. (2019). Characterization of magnetorheological brake utilizing synthesized and commercial fluids. *Materials Today: Proceedings*, 46, 9419–9424. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.061>
- Assadsangabi, B., Daneshmand, F., Vahdati, N., Egtesad, M., & Bazargan-Lari, Y. (2011). Optimization And Design of Disc-Type MR Brakes. *International Journal of Automotive Technology*, 12(6), 921–932. <https://doi.org/10.1007/s12239-011-0105-x>
- Attia, E. M., Elsodany, N. M., El-Gamal, H. A., & Elgohary, M. A. (2017). Theoretical and experimental study of magneto-rheological fluid disc brake. *Alexandria Engineering Journal*, 56(2), 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.11.017>
- Bhat, S. H., A, A., Naveen, S., Kumar, H., & M, A. (2025). Experimental investigation of rotor wound multi disc magneto-rheological fluid brake. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 36(6), 398–410. <https://doi.org/10.1177/1045389X241312271>
- Kadam, S., Kariganaur, A. K., & Kumar, H. (2023). Investigating the Effect of Material Properties and Geometric Design of Scaled Magneto-rheological Brake through FEMM. *Nano World Journal*, 9(1), 523–528. <https://doi.org/10.17756/nwj.2023-s1-101>
- Kadam, S., Kumar Kariganaur, A., & Kumar, H. (2024). Torque generation in lightweight four rotor magnetorheological brake. *Sadhana*, 49 (261), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12046-024-02607-8S>
- Karakoc, K., Park, E.J., & Suleman, A. (2008). Design considerations for an automotive magnetorheological brake. *Mechatronics*, 18(8), 434–447. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2008.02.003>
- Kariganaur, A. K., Kadam, S., Kumar, H., & Arun, M. (2023). Effect of reduced geometric dimensions on torque generation in two plate rotor magnetorheological brake with in-house magnetorheological fluid. *Smart Materials and Structures*, 32(3). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/acb871>
- Latha, K. H., Usha Sri, P., Seetharamaiah, N., & Assistant, S. (2017). Design and Manufacturing Aspects of Magneto-rheological Fluid (MRF) Clutch. In Hema Latha et al./ *Materials Today: Proceedings* (4).
- Li, W. H., & Du, H. (2003). Design and Experimental Evaluation of a Magnetorheological Brake. In *Int J Adv Manuf Technol.* (21), 508–515. <https://doi.org/10.1007/s001700300060>
- Park, E.J. (2006). A performance evaluation of an automotive magnetorheological brake design with a sliding mode controller, *Mechatronics*, September, Vol. 16, No. 7, pp.405–416.
- Patil, S. R., & Sawant, S.M. (2018). Experimental studies on magnetorheological

- brake for automotive application. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 15(1), 4893–4908. <https://doi.org/10.15282/ijame.15.1.2018.2.0381>
- Shiao, Y., Ngoc, N. A., & Lai, C. H. (2016). Optimal design of a new multipole bilayer magnetorheological brake. *Smart Materials and Structures*, 25(11). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/11/115015>
- Singh, R. K., & Sarkar, C. (2024a). Study of Effect of Graphite Based Magnetorheological Fluids on Braking Performance and Rotor Surface of Magnetorheological Disk Brake Using Full-Scale Brake Inertia Dynamometer. *Tribology Transactions*, 67(1), 157–172. <https://doi.org/10.1080/10402004.2023.2297832>
- Song, B. K., Hong, S. W., Kim, B. G., & Choi, S. B. (2021). A new design of small-sized magnetorheological brakes based on the mixed mode operation for high torque efficiency. *Smart Materials and Structures*, 30(11). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac277e>
- Wang, D. M., Hou, Y. F., & Tian, Z. Z. (2013). A novel high-torque magnetorheological brake with a water cooling method for heat dissipation. *Smart Materials and Structures*, 22(2). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/2/025019>
- Wu, J., Li, H., Jiang, X., & Yao, J. (2018). Design, simulation and testing of a novel radial multi-pole multi-layer magnetorheological brake. *Smart Materials and Structures*, 27(2). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa58a>
- Zhang, J., Hu, G., Cheng, Q., Yu, L., & Zhu, W. (2024). Analysis of braking performance and heat dissipation characteristics of multi-disc magnetorheological brake with an inner water-cooling mechanism. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 604. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.172313>
- Zhu, X., Yang, X., Wang, Y., Shi, W., & Qiu, M. (2025). Study on the wear mechanism of the composite disk magnetorheological brake. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 622. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2025.172953>
- Zainordin, A. Z., Hudha, K., Jamaluddin, H., & Nuri, M.N. (2015). Design and characterisation of magnetorheological brake system. *Int. J. Engineering Systems Modelling and Simulation*, 7 (1). <https://doi:10.1504/IJESMS.2015.066133>



# SÜT REÇELİ (DULCE DE LECHE): ÜRETİM TEKNOLOJİSİ, KALİTE PARAMETRELERİ VE GÜNCEL GELİŞMELER



*Şenol KÖSE<sup>1</sup>*  
*İbrahim ALTUN<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Doç. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, Van.

Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, İstanbul  
ORCID no: 0000-0003-0599-6030 senolkose28@gmail.com

<sup>2</sup> Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Özalp Meslek Yüksek Okulu, Van

## 1. Giriş

*Süt reçeli, süt ve şeker karışımının kontrollü şartlar altında ısıtılmasıyla üretilen tipik bir Latin Amerika ürünüdür. Bu karışım, karamel benzeri bir renge ve hoş bir tatlı aromaya sahip yarı akışkan bir macun oluşumunu sağlamaktadır. Sürülebilir bir gıda olarak, meyveler ve peynirle birlikte tüketilebilmekte; ayrıca fırıncılık, dondurma ve şekerleme ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Vargas et al., 2021). Enerji içeriği yüksek olmasının yanısıra protein oranı bakımından da zengin olması besin değerini artırmaktadır (Köse ve Altun, 2018).*

Süt reçeli, en yoğun biçimde Arjantin, Uruguay ve Brezilya'da üretilen ve tüketilen bir üründür. Üretildiği ve pazarlandığı ülkeye göre bu ürün farklı isimlerle anılmakta olup, bunların bileşimlerinde veya üretim süreçlerinde bazı farklılıklar olabilmektedir. Örneğin Meksika'da geleneksel olarak keçi sütünden hazırlanmakta ve bu durum ürüne kendine özgü bir aroma profili kazandırmaktadır. Küba'da ise uygulanan üretim yöntemi, toplam çözünür katı madde konsantrasyonu belirgin şekilde daha yüksek olan bir son ürün elde edilmesine yol açmakta; bu ürün çoğunlukla küçük barlar veya tabletler hâlinde piyasaya sunulmaktadır (Penci and Marin 2016). Süt reçeli farklı ülkelerde "dulce de leche", "duke de leche", "doce de leite", "arequipe", "manjar blanco" ve "caramel jam" (karamel reçeli) gibi isimlerle de anılmaktadır (Ranalli ve ark., 2012). Elde edilen ürün, kremden kahverengiye değişebilen renklerde, homojen ve akıcı kıvamda tatlı bir süt ürünüdür. Standart bir üretim yöntemi olmadığı için süt reçeli kullanım amacına göre istenen renk ve kıvamda elde edilebilmektedir (Akal et al., 2018). Süt reçeli doğduğu topraklar olarak kabul edilen Güney Amerika'da ve dünyanın diğer ülkelerinde kahvaltılık, atıştırma-lık, ara öğün ve tatlı olarak tüketilmektedir (Mercan, 2022). Bunun yanında pastacılık ürünlerinde dolgu maddesi, dondurma teknolojisinde dondurma sosu olarak da tüketilebilmektedir (Tuna ve Arslan, 2016). Genel olarak iki tip süt reçeli bulunmaktadır. Birincisi ev tipi sürülebilir kıvamda ve tatlı olarak tüketilmektedir, diğeri şekerleme üretimine yönelik viskozitesi daha yüksek sanayi tipi üründür (Öztok, 2023).

Süt reçelinin kuru madde oranı yaklaşık olarak %70 olup kullanıldığı alana ve yapıldığı yere göre bu oran çok fazla değişiklik göstermektedir. Brezilya'da resmi olarak standartlara göre %30 nem, %2 kül, en az %5 protein ve %6 ile %9 oranında yağ içermelidir. İçerisindeki sakkaroz miktarının ise süt içeriğine göre %30 oranda olması gerekmektedir. Nişasta oranı %0,5 i geçmemelidir (Sarı, 2020).

Ülkemizde süt reçelinin tam bir standardı olmamakla birlikte genel olarak üretimi; şeker ilavesinin %10-30 arasında yapılmasına ve kuru madde değerinin %50-80'e gelmeye kadar kaynatılması temeline dayanmaktadır. Ürün, suyunun uçurulmasından dolayı oda sıcaklığında depolanabilir nitelik ka-

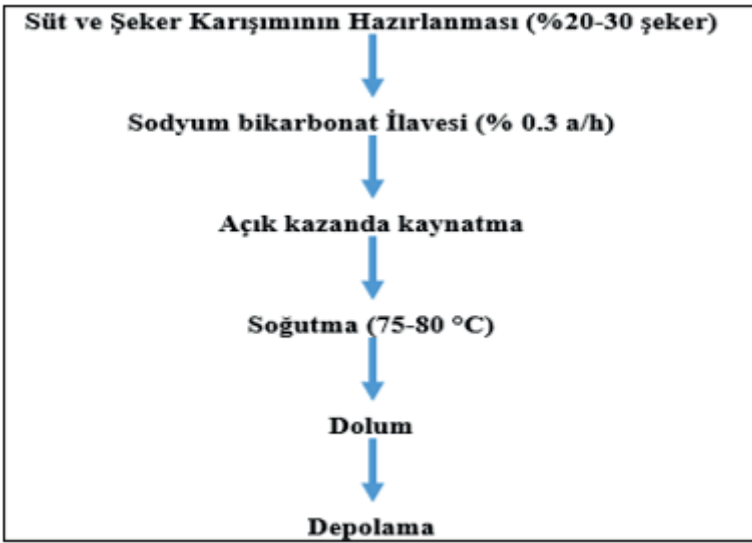
zanmaktadır. Şeker ile süt proteinlerinin ısı işlem uygulanması ile etkileşimi sonucunda oluşan enzimatik olmayan esmerleşme tepkimelerinin şiddetine bağlı olarak ürünün renginin çok açık kahverengiden çok koyu kahverengiye kadar değişebilmektedir (Akai ve ark., 2018).

## 2. Süt Reçeli Üretim Teknolojisi

Süt reçeli temel olarak sadece çiğ inek sütü ve şeker içeren bir üründür. Yapımı sırasında asitliğin dengelenmesi ve kesilme gibi oluşabilecek olumsuzlukların yaşanmasının engellenmesi amacıyla karbonat ilave edilmektedir. Ayrıca renklendirici ve aroma verici birçok katkı maddesi de eklenebilmektedir. Bazı üretimlerde şeker yerine bal kullanıldığı ve inek sütü yerine farklı hayvan sütleri kullanıldığı da görülmektedir (Tuna ve Arslan, 2016; Mercan, 2022). Süt reçeli orijini olduğu Güney Amerika bölgesinde geleneksel üretim yöntemleriyle ortaya çıkmış olsa bile, sanayi tipi üretimlerde çeşitli standartlara göre üretilmesi gerekmektedir. Bu standartlar üretildiği ülkeye ve kullanış amacına göre farklılık gösterebilmektedir (Mercan, 2022). Süt proteinleri ile indirgen şekerin ısı altında etkileşimi ile meydana gelen maillard reaksiyonunun yoğunluğu ve karamelizasyon derecesi son ürünün rengini belirlemektedir. Bu reaksiyonu teşvik etmek amacıyla üretimde sodyum bikarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ) kullanılabilir (Tuna ve Arslan, 2016). Sodyum bikarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ) ürüne kendine has tat, koku ve rengi veren maillard reaksiyonunu desteklemesinin yanında kazein proteininin pıhtılaşmasını da engellemektedir (Öztürk, 2022). Aynı zamanda sodyum bikarbonat, asidik bileşen miktarının artması sonucunda oluşabilecek topaklaşmayı da engellemektedir (Akai ve ark., 2018). Tuna (2018), süt reçeli üretiminde %0.05- %0.1- %0.15- %0.2- %0.3- %0.5 (a/h) oranlarında sodyum bikarbonat kullanarak deneme üretimler gerçekleştirmiş ve ürünün pH aralığı dikkate alınarak süt reçeli üretiminde kullanılacak en uygun sodyum bikarbonat oranının %0.3 olduğunu tespit etmiştir. Süt reçeli üretiminde sakkaroz kullanımının yanında farklı tatlandırıcılar (glikoz, fruktoz ya da mısır şurubu, polidekstroz) da kullanılabilir (Malec ve ark., 1999) sakkaroz yerine kullanılan farklı tatlandırıcıların son üründe çözünür katı madde içeriğini, pH ve su aktivitesi değerini etkilemediğini tespit etmişlerdir. Araştırmalarda süt reçelini zenginleştirmek ve özelliklerini değiştirmek amacıyla farklı gıdaların ve katkıların da ilave edildiği görülmüştür (Tuna, 2018). Bazı ülkelerde nişastalar ve modifiye nişastaların maksimum %0.5 kullanılmasına izin verilmiştir (Oliveira ve ark., 2009). Nişasta, suyu bağlayarak konsistansi artırması ve laktoz kristalizasyonunu kontrol etmesi amacıyla kullanılmaktadır (Silva ve ark., 2015).

Süt reçeli üretimi geleneksel ve endüstriyel yöntemlerle yapılmaktadır. Geleneksel yöntemle üretimde tüm malzemeler kazana alınarak kaynatılır. Karışımın kazan çeperlerine doğrudan temas ederek kavrulmasının önlenmesi amacıyla karıştırma işlemi uygulanır. Karıştırma ayrıca köpük oluşumunu azaltır, bu da suyun daha hızlı buharlaşmasını sağlar. Süt reçeli istenilen kuru

madde oranına (% 65-70) geldiğinde sıcaklık 75 °C civarına düşürülür. Soğutma yapılmazsa süt reçeli içindeki yüksek sıcaklıklardan kaynaklı renk ve doku bütünlüğü etkilenir. Toplam işlem süresi uygulanan ısı işlem çeşidine bağlı olarak 40 dakika ile 4 saat arasında değişebilmektedir. İşlem süresi ürünün viskozitesi, rengi ve aromasında önemli rol oynar ve doğal olarak son ürünün özelliklerini belirler. Paketlenmiş ürün oda sıcaklığında 160-180 gün saklanabilir. Süt reçelinin geleneksel yöntemle üretim akış şeması şekil 1'de verilmiştir. Endüstriyel yöntemle süt reçeli üretimi açık kazanlarda ve vakum evaporasyon yöntemiyle vakumlu kazanlarda yapılır. Vakumlu pişirme yönteminde süt ve şeker karışımı 60-62 brikse kadar evaporasyona tabi tutulur. Daha sonra açık kazanda 20-40 dakika daha 62-68 briks değerine ulaşıncaya kadar konsantre hale getirilir. Böylece üründe istenen viskozite ve renk sağlanmış olur (Stephani ve ark., 2019). Vakum evaporasyon tekniği ile üretim 40-75°C sıcaklık arasında yapılır böylece protein, şeker ve aroma bileşenlerinde meydana gelen değişiklikler ve kayıplar minimize edilir (Cichoski vd., 2011). Süt reçelinin endüstriyel yöntemle üretim akış şeması şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Süt reçelinin geleneksel yöntemle üretimi (Öztok, 2023).

Açık kazanda üretimde ise çift cidarlı, buharlı ve çelik kazanlar kullanılır. Kazanın cidarları arasında buhar dolaştırılarak ısı iletimi sağlanır. Aynı zamanda kazanın içerisinde süt reçelinin çeperlere yapışmaması için ve oluşan yüzeye çıkmasının sağlanması için bir karıştırıcı bulunur (Mercan, 2022). Bu yöntemde süt ve şeker karışımı kazana alınır ve sürekli karıştırma işlemi uygulanarak konsantre hale getirilir. İstenen kıvama gelen karışım soğutulur

ve paketlenir. Paketlemede nem kaybının ve mikrobiyal kontaminasyonun önlenmesi sağlanmalıdır. Cam, plastik kaplar ve metal kutular süt reçeli için yaygın kullanılan ambalaj çeşitleridir. Polipropilen ambalajlar da hafif olması nedeniyle tercih edilmektedir (Oliveira ve ark., 2009).



Şekil 2. Süt reçelinin endüstriyel yöntemle üretilmesi (Öztok, 2023).

### 3. Süt Reçellerinde Kalite Parametreleri ve Güncel Gelişmeler

Malec ve ark. (1999), farklı şeker kompozisyonları kullanarak ürettikleri süt reçellerinin hepsinde çözünür katı madde içeriğini  $70\pm 2$ , pH  $6.7\pm 0.01$  ve su aktivitesi değerini  $0.85\pm 0.01$  olarak belirlemişlerdir.

Garitta ve ark. (2004) süt reçelinin uygun depolama sıcaklığı ve süresini belirlemek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırma sonuçlarına göre süt reçeli örneklerinin tahmini raf ömrü  $25^{\circ}\text{C}$ 'de 109 gün,  $37^{\circ}\text{C}$ 'de 53 gün ve  $45^{\circ}\text{C}$ 'de 9 gün olacak şekilde belirlenmiştir.

Zimmermann ve ark. (2007) ksantan gam ve peynir altı suyu kullanılarak %10 ve % 8 sakkaroz içeren iki farklı formülasyonla üretilen süt reçellerinin bazı temel özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda örneklerin kuru madde % 64.11-71.78, yağ % 6.88-7.26, kül % 1.84- 2.05, protein % 8.78-9.23 ve karbonhidrat değerleri % 54.09-45.57 olarak saptanmıştır. Ayrıca, sakkaroz oranı yüksek olan örneğin viskozitesinin de yüksek olduğu belirlenmiştir. Her iki ürünün de duyuusal açıdan kabul edilebilir nitelikte olduğu saptanmıştır.

Giménez ve ark. (2008) süt reçelinde kumluluk oluşumunu önlemek amacıyla laktozu hidrolize edilmiş süt reçeli üretmiş ve bu ürünlerin duyuşal özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucuna göre, laktoz hidrolizinin örneğın doku, tat ve renk özelliklerinde değişikliklere sebep olduğu tespit edilmiştir. Laktoz hidroliz oranı arttıkça ürünün duyuşal kabul edilebilirliğinin belirgin biçimde azaldığı saptanmıştır. Çalışma kapsamında süt reçelinin duyuşal açıdan kabul edilebilir olduğu en yüksek laktoz hidroliz düzeyi ise % 5 olarak belirlenmiştir.

Hentges ve ark. (2010), süt reçeli örneklerine  $10^3$  ve  $10^1$  inokülasyon seviyelerinde *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* O157:H7, *Staphylococcus aureus* ve *Salmonella typhimurium* ekleyerek, bu mikroorganizmaların depolama süresince (0, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30 gün) aktif kalma sürelerini belirlemiştir. Çalışma sonucunda, depolama süresi boyunca her iki inokülasyon seviyesinde de aktivitesini sürdüren mikroorganizmaların *S. typhimurium* ve *L. monocytogenes* olduğu tespit edilmiştir.  $10^3$  düzeyinde yapılan depolamada, *E. coli* O157:H7 ve *S. aureus*'un son güne kadar aktivitesini sürdürdüğü,  $10^1$  düzeyinde ise *E. coli* O157:H7'nin 5. güne, *S. aureus*'un ise 10. güne kadar aktif kaldığını belirtmişlerdir.

Ferreira ve ark. (2011) kahve ve peyniraltı suyu kullanarak ürettikleri süt reçeli örneklerinin fizikokimyasal ve duyuşal özelliklerini incelemiştir. Yüzde 10 peynir altı suyu ve %1 kahve içeren formülasyonla üretilen örneğın duyuşal yönden en yüksek beğeni aldığını belirtmişlerdir.

Cichoski ve ark. (2011), vakum evaporasyon ile üretilen süt reçelinde starter kültür olarak *Staphylococcus xylosus*'un kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu amaçla, süt reçeli örneklerinin raf ömrü süresince *Staphylococcus xylosus*'un gelişimini tespit etmek için pH, asitlik, su aktivitesi, laktoz ile sakaroz içerikleri belirlenmiştir. Araştırmada, süt reçelinin protein değerlerini %9.67, yağ değerlerini %9.30, laktoz içeriğini %5.53, kül içeriğini %2 ve briks değerini 54 olarak tespit etmişlerdir. Depolama süresinin sonunda pH değerleri 6.36-6.57, titrasyon asitliği ise 30.45-30.89 ( $^{\circ}$ Dornik) aralığında saptanmıştır. Sonuç olarak, süt reçelinde saf *Staphylococcus xylosus* kültürünün  $10^{\circ}$ C depolama sıcaklığında faaliyet gösterdiği gözlemlenmiş ve şeker konsantrasyonu, asidite ve pH değerlerinin bu kültürün üremesini engellemediği tespit edilmiştir. Bu bulgular sonucunda, *Staphylococcus xylosus* kültürünün süt reçelinde kullanımının mümkün olduğu belirlenmiştir.

Ranalli ve ark. (2012), satın aldıkları süt reçellerinin birtakım özelliklerini incelemiştir. Araştırma sonuçlarına göre, ürünlerin protein içeriği %6.4 ila %8.2 arasında, yağ içeriği ise %1.3 ila %7.9 arasında değişmiştir. Nem oranı %31.5 ila %48.8, briks değeri 59 ila 78, pH değeri 5.70 ila 6.15 arasında bulunmuş, aw (su aktivitesi) değeri ise 0.764 ila 0.882 arasında ölçülmüştür. Süt reçellerinin psödoplastik bir davranış sergilediğini ve viskozite değeri azaldıkça

kayma hızının arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, ürünlerin renk değerlerinde de farklılıklar tespit etmişlerdir; Hunter L\* değeri 36.40 ila 50.40, a\* değeri 6.56 ila 9.07 ve b\* değeri ise 16.90 ila 26.10 arasında değişmiştir. Viskozite ile kayma hızı arasında ters bir ilişki olduğu, yani viskozite değeri azaldıkça kayma hızlarının arttığını belirlemişlerdir.

Gaze ve ark. (2014) Brezilya yerel satıcılardan satın aldıkları yedi farklı markaya ait süt reçeli örneğinin bazı özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda protein %3.51 -7.1, yağ %3.56 -6.99, kül %1.31 - 2.05, nem %17.49 -29.67, laktik asit %0.23 - 0.50 ve 9 pH değerini 6.14 -6.37, Na 0.12 – 0.16 g/100g, K 0.28- 0.40 g/100g, Ca 0.19- 0.36 g/100g ve P miktarını 0.14-0.24 (g/100g) aralığında belirlemişlerdir. Örneklerin renk değerlerini ise L\* 48.59-62.11, a\* 13.60- 16.90 ve b\* 17.89- 27.70 aralığında tespit etmişlerdir.

Antigo ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada tarçın yağı, karanfil yağı ve karanfil ile tarçın karışımı yağını ilave ederek süt reçeli üretmişlerdir. 210 günlük depolama sürecinde örneklerin bazı özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlara göre protein %6.0-6.1, yağ %2.3-2.7, nem % 26.8-28.6, kül % 1.8-1.9, asitlik 0.2-0.3, karbonhidrat %60.8- 62.9 ve renk değerlerini L\* 53.8- 56.3, a\* 5.5-5.7 ve b\* 16.7- 18.9 olarak bildirmişlerdir. Ayrıca tarçın yağı eklenen süt reçeli örneğinin yağ oksidasyonu diğer örneklerden daha düşük bulunurken örneklerin dokusal ve duyuşsal özelliklerinin kabul edilebilir düzeyde olduğunu belirtmişlerdir.

Ranalli ve ark. (2017), farklı nem düzeyleri ve yağ ikame maddesi olarak kullanılan ksantan gam içeriğine sahip süt reçeli örnekleri geliştirerek, hangi kombinasyonun yağ azaltılmamış geleneksel süt reçeline daha benzer davranışını incelemiştir. Araştırmacılar, ürünlerdeki kullanılabilir su miktarı azaldıkça süt reçelinin viskozitesinin ve kayma akış davranışının arttığını belirlemiştir. Önerilen yöntem sayesinde, reolojik özellikleri geleneksel süt reçeline benzer olan düşük yağlı bir süt reçelinin elde edilmesi için en uygun formülasyonun seçilebildiği sonucuna varılmıştır.

Yüksel-Önür (2018), Türkiye'de üretilen altı ticari süt reçelinde kuru madde, protein, yağ, kül, pH, laktik asit içeriği ve renk parametrelerini incelemiştir. İşletmelerin farklı üretim teknolojileri kullanmasından dolayı değerlerin değişkenlik gösterdiğini vurgulamıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre protein %1.76-9.0, yağ %3.56-6.99, kül %1.38-2.56 (g/100g), nem % 25.24-37.58, laktik asit % 0.098-0.386, pH 6.07-6.75 ve renk değerlerini L\* 30.66- 57.36, a\* 1.73-8.36, b\* 3.30- 17.63 olarak bildirmiştir.

Cebeci (2020), inek, keçi, manda ve koyun sütlerinin farklı kombinasyonlarının süt reçelinin kalite özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Analiz sonuçlarına göre süt reçellerinin kuru madde miktarı %67.12 ile % 89.4, briks değerleri % 65.00 ile % 81.00, pH değeri 6.21 ile 6.5, titrasyon asitliği %0.13 ile % 0.49, kül değeri %1.81 ile % 2.21, protein miktarı %4,59-7,89, yağ miktarı

%4.25-11.0 aralığında tespit edilmiştir. Ayrıca HMF değerinin 5,99-39,63mg/l, L\* değerinin 39.91-67.00, a\* değerinin 2.26-16.85, b\* değerinin 20.37-32.87 aralığında olduğu görülmüştür. Duyusal değerlendirme sonuçlarına bakıldığında ise renk ve tat özellikleri açısından örnekler arasındaki fark önemli bulunurken kıvam ve koku özellikleri açısından örnekler arasındaki farkın önemsiz olduğu tespit edilmiştir.

Silva ve ark. (2020a), süt reçeli üretiminde kullanılan sütün, hammadde nin mikrobiyal yükünü azaltmak amacıyla ısıtma işlemi tabii tutulduğunu ve bu sıcaklık uygulamasının süt matrisinde bazı hasarlara yol açabileceğini varsaymıştır. Bu nedenle araştırmacılar, alternatif bir yöntem olarak gelişmekte olan ohmik ısıtma teknolojisini uygulamayı ve bu yöntemle üretilen süt reçelinin duyusal özelliklerini gelişmiş duyusal analiz araçları kullanarak değerlendirmeyi amaçlamıştır. Çalışma sonucunda, kullanılan duyusal analiz yöntemlerinin süt reçelinin özelliklerini başarılı bir şekilde karakterize edebildiği ve zaman içerisinde ürün özelliklerinde meydana gelen değişimleri ortaya koyabildiği belirlenmiştir.

Silva ve ark. (2020b), ohmik ısıtma yönteminin patojenler ve spor oluşturan mikroorganizmaları inaktive ederken gıda kalitesini koruyabildiğini belirtmiştir. Düşük ve orta düzeyde elektrik alanı uygulanan ohmik işlem, ürünün genel kabul edilebilirliğini önemli ölçüde etkilememiştir; ancak aromada değişim meydana gelmiş, üründe daha belirgin bir acı tat oluşmuş ve karakteristik aromada azalma gözlenmiştir. Buna karşılık, yüksek şiddette elektrik alanı uygulanmasıyla duyusal özelliklerde artış sağlanmış; ürünün parlaklığı, akışkanlığı ve lezzeti artarken, kıvam ve tekstüründe azalma meydana gelmiş ve tüketici kabulünde genel bir artış gözlenmiştir. Genel olarak, ohmik işlem şiddeti arttıkça duyusal algıların daha belirgin hale geldiği ifade edilmiştir.

Sulejmani ve ark. (2021), az yağlı ve tam yağlı on altı süt reçeli örneğine kalsiyum klorür, sodyum bikarbonat ve sakaroz ilave edilerek fizikokimyasal, duyusal ve reolojik özelliklerini inceledikleri çalışmada süt yağındaki artışın süt reçelinin kıvamını azalttığını ve yağsız süt tozundan sodyum bikarbonat kullanılmadan hazırlanan süt reçeli örneklerinin daha kıvamlı bir yapı gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Akpınar ve ark. (2021), süt reçeline fonksiyonel nitelik kazandırmak amacıyla probiyotik bakteri, muz püresi ve fındık ezmesi ilavesiyle farklı formülasyonlar geliştirmiştir. Araştırmada, 30 günlük depolama süreci sonunda örneklerin özellikleri incelenmiş ve probiyotik bakterilerin canlılığını koruduğu belirlenmiştir. Ayrıca, probiyotik olarak katılan fındık ezmesinin probiyotik bakterilerin canlılığına katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Fındık ezmesi eklenen örneklerin protein ve yağ içeriklerinin muz püresi ilaveli örneklerle kıyasla anlamlı düzeyde daha yüksek olduğu saptanmıştır. Benzer şekilde fındık ez-

meli örneklerin duyuşal özellikler açısından da daha yüksek puan aldığı tespit edilmiştir.

Öztürk (2022), laktozsuz süt reçeli üretiminde stabilizatör olarak pektin ve nişasta kullanımının süt reçeli örnekleri üzerine etkilerini araştırmak amacıyla örneklerin fizikokimyasal, tekstürel, mikrobiyolojik ve duyuşal özelliklerini incelemiştir. Laktoz hidrolizi sebebiyle laktozsuz süttten üretilen süt reçellerinde HMF değerinde artış olduğunu ve bu artışın stabilizatör eklemesiyle azaldığını tespit etmiştir. Süt reçeli üretiminde laktozsuz süt ve stabilizatör kullanımının kumluluk sorununu önlediğini belirtmiştir.

Öztoğ (2023), endüstriyel yöntemle üretilen dokuz adet süt reçeli örneğinin kuru madde oranını %48.14-77.21, yağ miktarını %1.45-12.35, protein oranını % 0.10-9.04, asitlik oranını % 0.40-0.65, pH değerini 5.66-6.65, kül oranını %1.15-3.18, brix değerini 59.65-79.35, HMF 9.98-25.06 µmol/100 g, toplam fenolik madde içeriğini 810.00-2830.83 mg GAE/kg, antioksidan aktivitelerini DPPH testinde 12.73-71.95, TEAK testinde 4.50-7.91 mmol TE/g olarak belirlemiştir. Mineral madde içerikleri Ca 932.05-3286.16 mg/kg, Mg 106.70-318.58 mg/kg, K 821.59. 3499.90 mg/kg, Zn 69.98-319.30 mg/kg, Fe 27.52-81.06 mg/kg, Cu 3.64-12.86 mg/kg, Mn 0.98-3.27 mg/kg, Na 488.76-2399.82 mg/kg olarak tespit edilmiştir. Örneklerin L\* değerinin 28,71-41.40, a\* değerinin 4.28-14.39 ve b\* değerinin -1.28-18.02 arasında olduğu tespit edilmiştir.

## SONUÇ

Süt reçeli, geleneksel bir ürün olmasına rağmen bugün hem endüstriyel hem de gastronomik açıdan yüksek katma değer sunan, geniş bir kullanım alanına sahip fonksiyonel bir ürün haline gelmiştir. Farklı ülkelerde uygulanan üretim yöntemleri ve hammaddeler, ürünün karakteristik özelliklerini belirlemede kritik rol oynarken; modern teknolojilerle desteklenen üretim süreçleri kalite standardizasyonunu mümkün kılmaktadır. Vakum evaporasyon sistemleri, stabilizatör kullanımı, laktozsuz ve fonksiyonel formülasyonlar gibi yenilikçi yaklaşımlar, süt reçelinin raf ömrü, kıvam, renk ve duyuşal özelliklerinin iyileştirilmesine önemli katkı sağlamaktadır.

Literatürde yer alan çalışmalar, ürün bileşiminin kullanılan süt türüne, tatlandırıcılara, stabilizatörlere ve üretim koşullarına bağılı olarak geniş bir aralıkta değiştiğini göstermektedir. Bu çeşitlilik, hem araştırmacılar hem de üreticiler için önemli bir Ar-Ge potansiyeli sunmaktadır. Türkiye'de ürünle ilgili herhangi bir yasal standart bulunmaması ise, sektörün geleceği açısından standardizasyon gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak süt reçeli, gastronomik değerinin yanında teknolojik gelişmelere açık yapısıyla gıda endüstrisinde önemli bir alternatif ürün olarak öne çıkmaktadır. Gelecekte ürünün fonksiyonel özelliklerini artırmaya, raf

ömrünü uzatmaya ve duysal kabul edilebilirliğini optimize etmeye yönelik çalışmaların artması beklenmektedir. Bu doğrultuda süt reçeli, hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır.

## KAYNAKLAR

- Akal, C., Buran, İ., Delialioğlu, R. A., & Yetişemiyen, A. (2018). Farklı şeker oranlarının süt kalite özellikleri üzerine etkisi. *Gıda*, 43(5), 865-875. <https://doi.org/10.15237/gida.GD18067>
- Akpınar, A., Söbeli, C., Çetin, M. G., Zeytin, M., & Dilek, Z. (2021). Production of traditional milk jam with improved functional properties via probiotic and prebiotic. *Journal of Agriculture Faculty of Ege University*, 58(3), 325-334. <https://doi.org/10.20289/zfdergi.772761>
- Antigo, J., Cestari, L., Scapim, M., Santos, S., Moritz, C. F., & Madrona, G. S. (2017). Clove and cinnamon essential oils in dulce de leche. *Nutrition & Food Science*, 47(1), 101-107.
- Cebeci, Ç. (2020). Farklı süt kombinasyonlarının süt reçeli üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Cichoski, A. J., Cansian, A. P., & Di Luccio, M. (2011). Viability of *Staphylococcus xylo-sus* during shelf-life of dulce de leche prepared by vacuum evaporation. *Ciência Rural*, 41, 2026-2031.
- Ferreira, L.O., Pimenta, C.J., Pinheiro, A.C.M., Pereira, P.A.P., & Santos, G. (2011). Sensory evaluation of „dulce de leche with coffee and whey using different affective data analysis methods. *Food Science and Technology (Campinas)*, 31(4); 998-1005.
- Garitta, L., Hough, G., & Sánchez, R. (2004). “Sensory Shelf Life of Dulce de Leche”. *Journal Dairy Science*, 87, 1601-1607.
- Gaze, L. V., Costa, M. P., Monteiro, M. L. G., Lavorato, J. A. A., Júnior, C. C., Raices, R. S. L., & Freitas, M. Q. (2014). Dulce de Leche, a typical product of Latin America: characterisation by physicochemical, optical and instrumental methods. *Food Chemistry*, 169, 471-477. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.017>
- Giménez, A., Ares, G., & Gámbaro, A. (2008). Consumer reaction to changes in sensory profile of dulce de leche due to lactose hydrolysis. *International Dairy Journal*, 18; 951-955.
- Hentges, D., Silva, D. T., Priscila, A. D, Conceição, R. C. S, Zonta, M. N., & Timm, C. D. (2010). Pathogenic microorganism survival in dulce de leche. *Food Control*, 21 (5), 1291-1293.
- Köse, Ş., Altun, İ. 2018. Süt Reçeli: Üretimi ve Bazı Özellikleri. Ahtamara I. Uluslararası Multidisipliner Çalışmalar Kongresi, 25 - 26 Ağustos 2018, Van, Türkiye.
- Malec, L.S., Llosa, R.A., & Vigo, M.S. (1999). Sugar formulation effect on available lysine content of dulce de leche. *Journal Dairy Resience*, 66, 335-339
- Mercan, O. (2022). Geleneksel süt reçelinin üretim tekniğinin geliştirilmesi (süt reçelinde Ür-Ge), Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çanakkale.

- Penci, M. C. and Marin, M. A. (2016) Dulce de Leche: Technology, Quality, and Consumer Aspects of the Traditional Milk Caramel of South America. In *Traditional Foods: General and Consumer Aspects*, pp. 123–136. Kristbergsson K and Oliveira J, eds. Boston, MA: Springer.
- Oliveira, M. N., Penna, A. L. B., & Nevarez, H. G. (2009). Production of evaporated milk, sweetened condensed milk and ‘dulce de leche’. In Tamime, A. Y. (Ed.), *Dairy Powders and Concentrated Products* (pp. 149-180). Blackwell Publishing: Oxford, UK.
- Öztok, S. 2023. Endüstriyel olarak üretilen süt reçellerinin bazı özelliklerinin incelenmesi. *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı*, Van.
- Öztürk, Y. (2022). Laktozsuz süt reçeli üretiminde stabilizatör olarak nişasta ve pektinin kullanım olanaklarının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Mardin Artuklu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mardin.
- Ranalli, N., Andres, S.C., & Califano, A.N. (2012). Physicochemical and rheological characterization of “dulce de leche. *Journal of Texture Studies*, 43: 115–123.
- Ranalli, N., Andrés, S. C., & Califano, A. N. (2017). Rheological behavior of low-fat dulce de leche with added xanthan gum. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(4), e13011.
- Sarı, M. M. (2020). Farklı oranlarda evaporasyon uygulaması ile aromalı süt reçeli üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Stephani, R., Francisquini, J., Perrone, Í. T., de Carvalho, A. F., & de Oliveira, L. F. C. (2019). Dulce de leche—chemistry and processing technology. In Javed, K. (Ed.), *Milk production, processing and marketing* (pp. 1-18). IntechOpen: London.
- Sulejmani, E. I., Boran, O. S., Coşkun, A., & Hayaloglu, A. A. (2021). Physicochemical, sensorial and rheological characterisation of whole-fat or low-fat milk jams as influenced by calcium chloride, sodium bicarbonate and sucrose content. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(9), 4455-4464. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15239>
- da Silva, F. L., Ferreira, H. A. L., de Souza, A. B., de Freitas Almeida, D., Stephani, R., Pirozi, M. R., & Perrone, Í. T. (2015). Production of dulce de leche: the effect of starch addition. *LWT-Food Science and Technology*, 62(1), 417-423. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.10.062>
- Silva, R., Rocha, R. S., Guimarães, J. T., Balthazar, C. F., Scudino, H., Ramos, G. L. P., ... & Esmerino, E. A. (2020a). Dulce de leche submitted to ohmic heating treatment: Consumer sensory profile using preferred attribute elicitation (PAE) and temporal check-all-that-apply (TCATA). *Food Research International*, 134, 109217.
- Silva, R., Rocha, R. S., Guimarães, J. T., Balthazar, C. F., Pimentel, T. C., Neto, R. P., ... & Cruz, A. G. (2020b). Advantages of using ohmic heating in Dulce de Leche manufacturing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 65, 102475.

- Tuna, C. ve Arslan, S. (2016). Süt reçeli üretim yöntemleri ve özellikleri. *Akademik Gıda*, 14(2), 204-208.
- Tuna, C. (2018). Farklı meyvelerle zenginleştirilen süt reçellerinin bazı özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Yüksel-Önür, Z. (2018). Milk jam or dulce de leche: physicochemical characterization. *Gıda*, 43(6), 1091-1099. <https://doi.org/10.15237/gida.GD18111>
- Vargas, M. O., Prestes, A. A., Miotto, M., & Prudêncio, E. S. (2021). Dulce de leche: product types, production processes, quality aspects and innovations minor EDITS. *International Journal of Dairy Technology*, 74(2), 262-276.
- Zimmermann, J.V., Gris, E.F., Chaves, E.S., Prudêncio, E.S., Barreto, P.L.M., Amboni, R.D.M., & Luiz, M.B. (2007). Physicochemical, sensorial and rheological properties of doce de leite with xanthan gum and whey protein concentrate. *Publication of Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG)*, 13; 53-59.





**JEOTEKNİK VE MÜHENDİSLİK  
JEOLOJİSİ UYGULAMALARINDA  
KÜTLE HAREKETLERİNİN VE YER  
ALTI DEFORMASYONLARININ  
İNKLINOMETRE TABANLI  
İZLENMESİ VE ANALİZİ**

“ ”

*Veli KESKİN<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Devlet Su İşleri 17. Bölge Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler Şubesi, Van /Türkiye ORCID:  
0000-0003-2769-5044 velikeskin@dsi.gov.tr, veli\_keskin@outlook.com

## 1. GİRİŞ

Bu bölümde, zemin ve kaya kütlelerinde meydana gelen kütleli hareketlerin izlenmesinde kullanılan jeoteknik ölçüm yöntemlerine genel bir çerçeve sunulmaktadır. Özellikle deformasyonların derinlik boyunca belirlenmesine olanak sağlayan ölçüm sistemleri, kayma mekanizmasının tanımlanması ve mühendislik güvenliğinin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

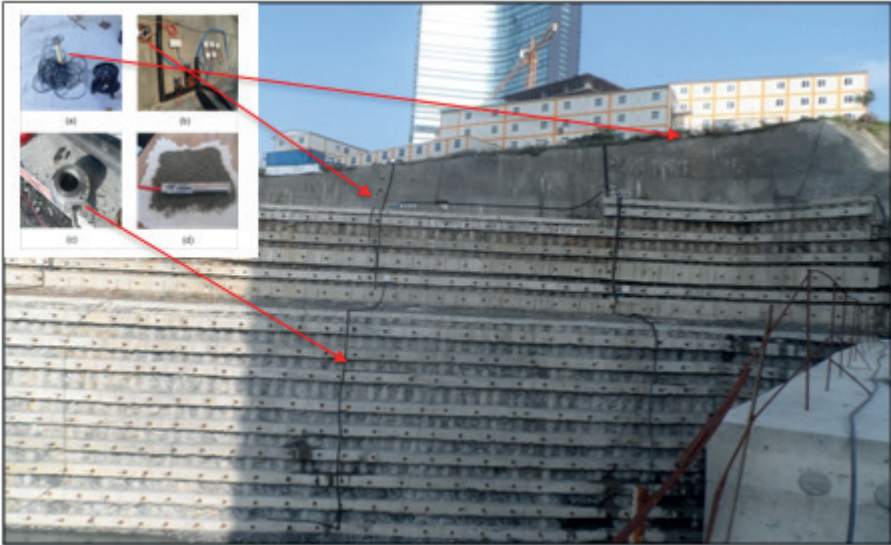
### 1.1. Şevli Derin Kazılar ve Heyelanlarda Deformasyon İzleme Gereksinimi

Şevli derin kazılar ve doğal ya da yapay yamaçlar, jeoteknik mühendisliği ve mühendislik jeolojisi uygulamalarında stabilite açısından en karmaşık ve belirsizlik içeren sistemler arasında yer almaktadır. Bu tür yapılarda deformasyonlar, çoğu zaman yüzeyde gözlemlenebilir belirtiler ortaya çıkmadan önce zemin veya kaya kütlelerinin iç kesimlerinde gelişmekte ve ilerlemektedir. Özellikle derin kazılar sırasında kazı aşamalarına bağlı olarak oluşan gerilme boşalımı, yatay yer değiştirmelerin artmasına ve potansiyel göçme mekanizmalarının tetiklenmesine neden olabilmektedir (Clough & O'Rourke, 1990). Heyelanlı alanlarda ise deformasyon süreci genellikle zamana bağlı ve kademeli olarak gelişir. Kayma yüzeyi boyunca meydana gelen küçük yer değiştirmeler, uzun süre fark edilmeden devam edebilir ve ani kütle hareketleriyle sonuçlanabilir. Bu durum, yalnızca mühendislik yapıları için değil, aynı zamanda yerleşim alanları ve ulaşım altyapıları için de ciddi riskler oluşturmaktadır. Bu nedenle heyelanların izlenmesinde, yüzey ölçümlerinin yanı sıra yeraltındaki deformasyonların da doğrudan ölçülmesi büyük önem taşımaktadır (Dunncliff, 1993). Geleneksel şev stabilitesi analizleri çoğunlukla limit denge yöntemlerine ve laboratuvar deneylerinden elde edilen parametrelere dayanmaktadır. Ancak zemin ve kaya ortamlarının heterojen ve süreksizlik içeren yapısı nedeniyle, hesaplanan güvenlik katsayıları her zaman gerçek saha davranışını tam olarak yansıtmayabilmektedir. Bu noktada, yerinde deformasyon izleme sistemleri, tasarım varsayımlarının doğrulanması ve şev davranışının gerçek zamanlı olarak değerlendirilmesi açısından vazgeçilmez bir araç haline gelmektedir (Fell et al., 2008). Şevli derin kazılarda deformasyon izleme, yalnızca mevcut stabilite durumunun değerlendirilmesini değil, aynı zamanda destek sistemlerinin performansının kontrol edilmesini de mümkün kılmaktadır. İksa sistemleri, ankrajlar ve istinat yapıları gibi destek elemanlarının etkinliği, kazı ilerledikçe oluşan yatay deplasmanların izlenmesi yoluyla değerlendirilebilmektedir. Bu sayede, tasarımda öngörülmeleyen deformasyonların erken aşamada tespit edilmesi ve gerekli mühendislik önlemlerinin zamanında alınması sağlanmaktadır (Peck, 1969). Heyelan izleme çalışmalarında ise deformasyon ölçümleri, kayma yüzeyinin derinliği ve geometrisinin belirlenmesinde temel veri kaynağıdır. Derinliğe bağlı yer değiştirme profilleri, aktif kayma zonlarının ayırt edilmesine ve heyelan mekanizmasının doğru şekilde yorumlanmasına olanak tanımaktadır. Bu tür veriler, hem mevcut riskin değerlendirilmesinde hem de gelecekte meydana gelebilecek hareketlerin öngörülmesinde kritik öneme sahiptir (Cornforth, 2005). Sonuç olarak, şevli derin kazılar ve heyelanlı alanlarda deformasyon izleme

çalışmaları, modern jeoteknik tasarımın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Özellikle yeraltı deformasyonlarının doğrudan ölçülmesini sağlayan izleme sistemleri, mühendislik kararlarının güvenilirliğini artırmakta ve risk yönetimine önemli katkılar sunmaktadır. Bu bağlamda, inklinometre sistemleri, şev stabilitesi ve heyelan izleme çalışmalarında en etkin ve yaygın kullanılan yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır.

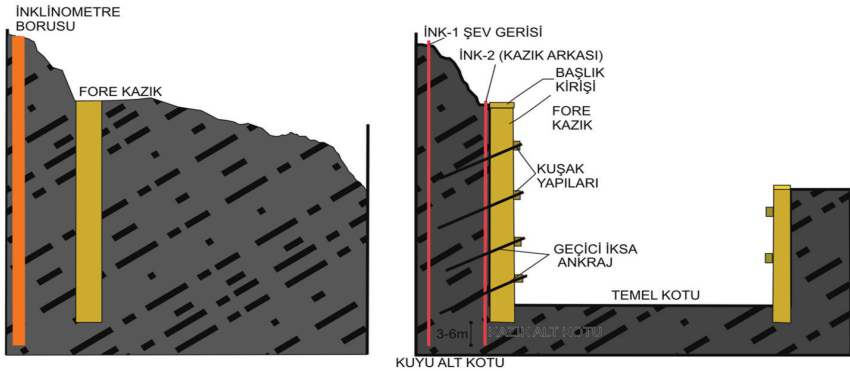
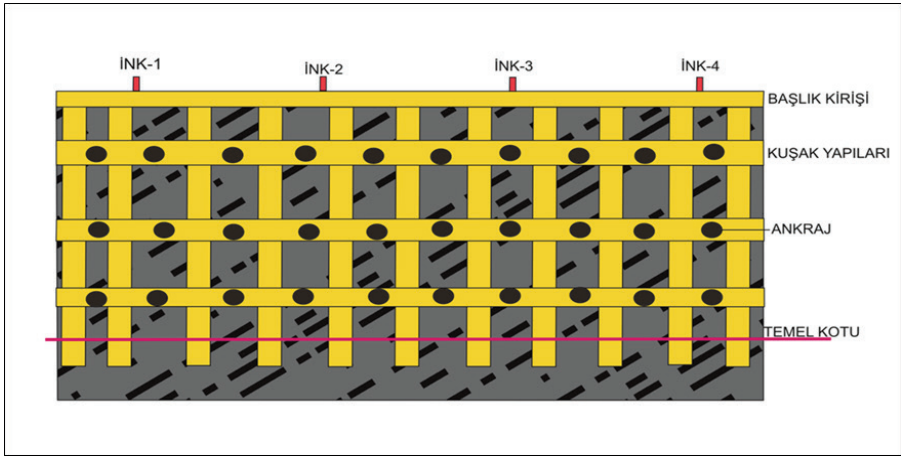
## 1.2. Yerinde Ölçüm Sistemlerinin Jeoteknik Tasarımdaki Rolü

Jeoteknik mühendisliği uygulamalarında tasarım süreci, zemin ve kaya ortamının mühendislik davranışının doğru şekilde tanımlanmasına dayanmaktadır. Ancak doğal zemin ve kaya kütleleri; heterojenlik, anizotropi, süreksizlikler ve zamana bağlı davranış gibi karmaşık özellikler sergilemektedir. Bu durum, laboratuvar deneyleri ve teorik analizler ile elde edilen parametrelerin, her zaman saha koşullarını tam olarak temsil edememesine neden olmaktadır. Bu bağlamda, yerinde ölçüm sistemleri, jeoteknik tasarımın belirsizliklerini azaltan ve mühendislik kararlarını doğrudan destekleyen temel araçlar olarak öne çıkmaktadır (Dunnicliff, 1993). Yerinde ölçüm sistemlerinin en önemli katkılarından biri, tasarım aşamasında yapılan varsayımların inşaat ve işletme sürecinde doğrulanabilmesidir. Özellikle şevli derin kazılar ve destekli kazı sistemlerinde, kazı ilerledikçe zemin veya kaya kütlelerinde meydana gelen deformasyonlar, önceden öngörülen davranıştan sapmalar gösterebilmektedir. Bu tür sapmaların erken aşamada tespit edilmesi, tasarımın revize edilmesine ve ilave önlemlerin zamanında alınmasına olanak sağlamaktadır. Bu yaklaşım, literatürde “gözleme dayalı tasarım yöntemi” (observational method) olarak tanımlanmakta ve modern jeoteknik mühendisliğinde yaygın biçimde uygulanmaktadır (Peck, 1969).



**Şekil 1.1.** Derin temel kazılarında farklı disiplinlerle aletsel izleme (a) inklinometre (b) ekstansometre (c) yük hücresi (loadcell) (d) piyezometre (Keskin, 2019).

Yerinde ölçüm sistemleri, yalnızca güvenlik açısından değil, aynı zamanda ekonomik tasarım açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Ölçüm verilerine dayalı olarak destek sistemlerinin performansının değerlendirilmesi, aşırı muhafazakâr tasarımların önüne geçilmesini sağlamakta ve gereksiz maliyetlerin azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte, beklenmeyen deformasyonların zamanında tespit edilmesi, ani göçmelerin ve büyük hasarların önlenmesine yardımcı olmaktadır (Mair & Taylor, 1997). Jeoteknik izleme sistemleri arasında inklinometreler, piezometreler, ekstansometreler ve yüzey deformasyon ölçüm teknikleri yer almaktadır. Bu sistemler, birlikte kullanıldığında zemin veya kaya kütesinin davranışına ilişkin bütüncül bir değerlendirme yapılmasına imkân tanımaktadır. Özellikle inklinometre ölçümleri, derinliğe bağlı yatay yer değiştirmelerin belirlenmesini sağlayarak, potansiyel kayma yüzeylerinin konumunun ve deformasyon mekanizmasının ortaya konulmasında kritik rol oynamaktadır (Keskin, 2019).



Şekil 1.2. Şevli kazılarda inklinometre kuyu tasarımı ve ankraj sistemleri (Keskin, 2019)

Heyelan izleme çalışmalarında yerinde ölçüm sistemleri, risk yönetimi ve erken uyarı sistemlerinin temel bileşenlerinden biridir. Zamana bağlı deformasyon verileri, heyelan hareket hızının belirlenmesine ve kritik eşik değerlerin tanımlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu tür veriler, yalnızca mevcut durumun değerlendirilmesi için değil, aynı zamanda gelecekte meydana gelebilecek kütle hareketlerinin öngörülmesi ve önleyici mühendislik önlemlerinin planlanması açısından da büyük önem taşımaktadır (Fell et al., 2008). Sonuç olarak, yerinde ölçüm sistemleri, jeoteknik tasarım sürecinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Teorik analizler ve sayısal modellemeler ile birlikte değerlendirilen saha ölçümleri, mühendislik yapılarının güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir biçimde tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda, inklinometre sistemleri, derin kazılar ve heyelanlı alanlarda zemin ve kaya davranışının anlaşılmasında en etkili izleme araçlarından biri olarak öne çıkmaktadır.

### 1.3. İnklinometre Ölçümlerinin Amaçları ve Kullanım Alanları

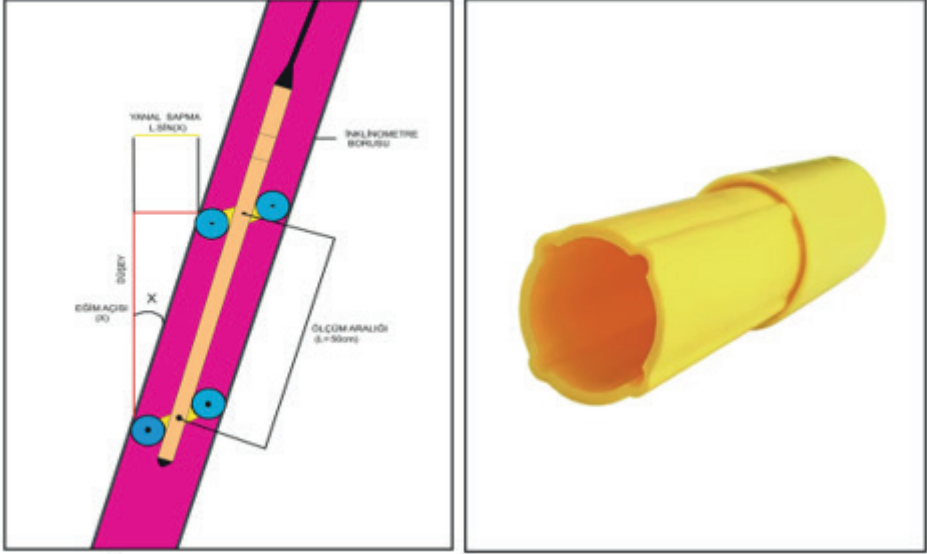
İnklinometre ölçümlerinin temel amacı, zemin veya kaya kütlesi içerisinde meydana gelen yatay yer değiştirmelerin derinliğe bağlı olarak belirlenmesi ve bu yer değiştirmelerin zamansal gelişiminin izlenmesidir. Bu ölçümler sayesinde, yüzeyde doğrudan gözlemlenemeyen deformasyonlar tespit edilebilmekte ve kütle hareketlerinin geometrisi ile mekanizması güvenilir biçimde ortaya konulabilmektedir. Özellikle şevli derin kazılar ve heyelanlı alanlarda, kayma yüzeylerinin çoğunlukla yer altında gelişmesi nedeniyle inklinometre ölçümleri vazgeçilmez bir izleme yöntemi olarak değerlendirilmektedir (Dunnicliff, 1993).

İnklinometre sistemleri, derinliğe bağlı yatay deplasman profilleri oluşturarak aktif veya potansiyel kayma zonlarının konumunun belirlenmesini sağlamaktadır. Bu profiller, kayma yüzeyinin derinliği, kalınlığı ve sürekliliği hakkında doğrudan bilgi sunmaktadır (Şekil 1.3). Elde edilen veriler, hem mevcut stabilite durumunun değerlendirilmesinde hem de şev stabilitesi analizlerinde kullanılan sayısal ve analitik modellerin doğrulanmasında kullanılmaktadır (Cornforth, 2005). Şevli derin kazı uygulamalarında inklinometre ölçümlerinin başlıca amaçlarından biri, kazı aşamalarına bağlı olarak gelişen yatay deformasyonların izlenmesidir. Kazı ilerledikçe oluşan gerilme boşalımı, zemin veya kaya kütlesinde yatay deplasmanların artmasına neden olabilmektedir. Bu deplasmanların düzenli olarak izlenmesi, iksa sistemleri, ankrajlar ve istinat yapılarının performansının değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sayede, tasarımda öngörülen sınır değerlerin aşılması durumunda erken müdahale imkânı doğmaktadır (Peck, 1969).

Heyelan izleme çalışmalarında ise inklinometreler, kütle hareketlerinin türünün ve hızının belirlenmesi açısından kritik rol oynamaktadır. Zamana bağlı ölçümler yardımıyla deformasyon hızları hesaplanabilmekte ve heyela-



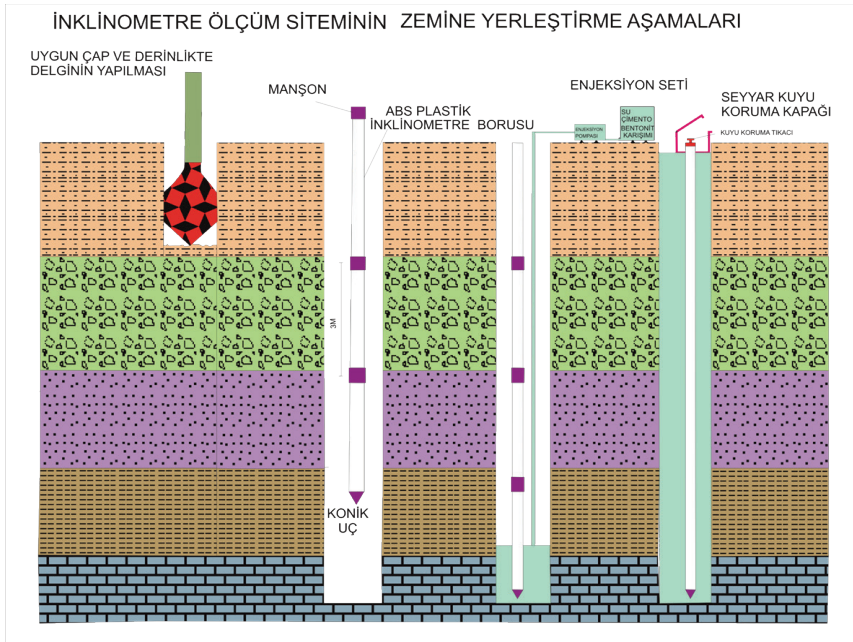
sindeki yatay ve düşey yük dağılımını incelemek ve hareketin hızını ölçmek amacıyla kullanılmaktadır. Tek bir inklinometre seti ile birden fazla sondaj kuyusundan veri alınabilmektedir. İnklinometrenin çalışma prensibi, zemin veya kaya kütesine yerleştirilen kılavuz boru boyunca meydana gelen yatay eğim değişimlerinin ( $10\text{--}20^\circ$ ) hassas sensörlerle ölçülmesi ve bu verilerin derinliğe bağlı yatay yer değiştirmelere dönüştürülmesine dayanır. Ölçüm sistemi, dört boyuna oluğa sahip özel bir inklinometre borusu ile bu boru içerisinde yukarı ve aşağı hareket ettirilen bir probdan oluşmaktadır (Dunnicliff, 1993). İnklinometre probu, birbirine dik iki ekseninde (genellikle A ve B eksenleri olarak tanımlanır) çalışan ivme ölçer veya servo ivme sensörleri içermektedir. Ölçüm sırasında prob, boru içerisindeki oluklara oturtularak belirli aralıklarla (genellikle 0,5 m) aşağıdan yukarıya doğru ilerletilir ve her ölçüm noktasında yerçekimine göre eğim açısı kaydedilir. Bu eğim değerleri, borunun ilgili derinlikteki yatay konum değişimini temsil etmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. İnklinometre borusu üst görünümü ve A ve B eksenlerinde çalışan probun ölçüm prensibi ile eğim–yer değiştirme ilişkisinin şematik gösterimi.

Elde edilen eğim verileri doğrudan yatay yer değiştirme bilgisi sunmakta; ancak sayısal entegrasyon yöntemi kullanılarak derinliğe bağlı deplasman profilleri hesaplanmaktadır. Bu işlemde, her ölçüm aralığındaki eğim değeri ölçüm aralığı uzunluğu ile çarpılarak yatay yer değiştirme bileşeni elde edilmekte ve bu değerler derinlik boyunca kümülatif olarak toplanmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, hem toplam yer değiştirme miktarı hem de deformasyonun hangi derinlikte yoğunlaştığı belirlenebilmektedir (Cornforth, 2005).

İnclinometre ölçümlerinde referans olarak genellikle ilk ölçüm (sıfır ölçümü) kabul edilmekte ve sonraki ölçümler bu referans duruma göre değerlendirilerek zamana bağlı deformasyonlar izlenmektedir. Bu yöntem, özellikle kazı aşamaları veya yağış rejimine bağlı olarak gelişen deformasyonların karşılaştırmalı olarak analiz edilmesine olanak tanımaktadır (Peck, 1969). Ölçüm prensibinin güvenilirliği, inclinometre borusunun çevre zeminle tam uyumlu şekilde hareket etmesine bağlıdır. Borunun kuyu içerisinde enjeksiyonla sabitlenmesi, boru ile zemin arasındaki boşlukların ortadan kaldırılmasını ve ölçülen deformasyonların gerçek zemin hareketlerini temsil etmesini sağlamaktadır. Aksi durumda, boru ile zemin arasında oluşabilecek boşluklar ölçüm hatalarına ve yanlış yorumlara neden olabilmektedir (Şekil 2.2) (Fell ve diğ., 2008). Sonuç olarak, inclinometre ölçüm prensibi; yüksek hassasiyetli eğim ölçümleri, kontrollü ölçüm aralıkları ve zamana bağlı karşılaştırmalı analizler sayesinde yer altındaki yatay deformasyonların güvenilir biçimde belirlenmesine olanak tanımaktadır.



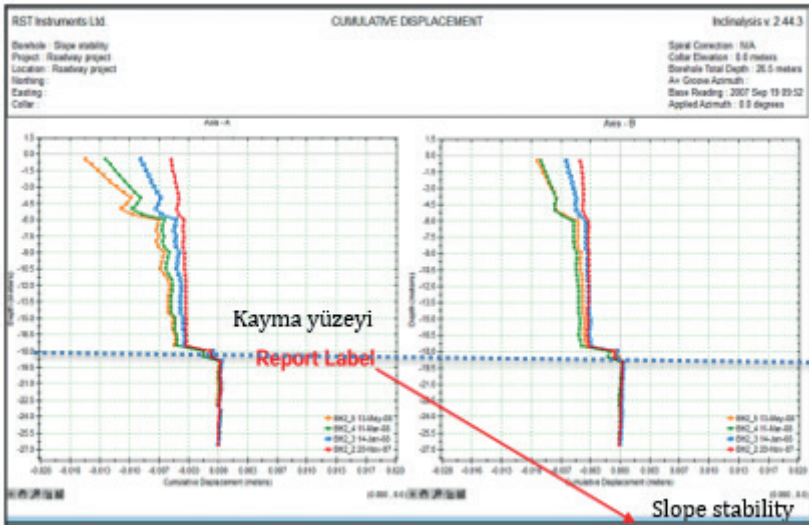
Şekil 2.2. İncinometre borusunun kuyu içerisinde enjeksiyonla sabitlenme durumu ve boru-zemin etkileşiminin şematik görünümü.

## 2.2. Yatay Yer Değiştirme ve Dönme Kavramları

Jeoteknik mühendisliği ve mühendislik jeolojisi uygulamalarında deformasyon davranışının doğru şekilde yorumlanabilmesi için yatay yer değiştirme ve dönme (rotasyon) kavramlarının birlikte değerlendirilmesi büyük önem

taşmaktadır. Özellikle şevli derin kazılar ve heyelanlı alanlarda gelişen kütle hareketleri, yalnızca doğrusal yer değiştirmelerle değil, aynı zamanda kütlelerin belirli bir eksen etrafında dönmesiyle de karakterize edilmektedir (Dunncliff, 1993). Yatay yer değiştirme, zemin veya kaya kütlelerinin belirli bir derinlikte zamanla başlangıç konumuna göre yatay doğrultuda yaptığı konum değişimini ifade etmektedir. İnklinometre ölçümleri, bu yer değiştirmeleri derinliğe bağlı olarak sürekli bir profil halinde sunarak deformasyonun hangi seviyelerde yoğunlaştığını açık biçimde ortaya koymaktadır (Şekil 2.3) (Cornforth, 2005). Buna karşılık dönme (rotasyon), zemin veya kaya kütlelerinin bir nokta veya eksen etrafında açılmal hareket yapması durumunu ifade etmektedir. Şev stabilitesi problemlerinde dönme davranışı genellikle dairesel veya yarı dairesel kayma yüzeyleri boyunca gelişmekte ve kütlelerin üst kesimlerinde daha büyük yatay yer değiştirmelerle kendini göstermektedir. İnklinometre ölçümlerinde, derinlik boyunca yer değiştirme eğrisinin şekli incelenerek dönme hareketinin varlığı ve karakteri yorumlanabilmektedir (Abramson ve diğ., 2002).

Yatay yer değiştirme ve dönme kavramlarının birlikte değerlendirilmesi, deformasyon mekanizmasının doğru şekilde tanımlanmasını sağlamaktadır. Belirli bir derinlikte ani yer değiştirme artışı gözlenmesi kesme kontrollü (translasyonel) bir kayma mekanizmasına işaret ederken, yer değiştirme eğrisinin yüzeye doğru kademeli olarak artması dönele (rotasyonel) kayma mekanizmasını düşündürmektedir (Peck, 1969). Sonuç olarak, yatay yer değiştirme ve dönme kavramlarının birlikte ele alınması; şev stabilitesi, derin kazı performansı ve kütle hareketlerinin doğru biçimde yorumlanmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.3. İnklinometre ölçümleri ile elde edilen derinliğe bağlı yatay yer değiştirme profili ve olası kayma yüzeyinin belirlenmesi.

### 2.3. Kayma Yüzeyi ve Deformasyon Mekanizmasının Belirlenmesi

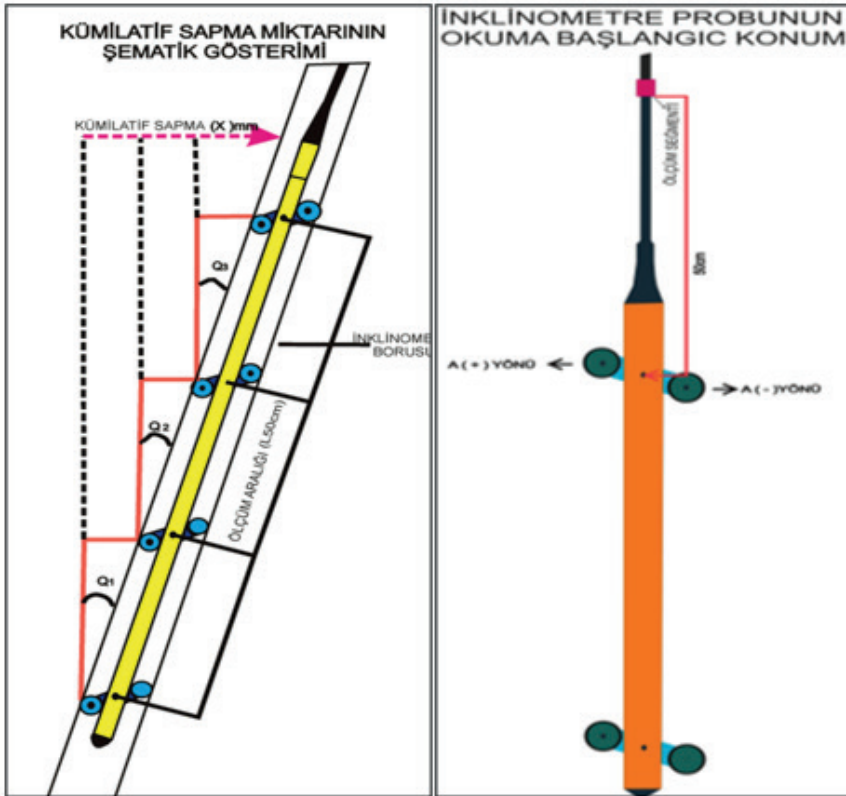
Şev stabilitesi, derin kazılar ve heyelanlı alanlarda güvenli tasarımın temelini, kayma yüzeyinin konumunun ve deformasyon mekanizmasının doğru biçimde belirlenmesi oluşturmaktadır. Zemin veya kaya kütlelerinde gelişen deformasyonlar, yalnızca yüzeyde gözlenen hasarlarla sınırlı kalmayıp, çoğu zaman derinlik boyunca ilerleyen karmaşık hareket bileşenleri içermektedir. Bu nedenle, kayma yüzeyinin geometrisi ile deformasyonun türü ve gelişim süreci, ayrıntılı ölçüm ve izleme verilerine dayalı olarak değerlendirilmelidir (Dunncliff, 1993). Kayma yüzeyi, zemin veya kaya kütlesi içerisinde göreceli yer değiştirmenin yoğunlaştığı ve kesme deformasyonlarının biriktiği süresizlik zonu olarak tanımlanmaktadır. Bu yüzeyin konumu ve şekli; malzeme özellikleri, tabakalanma, süresizlik sistemleri, yeraltı suyu koşulları ve dış yükler gibi çok sayıda faktörden etkilenmektedir. İnklinometre ölçümleri, derinlik boyunca elde edilen yatay yer değiştirme profilleri sayesinde, bu kritik zonların belirlenmesinde en güvenilir yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir (Cornforth, 2005).

İnklinometre profillerinde, belirli bir derinlikte yer değiştirme değerlerinde ani artışların gözlenmesi, genellikle aktif veya potansiyel bir kayma yüzeyinin varlığına işaret etmektedir. Bu tür profiller, translasyonel (doğrusal) kayma mekanizmalarında daha keskin ve sınırlı bir deformasyon zonu sunarken; rotasyonel kaymalarda yer değiştirme dağılımı daha geniş bir derinlik aralığına yayılmakta ve yüzeye doğru artan bir karakter göstermektedir (Abramson et al., 2002). Deformasyon mekanizmasının belirlenmesi, yalnızca kayma yüzeyinin tespit edilmesiyle sınırlı olmayıp, deformasyonun zaman içerisindeki gelişim hızının ve karakterinin de değerlendirilmesini gerektirmektedir. Ardışık inklinometre ölçümleri kullanılarak elde edilen zaman–yer değiştirme ilişkileri, deformasyonun progresif mi yoksa ani mi geliştiğinin anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. Bu yaklaşım, özellikle erken uyarı sistemlerinin kurulması ve stabilite kaybının öngörülmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Fell et al., 2008). Kayma yüzeyi geometrisinin ve deformasyon mekanizmasının doğru biçimde tanımlanması, uygulanacak stabilite analiz yöntemlerinin seçimini doğrudan etkilemektedir. Örneğin, dairesel kayma yüzeylerine sahip rotasyonel heyelanlarda limit denge yöntemleri yaygın olarak kullanılırken; düzlemsel veya kama tipi kaymalarda süresizlik kontrollü analiz yaklaşımları tercih edilmektedir. Bu bağlamda, ölçüm verilerine dayalı mekanizma tanımı, hesap sonuçlarının güvenilirliğini artıran temel bir unsur olarak öne çıkmaktadır (Peck, 1969). Sonuç olarak, kayma yüzeyi ve deformasyon mekanizmasının belirlenmesi; jeoteknik tasarım, risk değerlendirmesi ve iyileştirme önlemlerinin planlanmasında kritik bir aşamadır. İnklinometre ölçümleri, deformasyonun derinlik ve zaman boyutundaki davranışını ortaya koyarak, şev stabilitesi ve yer hareketlerinin mühendislik açısından doğru ve rasyonel biçimde yorumlanmasına olanak sağlamaktadır.

### 3. İNKLINOMETRE ALETLERİ VE TEKNİK ÖZELLİKLERİ

#### 3.1. İnklinometre Prob (Okuyucu) Sistemleri

İnklinometre prob (okuyucu) sistemleri, zemin veya kaya kütlesi içerisinde meydana gelen yatay deformasyonların derinliğe bağlı olarak ölçülmesini sağlayan temel bileşenlerdir. Bu sistemler, inklinometre borusu içerisine indirilen ve boru oluklarını referans alarak çalışan hassas sensörler yardımıyla, her ölçüm seviyesindeki eğim değişimlerini belirlemektedir. Ölçülen açılal sapmalar, derinlik boyunca yatay yer değiştirme değerlerine dönüştürülerek deformasyon profilleri elde edilmektedir (Dunnicliff, 1993). Modern inklinometre problemlerinde genellikle servo-ivmeölçer veya MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) tabanlı sensörler kullanılmaktadır. Bu sensörler, yüksek çözünürlük ve uzun süreli kararlılık sağlayarak, küçük deformasyonların dahi güvenilir biçimde ölçülmesine olanak tanımaktadır. Problemler çoğunlukla iki dik eksende (A ve B eksenleri) ölçüm yapacak şekilde tasarlanmakta, böylece deformasyonun yönü ve büyüklüğü üç boyutlu olarak değerlendirilebilmektedir (Mikkelsen, 2003).

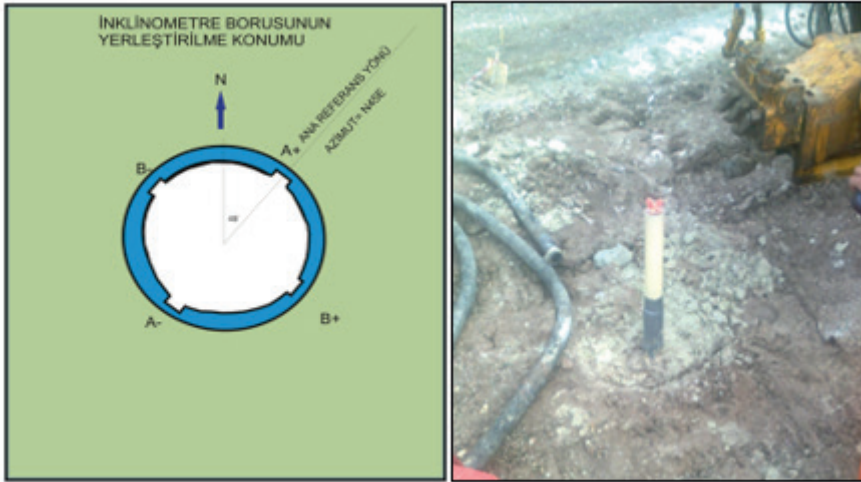


Şekil 3.1. İki eksenli ölçüm yapabilen tipik bir inklinometre probunun temel bileşenleri ve çalışma prensibinin şematik gösterimi.

İnclinometre prob sistemlerinde ölçüm doğruluğu; sensör hassasiyeti, prob kalibrasyonu, ölçüm tekrarlanabilirliği ve saha uygulama disiplinine doğrudan bağlıdır. Bu nedenle ölçümlerin, aynı referans yönü ve sabit ölçüm aralıkları kullanılarak gerçekleştirilmesi, elde edilen verilerin karşılaştırılabilirliği açısından büyük önem taşımaktadır (Peck, 1969).

### 3.2. İncinometre Boruları

İncinometre boruları, deformasyon ölçüm sisteminin zemin veya kaya kütlesi ile doğrudan etkileşimde bulunan yapısal elemanlarıdır. Bu borular, imalat çapları OD60, OD70, OD80 (mm) olan genellikle PVC, ABS veya cam elyaf takviyeli plastik (GRP) malzemeden üretilmekte olup, iç yüzeylerinde karşılıklı yerleştirilmiş dört adet kılavuz oluk bulunmaktadır. Bu oluklar, probun ölçüm sırasında sabit bir referans doğrultusunda ilerlemesini sağlayarak ölçüm hatalarını minimize etmektedir (Cornforth, 2005). Boruların zemin veya kaya içerisine yerleştirilmesi sırasında, çevresel malzeme ile iyi bir aderans sağlanması büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, sondaj boşluğu ile boru arasındaki boşluk genellikle çimento-bentonit esaslı enjeksiyon harçları ile doldurulmaktadır. Böylece borunun ölçülen deformasyonları gerçek zemin hareketlerini temsil etmesi sağlanmaktadır. Yetersiz enjeksiyon veya boru ekseninde oluşabilecek eğrilikler, ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Abramson et al., 2002).



Şekil 3.2. Dört oluklu tipik bir incinometre borusunun kuyu görünümü ve ölçüm eksenlerinin gösterimi.

İncinometre borularının uzunluğu, izlenmek istenen deformasyon derinliğine bağlı olarak belirlenmekte; genellikle sağlam temel birime veya de-

formasyon beklenmeyen bir seviyeye kadar indirilmektedir. Bu yaklaşım, ölçümlerde sabit bir referans noktası oluşturulmasını ve relatif yer değiştirmelerin doğru biçimde hesaplanmasını mümkün kılmaktadır (Dunnicliff, 1993).

### 3.3. Veri Toplama ve Okuma Sistemleri

İnclinometre ölçümlerinde veri toplama ve okuma sistemleri, sahadan elde edilen ham ölçüm değerlerinin kaydedilmesi, depolanması ve analiz edilmesi süreçlerini kapsamaktadır. Geleneksel sistemlerde ölçümler manuel olarak gerçekleştirilirken, günümüzde veri kaydedici (data logger) ve uzaktan izleme teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte ölçüm süreçleri büyük ölçüde otomatik hale gelmiştir (Fell et al., 2008). Manuel okuma sistemlerinde, prob yardımıyla belirli derinlik aralıklarında ölçüm alınmakta ve bu değerler saha bilgisayarlarına veya veri kaydedicilere aktarılmaktadır. Otomatik sistemlerde ise sabit problemler veya zincir inclinometreler kullanılarak, deformasyonlar gerçek zamanlı veya belirlenen periyotlarda sürekli olarak izlenebilmektedir. Bu tür sistemler, özellikle kritik şevler ve yüksek riskli kazı alanlarında erken uyarı mekanizmalarının oluşturulmasına olanak sağlamaktadır (Mikkelsen, 2003).



Şekil 3.3. Manuel inclinometre veri toplama seti.

Toplanan verilerin değerlendirilmesi aşamasında, ölçüm sonuçları genellikle yer değiştirme–derinlik ve yer değiştirme–zaman grafiklerine dönüştürülmektedir. Bu grafikler sayesinde deformasyonun hızı, yönü ve mekanizması yorumlanabilmekte; stabilite analizleri için gerekli temel girdiler elde edilmektedir. Veri kalitesinin artırılması amacıyla, düzenli kalibrasyon, tekrarlı ölçüm ve kalite kontrol prosedürlerinin uygulanması büyük önem taşımaktadır (Peck, 1969).

## 4. İNKLINOMETRE ÖLÇÜM DİSİPLİNİ

### 4.1. Ölçüm Aralıkları ve Zamanlama

İnklinometre ölçümlerinde ölçüm aralıklarının ve zamanlamasının doğru şekilde belirlenmesi, deformasyon davranışının güvenilir biçimde izlenebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Ölçüm aralığı, genellikle 0,5 m veya 1,0 m olarak seçilmekte olup, bu seçim deformasyonun beklenen büyüklüğü, zemin veya kaya koşulları ve mühendislik yapısının önemi gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Daha sık ölçüm aralıkları, kayma yüzeylerinin hassas biçimde belirlenmesine olanak sağlarken; daha geniş aralıklar, genel deformasyon trendlerinin izlenmesi için yeterli olabilmektedir (Dunnicliff, 1993). Ölçüm zamanlaması ise kazı aşamaları, yükleme koşulları, mevsimsel yeraltı suyu değişimleri ve yağış gibi dış etkenler dikkate alınarak planlanmalıdır. Kritik inşaat aşamalarında ölçüm sıklığının artırılması, ani deformasyonların erken aşamada tespit edilmesine katkı sağlamaktadır (Fell et al., 2008).

### 4.2. Referans (Sıfır) Ölçümün Önemi

Referans (sıfır) ölçüm, inklinometre sisteminin kurulumu tamamlandıktan sonra alınan ve tüm sonraki ölçümlerin karşılaştırma noktası olarak kullanılan başlangıç verisidir. Bu ölçüm, sistemin henüz dış yükler veya kazı etkileri altında kalmadığı bir aşamada gerçekleştirilmelidir. Referans ölçümün doğru ve tekrarlanabilir şekilde alınması, uzun dönemli deformasyon analizlerinin güvenilirliği açısından vazgeçilmezdir (Mikkelsen, 2003). Referans ölçümde yapılacak hatalar, ilerleyen dönemlerde elde edilecek tüm yer değiştirme verilerine sistematik sapmalar olarak yansımaktadır. Bu nedenle sıfır ölçümün, mümkünse birden fazla tekrar edilerek ortalama değerlerin kullanılması önerilmektedir (Peck, 1969).

### 4.3. A ve B Yönü Ölçümleri

İnklinometre boruları içerisinde bulunan karşılıklı oluklar, ölçümlerin iki dik ekseninde (A ve B yönleri) alınmasına olanak sağlamaktadır. A yönü ölçümleri genellikle şev hareketinin beklenen ana doğrultusuna paralel olacak şekilde tanımlanırken, B yönü ölçümleri buna dik doğrultuda alınarak deformasyonun üç boyutlu karakteri ortaya konulmaktadır. Bu yaklaşım, karmaşık deformasyon mekanizmalarının doğru biçimde yorumlanmasına katkı sağlamaktadır (Cornforth, 2005). A ve B yönü ölçümlerinin birlikte değerlendirilmesi, ölçüm hatalarının kontrol edilmesi açısından da önemlidir. İdeal koşullarda, iki yönlü ölçümlerin vektörel toplamı gerçek deformasyon büyüklüğünü yansıtmakta; yönler arası tutarsızlıklar ise olası ölçüm hatalarına işaret edebilmektedir (Dunnicliff, 1993).

#### 4.4. Ölçüm Hataları ve Kalite Kontrol

İnclinometre ölçümlerinde karşılaşılan hatalar; sensör kalibrasyonu, probun boru içerisinde yanlış yönlendirilmesi, ölçüm aralıklarının düzensizliği ve çevresel koşullar gibi çeşitli nedenlerden kaynaklanabilmektedir. Ayrıca boru ekseninde meydana gelen burkulmalar veya yetersiz enjeksiyon uygulamaları da ölçüm sonuçlarını olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Abramson et al., 2002). Kalite kontrol sürecinde, ölçümlerin aynı referans yönünde tekrarlanması, ters yönde okuma yapılması ve verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Bu uygulamalar, rastgele hataların ayırt edilmesini ve güvenilir deformasyon profillerinin elde edilmesini mümkün kılmaktadır (Mikkelsen, 2003).

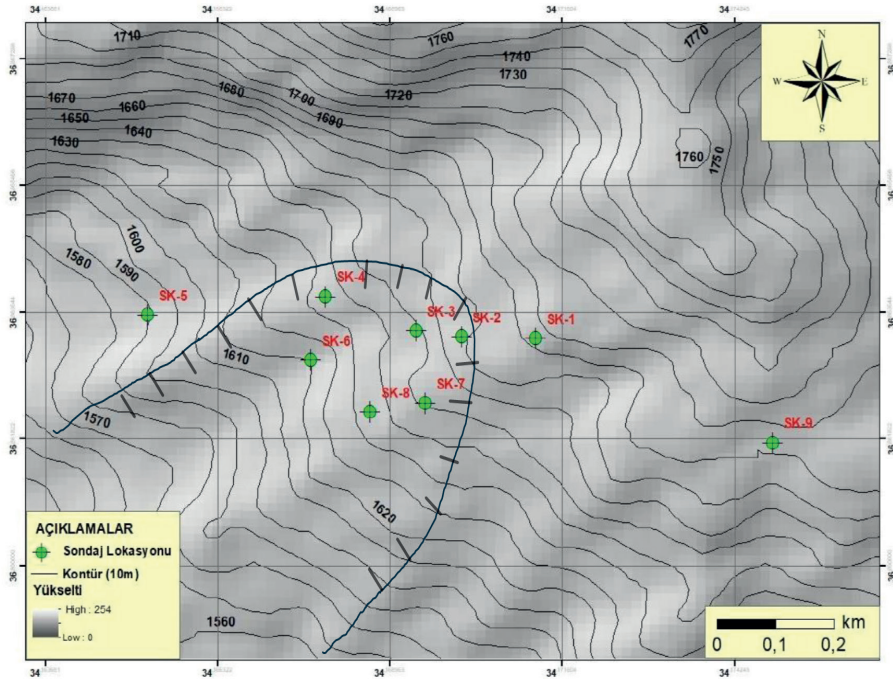
#### 4.5. Uzun Süreli İzleme Programlarının Oluşturulması

Uzun süreli izleme programları, deformasyon davranışının zamana bağlı gelişimini ortaya koyarak, stabilite problemlerinin erken aşamada tespit edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu programların oluşturulmasında; ölçüm sıklığı, izleme süresi, veri değerlendirme kriterleri ve alarm eşik değerleri önceden tanımlanmalıdır. Özellikle yüksek riskli şevler ve derin kazı alanlarında, otomatik veri toplama sistemleri ile entegre izleme programları tercih edilmektedir (Fell et al., 2008). Uzun süreli izleme verileri, yalnızca mevcut stabilite durumunun değerlendirilmesinde değil, aynı zamanda ileriye dönük tahminlerin yapılmasında da önemli bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda, ölçüm sonuçlarının mühendislik jeolojisi, hidrojeoloji ve jeoteknik analizlerle birlikte yorumlanması, bütüncül ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır (Peck, 1969).

### 5. SAHA ÇALIŞMALARI VE KURULUM AŞAMALARI

#### 5.1. İncinometre Kuyu Yerlerinin Belirlenmesi

İncinometre kuyularının konumlarının doğru biçimde belirlenmesi, deformasyon davranışının güvenilir şekilde izlenebilmesi açısından kurulum sürecinin en kritik aşamalarından biridir. Kuyu yerleri, şev geometrisi, litolojik birimler, süreksizlik sistemleri, beklenen kayma yüzeylerinin konumu ve yeraltı suyu koşulları dikkate alınarak planlanmalıdır. Özellikle potansiyel kayma zonlarının yukarı ve aşağı kesimlerini temsil edecek şekilde konumlandırılan kuyular, deformasyon mekanizmasının üç boyutlu olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Dunncliff, 1993). İncinometre kuyularının yer seçiminde, yüzey gözlemleri, jeolojik-jeoteknik etütler, sondaj verileri ve daha önce gerçekleştirilmiş ölçüm sonuçları birlikte değerlendirilmelidir. Bu bütüncül yaklaşım, ölçümlerin temsil yeteneğini artırmakta ve izleme sisteminin etkinliğini yükseltmektedir Cornforth, 2005).



Şekil 5.1. Kayma yüzeyleri olasılığı dikkate alınarak planlanan inklinometre kuyu yerlerinin harita gösterimi.

## 5.2. İnklinometre Kuyularının Açılması

İnklinometre kuyuları, genellikle rotari veya karotlu sondaj yöntemleri kullanılarak açılmakta ve sondaj derinliği, beklenen deformasyon zonunun altına kadar indirilmektedir. Kuyuların düşeyliğinin sağlanması, ölçüm doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır; eksenel sapmalar, inklinometre probunun boru içerisinde düzgün ilerlemesini engelleyerek ölçüm hatalarına yol açabilmektedir (Abramson et al., 2002). Sondaj sırasında elde edilen litolojik veriler, kayma yüzeyinin ön tahminine katkı sağlamakta ve inklinometre ölçümlerinin yorumlanmasında destekleyici bilgi sunmaktadır. Ayrıca kuyu çapının, kullanılacak inklinometre borusunun dış çapı ile uyumlu olacak şekilde seçilmesi gerekmektedir (Dunnicliff, 1993).

## 5.3. İnklinometre Borularının Kuyu İçine Yerleştirilmesi

İnklinometre boruları, kuyu içerisine dikkatli ve kontrollü bir şekilde yerleştirilmelidir. Boru segmentlerinin birleştirilmesi sırasında, oluk yönlerinin sürekliliğinin sağlanması ve eksenel sapmaların önlenmesi büyük önem taşımaktadır. Boruların, ölçüm yönleri (A ve B eksenleri) önceden belirlenmiş referans doğrultularına göre konumlandırılması, ilerleyen aşamalarda elde edilecek verilerin yorumlanabilirliği açısından kritik bir gerekliliktir (Mikkelsen, 2003). Yerleştirme işlemi sırasında boruların kuyu tabanına tam oturması sağlanmalı ve boru

içinde yabancı malzeme kalmamasına özen gösterilmelidir. Aksi takdirde, prob hareketi kısıtlanabilir ve ölçüm güvenilirliği azalabilir (Cornforth, 2005).

#### **5.4. Boruların Enjeksiyonla Sabitlenmesi**

İnclinometre borularının kuyu içerisinde çevre zemin veya kaya ile bütünleşmesini sağlamak amacıyla, boru ile kuyu duvarı arasındaki boşluk enjeksiyon harcı ile doldurulmaktadır. Enjeksiyon harcı genellikle çimento-bentonit esaslı olup, yeterli akışkanlık ve uzun vadeli dayanım sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu işlem, borunun çevre deformasyonları doğru biçimde yansıtabilmesi açısından hayati öneme sahiptir (Abramson et al., 2002).

Enjeksiyon işlemi, genellikle aşağıdan yukarıya doğru gerçekleştirilerek boşluk kalması engellenmekte ve homojen bir dolgu sağlanmaktadır. Yetersiz veya düzensiz enjeksiyon uygulamaları, borunun serbest hareket etmesine veya çevre zeminle uyumsuz deformasyonlar göstermesine neden olabilmektedir (Dunncliff, 1993).



Şekil 5.2. İnklinometre borusunun kuyu içerisine yerleştirilmesi ve çimento-bentonit enjeksiyonu ile sabitlenmesi çalışmaları.

## 5.5. Kurulum Sonrası Kontroller ve Referans Ölçüm

Kurulum işlemlerinin tamamlanmasının ardından, inklinometre sisteminin işlevselliği ve ölçüm doğruluğu kontrol edilmelidir. Bu kapsamda boru düşeyliği, oluk sürekliliği ve probun kuyu boyunca sorunsuz ilerleyip ilerlemediği test edilmelidir. Kurulum sonrası kontrollerin ardından alınan ilk ölçüm, referans (sıfır) ölçüm olarak kabul edilmekte ve sonraki tüm ölçümler bu veri seti ile karşılaştırılmaktadır (Peck, 1969). Referans ölçümün, enjeksiyon harcının prizini tamamlamasının ardından ve sistemin çevresel etkilerden minimum düzeyde etkilendiği bir zamanda alınması önerilmektedir. Bu yaklaşım, uzun dönemli izleme sonuçlarının güvenilirliğini artırmaktadır (Mikkelsen, 2003).

## 6. ŞEVLİ DERİN KAZILARDA İNKLINOMETRE UYGULAMALARI

### 6.1. Kazı Aşamalarına Bağlı Deformasyonların İzlenmesi

Derin kazı projelerinde deformasyon davranışının güvenli biçimde kontrol altına alınabilmesi, kazı aşamalarına bağlı olarak gelişen yer değiştirmelerin sistematik şekilde izlenmesini gerektirmektedir. Kazı ilerledikçe, zemin veya kaya kütlelerinde meydana gelen gerilme yeniden dağılımları, yatay ve düşey deformasyonların artmasına neden olmaktadır. İnklinometre ölçümleri, bu deformasyonların derinlik ve zaman boyutundaki gelişimini ortaya koyarak, kazı kaynaklı stabilite sorunlarının erken aşamada tespit edilmesine olanak sağlamaktadır (Dunncliff, 1993). Kazı aşamalarına bağlı izleme programlarında, her kazı kademesinin tamamlanmasının ardından ölçüm alınması ve elde edilen sonuçların önceki aşamalarla karşılaştırılması büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, deformasyon hızındaki artışların veya mekanizma değişimlerinin belirlenmesini mümkün kılmakta ve gözlemsel yöntem çerçevesinde tasarım kararlarının güncellenmesine katkı sağlamaktadır (Peck, 1969).

### 6.2. Destek Sistemlerinin Performans Değerlendirmesi

Derin kazı ve şev uygulamalarında kullanılan destek sistemlerinin (iksa sistemleri, ankrajlar, zemin çivileri ve püskürtme beton gibi) etkinliği, sahada ölçülen deformasyon verileri üzerinden değerlendirilmektedir. İnklinometre ölçümleri, destek sistemlerinin uygulanmasından önce ve sonra alınan verilerin karşılaştırılmasına olanak tanıyarak, destek elemanlarının deformasyonları ne ölçüde sınırlandırdığını ortaya koymaktadır (Abramson et al., 2002).

Destek sistemlerinin performans değerlendirmesinde, yatay yer değiştirme değerlerinin yanı sıra deformasyonun derinlik boyunca dağılımı da dikkate alınmalıdır. Destek sonrası ölçümlerde deformasyon eğrisinin belirli bir seviyede yataylaşması veya yer değiştirme artış hızının azalması, sistemin etkinliğine işaret etmektedir. Buna karşılık, destek uygulamasına rağmen deformasyonların artmaya devam etmesi, tasarımın gözden geçirilmesi gerektiğini göstermektedir (Mikkelsen, 2003).

### 6.3. Kritik Deplasman ve Uyarı Eşik Değerleri

İnclinometre izleme programlarının en önemli çıktularından biri, kritik deplasman değerlerinin ve uyarı eşiklerinin belirlenmesidir. Kritik deplasman, yapı güvenliğini veya şev stabilitesini tehlikeye sokabilecek seviyedeki yer değiştirme miktarını ifade etmekte olup, bu değerler genellikle proje özelinde ve mühendislik yargısı ile belirlenmektedir. Literatürde, kazı derinliği, zemin türü ve destek sistemine bağlı olarak farklı eşik değerlerin önerildiği görülmektedir (Fell et al., 2008). Uyarı eşik değerleri, genellikle çok kademeli bir sistem içerisinde tanımlanmakta ve ölçülen deplasmanların belirli sınırları aşması durumunda devreye girecek önlemler önceden belirlenmektedir. Bu kapsamda, düşük seviyeli uyarılar artan izleme sıklığını tetiklerken; yüksek seviyeli uyarılar kazı çalışmalarının durdurulması veya ilave destek önlemlerinin alınmasını gerektirebilmektedir. Bu yaklaşım, risk yönetimi ve iş güvenliği açısından önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir (Dunncliff, 1993).

Referans Aralığı	Ankrajlarla Desteklenmiş İksa Sistemleri İçin Güvenlik Alarm Kodları
(Deplasman miktarı (mm)/ kazı derinliği(mm)) *100	
≤ 0.1	Sarı Alarm
0.1-0.15	Turuncu Alarm
>0.2	Kırmızı Alarm

**Şekil 6.1.** İncinometre ölçümlerine dayalı kritik deplasman ve uyarı eşik değerlerinin tanımlanmasına ilişkin kavramsal gösterim.

Sonuç olarak, kazı aşamalarına bağlı deformasyonların izlenmesi, destek sistemlerinin performansının değerlendirilmesi ve kritik deplasman eşiklerinin belirlenmesi; derin kazı ve şev projelerinde güvenli, esnek ve adaptif bir mühendislik yaklaşımının temel bileşenlerini oluşturmaktadır. İncinometre verilerine dayalı bu değerlendirmeler, olası stabilite problemlerinin önceden öngörülmesine ve gerekli mühendislik önlemlerinin zamanında alınmasına olanak sağlamaktadır.

## 7. HEYELANLARDA İNKLİNOMETRE UYGULAMALARI

### 7.1. Kayma Yüzeyinin Belirlenmesi

Kayma yüzeyinin doğru biçimde tanımlanması, şev stabilitesi ve heyelan analizlerinin temelini oluşturmaktadır. İncinometre ölçümleri, derinlik boyunca elde edilen yatay yer değiştirme profilleri aracılığıyla, görelî hareketlerin yoğunlaştığı zonların belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu profillerde belirli bir derinlikte gözlenen ani yer değiştirme artışları, aktif veya potansiyel bir kayma yüzeyinin varlığına işaret etmektedir (Dunncliff, 1993).

Kayma yüzeyinin yorumlanmasında, tek bir ölçüm periyoduna ait veriler yerine, ardışık ölçümlerden elde edilen zaman bağımlı yer değiştirme eğrilerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, kayma yüzeyinin sürekliliğinin ve geometrisinin daha güvenilir biçimde ortaya konulmasını sağlamaktadır. Ayrıca, inklinometre verilerinin jeolojik kesitler ve sondaj logları ile birlikte yorumlanması, kayma mekanizmasının mühendislik açısından daha doğru şekilde tanımlanmasına katkı sunmaktadır (Abramson et al., 2002).

## 7.2. Aktif ve Potansiyel Heyelanların İzlenmesi

İnklinometre sistemleri, aktif ve potansiyel heyelanların davranışlarının izlenmesinde en etkili araçlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Aktif heyelanlarda, yer değiştirme hızlarının zaman içerisinde artış göstermesi ve deformasyon zonlarının belirginleşmesi, stabilite kaybının ilerlediğine işaret etmektedir. Potansiyel heyelanlarda ise düşük hızlarda ancak süreklilik gösteren deformasyonlar, ileride meydana gelebilecek hareketlerin habercisi olarak değerlendirilmektedir (Fell et al., 2008). Heyelan izleme çalışmalarında, inklinometre verileri genellikle yüzey ölçümleri, yağış kayıtları ve yeraltısuyu seviye değişimleri ile birlikte analiz edilmektedir. Bu çok parametrelili yaklaşım, deformasyonların tetikleyici faktörlerle ilişkisini ortaya koyarak, risk değerlendirmesinin daha sağlıklı yapılmasına olanak tanımaktadır (Cornforth, 2005).



Şekil 7.1. Aktif ve potansiyel heyelanlarda inklinometre ölçümleri için yapılan çalışmalar.

### 7.3. Erken Uyarı Sistemleri ile Entegrasyon

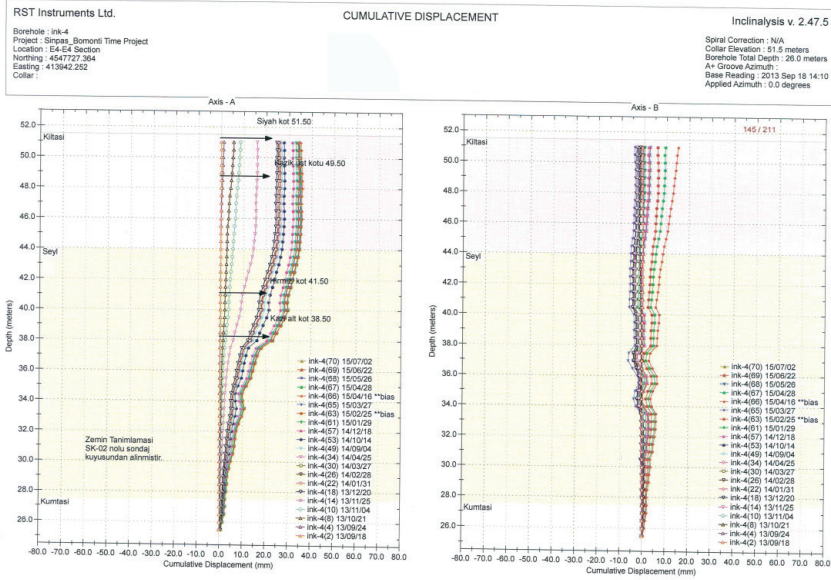
İnclinometre ölçümlerinin erken uyarı sistemleri ile entegre edilmesi, heyelan ve şev stabilitesi risklerinin yönetilmesinde önemli bir ilerleme sağlamaktadır. Otomatik veri toplama sistemleri ve gerçek zamanlı izleme teknolojileri sayesinde, deformasyon hızlarında meydana gelen ani değişimler hızlı biçimde tespit edilebilmekte ve önceden tanımlanmış eşik değerlerin aşılması durumunda uyarı mekanizmaları devreye sokulabilmektedir (Mikkelsen, 2003). Erken uyarı sistemlerinin etkinliği, uygun eşik değerlerin belirlenmesi ve ölçüm verilerinin doğru yorumlanmasına bağlıdır. Bu sistemler, özellikle yerleşim alanlarına yakın heyelan bölgelerinde ve kritik altyapı projelerinde, can ve mal kaybının azaltılmasına yönelik önemli bir mühendislik aracı olarak öne çıkmaktadır. İnclinometre verilerinin yağış, yeraltısuyu ve yüzey deformasyon ölçümleri ile entegre edilmesi, uyarı sistemlerinin güvenilirliğini daha da artırmaktadır (Dunncliff, 1993).

Sonuç olarak, kayma yüzeyinin belirlenmesi, aktif ve potansiyel heyelanların izlenmesi ve erken uyarı sistemleri ile entegrasyon; inclinometre ölçümlerinin uygulamaya dönük en kritik kullanım alanlarını oluşturmaktadır. Bu bütüncül yaklaşım, mühendislik jeolojisi ve jeoteknik tasarım süreçlerinde risklerin azaltılmasına ve sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır.

## 8. ÖLÇÜM VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

### 8.1. Kümülatif Yer Değiştirme Profilleri

Kümülatif yer değiştirme profilleri, inclinometre ölçümlerinden elde edilen ardışık yer değiştirme verilerinin referans (sıfır) ölçüme göre biriktirilmesiyle oluşturulmakta ve deformasyonun toplam etkisini derinlik boyunca ortaya koymaktadır. Bu profiller, zemin veya kaya kütlelerinde zaman içerisinde biriken deformasyonların konumunu ve büyüklüğünü görsel olarak sunarak, potansiyel stabilite problemlerinin belirlenmesinde temel bir analiz aracı olarak kullanılmaktadır (Dunncliff, 1993). Kümülatif profillerin yorumlanmasında, yer değiştirme değerlerinde belirli derinliklerde gözlenen ani artışlar, aktif kayma yüzeylerinin varlığına işaret ederken; yüzeye doğru düzenli ve kademeli artışlar, dönel kayma mekanizmalarının göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, deformasyonun yalnızca anlık durumunu değil, uzun vadeli davranışını da yansıtmaktadır (Cornforth, 2005).



**Şekil 8.1.** Derin temel kazısına ait iksa gerisi inklinometre referans ölçümlerine göre oluşturulmuş kümülatif yatay yer değiştirme–derinlik profili ve kayma yüzeyi göstergeleri.

Grafik değerlendirildiğinde söz konusu iksa kesitinde (E4-E4<sup>3</sup>) oluşan deplasmanın yapılan inklinometre ölçümüne göre kuyu üst kotundan 6m derinde meydana geldiği, yatay deplasmanın ise 30mm olduğu tespit edilmiştir.

## 8.2. Derinliğe Bağlı Deformasyon Analizi

Derinliğe bağlı deformasyon analizi, yer değiştirme değerlerinin belirli derinlik seviyelerinde nasıl yoğunlaştığının ve deformasyon zonlarının hangi seviyelerde geliştiğinin belirlenmesini amaçlamaktadır. Bu analiz, özellikle çok tabakalı zemin profillerinde veya süreksizlik kontrollü kaya kütlelerinde, farklı jeolojik birimlerin deformasyon davranışlarının karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır (Abramson et al., 2002). İnklinometre verilerinin derinlik boyunca türevlenmesiyle elde edilen deformasyon gradyanları, kesme deformasyonlarının yoğunlaştığı bölgelerin daha net biçimde tanımlanmasına katkı sağlamaktadır. Bu yöntem, kayma yüzeyinin kalınlığının ve deformasyon zonunun yayılımının belirlenmesinde destekleyici bir analiz yaklaşımı olarak kullanılmaktadır (Mikkelsen, 2003).

## 8.3. Zamana Bağlı Deformasyon Hızları

Zamana bağlı deformasyon hızı analizi, inklinometre ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme verilerinin zaman fonksiyonu olarak değerlendirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Deformasyon hızındaki artışlar veya ani ivmelenme-

ler, stabilite kaybının yaklaşmakta olduğuna işaret edebileceğinden, bu analiz erken uyarı sistemlerinin temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Fell et al., 2008). Deformasyon hızlarının değerlendirilmesinde, belirli derinlik seviyelerinde zamana karşı yer değiştirme eğrileri oluşturulmakta ve bu eğrilerin eğimleri incelenmektedir. Sürekli artan hızlar progresif kayma davranışını yansıtırken; hızın zamana bağlı olarak azalması, destek sistemlerinin veya drenaj önlemlerinin etkinliğini göstermektedir (Peck, 1969).

#### **8.4. Kayma Mekanizmasının Yorumlanması**

Kümülatif yer değiştirme profilleri, derinliğe bağlı deformasyon dağılımları ve zamana bağlı hız analizlerinin birlikte değerlendirilmesi, kayma mekanizmasının doğru ve bütüncül biçimde yorumlanmasını mümkün kılmaktadır. Bu kapsamda, translasyonel kaymalar genellikle dar ve belirgin bir deformasyon zonu ile karakterize edilirken; rotasyonel kaymalarda deformasyon daha geniş bir derinlik aralığına yayılmakta ve yüzeye doğru artan bir yer değiştirme profili sergilemektedir (Abramson et al., 2002). Kayma mekanizmasının yorumlanması, yalnızca mevcut durumun değerlendirilmesiyle sınırlı kalmayıp, gelecekteki davranışların öngörülmesine de olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda, inklinometre verilerinin jeolojik, hidrojeolojik ve mühendislik verileriyle birlikte yorumlanması, tasarım ve iyileştirme kararlarının güvenilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Dunncliff, 1993). Sonuç olarak, inklinometre verilerinin çok boyutlu analizi; kümülatif yer değiştirme profilleri, derinliğe ve zamana bağlı değerlendirmeler aracılığıyla, şev stabilitesi ve heyelan mekanizmalarının doğru biçimde anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. Bu bütüncül analiz yaklaşımı, jeoteknik tasarım süreçlerinde daha güvenli ve rasyonel kararların alınmasına önemli katkılar sunmaktadır.

### **9. TARTIŞMA**

#### **9.1. İnklinometre Ölçümlerinin Avantajları ve Sınırlamaları**

İnklinometre ölçüm sistemleri, zemin ve kaya kütlelerinde meydana gelen yatay deformasyonların derinliğe bağlı olarak izlenmesine olanak sağlaması nedeniyle jeoteknik mühendisliği ve mühendislik jeolojisi uygulamalarında yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu sistemlerin en önemli avantajı, deformasyonun yalnızca yüzeyde değil, derinlik boyunca hangi seviyelerde yoğunlaştığının doğrudan belirlenebilmesidir. Bu özellik, özellikle kayma yüzeylerinin tanımlanması, derin kazıların performansının izlenmesi ve heyelan mekanizmalarının yorumlanması açısından kritik bir üstünlük sağlamaktadır (Dunncliff, 1993).

İnklinometre ölçümlerinin bir diğer önemli avantajı, zamana bağlı deformasyon davranışlarının izlenmesine olanak tanımasıdır. Ardışık ölçümler sayesinde deformasyon hızları hesaplanabilmekte, progresif kayma davranışları erken aşamada tespit edilebilmekte ve bu veriler erken uyarı sistemlerine

entegre edilebilmektedir (Fell et al., 2008). Ayrıca, destek sistemlerinin etkinliği ve kazı aşamalarının zemine etkisi nicel olarak değerlendirilebilmektedir. Bununla birlikte, inklinometre sistemlerinin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Ölçümler yalnızca borunun yerleştirildiği doğrultudaki deformasyonları yansıtmakta olup, üç boyutlu deformasyon alanının tamamını tek başına temsil edememektedir. Ayrıca, büyük deformasyonların geliştiği durumlarda inklinometre borularında kırılma veya kilitlenme meydana gelebilmekte ve bu durum ölçümlerin sürekliliğini sınırlayabilmektedir (Mikkelsen, 2003).

## 9.2. Saha Koşullarının Ölçüm Güvenirliğine Etkisi

İnklinometre ölçümlerinin doğruluğu ve güvenilirliği, büyük ölçüde saha koşullarına ve kurulum kalitesine bağlıdır. Zemin veya kaya kütesinin litolojik özellikleri, süreksizlik yapısı, yeraltısuyu koşulları ve çevresel etkiler, ölçüm sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Özellikle gevşek, yüksek plastisiteli veya suya doygun zeminlerde, kuyu stabilitesinin sağlanamaması ölçüm hassasiyetini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Cornforth, 2005). Kuyu açımı sırasında oluşan eksen kaçıklıkları, boru yerleştirme hataları ve enjeksiyon kalitesindeki yetersizlikler, inklinometre borusunun çevre zeminle birlikte hareket etmemesine neden olabilmektedir. Bu durum, ölçülen yer değiştirmelerin gerçek deformasyon davranışını tam olarak yansıtmamasına yol açmaktadır. Özellikle enjeksiyon malzemesinin zemin özelliklerine uygun seçilmemesi, boru ile zemin arasındaki aderansı azaltarak ölçüm güvenilirliğini düşürmektedir (Dunncliff, 1993). Saha koşullarının etkisi yalnızca kurulum aşamasıyla sınırlı olmayıp, uzun süreli izleme sürecinde de önemini korumaktadır. Yeraltısuyu seviyesindeki değişimler, sıcaklık farkları ve çevresel titreşimler, ölçüm verilerinde gürültüye neden olabilmektedir. Bu nedenle, ölçüm sonuçlarının yorumlanmasında saha koşullarının sürekli olarak izlenmesi ve verilerin jeolojik-hidrojeolojik bilgilerle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Abramson et al., 2002).

Sonuç olarak, inklinometre ölçümlerinin sağlıklı ve güvenilir sonuçlar verebilmesi; uygun saha seçimi, doğru kurulum teknikleri ve saha koşullarının etkilerinin bilinçli biçimde değerlendirilmesine bağlıdır. Bu hususların göz önünde bulundurulması, ölçüm verilerinin mühendislik karar süreçlerinde etkin ve güvenilir biçimde kullanılmasını sağlamaktadır.

## 10. KAYNAKÇA

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2002). *Slope stability and stabilization methods* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Clough, G. W., & O'Rourke, T. D. (1990). Construction-induced movements of in situ walls. In *Proceedings of the Design and Performance of Earth Retaining Structures* (pp. 439–470). ASCE.
- Cornforth, D. H. (2005). *Landslides in practice: Investigation, analysis, and remedial/preventive options in soils*. John Wiley & Sons.
- Dunnicliff, J. (1993). *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. John Wiley & Sons.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*, 102(3–4), 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>
- Keskin, V. (2019). Derin temel kazılarında şev duraylılığının aletsel ölçümü ve ölçüm verilerinin değerlendirilmesi (Yüksek lisans tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Türkiye.
- Mair, R. J., & Taylor, R. N. (1997). Theme lecture: Bored tunnelling in the urban environment. In *Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 2353–2385). Balkema.
- Mikkelsen, P. E. (2003). Advances in inclinometer data analysis. *Geotechnical News*, 21(4), 38–42.
- Mikkelsen, P. E. (2003). Advances in inclinometer data analysis. In *Proceedings of the 6th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics* (pp. 555–567).
- Peck, R. B. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Géotechnique*, 19(2), 171–187. <https://doi.org/10.1680/geot.1969.19.2.171>



# İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANILAN HAVA FİLTRELERİNİN ÖZELLİKLERİ, FİLTRASYON VE MOTORDAKİ ETKİLERİ

“ ”

*Dinçer AKAL<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne  
dincerakal@trakya.edu.tr  
ORCID: 0000-0003-0055-5471

## Giriş

İçten yanmalı motorlarda emme sisteminin temel görevi, yanma sürecinin kararlı ve verimli bir şekilde gerçekleşebilmesi için gerekli olan havayı uygun termodinamik koşullar altında motor silindirlerine iletmektir. Yanma odasına gönderilen havanın basınç, sıcaklık ve yoğunluk gibi özelliklerinin uygun aralıklarda olması, yanma veriminin ve motor performansının doğrudan belirleyicilerinden biridir. Bu nedenle emme sistemi, motorun genel çalışma karakteristiğini etkileyen en önemli alt sistemlerden biri olarak kabul edilmektedir [1–5].

Bir içten yanmalı motorun 1 kg yakıtı tam olarak yakabilmesi için yaklaşık 14,5 kg havaya ihtiyaç duyduğu bilinmektedir. Bu oran, özellikle stoikiyometrik yanma koşullarının sağlanması açısından kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Motorun çalışma koşullarına ve motor hacmine bağlı olarak emilen hava miktarı önemli ölçüde değişiklik gösterebilir. Nominal çalışma koşullarında tipik bir binek otomobil motoru saatte yaklaşık 150–400 m<sup>3</sup> hava tüketmektedir. Buna karşılık daha büyük hacimli ve yüksek güç gereksinimine sahip kamyon motorlarında bu değer 900–2000 m<sup>3</sup>/saat aralığına kadar çıkabilmektedir. Bu nedenle emme sisteminin tasarımı, motorun ihtiyaç duyduğu hava miktarının güvenilir ve sürekli bir şekilde sağlanabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Yanma sürecine yeterli miktarda hava sağlanması, yalnızca motor gücünün artırılması açısından değil aynı zamanda yanma veriminin iyileştirilmesi ve zararlı egzoz emisyonlarının azaltılması açısından da önemli bir rol oynamaktadır. Motorların çalışması sırasında emilen hava yalnızca oksijen içermekle kalmaz, aynı zamanda çevresel koşullara bağlı olarak farklı türde gaz ve katı kirleticileri de içerebilir. Bu kirleticiler arasında özellikle mekanik aşınmaya neden olan mineral toz partikülleri büyük önem taşımaktadır. Araçların hareketi sırasında tekerleklerin yol yüzeyi ile etkileşimi veya rüzgâr etkisi sonucunda yer yüzeyinde bulunan toz parçacıkları havaya karışarak birkaç metre yüksekliğe kadar taşınabilmektedir. Daha sonra bu partiküller motorun emme sistemi tarafından çekilen hava ile birlikte motor içerisine girebilmektedir [6].

Atmosferde bulunan mineral tozunun bileşimi incelendiğinde, bu partiküllerin önemli bir kısmının yüksek sertliğe sahip mineral bileşiklerden oluştuğu görülmektedir. Özellikle silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) ve alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) gibi bileşikler mineral tozunun en önemli bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu partiküller keskin kenarlı yapıları ve yüksek sertlikleri nedeniyle mekanik sistemler üzerinde oldukça aşındırıcı etkilere sahiptir. Zeminin mineralojik yapısına ve atmosferik koşullara bağlı olarak bu bileşenler toplam toz kütesinin yaklaşık %65 ile %95'ini oluşturabilmektedir [7]. Bu durum, motor emme havasının yeterli düzeyde filtrelenmemesi halinde motor bileşenlerinde ciddi aşınma problemlerinin ortaya çıkabileceğini göstermektedir. Emme havası ile birlikte taşınan mineral toz parçacıkları motor

silindirlerine kadar ulaşarak piston tepesine ve silindir gömleği yüzeylerine yerleşebilmektedir. Bu parçacıklar motor yağı ile karışarak aşındırıcı özellikte bir karışım oluşturur. Oluşan bu karışım piston, piston segmanı ve silindir yüzeyleri arasındaki temas bölgelerinde aşındırıcı aşınmaya neden olmaktadır. Bu durum özellikle piston-segman-silindir temas çiftinde önemli hasarlara yol açabilmektedir. Bu bölgelerde meydana gelen aşırı aşınma, piston tepesindeki sızdırmazlık özelliklerinin zayıflamasına ve sıkıştırma strokunun sonunda silindir içerisindeki basıncın düşmesine neden olur. Bunun sonucunda motorun sıkıştırma oranı azalmakta ve motorun üretebildiği güç değerinde düşüş meydana gelmektedir. Buna ek olarak sıcak yanma gazlarının piston segmanlarından sızarak karter bölgesine geçmesi de artmaktadır. Bu durum piston-segman-silindir sisteminin ve motor yağının sıcaklığında artışa neden olur. Artan sıcaklık koşulları ise yağın viskozitesini düşürerek yağlama performansının azalmasına yol açmaktadır. Yağlama özelliklerinin zayıflaması ise silindir gömleği ve piston segmanlarında meydana gelen aşınmanın daha da hızlanmasına neden olmaktadır [8].

Aşındırıcı aşınma açısından en kritik durum, toz partikülünün çapının iki yüzey arasındaki minimum yağ filmi kalınlığına eşit veya buna yakın olduğu koşullarda ortaya çıkmaktadır. Bu durumda partiküller iki yüzey arasındaki yağ filmi tarafından taşınamaz ve doğrudan yüzeylerle temas ederek aşındırıcı etki oluşturur. Tipik içten yanmalı motor temas bölgelerinde minimum yağ filmi kalınlığı genellikle 50 µm değerini aşmamaktadır [8,9]. Bu nedenle belirli boyut aralığındaki partiküller motor bileşenleri açısından oldukça tehlikeli kabul edilmektedir.

Yeni nesil motor tasarımlarında aşınmayı azaltmak amacıyla piston segmanlarının yüzeylerinde çeşitli koruyucu kaplamalar kullanılmaktadır. Elmas benzeri karbon kaplamalar ve titanyum esaslı kompozit kaplamalar bu amaçla yaygın olarak kullanılan yüzey kaplama teknolojileri arasında yer almaktadır [9,10].

Motor bileşenlerinde meydana gelebilecek bu tür aşınma problemlerini önlemek amacıyla emme sisteminde hava filtreleri kullanılmaktadır. Hava filtrelerinin temel görevi, motora giren havanın mekanik kirleticilerden arındırılmasını sağlayarak motor bileşenlerini korumaktır. Hava filtreleri çalışma prensipleri, yapısal özellikleri, filtrasyon ortamı türleri ve filtrasyon verimlilikleri açısından farklı tasarımlara sahip olabilir. Düşük toz konsantrasyonuna sahip ortamlarda çalışan binek otomobillerde genellikle tek kademeli hava filtreleri tercih edilmektedir. Bu filtrelerde kullanılan filtre elemanı çoğunlukla pileli filtre kâğıdından veya dokunmamış filtre kumaşından üretilmiş kartuş ya da panel tipinde bir yapıya sahiptir [11-13].

Buna karşılık yüksek toz yoğunluğuna sahip ortamlarda çalışan kamyonlar, iş makineleri ve askeri araçlarda daha gelişmiş filtrasyon sistemleri

kullanılmaktadır. Bu tür araçlarda genellikle iki kademeli hava filtrasyon sistemleri tercih edilmektedir. İlk aşamada çoklu siklon prensibine dayalı bir ön ayırma mekanizması kullanılarak daha büyük partiküller hava akımından uzaklaştırılmaktadır. İkinci aşamada ise genellikle pileli filtre kâğıdından üretilmiş silindirik bir filtre elemanı kullanılarak daha küçük boyutlu partiküllerin tutulması sağlanmaktadır. Bu tasarım, sınırlı hacim içerisinde daha geniş bir filtre yüzey alanı elde edilmesine olanak sağlamaktadır [14]. Hava emme sistemi yalnızca havanın filtrelenmesi görevini yerine getirmekle kalmaz, aynı zamanda motorun akustik ve aerodinamik performansına da katkıda bulunur. Emme sistemi tasarımında kullanılan çeşitli elemanlar hava akışından kaynaklanan gürültünün azaltılmasına yardımcı olmaktadır [15]. Ayrıca emme kanallarında meydana gelen basınç dalgalarının kontrol edilmesi sayesinde belirli motor hızlarında rezonans etkisi oluşturularak silindir dolun verimi artırılabilir. Dinamik veya rezonanslı süperşarj olarak adlandırılan bu etki, motorun belirli çalışma aralıklarında daha yüksek güç üretmesine olanak sağlamaktadır [16]. Hava emme sisteminde hava filtresine ek olarak çeşitli yardımcı bileşenler de bulunmaktadır. Bunlar arasında hava akış ölçer, turboşarj, şarj havası soğutucusu, hava damperi, emme manifoldu, silindir kapağındaki emme kanalları ve emme valfleri yer almaktadır. Hava filtresinin çıkışında yer alan hava akış ölçer sensörü, motora giren havanın kütsel debisini sürekli olarak ölçerek bu bilgiyi motor kontrol ünitesine (ECU) iletmektedir. ECU bu verileri kullanarak yakıt enjeksiyon miktarını ve motorun çalışma parametrelerini optimize etmektedir. Dizel motorlarda yaygın olarak kullanılan turboşarj sistemleri, emme havasının basıncını artırarak silindirlere giren hava kütselinin artırılmasını sağlar. Böylece motorun özgül gücü ve verimi artırılabilir. Şarj havası soğutucuları ise sıkıştırılan havanın sıcaklığını düşürerek yoğunluğunu artırmakta ve motor silindirlerine daha fazla hava kütselinin girmesine olanak sağlamaktadır. Kamyonlar ve özel amaçlı araçlarda hava filtresinin akış direncini izlemek amacıyla filtre çıkış kanalına yerleştirilen basınç sensörleri kullanılmaktadır. Ayrıca karter havalandırma sistemi ve egzoz gazı devridaim sistemi (EGR) de hava emme sistemi ile doğrudan etkileşim içerisinde. Filtrasyon sürecinin etkinliği yalnızca filtre yapısına bağlı değildir; aynı zamanda ortamda bulunan kirleticilerin fiziksel ve kimyasal özellikleri de önemli rol oynamaktadır. Özellikle motor egzoz emisyonlarından kaynaklanan kurum partikülleri lifli filtre yüzeyinde kısa sürede yoğun ve yağlı bir tabaka oluşturabilir. Bu tabaka filtre yüzeyinin geçirgenliğini azaltarak basınç kaybının daha hızlı artmasına neden olur ve izin verilen maksimum basınç düşüşü değerine daha kısa sürede ulaşılmasına yol açar [17]. Filtre ortamında partiküllerin zamanla birikmesi sonucunda filtrasyon yatağında meydana gelen basınç düşüşü kademeli olarak artmaktadır. Filtre malzemesinin toz tutma kapasitesi tamamen dolduğunda ise basınç kaybında ani bir yükselme meydana gelmektedir. Filtre boyunca oluşan bu basınç kaybı değeri filtrenin akışa karşı gösterdiği

geçirgenlik direnci olarak tanımlanmaktadır. Filtre ortamında biriken toz miktarının artmasıyla birlikte hava akımına karşı oluşan direnç de artmakta ve bu durum sistemden geçen hava debisinin azalmasına neden olmaktadır. Artan filtre direnci koşullarında çalışan bir motor, silindir dolmuş veriminin azalması nedeniyle daha düşük tork üretir ve maksimum motor gücünde düşüş meydana gelir. Bunun sonucunda aracın ivmelenme kabiliyeti ve genel dinamik performansı olumsuz yönde etkilenmektedir. Ayrıca filtre arkasında oluşan yüksek negatif basınç, filtre yüzeyinde tutulan partikülleri yerinde tutan adezyon kuvvetlerini aşarak partiküllerin yeniden hava akımına karışmasına neden olabilir. Literatürde ikincil emisyon olarak adlandırılan bu durum, toz parçacıklarının tekrar motor silindirlerine taşınmasına ve piston-segman-silindir sisteminde aşınma hızının artmasına yol açmaktadır.

## 2.Hava Filtrelerinin Özellikleri

İçten yanmalı motorların verimli bir şekilde çalışabilmesi ve yüksek düzeyde güç ile tork üretebilmesi, silindir içerisine yeterli miktarda ve uygun nitelikte havanın iletilmesine bağlıdır. Bu nedenle emme sistemi aracılığıyla motora giren havanın; toz, kurum, polen, su damlacıkları ve benzeri yabancı partiküllerden arındırılmış olması büyük önem taşımaktadır. Aksi takdirde söz konusu partiküller motor bileşenleri üzerinde aşındırıcı etkilere yol açabilmekte ve zaman içerisinde motor performansında belirgin düşüşlere neden olabilmektedir. Diğer yandan hava temizleme işlemi gerçekleştirilirken emme hattında meydana gelen basınç kayıplarının mümkün olduğunca düşük seviyelerde tutulması, motorun genel verimliliği açısından kritik bir tasarım parametresidir. Bu bağlamda hava filtresi tasarımında hem yüksek filtrasyon etkinliği sağlanmalı hem de akışa karşı oluşan direnç en düşük seviyede tutulmalıdır. Günümüzde hava filtrelerinin üretiminde çoğunlukla selüloz kökenli liflerden elde edilen ve fenolik, epoksi ya da akrilik reçinelerle emprenye edilerek dayanımı artırılan filtre kâğıtları kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, dokuma işlemine tabi tutulmadan üretilen ve tamamen sentetik yapıdaki malzemelerden oluşan, yüksek filtrasyon performansı sunabilen yeni nesil filtre ortamları da geliştirilmiş olup çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaya başlanmıştır[18].

Otomotiv sektöründe kullanılan içten yanmalı motorların hava temizleme sistemlerinde çoğunlukla selüloz kökenli lifli filtre malzemeleri tercih edilmektedir. Bu tür filtrelerin temel amacı, emme havasında bulunabilecek zararlı katı partiküllerin motor içerisine ulaşmasını engelleyerek motorun hassas iç bileşenlerini korumaktır. Hava filtresi tasarımında dikkate alınması gereken en önemli parametrelerden biri, filtrasyon süreci sırasında emme hattında meydana gelen basınç kayıplarının mümkün olan en düşük seviyede tutulmasıdır. Motora iletilmesi gereken hava debisi ise motorun toplam silindir hacmi, çalışma devri ve volumetrik verim gibi çeşitli işletme parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu nedenle hava filtresi sistemlerinin

tasarım ve boyutlandırma aşamalarında; düşük basınç kaybı, yüksek partikül tutma verimliliği, emme hattında oluşabilecek gürültünün azaltılması, geri tepme durumlarında meydana gelebilecek yangın riskine karşı güvenli çalışma ve bakım işlemlerinin kolaylıkla gerçekleştirilebilmesi gibi kriterlerin dikkate alınması gerekmektedir. Özellikle ağır hizmet tipi araçlarda motorun yalnızca bir litre yakıtı yakabilmesi için oldukça büyük miktarlarda havaya ihtiyaç duyulduğu bilinmektedir. Yapılan hesaplamalar, bu miktarın yaklaşık olarak 12.000 ile 20.000 litre arasında değiştiğini göstermektedir. Bu kadar yüksek hacimde havanın emme sistemi aracılığıyla motora alınması sırasında havada bulunan toz partikülleri motor için ciddi bir risk oluşturmaktadır [18]. Motor silindirlerine iletilen havada bulunan toz ve diğer katı kirleticilerin uzaklaştırılması, motor parçalarında meydana gelebilecek aşınmayı azaltmak ve motorun kullanım ömrünü uzatmak açısından büyük önem taşımaktadır. Filtrasyonun yeterli düzeyde sağlanmadığı durumlarda ise çok küçük miktarlardaki partiküller dahi motor bileşenlerinde önemli hasarlara yol açabilmektedir. Yapılan araştırmalar, bir dizel motorun ciddi şekilde zarar görmesi ya da işlevini yerine getiremez hale gelmesi için yaklaşık 1 gram silisyum içeren tozun bile yeterli olabileceğini ortaya koymaktadır [18]. Atmosferde bulunan toz partiküllerinin boyut dağılımları ve ortam içerisindeki konsantrasyon değerleri Şekil 1’de gösterilmektedir. Araçların kullanım koşulları ve çalışma ortamı göz önünde bulundurularak hava filtrelerinin belirli aralıklarla kontrol edilmesi, temizlenmesi ve gerekli durumlarda yenileriyle değiştirilmesi gerekmektedir. Bu bakım işlemlerinin düzenli olarak gerçekleştirilmesi, motor performansının korunması ve sistemin uzun süre güvenilir şekilde çalışabilmesi açısından oldukça önemlidir. Hava filtresinde meydana gelen kısıtlama değeri, atmosfer basıncı ile filtrasyon sisteminin çıkış noktasında ölçülen statik basınç arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Başka bir ifadeyle bu değer, akışkanın filtre elemanı içerisinde geçerken karşılaştığı direnç seviyesini ifade etmektedir. Filtre ortamında oluşan basınç farkının artması, akışkanın filtre yapısından geçişini zorlaştıran bir durum ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle filtredeki kısıtlama arttıkça, akışkanın sistem içerisinde ilerleyebilmesi için gerekli olan itici kuvvet de yükselmekte ve akışın gerçekleşmesi daha güç hale gelmektedir. Bu sebeple filtrasyon sistemlerinin tasarımında, yeterli süzme etkinliği sağlanırken aynı zamanda akış direncinin mümkün olduğunca düşük seviyelerde tutulması hedeflenmektedir. Havadaki toz partiküllerinin boyutları ve konsantrasyon değerleri tablo 1’de verilmiştir. Araçların çalışma ve kullanım koşulları göz önünde bulundurularak, hava filtrelerinin düzenli olarak temizlenmesi ve gerekli durumlarda yenileriyle değiştirilmesi önem taşımaktadır. Havadaki toz partiküllerinin boyutları ve yoğunlukları tablo 1 de görülmektedir[19].

Tablo1. Havadaki toz partiküllerinin boyutları ve yoğunlukları

Parçacık Boyutu (Mikron Cinsinden)	Ağırlık % *	
	İyi (Yolda)	Kaba (Yol Dışı)
0 – 5 $\mu$	%39	%12
5 – 10 $\mu$	%18	%12
10 – 20 $\mu$	%16	%14
20 – 40 $\mu$	%18	%23
40 – 80 $\mu$	%9	%30
80 – 200 $\mu$	%0	%9
*Ağırlık Yüzdesi Her Partikülde $\pm$ %2 – 3 Arasında Değişebilir.		

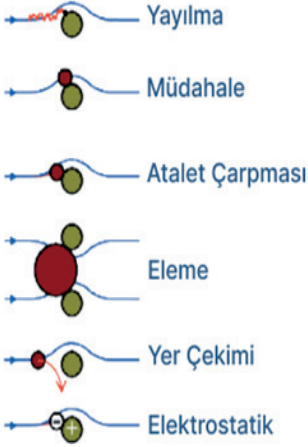
### 3.1. Filtrasyon Yöntemleri ve Partikül Tutma

Filtrasyon, bir akışkanın bünyesinde bulunan istenmeyen veya zararlı bileşenlerin uzaklaştırılması amacıyla gerçekleştirilen ayırma süreci olarak tanımlanmaktadır. Bu süreçte kullanılan farklı filtrasyon mekanizmaları, partiküllerin boyutları ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak kirleticilerin etkin biçimde tutulmasını mümkün kılmaktadır. Özellikle otomotiv ve endüstriyel sistemlerde hava filtrasyonu, farklı kullanım amaçlarına göre sınıflandırılmış filtre elemanları aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu bağlamda motor hava filtreleri, panel tip hava filtreleri, kabin hava filtreleri ve ağır hizmet tipi hava filtreleri gibi çeşitli filtre türleri yaygın olarak tercih edilmektedir [19].

Her bir filtre tipi, kullanım alanının gereksinimleri ve ortamda bulunan partikül yoğunluğu dikkate alınarak optimize edilmiş tasarım özelliklerine sahiptir. Bu sayede filtreler, buldukları sistemin çalışma koşullarına uyum sağlayarak filtrasyon performansını artırmakta ve sistemin daha verimli ve güvenilir bir şekilde çalışmasına katkıda bulunmaktadır.

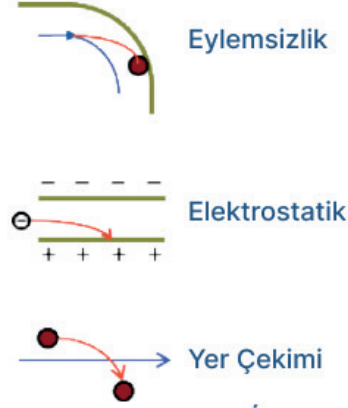
### Filtrasyon Mekanizmaları

#### Birincil



### Ayırma Mekanizmaları

#### Birincil



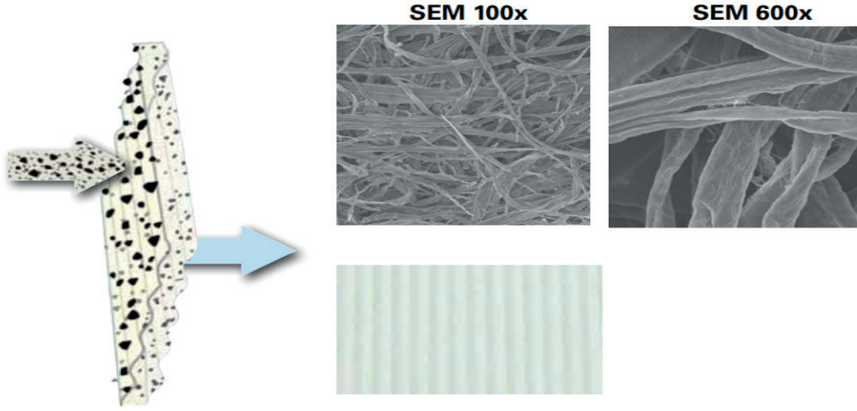
Şekil 3.1. Hava Temizleme ve Partikül Yakalama Mekanizmaları [19].

Filtrasyon süreci, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi, hava akımı içerisinde taşınan partiküllerin hareket davranışları ve dağılımları sonucunda ortaya çıkan farklı mekanizmaların etkisiyle gerçekleşmektedir. Bu mekanizmalardan biri, partiküllerin atalet kuvveti ve yer çekimi etkisiyle akıştan ayrılmasıdır. Özellikle belirli bir kütleyle sahip olan parçacıklar, yer çekimi etkisi altında hava akımından uzaklaşarak çökme eğilimi gösterir. Bu yöntem, yer çekimi kuvvetinin etkili olabileceği büyüklükteki partiküllerin ayrılmasında kullanılabilir. Bir diğer mekanizma ise eleme prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemde, filtre elemanının gözenek boyutları nedeniyle belirli bir büyüklüğün üzerindeki partiküllerin filtre ortamından geçmesi engellenir. Böylece daha büyük boyuttaki parçacıklar filtre yüzeyinde tutulur ve bu mekanizma sayesinde ön filtrasyon işlemi gerçekleştirilmiş olur. Elektrostatik filtrasyon yönteminde ise elektriksel yüklerin etkisinden yararlanılmaktadır. Pozitif yüklü partiküller, negatif yük taşıyan plakalar tarafından çekilerek hava akımından ayrılmaktadır. Bu yöntem sayesinde havada bulunan ince toz ve küçük partiküller, viskoz yapışkan bir tabaka ile kaplanmış plakalı yüzeyler üzerinde tutulabilmektedir[19]. Filtre performansının değerlendirilmesinde ise yakalanan partikül miktarının, filtre üzerinden geçen toplam kirli hava içerisindeki partikül sayısına oranı esas alınır ve bu oran filtre verimliliği olarak ifade edilir. Hava filtrelerinin performansı üzerinde lif çaplarının dağılımı ve kombinasyonu, gözenek boyutu, filtre ortamının yüzey ağırlığı ve yoğunluğu, üretim tekniği ile kullanılan malzemenin fiziksel ve

kimyasal özellikleri gibi birçok parametre belirleyici rol oynamaktadır. Endüstriyel uygulamalarda filtre performansının belirlenebilmesi amacıyla çeşitli test yöntemleri ve standartlar kullanılmakta, böylece filtrelerin gerçek çalışma koşullarındaki etkinliği güvenilir biçimde değerlendirilebilmektedir.

### 3.2. Geleneksel Selüloz Bazlı Filtre Teknolojileri

Motorların en uygun çalışma koşullarında performans gösterebilmesi, yanma sürecinin daha verimli gerçekleşmesi ve egzoz emisyonlarının azaltılması, silindirlere iletilen havanın yeterince temiz olmasına bağlıdır. Bu nedenle hava emme sistemi ve filtreleme elemanları, motorun temel performans parametreleri olan güç, tork ve yakıt tüketimi üzerinde doğrudan belirleyici bir etkiye sahiptir. Hava filtreleri, silindirlere ulaşmadan önce emme havasını kirleticilerden arındırarak motorun güvenli, kararlı ve verimli bir şekilde çalışmasına katkı sağlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, geleneksel üretim yöntemleriyle elde edilen kuru tip selüloz esaslı filtre malzemeleri yaygın olarak kullanılmaktadır[19]. Selüloz bazlı filtreler, partikülleri etkili bir şekilde tutarken aynı zamanda hava akışına karşı oluşabilecek direnci mümkün olduğunca düşük tutacak biçimde tasarlanmaktadır. Bu filtre yapısına ilişkin detaylar Şekil 3.2’de sunulmuştur. Geleneksel selüloz filtre teknolojisi, özellikle düşük maliyetli üretim imkânı ve uygulama kolaylığı gibi avantajları nedeniyle günümüzde de birçok otomotiv ve endüstriyel sistemde tercih edilmeye devam etmektedir.

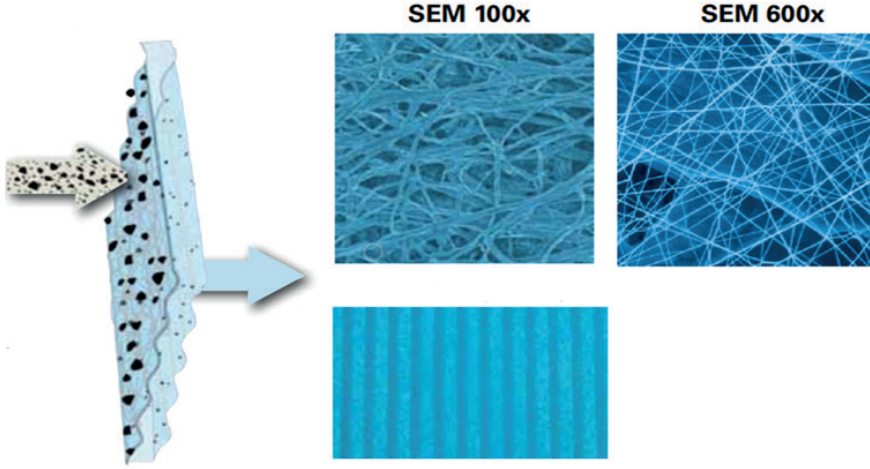


Şekil 3.2. Geleneksel Selüloz Malzemedan Oluşturulmuş Filtre Yapısı[19].

### 3.3. Gelişmiş Ultra Nanofiber Filtre Teknolojisi

Ultra nanofiber teknolojisi, temelde selüloz veya sentetik esaslı tabakaların yüzeyine çok ince çaplara sahip nano liflerin kaplanmasıyla elde edilen bir filtrasyon yapısını ifade etmektedir. Bu nano lif katmanı, filtrasyon yüze-

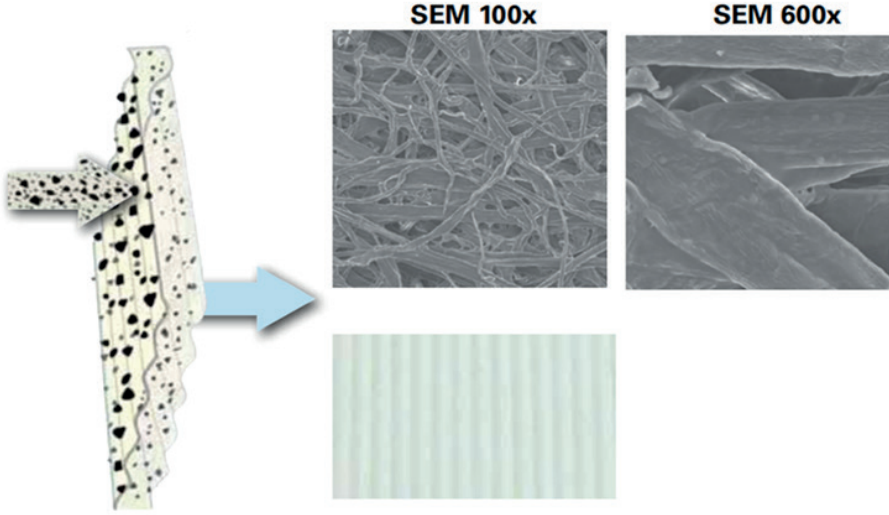
yine ilave bir tabaka oluşturarak partikül tutma kapasitesinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Nano lif uygulaması sayesinde, özellikle yüksek sıcaklık ve nem koşullarının hâkim olduğu ortamlarda, geleneksel selüloz bazlı hava filtrelerine kıyasla hem mekanik dayanım hem de filtrasyon performansı belirgin biçimde iyileştirilebilmektedir. Bu teknoloji, partiküllerin tutulma etkinliğini artırırken aynı zamanda hava akışına karşı oluşabilecek direncin düşük seviyelerde kalmasını sağlayacak şekilde tasarlanabilmektedir[19]. Ultra nanofiber filtre yapısına ait detaylar Şekil 3.3'te sunulmuştur. Böylece hem motor performansının korunması hem de filtre elemanının kullanım ömrünün uzatılması mümkün hale gelmektedir.



Şekil 3.3. Ultra Nanofiber Tabaka ile Güçlendirilmiş Filtre Yapısı[19].

### 3.4. Titreşime Dayanıklı Filtre Malzemeleri Teknolojisi

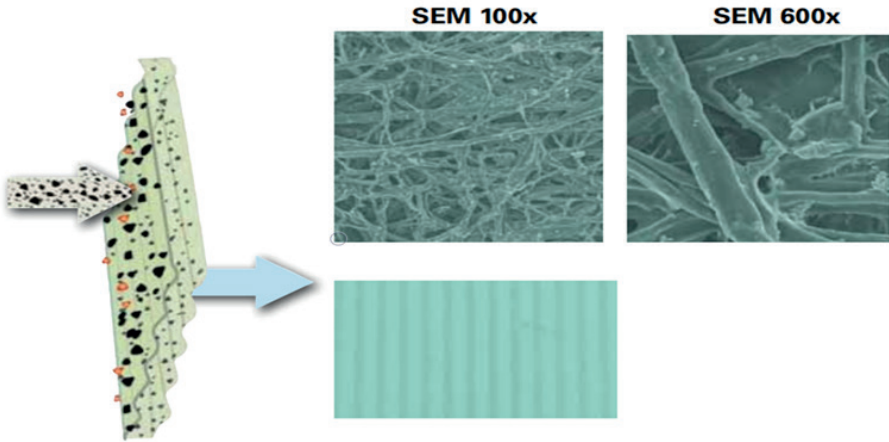
Titreşimli çalışma koşullarında üstün filtrasyon kapasitesi sunan ve diğer filtre elemanlarına kıyasla daha yüksek mekanik dayanım gösteren selüloz bazlı malzemelerdir. Bu tür filtre elemanları, özellikle titreşimin yoğun olduğu küçük motorlar ve hava kompresörleri gibi uygulamalarda tercih edilmektedir[19]. Yüksek titreşim dayanımına sahip selüloz filtre yapısının detayları Şekil 3.4'te sunulmuştur.



Şekil 3.4. Yüksek Titreşim Dayanımına Sahip Selüloz Filtre Yapısı[19].

### 3.5. Alev Geciktirici Filtre Malzemesi Teknolojisi

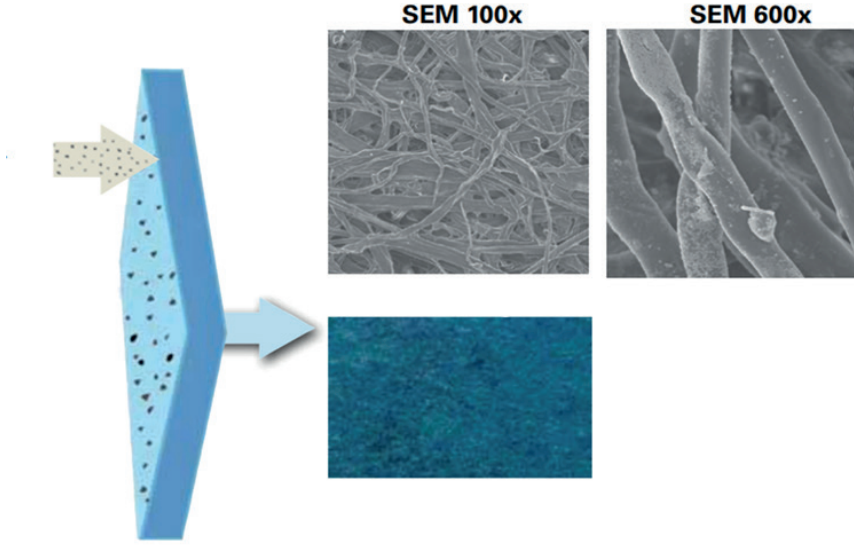
İçten yanmalı motorlarda, emme havasının geri tepmesinden kaynaklanabilecek kıvılcım veya alevlerin oluşturabileceği yangın riskini önlemek amacıyla geliştirilmiş özel selüloz bazlı malzemelerdir. Bu tür filtreler, özellikle endüstriyel ortamlar veya yangın güvenliğinin kritik olduğu uygulamalarda görev yapan motorlarda kullanılmaktadır[19]. Yangına karşı koruyucu özelliklere sahip hava filtre malzemesinin yapısı Şekil 3.5'te sunulmuştur.



Şekil 3.5. Alev Geciktirici Özelliklere Sahip Selüloz Filtre Yapısı[19].

### 3.6. Güvenlik Odaklı Filtre Malzemesi Teknolojisi

Yüksek hızlı hava akışına sahip, tek veya iki kademeli hava temizleyici sistemlerde emme hattını korumak amacıyla tasarlanmış özel filtre malzemeleridir. Bu filtre elemanları, yüksek hızlı hava emişi sırasında katı partiküllere karşı üstün dayanım gösteren malzemelerden üretilmektedir[19]. Güvenlik odaklı malzemelerle üretilmiş filtreler, özellikle ağır hizmet tipi araçlar için geliştirilmiştir. Bu tür hava filtre elemanının malzeme yapısı Şekil 3.6'da sunulmuştur.



Şekil 3.6. Güvenlik esashı filtre malzeme yapısı[19].

## 4.Hava Filtresinin İçten Yanmalı Motordaki Etkileri

Motor emme havasında bulunan partiküller ve kirleticiler, silindirlere ulaşmadan önce hareket hâlinde olduklarından, hava filtresi motor bileşenlerinin aşınmasını önleyecek şekilde, kirli havayı manifolda giriş yapmadan önce temizleyecek biçimde tasarlanmalıdır. Motor parçalarında oluşabilecek aşınma miktarını ve filtre tıkanıklığını etkileyen temel faktörlerden biri, partiküllerin boyutudur. Partikül boyutları aynı zamanda motordaki sürtünme kaynaklı aşınma süreçlerinin analiz edilmesinde de kritik öneme sahiptir[20].

### 4.1.Filtre Performansının Motor Çalışmasına Etkileri

Filtrede meydana gelen basınç kayıpları, filtre yüzeyinde biriken toz partiküllerinin miktarına (filtre tıkanıklığı) bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Filtredeki tıkanıklık arttıkça basınç düşüşü de yükselir ve bu durum motor çıkış gücünün azalmasına neden olur. Tıkanıklığın artması, silindirlerle iletilen hava miktarını azaltarak hava/yakıt karışımının silindir içerisinde homojen şekilde dağılmasını engeller. Sonuç olarak, silindirlerde gerçekleşen

yanma reaksiyonlarından elde edilen ısı ve enerji miktarı düşer.

Hava filtrelerinin temel görevi, motor parçalarında aşınmaya yol açabilecek kirleticileri havadan uzaklaştırmaktır. Günümüzde motor ve araç üreticileri, ürünlerini daha geniş kitlelere ulaştırmayı hedeflemekte ve bu nedenle motorların çalışacağı çevre koşullarını analiz etme gereği doğmaktadır. Ancak, çevre koşullarının ve uygulamaların gerçek şartlarda incelenmesi genellikle karmaşık, maliyetli ve zaman alıcı bir süreçtir. Filtrelerin toz tutma kapasitesinin yüksek olması, motor parçalarında aşınmanın azaltılması açısından kritik bir rol oynamaktadır [20]. Kirleticiler, motor içerisinde sürtünmeli çalışan yüzeyler arasında da bulunabilmektedir. Aşındırıcı özellik taşıyan kirleticiler, beraber çalışan yüzeylerde zamanla oluşan ve büyüyen mikro çatlaklar aracılığıyla yorulma kaynaklı aşınmalara neden olmaktadır. Erozyon kaynaklı aşınma, yüksek hızla hareket eden akışkanın yüzeye sahip olduğu kirleticilerle çarpması sonucunda meydana gelir. Partikül boyutlarının motor aşınması üzerindeki etkisi oldukça karmaşıktır. Motor çalışırken bazı partiküller daha küçük parçalara ayrılabilir. Yağ filminin inceliği nedeniyle küçük partiküller yüzeylere zarar vermeyebilir; ancak partiküllerin yoğun şekilde ezilmesi yağ filmini incelterek koyulaştırabilir ve koruyucu etkisini azaltabilir. Hangi boyuttaki partiküllerin aşındırma açısından en fazla zarara yol açtığı konusu tam olarak net değildir. Motor üzerindeki farklı parçalar farklı çalışma boşluklarına sahip olup, dinamik çalışma boşlukları genellikle 0–20 µm aralığında değişmektedir[20].

#### **4.2. Filtre Kirlenmesinin Motor Gücü ve Yakıt Tüketimi Üzerindeki Etkileri**

Hava içerisindeki kirleticiler, filtre tarafından tutuldukça hava akışı kısıtlanır ve bunun sonucunda hava akışına karşı direnç artar. Bu durum motor çıkış gücünün düşmesine ve özgül yakıt tüketiminin yükselmesine yol açar. Egzoz borusunda gözlemlenen siyah duman, genellikle artan yakıt tüketiminin ve yanma verimliliğinin düşüşünün bir göstergesi olarak değerlendirilir[20].

#### **4.3. Filtre Tıkanıklığının Motor Performansı ve Yakıt Tüketimi Üzerindeki Etkileri**

Hava içerisindeki kirleticiler filtre tarafından tutuldukça, hava akışı sınırlanır ve bu durum hava akış direncinin artmasına sebep olur. Sonuç olarak motorun çıkış gücü azalırken, özgül yakıt tüketimi yükselir. Egzoz borusunda meydana gelen siyah duman ise, genellikle artan yakıt tüketimi ve yanma verimindeki düşüşün bir göstergesi olarak kabul edilmektedir[20].

#### **4.4. Filtrenin Motor Parçalarında Aşınmaya Etkisi**

Hava filtrelerinin kullanımı, motor parçalarını hava akışındaki yabancı maddeler ve kirleticilerden korumak açısından kritik öneme sahiptir. Oto-

mobil motorlarının hava filtresi tasarımında, genellikle maksimum hava akışı dikkate alınmaktadır. Emme havasındaki partiküller ve kirleticiler silindirlere ulaşmadan önce hareket hâlinde olduklarından, filtre motor parçalarının aşınmasını önleyecek şekilde, kirli havayı manifolda giriş yapmadan temizleyecek biçimde tasarlanmalıdır[20] . Motor parçalarında meydana gelen aşınma miktarını etkileyen en önemli faktörlerden biri ise toz partiküllerinin boyutudur. Toz partiküllerinin neden olduğu aşınma tamamen engellenememektedir; ancak hava filtresi kullanımı, motor parçalarındaki aşınma miktarını önemli ölçüde azaltabilmektedir. İçten yanmalı motorlarda kullanılan filtrelerin gözenek boyutları genellikle 0,1 mikrona kadar ince değildir. Bu nedenle, 5 mikrondan küçük partiküllerin yoğunluğu yüksek olduğunda, aşınma oranı da artmaktadır.

Motor parçalarının aşınmasıyla ilgili yapılan bir araştırmada, kağıt elemanlı filtreye sahip motor ile filtersiz motor karşılaştırılmıştır. Araştırma sonuçları, filtersiz motorun aşınma seviyesinin, filtreli motorla kıyaslandığında yaklaşık 1,8–2 kat daha fazla olduğunu göstermektedir[20] .

### 5.Sonuç

Hava içinde farklı boyutlarda bulunan kirleticiler, motorun hareketli parçaları arasında aşınmalara yol açmaktadır. Bu aşınmaların en yoğun olduğu bölgeler genellikle piston, segman ve silindir arasındaki temas alanlarıdır. Emme manifoldunun girişine yerleştirilen hava filtresi, kirleticileri tutarken aynı zamanda hava akışına da bir direnç uygular. Bu direnç, silindirlere giren hava miktarını azaltarak volümetrik verimi düşürür. Dolayısıyla silindire ulaşan hava miktarındaki azalma, motor çıkış gücünde önem seviyede düşüşe ve egzoz emisyonlarının artması ile çevre kirliliğine sebep olmaktadır[20]. Motorlarda meydana gelen maksimum aşınmayı oluşturan en büyük partikül boyutunun 1–15 mikron aralığında olduğu tespit edilmiştir. Yapılan araştırmalarda, motor parçalarında en yoğun aşınmanın 21 mikron çapındaki partiküller nedeniyle gerçekleştiği ve daha büyük veya daha küçük partikül boyutlarında aşınmanın kademeli olarak azaldığı belirtilmiştir.Toz partiküllerinin neden olduğu bu aşınmalar tamamen ortadan kaldırılamasa da, hava filtresi kullanımıyla aşınma miktarı önemli ölçüde azaltılabilmektedir[20] .

Sonuç olarak literatürdeki bulgulara göre, hava filtresindeki tıkanıklık arttıkça silindirlere iletilen hava miktarı azalmakta; bunun sonucunda manifold basıncı, turbo kompresör çıkış basıncı ve volümetrik verim değerlerinde belirgin düşüşler gözlemlenmektedir [20].Hava filtrelerinin kirlenme oranı ve süresi, aracın çalıştığı ortamın koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Kirlenmenin yol açtığı olumsuz etkilerin azaltılmasında hava filtresinin ve hava kalitesinin düzenli izlenmesi, bu olumsuz etkilerin erken tespitinin büyük önem taşıdığı anlaşılmaktadır.

**KAYNAKLAR**

- [1]- Dziubak, T., & Karczewski, M. (2022). Experimental study of the effect of air filter pressure drop on internal combustion engine performance. *Energies*, 15, 3285.
- [2]- Yun, J. E. (2021). Optimal Design of Off-Road Utility Terrain Vehicle Air Filter Intake. *Energies*, 14, 2269.
- [3]- Mustafa, N. S., Ngadiman, N. H. A., Abas, M. A., & Noordin, M. Y. (2020). Application of box-behnken analysis on the optimisation of air intake system for a naturally aspirated engine. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 17(2), 8029-8042.
- [4]- Szczepankowski, A., Szymczak, J., & Przysowa, R. (2017, May). The effect of a dusty environment upon performance and operating parameters of aircraft gas turbine engines. In *Proceedings of the Specialists' Meeting—Impact of Volcanic Ash Clouds on Military Operations NATO AVT-272-RSM-047*, Vilnius, Lithuania (Vol. 17).
- [5]- Tang, R. J., Hu, B. F., Zhang, M., & Lu, Z. J. (2019). Study on separation characteristics of dust and droplet on air intake pre-filtration systems of CV based on CFD simulation and test. In *International Conference on Artificial Intelligence and Computing Science (ICAICS 2019)*.
- [6]- Huertas Cardozo, J. I., & Prato Sánchez, D. F. (2019). An experimental and numerical study of air pollution near unpaved roads. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 12, 471-489.
- [7]- Bojdo, N., & Filippone, A. (2014). Effect of desert particulate composition on helicopter engine degradation rate. In *Proceedings of the 40th European Rotorcraft Forum*, Southampton, UK (2-5).
- [8]- Dziubak, T., & Dziubak, S. D. (2022). A study on the effect of inlet air pollution on the engine component wear and operation. *Energies*, 15, 1182.
- [9]- Wróblewski, P., & Koszalka, G. (2021). An experimental study on frictional losses of coated piston rings with symmetric and asymmetric geometry. *SAE International Journal of Engines*, 14, 853-866.
- [10]- Wróblewski, P., & Rogólski, R. (2021). Experimental analysis of the influence of the application of TiN, TiAlN, CrN and DLC1 coatings on the friction losses in an aviation internal combustion engine intended for the propulsion of ultralight aircraft. *Materials*, 14, 6839.
- [11]- Dziubak, T., & Dziubak, S. D. (2020). Experimental study of filtration materials used in the car air intake. *Materials*, 13, 3498.
- [12]- Maddineni, A. K., Das, D., & Damodaran, R. M. (2019). Numerical investigation of pressure and flow characteristics of pleated air filter system for automotive engine intake application. *Separation and Purification Technology*, 212, 126-134.
- [13]- Fleck, S., Heim, M., Beck, A., Moser, N., & Durst, M. (2009). Realitätsnahe Prü-

- fung von Motoransaugluftfiltern. MTZ-Motortechnische Zeitschrift, 70, 414-418.
- [14]- Rieger, M., Hettkamp, P., Löhl, T., & Madeira, P. M. P.( 2019). Efficient engine air filter for tight installation spaces. ATZ Heavy Duty Worldwide. 12, 56-59.
- [15]- Dahlan, A. A., Said, M. F. M., Latiff, Z. A., Perang, M. M., Bakar, S. A., & Jalal, R. A. (2019). Acoustic study of an air intake system of SI engine using 1-dimensional approach. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 16, 6281-6300.
- [16]- Sawant, P., & Bari, S. (2018). Effects of variable intake valve timings and valve lift on the performance and fuel efficiency of an internal combustion engine (No. 2018-01-0376). SAE Technical Paper.
- [17]- Sun, Z., Liang, Y., He, W., Jiang, F., Song, Q., Tang, M., & Wang, J. (2019). Filtration performance and loading capacity of nano-structured composite filter media for applications with high soot concentrations. Separation and Purification Technology, 221, 175-182.
- [18]- Selvi, İ.(2022). Dizel Motorlarda Hava Filtresinde Oluşan Kirlilik (Tıkanıklık) Seviyesinin, Motorun Karakteristik Özelliklerine ve Emisyona Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- [19]-<https://www.donaldson.com/content/dam/donaldson/engine-hydraulics-bulk/catalogs/air-intake/emea/fl16005/Air-Intake-Product-Guide.pdf>
- [20]-Uzun, B.(2005). İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılan Kuru Tip Hava Filtreleri İçin Mikro denetleyici Kontrollü Tıkanıklık Gösterge Devresi Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara