

Ekim 2025

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ALANINDA ULUSLARARASI AKADEMİK ARAŞTIRMA VE ÇALIŞMALAR

EDİTÖR **PROF. DR. EROL İSKENDER**



SERÜVEN
YAYINEVİ

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

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

Birinci Basım / First Edition • © Ekim 2025

ISBN • 978-625-5737-67-0

© 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.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ALANINDA ULUSLARARASI AKADEMİK
ARAŞTIRMA VE ÇALIŞMALAR

EKİM 2025

EDİTÖR PROF. DR. EROL İSKENDER

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

ETRİYE VARLIĞI VE ETRİYE ARALIĞI İLE ETRİYE BOMBELENME
BOYU DEĞİŞİMİNİN BETONARME BİR KOLONUN YAPISAL
DAVRANIŞA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU1

BÖLÜM 2

BETONARME BİNALARDA ZEMİN KAT YÜKSEKLİĞİNİN YAPISAL
PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Muhammed ÖZTEMEL.....17

BÖLÜM 3

REFRAKTER MALZEMELER

Saadet Gökçe GÖK.....29

BÖLÜM 4

ÜSTYAPI YÖNETİM SİSTEMİNDE YAPAY ZEKÂ YAKLAŞIMLARI

Özlem BATTAL ŞAL51

BÖLÜM 5

ZEMİNDE OLUŞAN GERİLMELER: GERİLME TEORİLERİ VE
MÜHENDİSLİK ÇÖZÜMLERİ

Damla KÜÇÜKAY KAYAALP73

Hüseyin Suha AKSOY73



ETRİYE VARLIĞI VE ETRİYE ARALIĞI İLE ETRİYE BOMBELANME BOYU DEĞİŞİMİNİN BETONARME BİR KOLONUN YAPISAL DAVRANIŞA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

“ ”

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Giresun Üniversitesi, Keşap Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Giresun, Türkiye, erdem.colakoglu@giresun.edu.tr
(ORCID: 0000-0002-4498-3569)

1. Giriş

Betonarme taşıyıcı sistemler, modern yapı mühendisliğinde en yaygın kullanılan sistemlerden biridir. Bu sistemlerde kolonlar, yapının düşey yükleri taşıırken aynı zamanda yatay (deprem ve rüzgâr) yükler altında da önemli bir dayanım ve süneklik göstermesi gereken elemanlardır. Betonarme kolonların sünek ve güvenli bir şekilde davranabilmesi, yalnızca betonun ve donatının mekanik özelliklerine değil, aynı zamanda donatının düzenleniş biçimine de doğrudan bağlıdır. Bu noktada etriyeler, kolonun kesitinde enine donatı olarak görev yaparak hem enine donatı etkisiyle betonun sarılmasını sağlar hem de boyuna donatının burkulmasını önleyerek yapısal stabiliteyi artırır.

Betonarme kolonların deprem gibi tersinir ve tekrarlı yükler altındaki performansı, yapının bir bütün olarak gösterdiği performansı doğrudan etkilemektedir [1]. Öyleki deprem nedeniyle ağır hasar alan betonarme bir yapıda hasarın en temel nedenlerinden biri de enine donatıların eksik veya hatalı kullanımından kaynaklanmaktadır. Bu noktada etriyelerin en kritik parametrelerinden biri olan etriye aralığı, kolonun enerji yutma kapasitesi, sünekliği ve genel deprem performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Deprem sırasında kolon uç bölgelerinde meydana gelen plastik mafsallar, yüksek şekil değiştirme taleplerine maruz kalır. Bu bölgelerde etriye aralığının sıklaştırılması, beton çekirdeğinin daha etkin şekilde sarılmasını sağlayarak betonun gevrek kırılmasını engeller ve kolonun sünek davranışını artırır. Buna karşılık, etriye aralığının fazla olması, betonun erken ezilmesine ve boyuna donatının burkulmasına yol açarak kolonun ani göçmesine neden olabilir.

Güncel deprem yönetmelikleri (örneğin TBDY 2018) bu nedenle kritik bölgelerde minimum etriye aralıklarını tanımlamakta ve yoğun etriye düzenlemesinin zorunlu olduğu plastik mafsal bölgeleri tarif etmektedir. TBDY 2018 [2]'e göre her bir kolonun alt ve uç kısımlarında kolon serbest yüksekliğinin 1/6'sından, kolon en büyük kesit boyutunun 1,5 katından ve 500 mm'den, daha küçük olmayacak şekilde özel sarılma bölgeleri

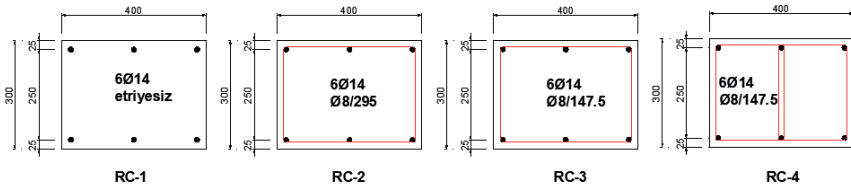
oluşturulması gerekmektedir. Bu sarılma bölgelerinde kullanılacak enine donatıların çapının 8 mm'den daha küçük olmaması ve aralıklarının da 50 mm'den büyük olmayacak şekilde kullanılması gerekmektedir [2]. Ancak yapılan deneysel ve analitik çalışmalar, bu sınırların malzeme kalitesi, eksenel yük düzeyi ve kolon boyutlarına bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, etriye aralığı ve düzeninin kolonun deprem davranışı üzerindeki etkilerinin kapsamlı şekilde incelenmesi, güvenli ve ekonomik tasarım açısından büyük önem taşımaktadır.

Literatürdeki birçok çalışmada, betonarme kolonların deprem davranışı farklı parametreler üzerinden ele alınmıştır. Bu çalışmaların çoğunda kullanılan etriyelerin sargılama tipi ve etriye aralığı ile eksenel yük düzeyi ve kullanılan malzeme modelleri değişken parametre olarak ele alınmıştır [3, 4, 5, 6].

Bu çalışmada ise betonarme kolonlarda etriye kullanımının deprem davranışına etkisi yatay yük taşıma kapasitesi ve süneklik üzerinden ele alınacaktır. Çalışmada etriye aralığı ve etriye bombelenme boyu değişken parametre olarak incelenmiş ve sonlu eleman modelleme tekniğinden faydalanılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada ele alınan betonarme kolon 300 mm x 400 mm x 3000 mm boyutlarında olup, değişken parametrelere ait enkesit ve donatı düzenleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Çalışmadaki tüm kolonlarda C25/30 tek tip beton dayanım sınıfındaki beton tercih edilmiştir.

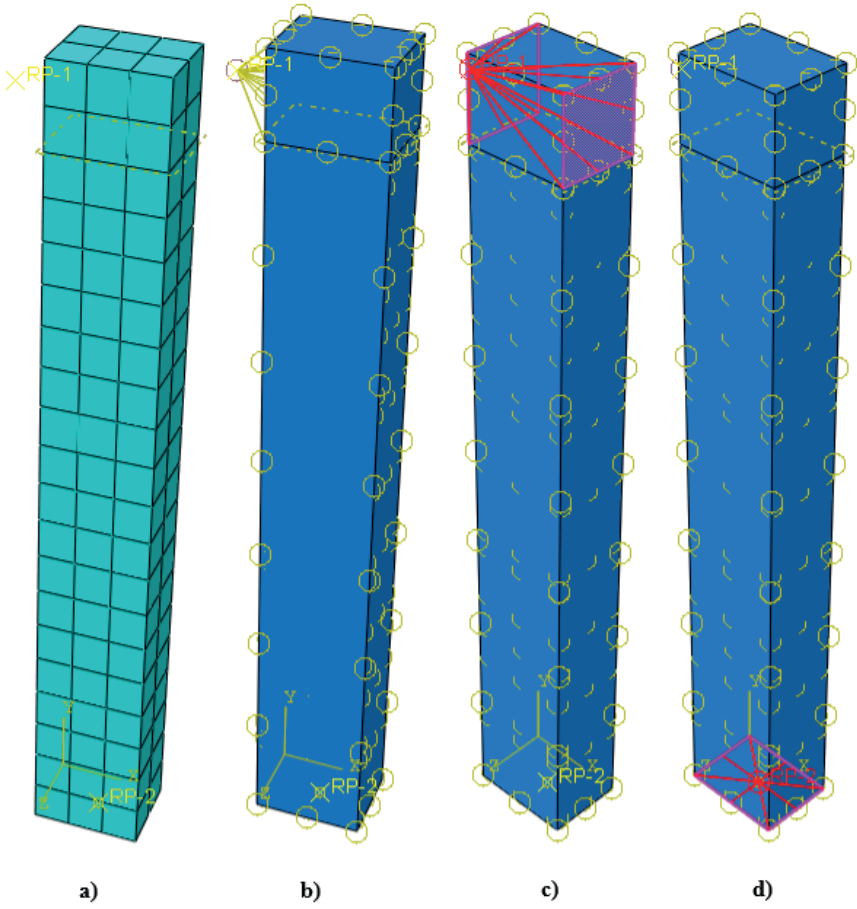


Şekil 1. Betonarme kolon enkesit özellikleri ve donatı düzeni

Çalışmada ele alınan betonarme kolon elemanlarından RC-1’de 6 adet Ø14 boyuna donatı kullanılmış, etriye kullanılmamıştır. Kolon elemanlarından RC-2’de 6 adet Ø14 boyuna donatı ile birlikte kolon boyunca 295 mm aralıklarla Ø8 enine donatı kullanılmıştır. Kolon elemanlarından RC-3’de 6 adet Ø14 boyuna donatı ile birlikte kolon boyunca 147,5 mm aralıklarla Ø8 enine donatı kullanılmıştır. RC-4’de ise diğer kolon elemanlardan farklı olarak etriye bombelenme boyu yarıya düşürülerek 6 adet Ø14 boyuna donatı ile birlikte kolon boyunca 147,5 mm aralıklarla Ø8 enine donatı kullanılmıştır.

2.1. Betonarme kolonun sonlu eleman modelinin oluşturulması

Betonarme kolonun sonlu eleman modeli ABAQUS [7] yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Nümerik analizlerde kullanılan sonlu elemanın boyutları hem analiz süresini hem de analiz sonucunu doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle aşırı küçük boyutlarda sonlu eleman tercih edilmesi analiz süresini uzatmakta ve sonuca ulaşmayı zorlaştıracaktır. Bu çalışmada analiz süresini makul bir seviyede tutmak ve aynı zamanda betonda yük etkisi altındaki çatlama ve ezilme davranışını en güzel şekilde simüle etmek amacıyla 150 mm x 150 mm boyutlarındaki mesh ağı tercih edilmiştir (Şekil 2a).



Şekil 2. Betonarme kolon sonlu eleman modelleme göstergeleri

Öte yandan betonarme kolona yatay yükün uygulanması için RP1 referans noktası ve ankastre mesnet üzerinden kesit tesirlerinin elde edilebilmesi için de kolon tabanında RP2 referans noktası tanımlanmıştır (Şekil 2b). Belirtilen RP1 ve RP2 referans noktalarını sırasıyla kolon üst ucu ile kolon alt ucuna mesnetlenmiştir (Şekil 2c ve Şekil 2d).

Nümerik analizlerde sonlu eleman modelinin doğru deprem davranışını verebilmesi için beton ile çelik donatının gerçek davranışının doğru malzeme modelleri ile tanımlanması çok önemlidir. Bu açıdan mevcut çalışmada ABAQUS [7] yazılımında mevcut olan beton malzemenin çatlama ve ezilme davranışını yansıtabilen C3D8R sürekli katı elemanı

tercih edilmiş, çelik donatı malzemesi de T3D2 elemanı ile simüle edilmiştir.

ABAQUS yazılımında betonun basınç etkilerine bağlı olarak ezilme davranışı ile çekme etkilerine bağlı çatlama davranışı CDP malzeme modeli ile tanımlanmaktadır. CDP malzeme modeli için ABAQUS yazılımında bazı plastisite parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veriler dilasyon açısı (ψ), eksantrisite (e), viskozite (μ) ve f_{bo}/f_{co} dur. Tablo 1’de beton malzemesi için betonarme kolonun sonlu eleman modelinde alınan plastisite parametreleri gösterilmiştir.

Tablo 1. Beton için plastisite parametreleri

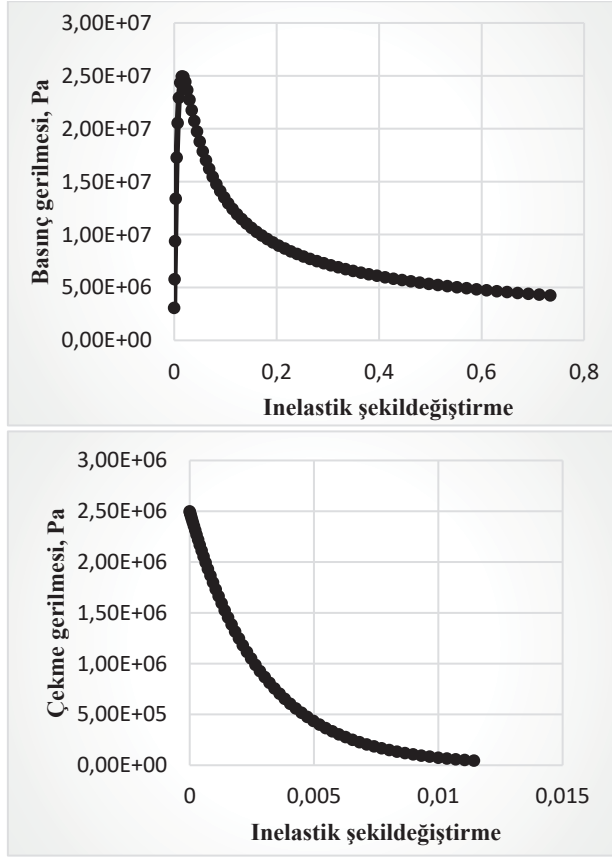
Dilasyon açısı	Eksantrisite	f_{bo}/f_{co}	K	Viskozite
31	0,1	1,16	0,667	0,0001

Literatürdeki birçok çalışmada [8, 9, 10], deneysel çalışmalarla uyumlu olması için dilatasyon açısı 5° ile 45° arasında seçilmiştir. Çolakoğlu ve Hüsem [11], farklı dilatasyon açısı değerleri ile birçok parametrik çalışma gerçekleştirmiş ve davranıştaki değişimi araştırmıştır. Bu çalışmada dilatasyon açısı 31° olarak alınmıştır.

Literatürdeki önceki çalışmalara uygun olarak [12, 13], bu çalışmada benimsenen eksantriklik değeri 0,1’dir.

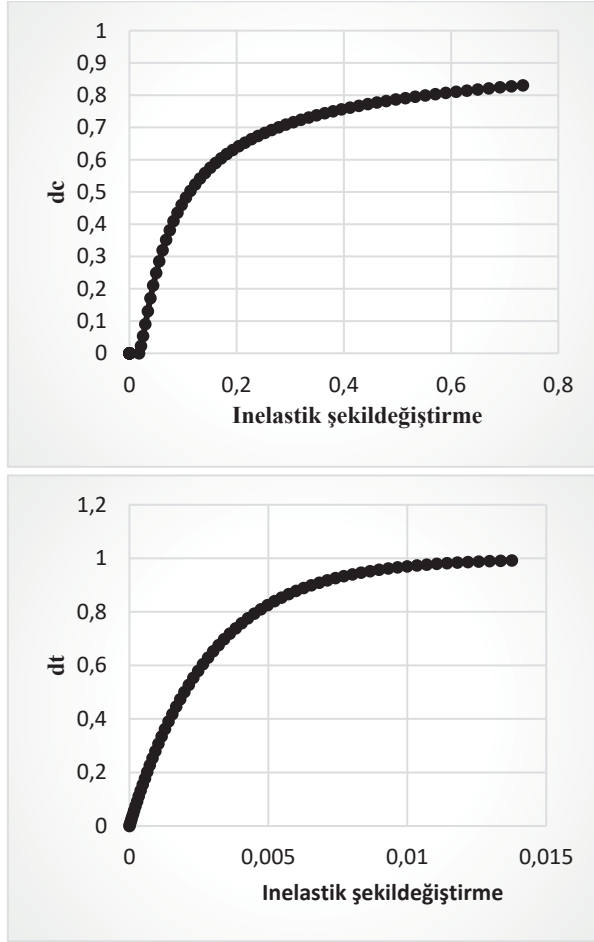
Literatürdeki çalışmalarda [11, 12, 14, 15], viskozite değeri 1×10^{-7} ile 667×10^{-3} arasında seçilmiştir. Bu çalışmada da viskozite değeri olarak 0,0001 kullanılmıştır.

Bu çalışmada C25/30 dayanım sınıfındaki beton için sonlu eleman modelinde kullanılan gerilme – birim şekildeğiştirme ilişkileri basınç ve çekme durumu için Şekil 3’de gösterilmiştir.



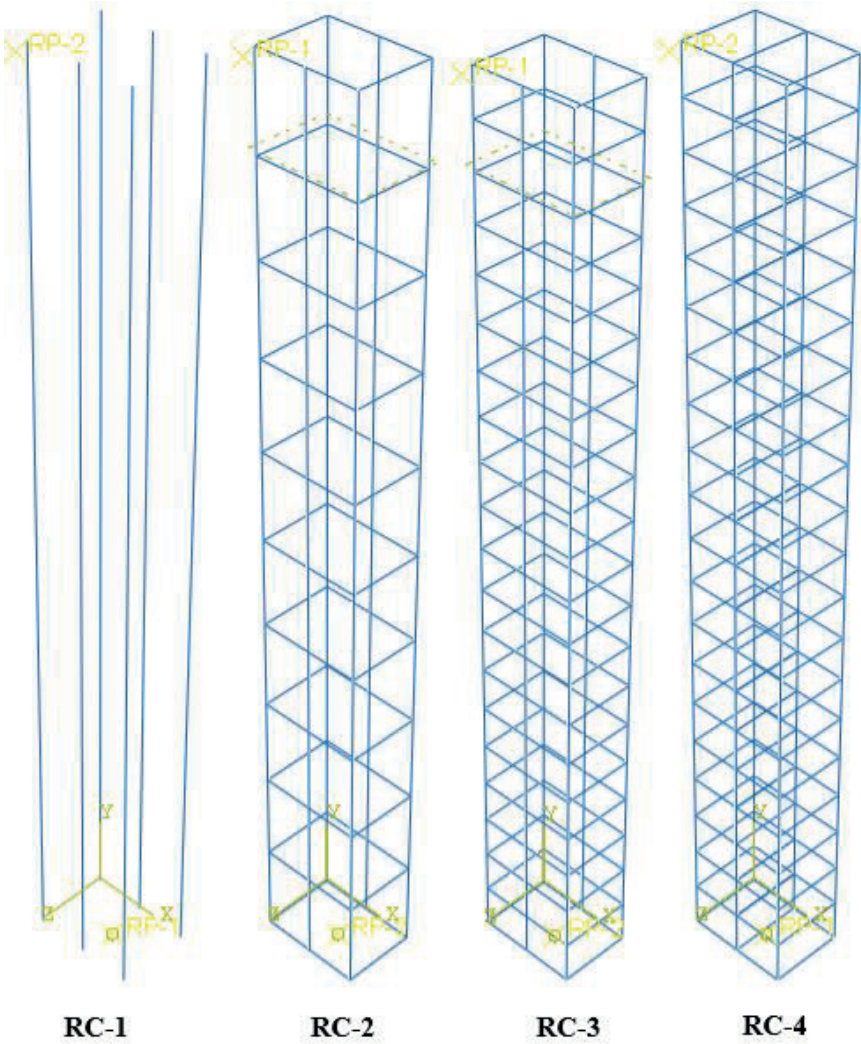
Şekil 3. Sonlu eleman modelinde kullanılan gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri

Yük etkilerine bağlı olarak betonda meydana gelen çatlaklar betonarme kolonda rijitlik kayıplarına neden olur. ABAQUS paket programında, betonun rijitliğindeki azalmaları temsil etmek üzere, basınç için dc ve çekme için dt rijitlik azaltma parametreleri tanımlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Sonlu eleman modelinde kullanılan hasar parametreleri

Bu çalışma ele alınan betonarme kolon elemanların ABAQUS yazılımı kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modellerinde ele alınan donatı düzenlemeleri Şekil 5’de gösterilmiştir.



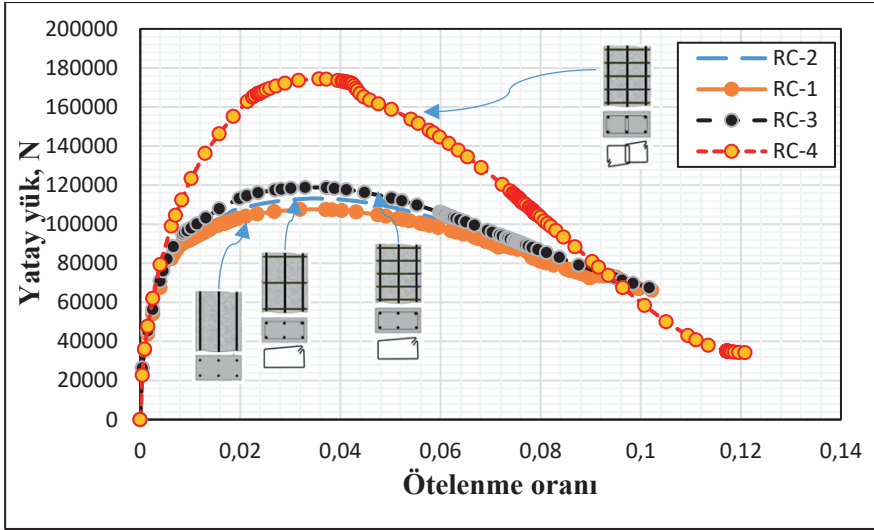
Şekil 5. Sonlu eleman modelinde kullanılan donatı düzenleri

3. Bulgular

Betonarme kolonda etriyenin kullanılması, etriye aralığı ile etriye bombelenme boyu değişiminin kolonun deprem davranışına etkisinin incelendiği bu çalışmada betonarme kolonun üst ucunda RP1 referans noktasına 50 mm yatay ötelenme verilmiştir. Bu ötelenmeye etkisinde etriyesiz kolon elemanı ile etriye aralığının değişkenlik gösterdiği kolon elemanları arasında yatay yük taşıma kapasitesi açısından meydana gelen

değişimler araştırılmıştır. Ayrıca etriye bombelenme boyunun, betonarme kolonun yatay yük taşıma kapasite üzerindeki etkisi de ele alınmıştır.

Şekil 6'da betonarme kolon elemanların yatay yük taşıma kapasitesinin ötelenme oranına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6. Betonarme kolon elemanların yatay yük – ötelenme oranı ilişkisi

Şekil 6 da görüldüğü gibi etriyenin varlığı betonarme kolonun yatay yük taşıma kapasitesi arttırmaktadır. Etriyelerin sık aralıklarla kullanılması halinde yatay yük taşıma kapasitesi de olumlu yönde etkilenmektedir. Etriyenin bombelenme boyunun yarıya düşürülmesi halinde ise yatay yük taşıma kapasitesi daha da artmaktadır. Tablo 2'de yatay yük taşıma kapasitesindeki değişimler etriyesiz kolon elemana kıyasla sayısal olarak verilmiştir. Burada görüldüğü üzere etriyenin kullanılmadığı betonarme kolonlara göre etriyenin 295 mm aralıklarla kullanıldığı kolon elemanlarda yatay yük taşıma kapasitesi %4,94 artmaktadır. Etriye aralığının 147,5 mm ye düşürülmesi halinde yatay yük taşıma kapasitesi etriyesiz kolon elemanlara göre %9,45 artmaktadır. Ancak yatay yük taşıma kapasitesinin arttırılması için etriye aralığının daha da azaltılması gerektiği ve kolon her

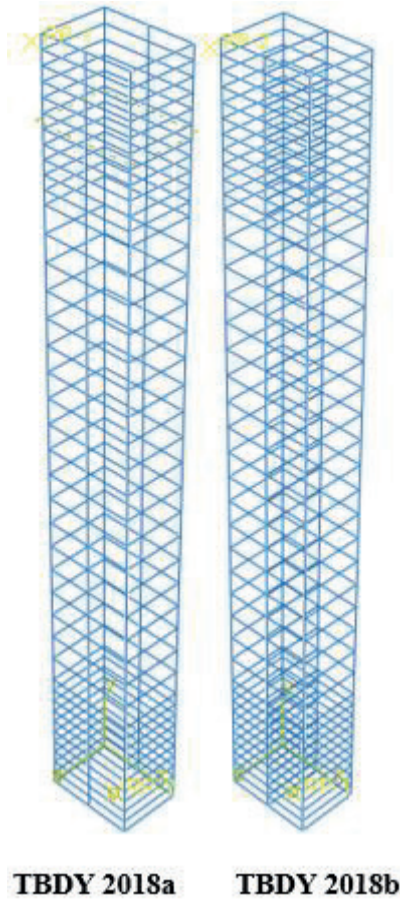
iki uç kısmında özel sargılama bölgesi oluşturulmasının gerekliliği gözden kaçmamaktadır.

Tablo 2. Yatay yük taşıma kapasitesindeki değişim (%)

Eleman Adı	Maksimum yatay yük (N)	% artış
RC-1	107585,34	-
RC-2	113179,60	4,94
RC-3	118811,88	9,45
RC-4	174390,07	38,31

Tablo 2'ye göre betonarme kolonun yatay yük taşıma kapasitesinde etriye bombelenme boyunun en az etriye sıklaştırılması kadar etkili olduğu görülmektedir. Etriye bombelenme boyunun yarıya düşürüldüğü RC-4 kolon elemanında yatay yük taşıma kapasitesi etriyesiz kolonlara göre %38,31 artış göstermektedir. Etriye bombelenme boyunun yarıya düşürülmesi yalnız başına yatay yük taşıma kapasitesini %31,87 artırmaktadır.

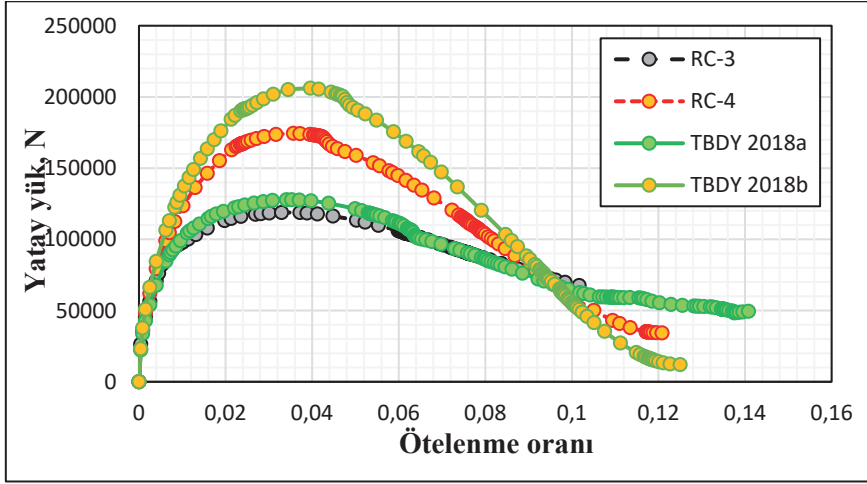
TBDY 2018 [2], betonarme kolon uç kısımlarında özel sargılama bölgeleri oluşturulması gerekliliğini söylemektedir. Bu sargılama bölgesinin kolon her iki uç bölgesinde 500 mm'den daha küçük olmaması ve etriye aralığının da en az 50 mm olarak tutulmasını uygun görülmektedir.



Şekil 7. TBDY 2018 [2]'de belirtilen donatı düzeni

Bu çalışmada TBDY 2018' e uygun olarak 300 mm x 400 mm boyutlarında betonarme bir kolonun Şekil 7'de gösterilen iki farklı donatı düzeni ile sonlu eleman modeli de oluşturulmuştur. Şekil 7'de TBDY 2018a ve TBDY 2018b ile ifade edilen sonlu eleman modelinde betonarme kolon her iki uç kısmında 500 mm lik bir bölgede etriye aralığı 50 mm olarak alınmış ve kolon gövdesinde bu aralık 100 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca TBDY 2018b olarak ifade edilen sonlu eleman modelinde etriye bombelenme boyu yarıya düşürülmüştür.

TBDY 2018 [2]'e uygun olarak etriye aralığı ve etriye bombelenme boyunda yapılan değişikliklere bağlı olarak betonarme kolonun yatay yük taşıma kapasitesindeki değişim Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. TBDY 2018'e göre betonarme kolon elemanların yatay yük – ötelenme oranı ilişkisi

TBDY 2018a ve TBDY 2018b sonlu eleman modellerinde görüldüğü üzere betonarme kolon her iki uç bölgesinde yapılan özel sargılama bölgesi ile kolon yatay yük taşıma kapasitesinde artış meydana gelmekte, bununla birlikte kolonun sünek davranışında iyileşme oluşmaktadır. Bununla birlikte etriye bombelenme boyunun yarıya düşürülme ile yatay yük taşıma kapasitesi daha da artmaktadır. Tablo 3'de sayısal veriler gösterilmiştir. Herhangi bir sargılama bölgesi olmayan RC-3 elemanına kıyasla TBDY 2018a kolon elemanında yatay yük taşıma kapasitesi %6,98 artış göstermiş, RC-4 elemanına kıyasla TBDY 2018b kolon elemanında yatay yük taşıma kapasitesi %15,36 artış göstermiştir.

Tablo 3. TBDY 2018'e göre yatay yük taşıma kapasitesindeki değişim (%)

Eleman Adı	Maksimum yatay yük (N)	% artış
RC-3	118811,88	-
RC-4	174390,07	-
TBDY 2018a	127728,20	6,98
TBDY 2018b	206040,89	15,36

4. Sonuçlar

Bu çalışmada 300 mm x 400 mm enkesit boyutlarındaki betonarme kolonun farklı etriye aralığına sahip donatı düzenlemesinde yatay yük taşıma kapasitesindeki değişim ile etriye bombelenme boyundaki değişimin yatay yük taşıma kapasitene etkisi incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Etriyenin varlığı betonarme kolonun yatay yük taşıma kapasitesi arttırmaktadır. Etriye aralığı küçüldükçe yatay yük taşıma kapasitesindeki iyileşme daha belirgindir.
- Betonarme kolonun yatay yük taşıma kapasitesindeki en belirgin artış etriye bombelenme boyunun yarıya düşürülme ile sağlanmıştır.
- TBDY 2018’de belirtilen etriye sargılama bölgesinin oluşturulması betonarme kolonda deprem performansı açısından son derece önemlidir. İmalatta sargılama bölgesinin oluşturulmasına özellikle dikkat edilmelidir.
- Betonarme kolonda hem özel etriye sargılama bölgesi yapılır, hem de bombelenme boyu yarıya düşürülürse kolon yatay yük taşıma kapasitesi etriyesiz elemana kıyasla %47,78 ye kadar arttırılabilir.

Kaynaklar

- [1] Çolakoğlu, H. E. (2020). Betonarme kolonların deprem performansında enine donatı aralığı etkisinin sayısal olarak incelenmesi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(12), 1-13.
- [2] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, TBDY 2018.
- [3] Taşkın, M., & Okay, F. (2019). Sargılama tipinin deprem yüklerine maruz kalan kolonların davranışına etkisinin sayısal olarak modellenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(1), 205-210.
- [4] Elci, H., & Göker, K. A. (2018). Comparison of earthquake codes (TEC 2007 and TBEC 2018) in terms of seismic performance of RC columns. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 4(6), 9-21.
- [5] Kolgu, S., & Peker, K. (2003). Effect of axial load material model and confinement on behavior of RC sections. In *Fifth National Conference on Earthquake Engineering, İstanbul, Turkey*.
- [6] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Observed stress-strain behavior of confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8), 1827-1849.
- [7] Abaqus/CAE V6.12 (2018) Programme, Dassault Systemes Simulia Corp. Providence, RI, USA.
- [8] Vitorino, H., Rodrigues, H., & Couto, C. (2020, February). Evaluation of post-earthquake fire capacity of a reinforced concrete one bay plane frame under ISO fire exposure. In *Structures* (Vol. 23, pp. 602-611). Elsevier.

- [9] Kamath, P., Sharma, U. K., Kumar, V., Bhargava, P., Usmani, A., Singh, B., ... & Pankaj, P. (2015). Full-scale fire test on an earthquake-damaged reinforced concrete frame. *Fire Safety Journal*, 73, 1-19.
- [10] Shah, A. H., Sharma, U. K., & Bhargava, P. (2017). Outcomes of a major research on full scale testing of RC frames in post earthquake fire. *Construction and Building materials*, 155, 1224-1241.
- [11] ÇOLAKOĞLU, H. E., & HÜSEM, M. (2025). Investigation of the cyclic load behavior of reinforced concrete frames exposed to high temperatures using the finite element method. *Sigma*, 43(3), 857-877.
- [12] Ren, W., Sneed, L. H., Yang, Y., & He, R. (2015). Numerical simulation of prestressed precast concrete bridge deck panels using damage plasticity model. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(1), 45-54.
- [13] Zhao, G., Zhang, M., Li, Y., & Li, D. (2016). The hysteresis performance and restoring force model for corroded reinforced concrete frame columns. *Journal of Engineering*, 2016(1), 7615385.
- [14] Labibzadeh, M., Zakeri, M., & Adel Shoaib, A. (2017). A new method for CDP input parameter identification of the ABAQUS software guaranteeing uniqueness and precision. *International Journal of Structural Integrity*, 8(2), 264-284.
- [15] Sümer, Y., Zakour, M. N., & Öztemel, M. (2025). Finite elements investigations of the effect of different parameters on the retrofitted RC beams with anchored FRP plate. *Structural Engineering and Mechanics*, 93(3), 165-179.



BETONARME BİNALARDA ZEMİN KAT YÜKSEKLİĞİNİN YAPISAL PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

“ ”

Muhammed ÖZTEMEL¹

¹ Öğr. Gör.; Giresun Üniversitesi, Keşap Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü,
muhammed.oztemel@giresun.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-6530-0739

1.Giriş

Aktif tektonik kuşaklar üzerinde bulunan Türkiye, jeolojik olarak sürekli deprem tehlikesi altındadır. Bu yüzden tarih boyunca birçok yıkıcı depreme maruz kalmış ve bu depremler sonucu önemli can ve mal kayıpları yaşanmıştır. Yapıların deprem etkisi altındaki yatay yükler karşısında gösterdiği performans, can ve mal güvenliğinin korunması açısından belirleyici bir faktördür (Çolakoğlu ve Öztemel, 2024). Özellikle Türkiye de yaşanan son depremler, yapı stokunun önemli bir bölümünün mevcut yönetmeliklerin gerekliliklerini karşılamadığını ve birçok binada yapısal düzensizliklerin doğrudan göçmeye neden olduğunu göstermiştir (Yılmaz ve Öncü, 2025). Deprem yükleri altında emniyetli yapı davranışının sağlanması, tasarım sürecinde yapılan projelendirme çalışmalarının doğruluğu ile doğrudan ilişkilidir (Öztemel, Turan, Çolakoğlu, 2022). Depreme dayanıklı yapı tasarımında temel ilke, taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların deprem yüklerini güvenli ve sürekli bir şekilde zemine aktarabilecek düzeyde rijitlik, dayanım ve süneklik özelliklerine sahip olmalarıdır. Ancak Türkiye’deki mevcut yapı stoğunun büyük bölümünü oluşturan az ve orta katlı betonarme binalarda, mimari tercihler, ticari gereksinimler, imar koşulları, mal sahibi talepleri ve alan sınırlamaları gibi nedenlerle zemin katlar genellikle diğer katlara oranla daha yüksek tasarlanmaktadır. Bu durum, katlar arasında rijitlik süreksizliği yaratarak düşey doğrultuda yapısal bir düzensizlik oluşturmaktadır (Korkmaz ve Uçar, 2006; Garip ve Dibekoğlu, 2023; Özkan, Gürsoy ve Garip, 2023). Zemin kattaki taşıyıcı elemanların rijitliğinin üst katlara göre düşük olması, deprem anında bu katta daha büyük yatay yer değiştirmelere neden olmakta ve bu davranış, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nde (TBDY, 2019) “yumuşak kat düzensizliği” olarak tanımlanmaktadır. Bu düzensizliklerin en yaygın görülenlerinden biri, zemin kat yüksekliğinin diğer katlara göre fazla olması sonucu oluşan yumuşak kat düzensizliğidir. Betonarme binalarda zemin kat yüksekliği, çoğunlukla ticari kullanım alanları, otopark veya galeri boşluğu gibi mimari gerekçelerle üst katlara kıyasla daha fazla seçilmektedir (Işık, Özdemir ve Kutanis, 2016). Kat yükseklikleri arasındaki farklar, yapı sisteminin dinamik özelliklerini değiştirerek doğal titreşim periyotlarını uzatmakta, katlar arası rijitlik dağılımını etkilemekte ve dolayısıyla yapı davranışında düzensizlik yaratmaktadır (Işık, Özdemir ve Kutanis, 2016). Artan kat yüksekliği, tepe yer değiştirmelerini artırırken taban kesme kuvvetlerini azaltmakta; bu durum yapıların enerji sönümleme kapasitesini düşürmekte ve süneklik gereksinimini artırmaktadır (Işık ve Öztürk, 2017). Son yıllarda yapılan analitik ve sayısal çalışmalar, zemin kat yüksekliği değişimlerinin yapı davranışına etkilerinin yalnızca lokal düzeyde değil, tüm sistem davranışını etkileyen bir parametre olduğunu göstermektedir. Örneğin, Yılmaz ve Öncü (2025) tarafından yapılan çalışmada, artan kat yüksekliği ve dolgu duvar eksikliğinin kırılğanlık eğrilerini olumsuz etkilediği ve göçme olasılığını artır-

dığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Işık ve Öztürk (2017), zemin kat yüksekliği arttıkça yapının çökme mekanizmalarının yumuşak kat etkisiyle benzer özellikler sergilediğini ortaya koymuştur. Bu kapsamda, zemin kat yüksekliğinin yapı performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi, deprem güvenli tasarım ilkeleri açısından büyük önem taşımaktadır. Mevcut yapı stokunda yer alan çok sayıda bina, yönetmelik öncesi dönemde inşa edildiği için düşey düzensizlik içermekte ve özellikle zemin katlardaki yüksekliğin artması nedeniyle performans kaybı yaşamaktadır. Bu nedenle, bu çalışma; farklı zemin kat yüksekliği koşulları altında betonarme binaların yapısal davranışını incelemeyi, performans değişimini analitik olarak değerlendirmeyi ve sonuçları karşılaştırmalı biçimde sunmayı amaçlamaktadır. Elde edilen bulguların, deprem güvenli yapı tasarımı ve güçlendirme stratejilerinin geliştirilmesinde önemli katkılar sağlaması beklenmektedir.



Şekil 1. Yumuşak kat düzensizliğinin yapısal etkisi (Varum ve diğerleri, 2018:51).

Şekil 1’de, 2015 Nepal (Gorkha) depremi sonrasında yumuşak kat düzensizliği nedeniyle ağır hasar görmüş betonarme binalardan örnekler görülmektedir. Görseldeki yapılarda zemin katlarda dolgu duvar bulunmaması ve açıklıkların büyük tutulması, düşey doğrultuda rijitlik süreksizliği oluşturarak zemin katın üst katlara göre çok daha fazla yer değiştirmesine yol açmıştır. Bu durum, yapının deprem etkisi altında zemin katta göçme mekanizmasının oluşmasına neden olmuştur. Varum ve diğerlerinin (2018) da belirttiği üzere, yumuşak kat etkisi genellikle ticari kullanım amacıyla açık bırakılan zemin katlarda ortaya çıkmakta ve bu tür düzensizlikler yapının genel stabilitesini ciddi biçimde zayıflatmaktadır. Dolayısıyla, Şekil 1’de görülen örnekler, yumuşak kat oluşumunun deprem performansını olumsuz yönde etkileyen en kritik faktörlerden biri olduğunu açıkça göstermektedir.

2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında, zemin kat yükseklikleri farklı iki yapı modeli tasarlanmış ve bu modellerin deprem davranışı sonlu elemanlar esasına dayalı bir analiz yaklaşımıyla incelenmiştir. Yapısal modelleme süreci ideCAD Statik 10 programı kullanılarak yürütülmüş, analizler belirlenen parametreler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen titreşim periyotları, taban ve kat kesme kuvvetleri ile yatay yer değiştirmeler Excel ortamında grafiksel olarak değerlendirilmiş; farklı zemin kat yüksekliklerinin yapı performansına etkileri sayısal olarak karşılaştırılmıştır.

3. Betonarme Yapının Genel Özellikleri

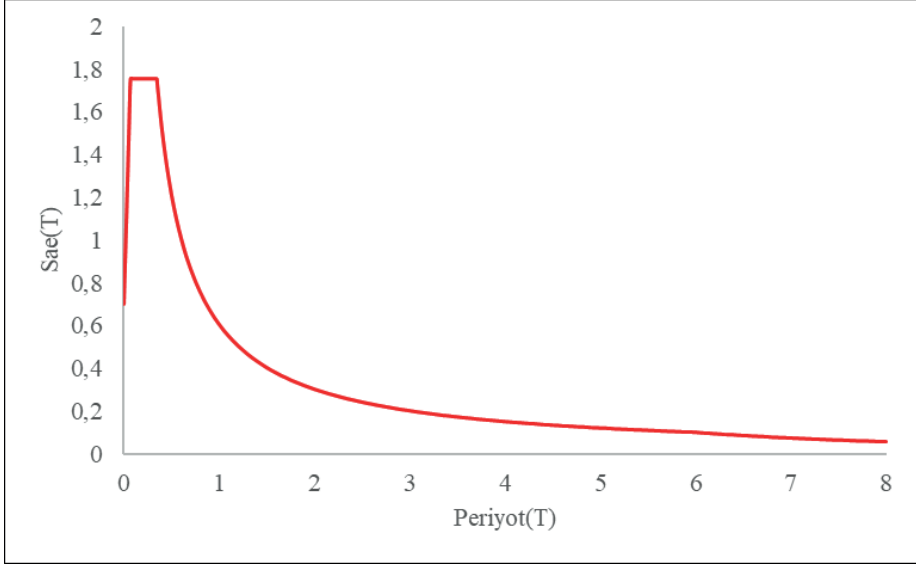
Bu çalışmada, beş katlı betonarme bir çerçeve sistem yapısı model olarak seçilmiştir. Yapının tüm normal katları eşit yükseklikte olup, her birinin kat yüksekliği 3 m'dir. Taşıyıcı sistemde kullanılan malzeme sınıfı C25 beton ve B420C nervürlü çeliktir. Kiriş ve kolon elemanlarında kullanılan boyuna donatı çapları sırasıyla $\phi 12$ (kirişlerde) ve $\phi 16$ (kolonlarda) olarak belirlenmiştir. Seçilen betonarme yapıya ait kalıp planı Şekil 3'te sunulmaktadır.

Tablo 1. Çalışma modellerine ait parametreler

	1.Model	2.Model
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-2	DD-2
Zemin Sınıfı	ZC	ZC
Beton Sınıfı	C25	C25
Kat Yüksekliği 3m	3m	3m
Zemin Kat Yüksekliği	3 m	4,5m
Bina Önem Katsayısı	1	1
Kolon	50/50	25/50
Kiriş	50/50	25/50

Tablo 1'de, bu çalışmada incelenen iki farklı betonarme yapı modeline ait temel tasarım ve analiz parametreleri sunulmaktadır. Çalışmada, yapı davranışını karşılaştırmalı olarak inceleyebilmek amacıyla her iki model için deprem ve malzeme özellikleri aynı tutulmuş, yalnızca zemin kat yüksekliği parametresi değiştirilmiştir. Her iki modelde de deprem yer hareketi düzeyi (DD-2), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) kapsamında *tasarım depremi* seviyesini temsil etmektedir. Bu düzey, yapıların performans analizinde orta şiddette ancak yapısal davranış açısından belirleyici etkiler oluşturan bir deprem senaryosunu ifade etmektedir.

Çalışma kapsamında, yapının bulunduğu bölgeye ait enlem ve boylam değerleri kullanılarak AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı tarafından yayımlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritası üzerinden, DD-2 deprem yer hareketi düzeyi ve ZD yerel zemin sınıfı için tanımlanan tasarım spektrumu elde edilmiştir. Elde edilen spektrum aşağıda gösterilmektedir (Şekil 2).



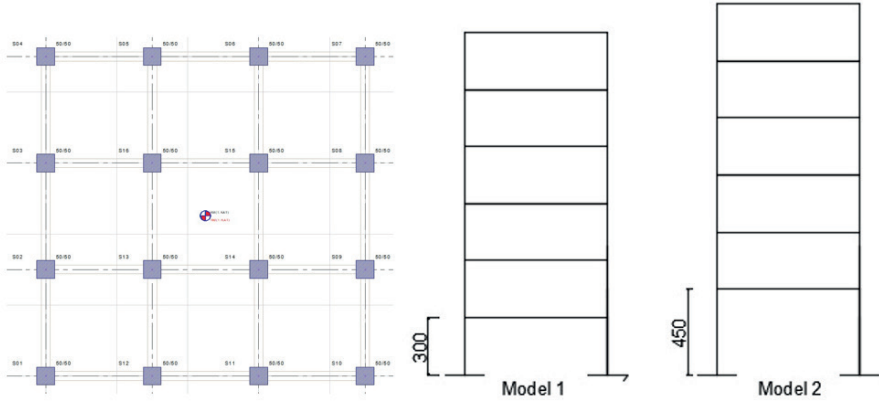
Şekil 2. DD-2 deprem düzeyi ve ZC zemin sınıfına ait tasarım spektrumu.

Zemin özellikleri bakımından her iki model ZC zemin sınıfında tanımlanmıştır. Bu sınıf, orta sıkı zemin koşullarını temsil etmekte olup, rijitlik ve sönüm özellikleri bakımından orta derecede deformasyonlara izin vermektedir. Betonarme taşıyıcı elemanlarda C25 beton sınıfı ve B420C nervürlü çelik donatı kullanılmıştır. Bu malzeme seçimi, Türkiye’de yaygın olarak kullanılan bina stokunu temsil etmesi açısından tercih edilmiştir.

Normal kat yükseklikleri her iki modelde de 3 m olarak sabit tutulmuştur. Model 1’de zemin kat yüksekliği de 3 m olup, yapıda herhangi bir düşey düzensizlik bulunmamaktadır. Buna karşılık Model 2’de zemin kat yüksekliği 4,5 m olarak tanımlanmış ve bu fark, düşey doğrultuda rijitlik değişimi oluşturarak yumuşak kat etkisinin incelenmesine olanak sağlamıştır. Böylece, her iki model arasındaki temel fark yalnızca zemin kat yüksekliğinden kaynaklanmakta; diğer tüm parametreler (malzeme özellikleri, yükleme durumu, deprem düzeyi ve sınır koşulları) sabit tutulmaktadır.

Her iki model için bina önem katsayısı ($I = 1$) olarak alınmıştır. Bu katsayı, yapıların normal kullanım binaları kategorisinde değerlendirildiğini göstermektedir. Modelleme süreci, parametrik olarak yalnızca zemin kat yüksekliği değişiminin yapısal performansa etkisini ortaya koyacak şekilde kurgulanmıştır. Bu nedenle tablo 1’de verilen parametreler, analiz sonuçları-

nın yorumlanması açısından referans değerler olarak kullanılmaktadır.

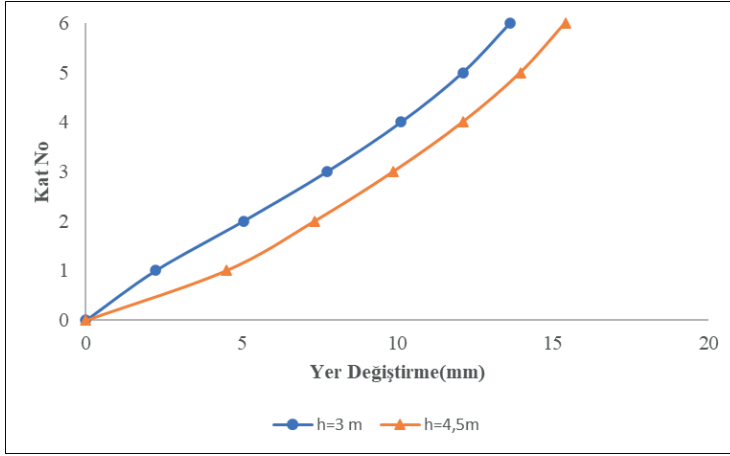


Şekil 3. Çalışmada analiz edilen yapı modellerinin planı ve zemin kat yüksekliği karşılaştırması (Model 1: 3 m, Model 2: 4,5 m).

Modelleme çalışmasında, betonarme taşıyıcı sistemin plan ve düşey doğrultudaki davranışını değerlendirmek amacıyla iki farklı yapı modeli oluşturulmuştur. Şekil 3'te görüldüğü üzere betonarme sistem, kolon elemanları 50×50 cm, kiriş elemanları ise 25×50 cm kesit boyutlarında tasarlanmıştır. Modeller arasında tek değişken olarak zemin kat yüksekliği ele alınmış; birinci modelde zemin kat yüksekliği 3.00 m, ikinci modelde ise 4.50 m olarak belirlenmiştir. Üst katların yüksekliği her iki modelde de sabit tutulmuştur. Böylece, diğer tüm geometrik ve malzeme özellikleri aynı kalmak koşuluyla yalnızca zemin kat yüksekliğinin yapı davranışına etkisi incelenmiştir. Zemin kat yüksekliğinin artırılması, düşey doğrultuda rijitlik süreksizliği oluşturarak “yumuşak kat” etkisini ortaya çıkarmakta ve bu durum deprem etkisi altında yapı performansını önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu nedenle, Model 2 zemin kat yüksekliği fazla olan ve yumuşak kat düzensizliği barındıran yapı davranışını temsil ederken, Model 1 düzenli rijitlik dağılımına sahip referans yapı olarak değerlendirilmiştir.

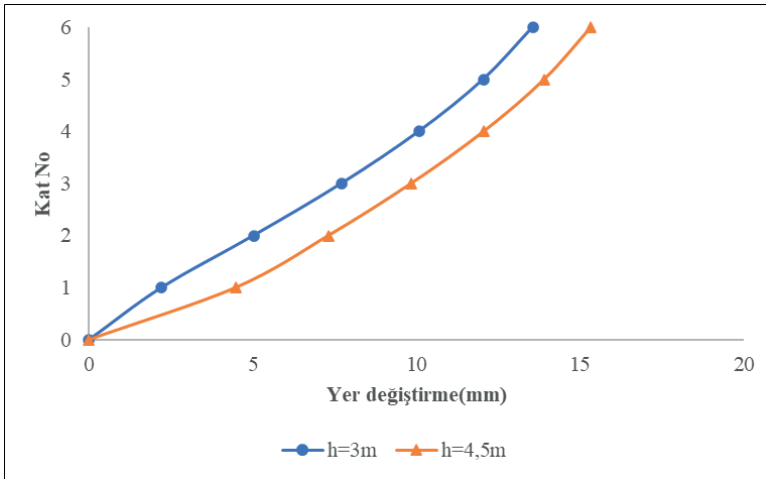
4. Bulgular ve Değerlendirme

Analizler sonucunda her iki modelde de normal kat yükseklikleri 3 m olarak sabit tutulmuştur. Model 1’de zemin kat yüksekliği 3 m olarak belirlenmiş, bu durumda yapıda düşey doğrultuda herhangi bir düzensizlik tanımlanmamıştır. Model 2’de ise zemin kat yüksekliği 4,5 m olarak tanımlanmış ve bu fark, yapının düşey doğrultuda rijitlik dağılımını değiştirmiştir. Her iki model için yapılan analizlerde titreşim periyotları, taban kesme kuvvetleri, kat kesme kuvvetleri ve yatay yer değiştirmeler elde edilmiştir. Sonuçlar, zemin kat yüksekliği farkının yapısal davranış parametrelerinde farklı değerlere yol açtığını göstermektedir.



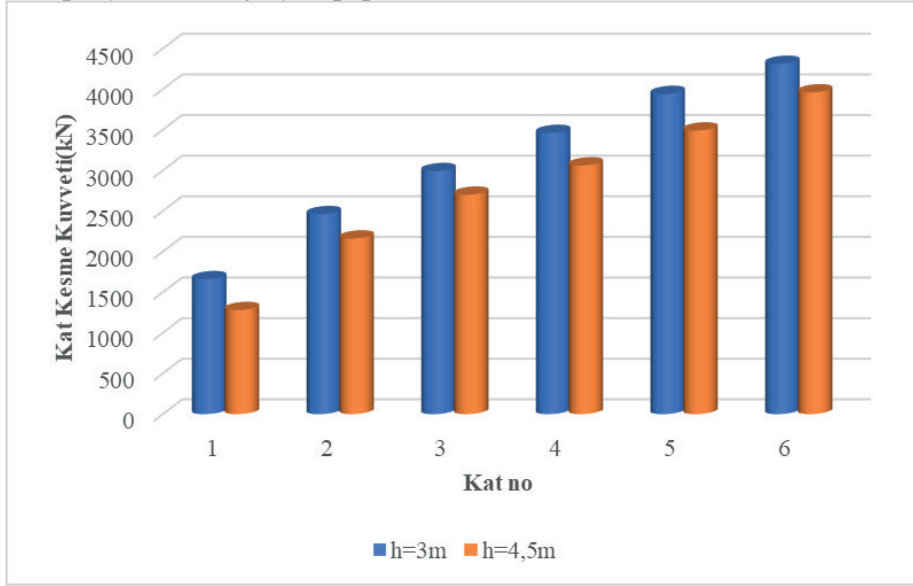
Şekil 4. Katlara göre x yönü yer değiştirme değerleri

X yönündeki analiz sonuçları incelendiğinde, zemin kat yüksekliğinin artmasının yatay yer değiştirme değerleri üzerinde belirgin bir etki oluşturduğu görülmektedir. Zemin kat yüksekliği 3 m olan modelde yer değiştirmeler daha sınırlı kalırken, 4,5 m yüksekliğe sahip modelde tüm katlar boyunca yer değiştirmelerin daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Zemin katın daha yüksek tanımlanması, bu bölgede rijitliğin azalmasına neden olmuş ve üst katlara aktarılan yatay deplasmanların artmasına yol açmıştır. Şekil 4'te de görüldüğü üzere, her iki modelde yer değiştirmeler kat yüksekliğiyle birlikte kademeli olarak artmakta olup, zemin kat yüksekliği fazla olan modelde bu artış daha belirgin şekilde gözlenmektedir. Bu durum, zemin kat yüksekliğinin artırılmasıyla birlikte yapının yatay yer değiştirme miktarlarında artış meydana geldiğini göstermektedir.



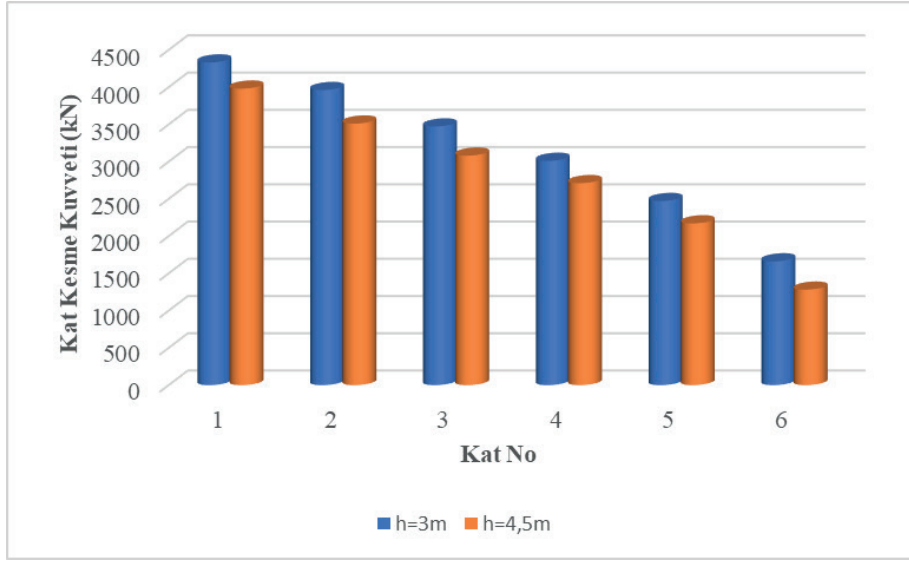
Şekil 5. Katlara göre y yönü yer değiştirme değerleri

Y yönündeki analiz sonuçları incelendiğinde, zemin kat yüksekliğinin artmasının yatay yer değiştirme değerleri üzerinde X yönüne benzer biçimde etkili olduğu görülmektedir. Zemin kat yüksekliği 3 m olan modelde yer değiştirmeler daha sınırlı kalırken, 4,5 m yüksekliğe sahip modelde tüm katlar boyunca yer değiştirmelerin arttığı belirlenmiştir. Zemin katın daha yüksek tanımlanması bu bölgede rijitliğin azalmasına neden olmuş, buna bağlı olarak üst katlara aktarılan yatay deplasmanlar da artış göstermiştir. Şekil 5’de her iki modelin Y yönündeki yer değiştirme dağılımları karşılaştırmalı olarak sunulmuş olup, zemin kat yüksekliği fazla olan modelde artışın daha belirgin şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 6. Katlara göre x yönü kat kesme kuvvetleri

X yönündeki analiz sonuçları, zemin kat yüksekliğinin kat kesme kuvvetleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 6). $h=3$ m yüksekliğine sahip modelde, zemin katta yaklaşık 4310 kN olarak elde edilen kesme kuvveti, $h=4,5$ m yüksekliğindeki modelde yaklaşık 3960 kN seviyesine düşmüştür. Benzer şekilde, üst katlarda da $h=3$ m yüksekliğindeki modelin kesme kuvveti değerleri, $h=4,5$ m modeline göre daha yüksek seyretmiştir. Bu fark, zemin kat yüksekliğinin artmasıyla birlikte yapının X yönündeki rijitliğinde meydana gelen azalmadan kaynaklanmaktadır. Şekil 6’da görüldüğü üzere, zemin kat yüksekliğinin 3 m’den 4,5 m’ye çıkarılması sonucunda tüm katlarda kesme kuvveti değerlerinde azalma meydana gelmiş, bu durum yatay yük aktarımının karakterini değiştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, zemin kat yüksekliğindeki artışın yapının X yönündeki yatay yük taşıma kapasitesini düşürdüğünü göstermektedir.



Şekil 7. Katlara göre y yönü kat kesme kuvvetleri

Y yönündeki analiz sonuçlarına göre, zemin kat yüksekliğinin artması kat kesme kuvvetleri üzerinde belirgin bir azalmaya neden olmuştur. $h=3$ m yüksekliğine sahip modelde zemin katta yaklaşık 4330 kN olan kesme kuvveti, $h=4,5$ m yüksekliğindeki modelde 3980 kN seviyesinde gerçekleşmiştir. Aynı şekilde, diğer katlarda da $h=3$ m yüksekliğindeki modelin kesme kuvveti değerleri, $h=4,5$ m yüksekliğine kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Örneğin 3. katta bu değerler sırasıyla yaklaşık 3010 kN ve 2710 kN olarak elde edilmiştir. Zemin kat yüksekliğinin artması, yapının Y yönündeki rijitliğini azaltmış ve yatay yüklerin büyüklüğünü düşürmüştür. Şekil 7’de görüldüğü üzere, zemin kat yüksekliğinin 3 m’den 4,5 m’ye çıkarılması sonucunda Y yönündeki tüm katlarda kesme kuvveti değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu sonuç, zemin kat yüksekliğinin Y yönündeki yatay yük aktarımı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Farklı zemin kat yüksekliklerine sahip modellerin birinci doğal titreşim periyotları

Periyot	Model 1 (h=3m)	Model 2 (h=4,5m)
$T_{1x(sn)}$	0,76016	0,87371
$T_{1y(sn)}$	0,76004	0,87284

Model 1 ($h = 3$ m) ve Model 2 ($h = 4,5$ m) için elde edilen birinci doğal titreşim periyotlarının karşılaştırılması, zemin kat yüksekliğinin yapının dinamik özellikleri üzerindeki belirleyici etkisini açık bir şekilde ortaya koy-

maktadır (Tablo 2). Zemin kat yüksekliği 3 m olan Model 1’de, birinci doğal titreşim periyodu X yönünde 0,76016 s, Y yönünde ise 0,76004 s olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, yapının her iki yatay doğrultuda benzer rijitlik özelliklerine sahip olduğunu ve plan düzleminde simetrik bir davranış sergilediğini göstermektedir.

Zemin kat yüksekliğinin 4,5 m’ye çıkarıldığı Model 2’de ise, X yönündeki periyot 0,87371 s’ye, Y yönündeki periyot ise 0,87284 s’ye yükselmiştir. Zemin kat yüksekliğinde meydana gelen bu artış, özellikle alt katlardaki kolonların boylarının uzaması ve dolayısıyla kesit rijitliklerinin azalması sonucunda, yapının genel yatay rijitliğini düşürmüştür. Rijitlikteki bu azalma, doğal titreşim periyotlarının uzamasına neden olmuş ve yapının dinamik davranışını daha esnek hale getirmiştir.

Ayrıca, her iki model için X ve Y yönlerindeki periyot değerlerinin birbirine oldukça yakın olması, yapının plan geometrisinde önemli bir düzensizlik bulunmadığını ve yatay yükler karşısında simetrik bir tepki verdiğini ortaya koymaktadır. Ancak zemin kat yüksekliğindeki 1,5 m’lik artış, titreşim periyotlarında yaklaşık %15 oranında bir artışa yol açmıştır. Bu durum, yapının deprem yükleri altındaki dinamik tepkisinin önemli ölçüde değiştiğini ve zemin kat yüksekliğinin yapı performansını doğrudan etkileyen kritik bir parametre olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, zemin kat yüksekliğinin artmasıyla birlikte yapı, yatay yükler karşısında daha esnek bir davranış göstermekte ve bu durum deprem performansının değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken temel bir tasarım kriteri haline gelmektedir.

5.Sonuçlar

Bu çalışmada, zemin kat yüksekliğinin betonarme binaların yapısal davranışı üzerindeki etkisi, iki farklı model üzerinden karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Her iki modelde plan düzeni, malzeme özellikleri ve yükleme koşulları aynı tutulmuş, yalnızca zemin kat yüksekliği 3 m ve 4,5 m olacak şekilde değiştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler, zemin kat yüksekliğinin yapı rijitliği, kesme kuvvetleri, yer değiştirmeler ve doğal titreşim periyotları üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

X ve Y yönlerinde yapılan analizlerde, zemin kat yüksekliğinin artmasıyla birlikte yapı rijitliğinde azalma meydana gelmiş ve bu durum hem yatay yer değiştirmelerin hem de periyot değerlerinin artmasına yol açmıştır. $h=3$ m yüksekliğine sahip modelde elde edilen periyot değerleri yaklaşık 0,76 s civarında iken, $h=4,5$ m yüksekliğindeki modelde bu değer 0,87 s seviyesine yükselmiştir. Aynı şekilde, $h=3$ m modelinde her iki doğrultuda da daha yüksek kesme kuvveti değerleri elde edilirken, zemin kat yüksekliğinin artırıldığı modelde kesme kuvvetlerinde belirgin düşüşler gözlenmiştir.

Yer değiştirme analizleri incelendiğinde, zemin kat yüksekliğinin artışıyla birlikte özellikle alt katlarda yatay deplasmanların arttığı belirlenmiştir. Bu artış, zemin katın rijitliğinde meydana gelen azalma nedeniyle yumuşak kat davranışının oluşmasına zemin hazırlamaktadır. Her iki modelin genel davranışı karşılaştırıldığında, zemin kat yüksekliğinin 3 m'den 4,5 m'ye çıkarılmasının, yapının hem dinamik hem de statik parametrelerinde önemli değişimlere neden olduğu sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, zemin kat yüksekliğinin yapısal tasarımda dikkate alınması gereken kritik bir parametre olduğu, yüksek zemin katlı yapılarda rijitlik süreksizliğinin oluşabileceği ve bu durumun deprem etkisi altında yer değiştirmeleri artırarak yapının genel davranışını olumsuz yönde etkileyebileceği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Çolakoğlu, H. E., & Öztemel, M. (2024). Investigation of Linear and Nonlinear Behaviour of Reinforced Concrete Column Exposed to Corrosion Effect for Different Damage Limit Levels. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 7(3), 409–422.
<https://doi.org/10.34248/bsengineering.1424973>
- Garip, Z. Ş., & Dibekoğlu, Ş. (2023). Deprem etkisindeki betonarme binalarda dolgu duvarların davranışa etkilerinin incelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi (UMAGD)*, 15(2), 344–360.
- ideYAPI Mühendislik Yazılım Ltd. Şti. (2023). *ideCAD v10*. Erişim adresi: <https://www.idecad.com.tr>
- Işık, E., & Öztürk, G. (2017). Betonarme binalarda kat yüksekliğinin yapı performansına etkisi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(1), 299–305.
- Işık, E., Özdemir, M., & Kutaniş, M. (2016). Farklı zemin kat yüksekliklerinin yapı performansına etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), 445–454.
- Korkmaz, A., & Uçar, T. (2006). Yumuşak kat düzensizliğinin betonarme binaların deprem davranışına etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 11(2), 65–76.
- Özkan, A. M., Gürsoy, Ş., & Garip, Z. Ş. (2023). Zemin kat yüksekliği ve kat adedi farklı olan betonarme binalarda sismik izolatör kullanımının bina davranışına etkisinin incelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 15(2), 671–688. <https://doi.org/10.29137/umagd.1253099>
- Öztemel, M., Turan, M. T., & Çolakoğlu, H. E. (2022). Mevcut az katlı betonarme bir binada perde kullanımı ve yerleşiminin yapısal davranışa etkisinin incelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 153–159. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1078414>
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018). Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD).
- Varum, H., Dumarı, R., Furtado, A., Barbosa, A. R., Gautam, D., & Rodrigues, H. (2018). Seismic performance of buildings in Nepal after the Gorkha earthquake. In *Impacts and Insights of the Gorkha Earthquake* (pp. 35–58). Elsevier.
- Yılmaz, A., & Öncü, M. E. (2025). Deprem etkisi altında yumuşak kat düzensizliğine sahip betonarme binaların hasar görebilirlik analizi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(3), 1574–1590.



REFRAKTER MALZEMELER

“ ”

Saadet Gökçe GÖK¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırklareli, Türkiye, e-posta: saadet.gokce.gok@klu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7879-1610

1. GİRİŞ

Refrakter (ateşe dayanıklı) malzemeler, yüksek sıcaklıklara, ani sıcaklık değişimi sonucu gerçekleşen ısıl şoklara, zorlu çevresel şartlara, çeşitli kimyasallara direnç gösterebilme ve bu zorlayıcı koşullara dayanabilme özellikleri sayesinde endüstrinin vazgeçilmez yapısal elemanlarından biridir (Bostancı & Bahtlı, 2025; Köksal vd., 2003). Çimento, cam, seramik, demir-çelik, enerji ve petrokimya gibi farklı sektörlerde kritik öneme sahip olan bu malzemeler, yalnızca yüksek sıcaklıklara dayanıklılıklarıyla değil, aynı zamanda çevresel etkiler karşısında özelliklerini kaybetmemeleriyle, mekanik ve kimyasal kararlılıklarıyla da ön plana çıkmaktadır (Arianpour, 2020; Briggs, 2005; Turfanda vd., 2021). Özellikle yüksek sıcaklıkta gerçekleşen endüstriyel süreçlerde refrakterlerin performansı ve servis ömrü, tesislerin verimliliğini ve işletme maliyetlerini doğrudan etkilemektedir (Fleuriault vd., 2018; Pitak, 1982).

Tarihsel süreçte ilk olarak doğal taşlar ve killerin kullanımıyla başlayan refrakter uygulamaları, günümüzde gelişmiş seramik esaslı, karbon katkılı ve nanoteknoloji ile güçlendirilmiş ileri malzemelere evrilmiştir (Lee vd., 2023). Geleneksel tuğla biçiminde üretilen refrakterlerin yerini giderek daha fazla monolitik sistemler almakta; püskürtme, dökme ve kendiliğinden akışkan özellikli refrakterler sayesinde saha uygulamalarında işçilik ve zaman açısından önemli kazanımlar sağlanmaktadır (Sato & Ishikawa, 2020; Tomšů & Palčo, 2017). Bu dönüşümle birlikte, üretim ve uygulama yöntemleri, malzemelerin fonksiyonel özellikleri ve performans beklentileri açısından da yeni araştırma alanları oluşmuştur (Tatič vd., 2022).

Refrakter malzemeler, ince seramik tozlarından sinterleme yoluyla elde edilir ve yalıtım sağlama amaçlı kullanılırlar, bu malzemeler, sahip oldukları yüksek sıcaklığa dirençli yapıları, mekanik dayanımları ve kimyasal kararlılıkları sayesinde çelik, çimento, cam, seramik ve enerji endüstrilerinde kritik öneme sahiptir (Biswas & Sarkar, 2020; Naher & Haseeb, 2006; Onaran, 2014). Geleneksel refrakterler, silika, alümina, magnezit ve karbon bazlı sistemlere dayansa da, modern sanayinin artan performans talepleri doğrultusunda nanoteknoloji, hibrit sistemler, akıllı sensör entegrasyonu ve sürdürülebilir üretim yöntemleri öne çıkmaktadır (Huang, 2017; Jastrzębska vd., 2025; Jastrzębska & Szczerba, 2024; Khoroshavin, 1994; Mena vd., 2023). Günümüzde refrakter malzemelerle ilgili en önemli tartışma konularından biri, malzeme ömrü ve sürdürülebilirlik ilişkisidir. Refrakterlerin görece kısa servis ömrü, hem ekonomik kayıplara hem de yüksek hammadde ve enerji tüketimine sebep olmaktadır. Bu nedenle refrakter malzemedeki bulunan kusurların hızlı ve tahribatsız yöntemlerle tespiti, bu malzemelerin performans ve ömür tahminleri üzerine yapılan çalışmalar önem kazanmıştır (Boccaccini vd., 2008; Cannio vd., 2014).

Refrakter üretiminde kullanılan hammaddelerin çıkarılması, işlenmesi ve yüksek sıcaklıkta sinterlenmesi, önemli ölçüde enerji tüketimine ve karbon emisyonuna neden olduğundan bu durum, refrakter sektörünü sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi ekseninde yeniden düşünmeye zorlamaktadır (An vd., 2018; Huarachi vd., 2020). Atıkların refrakter üretiminde kullanımı, geri dönüşüm stratejileri ve düşük karbonlu üretim teknolojileri, son yıllarda öne çıkan araştırma başlıkları arasında yer bulmaktadır (Muñoz vd., 2020). Bununla birlikte teknolojik gelişmeler, refrakter malzemelerin yüksek sıcaklıklara dayanıklılıklarının sunduğu avantajlarla beraber fonksiyonel özellikler kazanması için de araştırılmasını teşvik etmektedir; nano katkılarla güçlendirilmiş kompozit refrakterler, grafen ve karbon nanotüplerin kullanımıyla geliştirilen yüksek mukavemetli malzemeler, hafif ve düşük ısı iletkenliğine sahip yeni nesil ürünler, sektörün geleceğine yön vermektedir (Khalil vd., 2019; Liang vd., 2016; Liao vd., 2016).

Ölçülen ultrases geçiş hızı değerleri ve yüzey hasar analizine dayanan servis ömrü tahminleri (Boccaccini vd., 2008; Cannio vd., 2014), yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı ömür, özellik ya da performans tahmin yöntemleri (Buranich vd., 2020; Tian vd., 2025; Yu vd., 2024; J. Zhang vd., 2023), dijital ikiz uygulamaları, sonlu elemanlar yöntemi ve ileri sayısal modelleme teknikleri (Ba vd., 2025; Du vd., 2025), refrakterlerin üretiminde ya da kullanım ömürlerinin optimize edilmesinde yenilikçi fırsatlar sunmakta, enerji verimliliğine katkıda bulunmaktadır. Bu açıdan, refrakter malzemeler alanındaki güncel çalışmalar; sınıflandırma, özellikler, uygulamalar anlamında klasik bilgi birikiminin yanında nanoteknoloji, sürdürülebilirlik, karbon ayak izini azaltma ve dijitalleşme gibi yenilikçi yaklaşımlar barındırır (Ba vd., 2025; Badioli vd., 2025; Du vd., 2025; Khalil vd., 2019; Sako vd., 2024; Sawai vd., 2024).

Bu çalışmada, refrakterlerin sınıflandırılması, temel özellikleri, endüstriyel uygulamaları ile özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan refrakter katkıları incelenmiş, refrakter malzemeler ile ilgili olarak gelişmekte olan araştırma alanları araştırılmıştır.

2. REFRAKTER MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI VE TEMEL ÖZELLİKLERİ

Refrakter malzemeler, yüksek sıcaklıklarda dayanıklılık gösterebilen, fiziksel ve kimyasal kararlılığını koruyabilen özel mühendislik ürünleridir (Sako vd., 2024). Endüstriyel uygulamalarda refrakter seçimi, malzemenin kullanılacağı ortamın sıcaklığı, kimyasal atmosferi, maruz kalacağı mekanik yükler ve termal çevrimler gibi birçok farklı parametreye bağlıdır (Sawai vd., 2024). Bu nedenle refrakter malzemelerin sınıflandırılması ve özelliklerinin anlaşılması, uygun malzeme seçiminde kritik rol oynamaktadır.

2.1. Refrakter Malzemelerin Sınıflandırılması

Refrakterler, kimyasal bileşimlerine ya da üretim ve şekillendirme yöntemlerine göre fiziksel açıdan sınıflandırılabilirler (Sarkar, 2023). Kimyasal bileşimlerine göre refrakter malzemeler; asidik, bazik ve nötr refrakterler olmak üzere üç ana grupta incelenebilir (Kamara, 2025):

Asidik Refrakterler: Bu tür refrakterler, yüksek silika içeriğine sahip malzemelerdir (Bayoumi vd., 2022; Samad vd., 2021). Bu malzemeler, asidik cüruflara ve ortamlara karşı dirençli olmalarına rağmen bazik ortamlarda zayıf performans gösterirler (Kamara, 2025). Silis refrakterleri ve zirkon refrakterleri bu grubun en bilinen örnekleridir, asidik refrakterler cam fırınlarında, seramik pişirme fırınlarında, asidik cüruflarla temas eden bölgelerde kullanılabilirler (Khater vd., 2024; Sadik vd., 2014).

Bazik Refrakterler: Bu malzemeler, magnezit (MgO) veya dolomit (CaO–MgO) esaslıdır, bazik cüruflara dayanıklıdır, ancak asidik ortamlarda kolayca bozulabilirler (Bayoumi vd., 2022; Kamara, 2025; Lee vd., 2023; Mohammedihooyeh vd., 2020). Yüksek sıcaklıklarda özelliklerini koruma ve yüksek erime noktaları ile öne çıkarlar, bu özellikleriyle çelik endüstrisinde konverter ve pota astarlarında, çimento döner fırınlarında kullanılabilirler (Bayoumi vd., 2022; Lee vd., 2023).

Nötr Refrakterler: Nötr refrakter malzemeler, hem asidik hem de bazik ortamlara karşı direnç gösterebilirler; alümina (Al_2O_3), kromit (Cr_2O_3) ve karbon esaslı refrakterler bu grupta yer almaktadır (Khater vd., 2024). Çeşitli kimyasal koşullarda sergiledikleri dayanıklılıkları bu malzemeleri tercih edilir kılmakta, çok yönlü uygulamalarda yer edinmelerini sağlamaktadır. Metalürjik fırınlar ve yüksek aşındırıcı ortamlara sahip prosesler bu malzemelerin kullanıldığı yerlerden bazılarıdır (Kamara, 2025).

Fiziksel açıdan sınıflandırma yapılacak olursa, üretim ve şekillendirme yöntemlerine göre refrakterler iki ana kategoride ele alınabilir; bunlardan ilki tuğla tipi refrakterlerin de bu gruba dahil olduğu şekillendirilmiş refrakterlerdir (Lee vd., 2023; Tomšů & Palčo, 2017). Bunlar, döküm ya da basınç etkisi ile şekillendirilme yoluyla üretilir, daha sonra naklieleri sağlanır. Geleneksel olarak kalıplara dökülerek veya preslenerek üretilen refrakterler, standart boyut ve şekillerde piyasaya sunulurlar. Bu malzemelerin dayanıklılıkları yüksek olmasına rağmen montaj sırasında fazla işçilik gerektirmeleri dezavantaj yaratmaktadır, bu tip refrakterler klasik endüstriyel fırın duvarlarında, tünel fırınlarında, küçük ölçekli sistemlerde kullanılırlar (S. Li vd., 2024). Diğer tür refrakterler ise tuğla şeklinde değil, dökme veya püskürtme gibi yöntemlerle yerinde uygulanan monolitik refrakterlerdir (Deneen & Gross, 2010). Dökme refrakterler, püskürtme refrakterler, kendiliğinden akışkan dökümler, plastik refrakterler bu gruba dahil edilebilir (Lensing vd., 2025; Pileggi & Marques, 2003; Pivinskii vd., 2000; Sato & Ishikawa, 2020; W. Zhang vd., 2013). Daha az

derz, daha kısa montaj süresi, yüksek bütünlük gibi avantajlarıyla öne çıkan bu malzemeler, çimento döner fırınlarında, çelik potalarında, enerji santrallerinde kullanılmaktadır (Bayoumi vd., 2022; Sato & Ishikawa, 2020; Tomšů & Palčo, 2017).

2.2. Refrakter Malzemelerin Temel Özellikleri

Refrakter malzemelerden beklenen temel özellikler; rijitlik, genel olarak yüksek olan işlem sıcaklığında boyut, şekil, dayanım kararlılığı, ani sıcaklık değişimleri sonucu gerçekleşebilecek olan termal şoklara karşı direnç ve kimyasal etkilere karşı dayanıklılık olarak karşımıza çıkmaktadır (Gilchrist, 1977). Refrakter malzemelerin endüstride kullanılabilirliğini belirleyen temel özellikler arasında yüksek sıcaklıklara dayanıklılık, termal şok direnci, kimyasal stabilite, mekanik dayanım, gözeneklilik ve yoğunluk bulunur (Brochen vd., 2016; Köksal vd., 2003). Refrakterlerin ergime noktaları 1500 °C-2000 °C civarındadır, bu malzemelerin yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruması endüstriyel işlemlerde kritik öneme sahiptir (Silvestroni vd., 2017). Isıl şok direnci ya da termal şok direnci, malzemenin ani sıcaklık değişimlerinde çatlamadan veya parçalanmadan dayanabilme yeteneği olarak tanımlanabilir (Boccaccini vd., 2007). Isıl iletkenlikleri büyük ve ısıl genleşme katsayısı küçük olan malzemeler daha yüksek termal şok direncine sahiptir (Brochen vd., 2016; Nespor vd., 2022). Refrakterlerin, cüruf, gaz ve sıvı metaller gibi korozyon ortamlarında reaksiyona girmemesi gereklidir, kimyasal bileşimin seçimi, doğrudan refrakter ömrü üzerinde etkilidir (Andrejiova vd., 2025). Yüksek sıcaklıklarda refrakterlerin basma mukavemeti ve aşınma direnci önemlidir, özellikle metalürjik proseslerde erimiş metalin türbülansı ve mekanik aşındırıcı etkisi dikkate alınmalıdır (Fleuriault vd., 2018; Yılmaz, 2023). Refrakterlerin gözenek yapısı, malzemenin ısıl iletkenliğini, kimyasal etkilere karşı direncini ve mekanik özelliklerini etkilemektedir, düşük gözeneklilik ve düşük boşluk oranı, yüksek mekanik dayanım ve kimyasal direnç ile ilişkiliyken; yüksek gözeneklilik ve porozitenin fazla olması düşük ısı ve ses iletkenliği oluşturmakta, daha iyi yalıtım özellikleri sağlamaktadır (Salomão vd., 2021). Refrakter malzemeler genellikle gevrek davranış sergilerler (Nickel vd., 2010).

Refrakter seçiminde belirgin rol oynayan kritik parametreler arasında; çalışma sıcaklığı aralığı, malzemenin cüruf, gaz, buhar vb. temas halinde bulunacağı ortamın asidik, bazik ya da nötr olması gibi kimyasal koşulları, malzemenin darbe, titreşim, aşınma gibi hangi mekanik etkilere maruz kalacağı, ısıl çevrimlerin sayısı ile süresi, mikroyapısal özellikler, ekonomik ömür ve bakım kolaylığı bulunur; bu faktörlerle birlikte montaj ve bakım kalitesi, refrakterlerin performansını ve hizmet ömrünü de etkilemektedir (Prihodko vd., 2023; Sawai vd., 2024).

Refrakter malzemelerin karakterizasyonunda, optik mikroskopi (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM),

X-ışını kırınımı (XRD), X-ışını floresansı (XRF), Raman ve FTIR spektroskopisi gibi yöntemlerle inceleme yapılır (Apaydın & Kaya, 2017; Gilchrist, 1977; Lensing vd., 2025; Sallah vd., 2022). Böylece malzemenin mikroyapısal özellikleri belirlenir ve kimyasal bileşimi hakkında bilgi sahibi olunur. Bu testlerin yanı sıra, sıcaklık bağımlı mekanik deneylerle malzemenin mekanik özellikleri belirlenir (Yılmaz, 2023). Ayrıca, ısı şok testleriyle tekrarlanan ısıtma-soğutma çevrimlerinde malzemenin davranışı gözlemlenebilir ve bu deneylere ek olarak ısıl iletkenlik ölçümleri yapılabilir (Boccaccini vd., 2007; Gilchrist, 1977; Köksal vd., 2003; Yılmaz, 2023). Bu yöntemlerin kombinasyonunu, refrakter malzemenin performans ömrü tahmini açısından kritik öneme sahiptir (Boccaccini vd., 2008; Cannio vd., 2014).

3. REFRAKTER MALZEMELERİN UYGULAMA ALANLARI

Refrakter malzemeler, endüstriyel işlemlerde yüksek sıcaklıklara ve agresif kimyasal ortamlara dayanabilen özel mühendislik malzemeleridir (Andrejova vd., 2025; Kamara, 2025). Bunlar, çelik üretiminden cam ergitmeye, çimento fırınlarından enerji santrallerine kadar geniş bir uygulama alanına sahiptirler (Yılmaz, 2023). Geleneksel refrakterler, dayanıklılıkları ile öne çıksa da, günümüz sanayisinin sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve dijitalleşme hedefleri, yeni nesil refrakterlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Tatič vd., 2022).

Refrakter malzemeler, yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal ve boyutsal kararlılığı, mekanik performansları sayesinde birçok ağır sanayi dalında vazgeçilmez yapı elemanlarıdır (Kamara, 2025; Yılmaz, 2023). Ancak her endüstrinin ihtiyaç duyduğu çalışma koşulları (sıcaklık aralığı, kimyasal ortam, mekanik yükler) farklı olduğundan, refrakterlerin seçiminde ve performans ömürlerinde önemli farklılıklar ortaya çıkmaktadır (Yılmaz, 2023).

İnşaat sektöründe refrakter uygulamaları, yüksek sıcaklıklara, ani sıcaklık değişimlerine, kimyasal aşınmalara ve mekanik zorlanmalara dayanıklı malzemelerin kullanıldığı özel alanları kapsamaktadır. Refrakter malzemeler, genellikle 1000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yapısal bütünlüğünü koruyabilen seramik, oksit, karbür, nitrür veya silikat esaslı malzemelerdir (Kamara, 2025). Refrakterlerin en yaygın kullanıldığı alanlardan biri endüstriyel fırın ve ocak yapımıdır (Lee vd., 2023). Çimento üretiminde döner fırın astarlarında alümina, magnezit, spinel esaslı refrakterler kullanılmaktadır, tuğla fırınlarının zemin kubbe ve astarlarında da refrakter malzemelerden yararlanılır (Apaydın & Kaya, 2017; Arianpour, 2020; El-Amir vd., 2023; Ghifari & Mubarok, 2025; Seth vd., 2025; Tatič vd., 2022). Refrakter tuğlalar, seramik ve porselen fırınlarında yüksek sıcaklıklara ve ısı şoklara karşı dayanıklılıkları nedeniyle tercih edilmektedir (Ghifari & Mubarok, 2025; Seth vd., 2025). Yüksek sıcaklıkta ergiyen cüruf ve metale dayanıklı özel magnezit-karbon refrakterler, demir-çelik endüstrisinde yer bulmaktadır (J. Li vd.,

2021). Yüksek sıcaklık kanalları, baca ve şaft yapıları, kimyasal tesisler, enerji üretim sistemleri, yangın ve patlama olasılığının fazla olduğu çeşitli yapılar refrakterlerin kullanıldığı alanlardan bazılarıdır (Kamara, 2025). Baca iç yüzey kaplamalarında refrakter beton veya tuğlalar, asit gazlarına ve yüksek sıcaklığa karşı koruma sağlar (Bayoumi vd., 2022). Enerji santralleri, petrokimya tesisleri veya çimento fabrikalarında sıcak gaz taşıyan kanalların iç yüzeyinde refrakter kaplamalar bulunmaktadır (Briggs, 2005; Yılmaz, 2023). Zirkonya ya da silika esaslı, yüksek sıcaklık ve kimyasal korozyona dayanıklı refrakterler, reaktör kaplamalarının üretiminde kullanılır, kazan iç astarlarında termal genleşmeye karşı dayanıklı refrakter beton uygulamaları tercih edilir (Bayoumi vd., 2022; Ghifari & Mubarak, 2025). Yanma odaları ve ısı eşanjörlerinde sıcaklığa dayanıklı beton ya da püskürtme refrakterler uygulanmaktadır (Marques vd., 2004; Pileggi vd., 2002; Pileggi & Marques, 2003). Refrakterler yalıtım amaçlı da kullanılabilir (Sadık vd., 2014; Salomão vd., 2021). Egzoz ve ısı geri kazanım sistemlerinde, termal yalıtım ve aşınma direnci sağlama amacıyla refrakter kaplama kullanılır (Sadık vd., 2014). Isıl yalıtım sağlayan ateş tuğlaları, boşluklu ve hafif yapıları sayesinde ısı kaybını önlemektedir (Salomão vd., 2021). Seramik elyaf yalıtım battaniyeleri, refrakter harçlar ve izolasyon plakaları da yüksek sıcaklıklarda enerji verimliliği sağlamaktadır (Prihodko vd., 2023; Salomão vd., 2021).

Refrakter uygulamaları, inşaat sektörünün yüksek sıcaklık, yangın dayanımı ve enerji verimliliği gerektiren alt alanlarında kritik rol oynar. Yangın dayanımı yüksek yapılarda, beton veya çelik yüzeylerin üzerine refrakter sıvalar veya kaplamalar uygulanmaktadır. Yapısal elemanlarda koruyucu tabaka olarak uygulanan refrakterler; tüneller, enerji santralleri, petrol rafinerileri gibi yapılarda patlama ve yangına karşı koruma sağlamaktadır (Yılmaz, 2023). Bununla birlikte, yangın kapıları ve baca çevresi duvarlar yalıtım amacıyla refrakter panellerle güçlendirilebilmektedir (Bostanci & Bahtlı, 2025; Hussain vd., 2024; Krivenko vd., 2017).

Dökümü yapılabilen refrakter beton uygulamaları, çimento ve metalürji tesislerinde fırın tabanları, duvarları, bacalarda, petrokimya tesislerinde reaksiyon kapları ve ısıtıcı astarlarında kullanılabilir (Bayoumi vd., 2022; Yılmaz, 2023). Ekmek fırınları, döner ocaklar gibi küçük ve orta ölçekli sistemlerde, yerinde döküm refrakter betonlar uygulanabilir (Cichocki vd., 2023). Refrakter lif katkılı betonlarla, termal genleşme çatlakları azaltılarak mekanik dayanım iyileştirilebilmektedir (Nematzadeh & Baradaran-Nasiri, 2019). Daha yenilikçi bir yaklaşım olarak geopolimer esaslı refrakterler, düşük karbon emisyonu ve yüksek refrakter özellikler sunar; refrakter agregaların kullanıldığı geopolimerler, ısı yorulma direnci ve yüksek sıcaklıklara maruziyet sonrası dayanım koruma kabiliyetleriyle potansiyel bir refrakter kompozit olarak öne çıkmaktadır (Hussain vd., 2024; Mokhtari vd., 2025). Nano katkılı refrakter kaplamalar, termal şok dayanımını ve kimyasal ka-

rarlılığı artırırken üç boyutlu baskı teknolojisi ile refrakter yapı elemanları üretimi, üzerinde çalışılan ve özellikle endüstriyel fırın prototiplerinde uygulanarak gelişmekte olan bir alandır (Khalil vd., 2019; Liao vd., 2016; Zhuo vd., 2022).

Çelik endüstrisinde yüksek fırın astarlarında SiO_2 ve Al_2O_3 esaslı refrakterler kullanılmaktadır (Stjernberg vd., 2012). Konverterler ve elektrik ark ocaklarında daha çok MgO-C refrakterler tercih edilmektedir, sürekli döküm potaları ile tandişlerde ise yüksek Al_2O_3 ve zirkonya katkılı refrakterler öne çıkar (Yılmaz, 2023). Çelik üretimi sürecinde termal şoklar, çelik cürufu ile kimyasal etkileşim, karbon oksidasyonu gibi durumlar karşılaşılabilecek sorunlardan bazılarıdır, bu nedenle refrakter ömrünü uzatma amacıyla karbon katkıları, antioksidan ilaveler ve su soğutmalı tasarımlar uygulanmaktadır (de Aza vd., 2024; Kamara, 2025; Z. Li vd., 2023).

Cam endüstrisinde karşılaşılabilecek bir problem, alkali ve silikat buharlarının refrakterle reaksiyonudur (Velasquez vd., 2025). Bu durum sızıntı ve cam kirliliğine neden olarak cam kalitesini düşüreceğinden cam endüstrisinde yoğun zirkonya katkılı refrakterler tercih edilmektedir (El-Amir vd., 2023). Cam ergitme havuzlarında zirkonya esaslı refrakterler sıklıkla ön plana çıkarken çekme kanalları ve borularda yüksek alümina refrakterler kullanılabilmektedir (Velasquez vd., 2025).

Seramik pişirme fırınlarında refrakterler, yüksek sıcaklık altında boyutsal kararlılık göstermeleri ve tekrarlanan çevrimlere dayanabilmeleri açısından avantaj sağlamaktadır (Apaydın & Kaya, 2017; Yılmaz, 2023). Hafif refrakter tuğlalar ve ısı yalıtım refrakterleri, seramik endüstrisinde enerji verimliliği için önem kazanmakta olan uygulamalardır (Salomão vd., 2021).

Refrakterler, alüminyum ve demir dışı metal endüstrilerinde kullanılabilmektedir (Andrejiova vd., 2025; Yılmaz, 2023). Alüminyum üretiminde refrakterler, agresif elektrolitler ve erimiş tuzlarla etkileşime girdiğinden, bu alanda karbon bağlayıcı, az gözenekli refrakterler tercih edilmektedir (Andrejiova vd., 2025).

Günümüzde sürdürülebilir malzeme geliştirme çalışmaları; geri dönüştürülmüş refrakter atıkların yeniden kullanımı, enerji verimli izolasyon sistemleri ve geopolimer bazlı refrakter kompozitler üzerine yoğunlaşmaktadır (Bostanci & Bahtlı, 2025; El-Amir vd., 2023; Huarachi vd., 2020; Hussain vd., 2024; Muñoz vd., 2020).

4. REFRAKTER MALZEMELERDE ÖZELLİKLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ AMACIYLA KULLANILAN KATKILAR VE YÖNTEMLER

Refrakterler, geleneksel olarak silika, alümina, magnezit ve karbon esaslı bileşimlerden oluşur ancak yüksek sıcaklıklarda aşırı oksidasyon, aşınma, korozyon, termal şoklar, kimyasal ortamın etkisi gibi olumsuz durumlarda

bu malzemeler, özelliklerinin geliştirilebilmesi için birtakım katkı maddelerine ihtiyaç duymaktadır (Andrejiova vd., 2025; Nickel vd., 2010). Karbon, yüksek sıcaklıklarda hem ısı şoklarına dayanıklı hem de erimiş metallerle ıslanma eğilimi düşük bir elementtir, bu yüzden, özellikle çelik üretiminde pota ve konverter refrakterlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Liu vd., 2018; Yamaguchi, 2007). MgO-C refrakterler, çelik endüstrisinde en çok kullanılan karbon katkılı refrakterlerdir, bunlar, yüksek refrakterlik, termal şok direnci ve düşük ıslanabilirlik özellikleriyle bilinirler (Bai vd., 2022; Heo vd., 2012; Liu vd., 2018). Refrakter üretiminde grafit katkısı, ısı iletkenliği artırarak sıcaklık gradyanlarını düşürür, çatlak oluşumunu azaltır (de Aza vd., 2024). Yeni nesil karbon katkılı refrakterlerde, nano-grafen oksit ve karbon nanotüpler ile hibrit yapılar oluşturulmakta, oksidasyona karşı daha dirençli sistemler geliştirilmektedir (Z. Li vd., 2023; Liang vd., 2016). Nano-silika ve nano-alümina katkıları, partikül boyutunun küçüklüğü sayesinde malzeme yoğunluğunu artırmakta, gözenekliliği azaltmakta ve yüksek sıcaklık mukavemetini iyileştirmektedir (Nouri-Khezrabad vd., 2013). Karbon nanotüpler (CNT) ve grafen nanoparçacıkları, refrakterlerin mekanik dayanımını ve termal iletkenliğini düzenleyerek özellikle metalürjik uygulamalarda aşınma direncini artırmaktadır (Z. Li vd., 2023). Nano katkılarla, aynı zamanda refrakterlerin kendi kendini iyileştirme potansiyelinin geliştirilmesi de araştırılmaktadır (M. Zhang vd., 2022). Mikro çatlakların nano katkılarla doldurulması, malzeme ömrünü uzatmaktadır (Liao vd., 2016).

Gözenekli refrakterler, kontrollü porozite ile hafifletilmiş ve düşük ısı iletkenliğe sahip malzemeler olup hafiflik sağlamada avantaj getirirler, bu malzemeler, ısı yalıtım özelliklerinin iyi olmasıyla ön plana çıkmaktadır (Salomão vd., 2021). Yine yalıtım konusunda seramik fiberler, cam elyaf katkıları ve hafif kompozitler, özellikle izolasyon kaplamalarında yaygınlaşmakta, fiber esli refrakterler geliştirilmektedir (Nematzadeh & Baradaran-Nasiri, 2019).

Endüstride sadece yüksek sıcaklığa dayanıklı olmak yeterli değildir; aynı zamanda kimyasal direnç, mekanik aşınma ve termal performansın bir arada sağlanması gerekir (Wang vd., 2024). Bunun sağlanabilmesi için hibrit ve fonksiyonel tasarımlar öne çıkmaktadır. Zirkonya takviyeli refrakterler, yüksek sıcaklık stabilitesi ve korozyon direnci ile cam endüstrisinde tercih edilmektedir (Velasquez vd., 2025). Kompozit refrakterlerde, organik-inorganik hibrit yapılar sayesinde hem mekanik hem de termal özellikler optimize edilmektedir (Kessman vd., 2009; S. Li vd., 2024; Lisovsky, 2013; Yamaguchi, 2007). Akıllı refrakter uygulamalarında kullanım sırasında sıcaklık ve gerilme değişimlerini izleyebilen sensör entegrasyonlu sistemler araştırılmaktadır (Mena vd., 2023).

Refrakter malzemelerin üretimi genellikle yüksek sıcaklıkta sinterleme veya ergitme işlemleri gerektirir, bu durum hem yoğun enerji kullanımına

hem de sera gazı salımına neden olur (Amkpa vd., 2016). Enerji tasarrufu sağlayabilmek için uygulamada; çimento fırınları, enerji santralleri ve atık yakma tesislerinde yakıt tüketiminin azaltılması hedeflenmektedir. Sürdürülebilir üretim yöntemlerini oluşturabilmek adına düşük sıcaklıkta kürlenен bağlayıcılar, enerji verimli fırınlar ve biyoyakıt ya da hidrojen gibi alternatif yakıt kullanımı üzerine çalışmalar önem kazanmıştır (Badiie & Sasan, 2009; Cichocki vd., 2023). Sürdürülebilir üretimi sağlamak amacıyla, refrakterlerin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi, karbon ayak izlerinin ölçülmesi ve yaşam döngüsü analizlerinin gerçekleştirilmesi üzerine çalışmalar yürütülmektedir (Badioli vd., 2025; Mottram vd., 2023).

Geleneksel refrakterlerde kullanılan yüksek kireçli bağlayıcılar, yüksek sıcaklıkta sinterleme sırasında önemli ölçüde enerji tüketir (Amkpa vd., 2016). Bunu azaltabilmek için günümüzde daha çevreci ve düşük sıcaklıkta kürlenен bağlayıcı sistemler geliştirilmektedir, bu anlamda sol-jel bağlayıcılar, daha düşük sıcaklıklarda yüksek yoğunluk ve dayanım sağlar (Badiie & Sasan, 2009; Cichocki vd., 2023; Kessman vd., 2009). Yine karbondioksit emisyonunu azaltma hedefiyle refrakter sistemlerde alternatif bağlayıcı olarak alkali ile aktive edilmiş refrakter bağlayıcılar kullanılabilmektedir (Horvat & Ducman, 2020; Krivenko vd., 2017).

Endüstriyel yan ürünlerin refrakter üretiminde değerlendirilmesi, hammadde tüketimini azaltmaya katkı sağlar ve çevresel anlamda fayda oluşturur. Yüksek CaO ve MgO içeriğiyle bazik refrakterlerde çelik cürufu, yüksek Al_2O_3 içeriğiyle alümina esaslı refrakterlerde boksit atıkları, silika ve alümina içeriğiyle ucuz bir endüstriyel yan ürün olan uçucu kül, ince öğütülerek bağlayıcı fazın iyileştirilmesinde fayda sağlayabilen seramik ve cam atıkları, atık bazlı refrakterlerin üretiminde potansiyel olarak kullanılabilecek malzemelerdendir (El-Amir vd., 2023).

Yeni bir araştırma alanı olarak kendi kendini onaran refrakterlerde, çatlak oluşumunda otomatik iyileşme mekanizmalarının geliştirilmesi üzerine çalışılmaktadır (Paladugu vd., 2022; Sako vd., 2024; Yamaguchi, 2007; M. Zhang vd., 2022). Sıfır atık ve düşük karbon ayak izine sahip üretim yöntemleri ile yeşil refrakterlerin üretimi, yüksek radyasyon ve ekstrem sıcaklıklara dayanıklı yeni refrakter sistemlerinin geliştirilmesi, refrakter yüzeyinde kimyasal korozyona dayanıklı ince film kaplamaların uygulanmasıyla akıllı yüzey kaplamaları oluşturulması gibi konular bu alanda araştırmaya açık alanlardır (Fomenko vd., 2022; Shapagina & Dushik, 2024). Üretim sürecinde atmosfere salınan karbondioksitin refrakter yapısına bağlanması üzerine de araştırmalar yürütülmektedir (Capelo-Avilés vd., 2024; DiGiovanni vd., 2024; Hamedi vd., 2025; Ndlovu vd., 2025). Pirinç kabuğu külü, lignin ve odun türevleri gibi biyolojik kökenli atıkların refrakter matrislerde kullanımı, çevreci malzeme geliştirme alanında öne çıkmaktadır (Borregaard, 2025; Kerber vd., 2024; Yoon vd., 2025). Ayrıca refrakter üretiminde elektrikli fırınlar, mikro-

dalga sinterleme ve plazma teknolojileri sayesinde daha düşük enerji tüketimi hedeflenmektedir (Mondal vd., 2019; Mukherjee & Mondal, 2024).

Refrakterlerin hizmet ömrünü uzatmak amacıyla yüzey kaplamaları giderek daha fazla uygulanmaktadır (Shapagina & Dushik, 2024). Plazma püskürtme kaplamalar, yüksek sıcaklık korozyonuna karşı bariyer etkisi oluşturur (Bolelli vd., 2006; Ramaswamy vd., 2020). Nano seramik kaplamalar, çatlak ilerlemesini yavaşlatır ve kimyasal direnci artırır (Dahotre vd., 2001; Sanjai vd., 2019). Yenilikçi refrakterler anlamında yüksek sıcaklıkta oksitlenerek çatlakları kapatan sistemler geliştirilmekte, kendini iyileştiren kaplamalar araştırılmaktadır (Sako vd., 2024; M. Zhang vd., 2022).

Kullanım ömrü sona eren refrakterler genellikle endüstriyel atık olarak bertaraf edilmektedir. Ancak geri dönüşüm stratejileri sayesinde bu malzemeler yeniden hammadde kaynağı olarak değerlendirilebilir (Muñoz vd., 2020). Kullanılmış refrakterlerin öğütülerek agrega veya dolgu malzemesi olarak yeniden kullanılması mümkündür (Auliya vd., 2025). Asit veya alkali çözeltiler ile bileşenlerin geri kazanılması da geri dönüşüm anlamında fayda sağlayacaktır (Furlani vd., 2021; Hao vd., 2024; Hou vd., 2021; Ourgessa vd., 2024). Endüstri uygulamalarında kullanılan refrakterlerin geri dönüşüm ile tekrar üretime kazandırılması ekonomik açıdan katma değer yaratacaktır (Hao vd., 2024; Muñoz vd., 2020).

5. SONUÇ

Refrakter üretim sürecinde sürdürülebilir ve çevre dostu malzeme tasarımı, hem endüstriyel verimlilik hem de çevresel sorumluluk açısından öncelikli hale gelmiştir. Refrakter teknolojilerinin geleceği, kendi kendini iyileştirebilen ve daha dayanıklı malzemelerin geliştirilmesine ihtiyaç duymakta, aynı zamanda dijitalleşme, sürdürülebilirlik ve akıllı malzeme kavramlarının bir araya getirilmesine dayanmaktadır. Refrakterlerin sürdürülebilir üretimi, yalnızca çevresel etkileri azaltmayı değil, aynı zamanda ekonomik ve operasyonel faydaları da beraberinde getirir. Daha uzun ömürlü malzemeler, bakım maliyetlerini azaltır, bununla birlikte geri dönüştürülebilir refrakterler hammadde ithalatını ve lojistik maliyetleri düşürür. Bu açıdan değerlendirme yapıldığında sürdürülebilirlik, refrakter sektöründe bir tercih değil, zorunlu bir dönüşüm olarak karşımıza çıkmaktadır. İlerleyen dönemlerde atık esaslı hammaddelerin daha yaygın kullanımı, düşük karbonlu üretim teknolojilerinin yaygınlaştırılması ve geri dönüşüm altyapısının güçlendirilmesi, sektörün temel odak noktaları olacaktır.

KAYNAKÇA

- Amkpa, J. A., Badarulzaman, N. A., & Aramjat, A. B. (2016). Influence of Sintering Temperatures on Physico-Mechanical Properties and Microstructure of Refractory Fireclay Bricks. *International Journal of Engineering and Technology*, 8(6), 2588–2593.
- <https://doi.org/10.21817/ijet/2016/v8i6/160806214>
- An, J., Li, Y., & Middleton, R. S. (2018). Reducing energy consumption and carbon emissions of magnesite refractory products: A life-cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 182(1 May 2018), 363–371.
- <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.266>
- Andrejiova, M., Markulik, Š., Pinosova, M., & Šolc, M. (2025). Comprehensive Quality Assessment of Refractory Materials Used in Aluminum Production. *Materials*, 18(17), 1–25.
- <https://doi.org/10.3390/ma18173957>
- Apaydın, F., & Kaya, K. (2017). Comparison of properties of basic refractory bricks which use in rotary kiln of cement industry. *Sakarya University Journal of Science*, 21(5), 1088–1094.
- <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.290699>
- Arianpour, A. Ç. (2020). Yerli Spinel Kullanılarak Üretilen Magnezya -Spinel Refrakterlerin Mekanik Özelliklerinin ve Termal Şok Davranışlarının İncelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 12(2), 624–630.
- <https://doi.org/10.29137/umagd.7052236>
- Auliya, N. H., Caronge, M. A., & Tjaronge, M. W. (2025). Compressive strength and sustainability indicators of concrete manufactured with recycled refractory brick furnace waste. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, 101177.
- <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101177>
- Ba, L., Tangour, F., El Abbassi, I., & Absi, R. (2025). Analysis of Digital Twin Applications in Energy Efficiency: A Systematic Review. *Sustainability (Switzerland)*, 17(8).
- <https://doi.org/10.3390/su17083560>
- Badiee, S. H., & Sasan, O. (2009). Non-cement refractory castables containing nano-silica: Performance, microstructure, properties. *Ceramics - Silikat*, 53(4), 297–302.
- Badioli, S., Jubayed, M., Dargaud, M., Siebring, R., & Léonard, A. (2025). Environmental performance of refractories: A state-of-the-art review on current methodological practices and future directions. *Environmental and Sustainability Indicators*, 27(February).
- <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100868>

- Bai, R. qiang, Liu, S. yang, Mao, F. xiong, Zhang, Y. yuan, Yang, X., & He, Z. jun. (2022). Wetting and corrosion behavior between magnesia-carbon refractory and converter slags with different MgO contents. *Journal of Iron and Steel Research International*, 29(7), 1073–1079.
<https://doi.org/10.1007/s42243-021-00695-y>
- Bayoumi, I. M. I., Ewais, E. M. M., & El-Amir, A. A. M. (2022). Rheology of refractory concrete: An article review. *Boletin de la Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio*, 61(5), 453–469.
<https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2021.03.003>
- Biswas, S., & Sarkar, D. (2020). *Refractories for Iron and Steel Plant BT - Introduction to Refractories for Iron- and Steelmaking* (S. Biswas & D. Sarkar (ed.); ss. 1–97). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-43807-4_1
- Boccaccini, D. N., Cannio, M., Volkov-Husoviæ, T. D., Kamseu, E., Romagnoli, M., Veronesi, P., Leonelli, C., Dlouhy, I., & Boccaccini, A. R. (2008). Service life prediction for refractory materials. *Journal of Materials Science*, 43(12), 4079–4090.
<https://doi.org/10.1007/s10853-007-2315-1>
- Boccaccini, D. N., Romagnoli, M., Kamseu, E., Veronesi, P., Leonelli, C., & Pellacani, G. C. (2007). Determination of thermal shock resistance in refractory materials by ultrasonic pulse velocity measurement. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(2), 1859–1863.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.070>
- Bolelli, G., Cannillo, V., Lugli, C., Lusvarghi, L., & Manfredini, T. (2006). Plasma-sprayed graded ceramic coatings on refractory materials for improved chemical resistance. *Journal of the European Ceramic Society*, 26(13), 2561–2579.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.07.066>
- Borregaard. (2025). *Sustainable Binders for Refractories*. [https://info.borregaard.com/hubfs/BioKeram/New designs/Refractories - case study.pdf](https://info.borregaard.com/hubfs/BioKeram/New%20designs/Refractories%20-%20case%20study.pdf)
- Bostanci, V. M., & Bahtlı, T. (2025). Investigation of the effects of precision-casting waste sands on the thermal shock resistance properties of fire clay refractory materials. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 31(5), 734–743.
<https://doi.org/10.5505/pajes.2024.82496>
- Briggs, J. (2005). The Refractories Industry - A Review. *Materials Technology*, 20(4), 225–232.
<https://doi.org/10.1080/10667857.2005.11753145>
- Brochen, E., Clasen, S., Dahlem, E., & Dannert, C. (2016). Determination of the Thermal Shock Resistance of Refractories. *Technology Trends-refractories WORLDFORUM*, 8(January 2016), 79–86.

- Buranich, V., Rogoz, V., Postolnyi, B., & Pogrebnjak, A. (2020). Predicting the Properties of the Refractory High-Entropy Alloys for Additive Manufacturing-Based Fabrication and Mechatronic Applications. *Proceedings of the 2020 IEEE 10th International Conference on "Nanomaterials: Applications and Properties", NAP 2020*, 9–13.
<https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309720>
- Cannio, M., Boccaccini, D. N., & Boccaccini, A. R. (2014). Methods for Service Life Prediction in Refractory Materials. İçinde R. B. Hetnarski (Ed.), *Encyclopedia of Thermal Stresses* (ss. 3008–3018). Springer Netherlands.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-2739-7_65
- Capelo-Avilés, S., Tomazini de Oliveira, R., Gallo Stampino, I. I., Gispert-Guirado, F., Casals-Terré, A., Giancola, S., & Galán-Mascarós, J. R. (2024). A thorough assessment of mineral carbonation of steel slag and refractory waste. *Journal of CO2 Utilization*, 82, 102770.
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102770>
- Cichocki, M., Angelkort, J., Fröse, N., Higgins, S., Knoll, M., & Mix, M. (2023). *The Binding of non-cement refractory castables using the technology of in-situ sol-gel formation*.
https://www.intocast.de/wp-content/uploads/2024/02/Binding_of_Non-Cement_Refractory_Castables_2023.pdf
- Dahotre, N. B., Kadolkar, P., & Shah, S. (2001). Refractory ceramic coatings: processes, systems and wettability/adhesion. *Surface and Interface Analysis*, 31(7), 659–672.
<https://doi.org/10.1002/sia.1092>
- de Aza, A. H., Acosta, P., Quirós, E., Almagro, J. F., & Baudín, C. (2024). Tensile strength of MgO-graphite based refractories: Effect of anisotropy and specimen size. *Ceramics International*, 50(24, Part C), 56099–56108.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.036>
- Deneen, M. A., & Gross, A. C. (2010). Refractory materials: The global market, the global industry. *Business Economics*, 45(4), 288–295.
<https://doi.org/10.1057/be.2010.30>
- DiGiovanni, C., Hisseine, O. A., & Awolayo, A. N. (2024). Carbon dioxide sequestration through steel slag carbonation: Review of mechanisms, process parameters, and cleaner upcycling pathways. *Journal of CO2 Utilization*, 81(November 2023), 102736.
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102736>
- Du, J., Xie, D., Sun, H., & Zhang, P. (2025). Establishment and control method of digital twin model for refractory alloy smelting and sintering process. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, 12(April), 100213.

<https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2025.100213>

El-Amir, A. A. M., Bayoumi, I. M. I., El-korashy, S. A., Shalaby, N. H., & Ewais, E. M. M. (2023). Industrial Waste-Derived Alumina-Zirconia-Silica Low Cement Castable. *Refractories and Industrial Ceramics*, 63(5), 488–499.

<https://doi.org/10.1007/s11148-023-00755-8>

Fleuriaux, C., Grogan, J., & White, J. (2018). Refractory Materials for Metallurgical Uses. *JOM*, 70(11), 2420–2421.

<https://doi.org/10.1007/s11837-018-3096-5>

Fomenko, S., Tolendiuly, S., Turan, A., & Akishev, A. (2022). Production of Refractory Bricks through Combustion Synthesis from Metallurgical Wastes and the Thermo-Physical Properties of the Products. *Sustainability (Switzerland)*, 14(18).

<https://doi.org/10.3390/su141811439>

Furlani, E., Rondinella, A., Aneggi, E., & Maschio, S. (2021). Possible Recycling of End-of-Life Dolomite Refractories by the Production of Geopolymer-Based Composites: Experimental Investigation. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 7(3), 908–919.

<https://doi.org/10.1007/s40831-021-00383-x>

Ghifari, F. R., & Mubarak, F. (2025). Magnesia Refractory Bricks for Cement Rotary Kiln: A Systematic Review. *Asian Journal of Engineering, Social and Health*, 4(3), 579–592.

<https://doi.org/10.46799/ajesh.v4i3.578>

Gilchrist, J. D. (1977). Properties and Testing. İçinde *Fuels, Furnaces and Refractories* (ss. 240–252). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-020430-7.50025-6>

Hamed, H., Gonzales-Calienes, G., & Shadbahr, J. (2025). Ex Situ Carbon Mineralization for CO₂ Capture Using Industrial Alkaline Wastes—Optimization and Future Prospects: A Review. *Clean Technologies*, 7(2), 1–37.

<https://doi.org/10.3390/cleantechnol7020044>

Hao, C., Yu, L., Chen, X., Chen, Y., Li, C., Qi, P., Sun, J., & Zhou, H. (2024). Research on the development of recycling technology for magnesium refractory materials. *Materials Research Express*, 11(11), 115504.

<https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad8f18>

Heo, S. H., Lee, K., & Chung, Y. (2012). Reactive wetting phenomena of MgO–C refractories in contact with CaO–SiO₂ slag. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(3), s870–s875.

[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61818-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61818-4)

Horvat, B., & Ducman, V. (2020). Influence of particle size on compressive strength of

- alkali activated refractory materials. *Materials*, 13(10).
<https://doi.org/10.3390/ma13102227>
- Hou, W., Li, H., Li, M., & Cheng, B. (2021). Recycling of spent refractory materials to produce Al-Si master alloys via the aluminum reduction cell. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125162.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125162>
- Huang, Q. (2017). *Dynamic Model and Estimator Development for a Smart Refractory Brick with Embedded Wireless Sensors for Gasifier Applications Dynamic Model and Estimator Development for a Smart Refractory Brick with Embedded Wireless Sensors for Gasifier Applications Dep* [West Virginia University].
<https://researchrepository.wvu.edu/etd/5831>
- Huarachi, D. A. R., Gonçalves, G., de Francisco, A. C., Canteri, M. H. G., & Piekarski, C. M. (2020). Life cycle assessment of traditional and alternative bricks: A review. *Environmental Impact Assessment Review*, 80(November 2019), 106335.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106335>
- Hussain, S., Amritphale, S., Matthews, J., Paul, N., Matthews, E., & Edwards, R. (2024). Advanced Solid Geopolymer Formulations for Refractory Applications. *Materials*, 17(6).
<https://doi.org/10.3390/ma17061386>
- Jastrzębska, I., Ludwig, M., & Przysaś, J. (2025). Cr-free refractories for copper metallurgy: Raw materials and FactSage thermodynamic simulations. *Ceramics International*, 51(3), 3778–3791.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.11.353>
- Jastrzębska, I., & Szczerba, J. (2024). Design, Manufacturing and Properties of Refractory Materials. *Materials*, 17(7), 17–20.
<https://doi.org/10.3390/ma17071673>
- Kamara, S. (2025). A Summarized Review of Refractory Materials and Their Chemical Components. *American Journal of Chemistry and Pharmacy*, 4(1), 37–47.
<https://doi.org/10.54536/ajcp.v4i1.5789>
- Kerber, F., Zienert, T., Neumann, M., Malczyk, P., Schemmel, T., Jansen, H., & Aneziris, C. G. (2024). Insulating refractories based on rice husk ashes functionalized by flame-sprayed alumina coatings for steel ingot casting. *Journal of the European Ceramic Society*, 44(12), 7296–7309.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.04.075>
- Kessman, A. J., Ramji, K., Morris, N. J., & Cairns, D. R. (2009). Zirconia sol-gel coatings on alumina-silica refractory material for improved corrosion resistance. *Surface and Coatings Technology*, 204(4), 477–483.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.08.024>
- Khalil, N. M., Algama, Y., Saleem, Q. M., Aly, K. A., & Wahsh, M. M. S. (2019).

Improved refractory aluminosilicate bricks through nano zirconia additions. *International Journal of Thin Film Science and Technology*, 8(3), 139–145.
<https://doi.org/10.18576/ijtfst/080306>

Khater, G. A., Romero, M., López-Delgado, A., Padilla, I., El-Kheshen, A. A., Farag, M. M., Elmaghraby, M. S., & Nasralla, N. H. S. (2024). Synthesis and characterization of ceramic refractories based on industrial wastes. *Scientific Reports*, 14(1), 1–17.

<https://doi.org/10.1038/s41598-024-74997-y>

Khoroshavin, L. B. (1994). Refractories of a new generation. *Refractories* 35(8), 243–245.

Köksal, N. S., Ünlü, B. S., & Meriç, C. (2003). Alümina Esaslı Refrakter Tuğlaların Isıl Şok Davranışlarının İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 147–151.

Krivenko, P., Petropavlovsky, O., & Vozniuk, H. (2017). Development of mixture design of heat resistant alkali-activated aluminosilicate binder-based adhesives. *Construction and Building Materials*, 149, 248–256.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.138>

Lee, G., Aripova, M., & Babakhanova, Z. (2023). *Basic Refractories in the Cement Processes*.

Lensing, M., Sato, M., McMurchie, E., Dreyer, C. B., & Brennecke, G. L. (2025). Corrosion and wetting behavior of monolithic refractory ceramics under molten lunar regolith electrolysis conditions. *Acta Astronautica*, 236(April), 128–136.

<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.06.009>

Li, J., Yilmaz, E., & Cao, S. (2021). Influence of industrial solid waste as filling material on mechanical and microstructural characteristics of cementitious backfills. *Construction and Building Materials*, 299(July), 124288.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124288>

Li, S., Ding, Y., Wang, T., Huang, Z., Chen, R., & Zhang, H. (2024). Improving the service performances of carbon refractory brick by using derivatives of industrial waste-sucrose wastewater. *Construction and Building Materials*, 452, 138939.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138939>

Li, Z., Wang, H., Ding, F., & Tang, H. (2023). Prolonging Campaign Life of Blast Furnace Trough by Water Cooling. *Çinde Materials* (C. 16, Sayı 3).

<https://doi.org/10.3390/ma16030891>

Liang, F., Li, N., Liu, B., & He, Z. (2016). Processing and Characterization of Multi-Walled Carbon Nanotubes Containing Alumina-Carbon Refractories Prepared by Nanocomposite Powder Technology. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 47(3), 1661–1668.

<https://doi.org/10.1007/s11663-016-0647-4>

Liao, N., Li, Y., Jin, S., Sang, S., & Harmuth, H. (2016). Enhanced mechanical performance of Al₂O₃-C refractories with nano carbon black and in-situ formed multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs). *Journal of the European Ceramic Society*, 36(3), 867–874.

<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.10.003>

Lisovsky, A. F. (2013). On the formation of a refractory skeleton in composite materials. a review. *Journal of Superhard Materials*, 35(2), 65–76.

<https://doi.org/10.3103/S1063457613020019>

Liu, Z., Yu, J., Yang, X., Jin, E., & Yuan, L. (2018). Oxidation resistance and wetting behavior of MgO-C refractories: Effect of carbon content. *Materials*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/ma11060883>

Marques, Y. A., Vasques Filho, D., Pileggi, R. G., & Pandolfelli, V. C. (2004). Influência dos aditivos sobre a permeabilidade e a velocidade de secagem de concretos refratários aplicados por projeção. *Cerâmica*, 50(313), 7–11.

<https://doi.org/10.1590/s0366-69132004000100002>

Mena, J., Sabolsky, E., Sierros, K., Sabolsky, K., Jones, M., Stepp, C., Winch, N., & Raughley, M. (2023). Smart Refractory Sensors Development for Corrosion and Erosion Monitoring in High Temperature Systems. *ECS Meeting Abstracts*, MA2023-01(18), 1475.

<https://doi.org/10.1149/MA2023-01181475mtgabs>

Mohammadihooyeh, M., Karamian, E., & Emadi, R. (2020). Effect of magnesium-aluminate spinel nano-particles on microstructure and properties behaviors of doloma-containing refractories. *Ceramics International*, 46(2), 1662–1667. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.138>

Mokhtari, P., Ozer, A., Samuel, D. M., & Kriven, W. M. (2025). Irreversible, in situ, self-healing and self-glazing of geopolymers. *Ceramics International*, 51(1), 25–42. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.291>

Mondal, M. K., Bose, B. P., & Bansal, P. (2019). Recycling waste thermoplastic for energy efficient construction materials: An experimental investigation. *Journal of Environmental Management*, 240, 119–125.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.016>

Mottram, R. S., Steele, T., Williamson, A., Amin, B. K., & Cantone, R. (2023). Insulating refractories as an enabler to carbon sustainability, demonstrated through life cycle assessment. *Morgan Advanced Materials*, 3 July 2023, 614–617.

Mukherjee, S., & Mondal, P. (2024). A Brief View on Refractories for Electric Furnace. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 06, 5127–5136.

<https://doi.org/10.56726/irjmets59428>

Muñoz, I., Soto, A., Maza, D., & Bayón, F. (2020). Life cycle assessment of refractory

waste management in a Spanish steel works. *Waste Management*, 111, 1–9.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.023>

Naher, S., & Haseeb, A. S. M. A. (2006). A technical note on the production of zirconia and zircon brick from locally available zircon in Bangladesh. *Journal of Materials Processing Technology*, 172(3), 388–393.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.10.013>

Ndlovu, P., Chabalala, M. B., Rampou, M., Khumalo, S. P. G., Fashu, S., & Hungwe, D. (2025). Carbon dioxide utilization in mineral processing. *Journal of CO2 Utilization*, 94(August 2024), 103063.

<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2025.103063>

Nematzadeh, M., & Baradaran-Nasiri, A. (2019). Mechanical performance of fiber-reinforced recycled refractory brick concrete exposed to elevated temperatures. *Computers and Concrete, An International Journal*, 24(1), 19–35.

Nespor, B., Chromkova, I., Szklorzova, H., Prachar, V., Svitak, O., Stanek, L., & Nejedlik, M. (2022). A new approach for the determination of thermal shock resistance of refractories. *Journal of Physics: Conference Series*, 2341(1).

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2341/1/012006>

Nickel, K. G., Quirmbach, P., & Pötschke, J. (2010). High temperature corrosion of ceramics and refractory materials. *Shreir's Corrosion*, December 2010, 668–690.

<https://doi.org/10.1016/B978-044452787-5.00079-2>

Nouri-Khezrabad, M., Brailio, M. A. L., Pandolfelli, V. C., Golestani-Fard, F., & Rezaie, H. R. (2013). Nano-bonded refractory castables. *Ceramics International*, 39(4), 3479–3497.

<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.11.028>

Onaran, K. (2014). *Malzeme Bilimi* (13. Baskı). Bilim Teknik Yayınevi.

Ourgessa, A. W., Kraxner, J., Elsayed, H., Galusek, D., & Bernardo, E. (2024). Sustainable construction materials from alkali-activated waste fiberglass and waste refractory. *Open Ceramics*, 20(September).

<https://doi.org/10.1016/j.oceram.2024.100678>

Paladugu, S. R. M., Sreekanth, P. S. R., Sahu, S. K., Naresh, K., Karthick, S. A., Venkateshwaran, N., Ramoni, M., Mensah, R. A., Das, O., & Shanmugam, R. (2022). A Comprehensive Review of Self-Healing Polymer, Metal, and Ceramic Matrix Composites and Their Modeling Aspects for Aerospace Applications. *Materials*, 15(23).

<https://doi.org/10.3390/ma15238521>

Pileggi, R. G., & Marques, Y. (2003). Shotcrete performance of refractory castables. *Refract. Appl.*, 8(3), 15–20.

http://www.ranews.info/feat_art/2003/famj03.pdf

- Pileggi, R. G., Marques, Y. A., Vasques Filho, D., Studart, A. R., & Pandolfelli, V. C. (2002). Wet-shotcrete for refractory castables. *American Ceramic Society Bulletin*, 81(10), 51–56.
- Pitak, N. V. (1982). Quality and economy of refractories. *Refractories*, 23(July 1982), 335–330.
<https://doi.org/10.1007/BF01386540>
- Pivinskii, Y. E., Doroganov, V. A., & Doroganov, E. A. (2000). Refractory plastic mixtures based on highly concentrated ceramic binding suspensions (HCBS). 1. Structural and mechanical properties of suspensions (pastes) of refractory clays. *Refractories and Industrial Ceramics*, 41(3–4), 125–130.
<https://doi.org/10.1007/BF02693769>
- Prikhodko, E., Nikiforov, A., Kinzhbekova, A., Paramonov, A., Aripova, N., & Karmanov, A. (2023). Analysis of the Effect of Temperature on the Ultimate Strength of Refractory Materials. *Energies*, 16(18).
<https://doi.org/10.3390/en16186732>
- Ramaswamy, P., Tilleti, P., Pinto, R., Ranjith, S., & Benjamin, J. (2020). Plasma Sprayed Refractory Coatings from Aluminium Dross. *Materials Today: Proceedings*, 22, 1285–1294.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.421>
- Sadik, C., El Amrani, I.-E., & Albizane, A. (2014). Recent advances in silica-alumina refractory: A review. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2(2), 83–96.
<https://doi.org/10.1016/j.jascer.2014.03.001>
- Sako, E. Y., Orsolini, H. D., Carreri, F. C., Galesi, D. F., Silva, B. M. G. da, Hespanhol, D. C. F., & Alves, W. (2024). Self-Healing Microstructure: the Utmost Refractory Toughness Mechanism. *52º Seminário de Redução de Minérios e Matérias-Primas*, 375–383.
<https://doi.org/10.5151/2594-357X-41118>
- Sallah, E., Al-Shatty, W., Pleydell-Pearce, C., & London, A. J. (2022). Distinguishing of carbons and oxidation behaviour (Part 1): Exploring model-free kinetics and RAMAN spectroscopy as a synergistic approach for evaluating carbon-bonded-refractories. *Carbon Trends*, 8, 100174.
<https://doi.org/10.1016/j.cartre.2022.100174>
- Salomão, R., Oliveira, K. S., Fernandes, L., Tiba, P., & Prado, U. S. (2021). Porous Refractory Ceramics for High-Temperature Thermal Insulation - Part 1: The Science Behind Energy Saving. *InterCeram: International Ceramic Review*, 70(3), 38–45.
<https://doi.org/10.1007/s42411-021-0460-1>
- Samad, A., Baidya, S., Akhtar, U. S., Ahmed, K. S., Roy, S. C., & Islam, S. (2021). Manufacture of Refractory Brick From Locally Available Red Clay Blended With White Portland Cement and Its Performance Evaluation. *International Journal of GEOMATE*, 20(80), 105–112.

<https://doi.org/10.21660/2021.80.j2033>

Sanjai, S. G., Pinto, R., & Ramaswamy, P. (2019). Plasma sprayed nano refractory coatings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 577(1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/577/1/012100>

Sarkar, R. (2023). *Refractory Technology: Fundamentals and Applications* (2nd Editio). CRC Press.

<https://doi.org/10.1201/9781003227854>

Sato, M., & Ishikawa, A. (2020). Construction Technology of Monolithic Refractories. *Nippon Steel Technical Report*, 125, 74–79.

Sawai, N. M., Yadav, C., Mankar, A. R., Bagade, A. A., & Nandkishor Chopkar, Y. (2024). Improvement in the Life of Refractory Material Applicable with Technical Aspects. *Journal of Physics: Conference Series*, 2818(1).

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2818/1/012033>

Seth, S., Bawa, M., Tokan, A., & Jatau, J. (2025). Production and Characterisation of Refractory Bricks for Cement Kiln Burning Zone Application. *Industrial Engineering*, 9(1), 20–35.

<https://doi.org/10.11648/j.ie.20250901.13>

Shapagina, N. A., & Dushik, V. V. (2024). Coatings Based on Refractory Materials for Corrosion and Wear Applications. *Materials*, 17(23).

<https://doi.org/10.3390/ma17235936>

Silvestroni, L., Kleebe, H.-J., Fahrenholtz, W. G., & Watts, J. (2017). Super-strong materials for temperatures exceeding 2000 °C. *Scientific Reports*, 7, 40730.

<https://doi.org/10.1038/srep40730>

Stjernberg, J., Ion, J. C., Antti, M.-L., Nordin, L.-O., Lindblom, B., & Odén, M. (2012). Extended studies of degradation mechanisms in the refractory lining of a rotary kiln for iron ore pellet production. *Journal of the European Ceramic Society*, 32(8), 1519–1528.

<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.01.012>

Tatič, M., Lukáč, L., & Kizek, J. (2022). New Generation of Refractories for Rotary Cement Kiln. *Advances in Thermal Processes and Energy Transformation*, 5(4), 69–77.

<https://doi.org/10.54570/atpet2022/05/04/0069>

Tian, G., Zhao, P., Wang, Y., Zhang, H., Xing, L., & Cheng, X. (2025). Research on Performance Prediction Method of Refractory High-Entropy Alloy Based on Ensemble Learning. *Metals*, 15(4).

<https://doi.org/10.3390/met15040371>

Tomšů, F., & Palčo, S. (2017). Refractory Monolithics versus Shaped Refractory Products. *Interceram - International Ceramic Review*, 66(1), 20–23.

<https://doi.org/10.1007/BF03401197>

- Turfanda, M., Cengiz, U., & Bilgiç, M. (2021). Magnezya Spinel Kompozit Refrakterlerin Termomekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Bilecik Demir Çelik A.Ş.*
<https://www.bilecikdemircelik.com.tr/wp-content/uploads/2021/02/EFRS-Magnezyum-Oksit-Spinel-Refrakter-Malzemelerin-Termomekanik-Ozellikl....pdf>
- Velasquez, C. P., Montazerian, M., & Mauro, J. C. (2025). Corrosion of zirconium-based refractories in glass-contact areas: Mechanisms and challenges. *Int J Appl Ceram Technol.*, 22, e15064.
<https://doi.org/10.1111/ijac.15064>
- Wang, Y. X., Li, Y. G., Gao, Y. B., Huang, Z., & Zhang, H. J. (2024). High-temperature wetting behavior between slag and refractory. *Journal of Iron and Steel Research International*, 31(6), 1304–1319.
<https://doi.org/10.1007/s42243-024-01252-z>
- Yamaguchi, A. (2007). Self-Repairing Function in the Carbon-Containing Refractory. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 4(6), 490–495.
<https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2007.02176.x>
- Yılmaz, S. (2023). *Refrakter Malzemeler : Klasifikasyon-Ürünler- Özellikler-Standartlar-Bilgisayarlı Astar Tasarımı*. IUC University Press.
<https://doi.org/10.5152/3500>
- Yoon, B., Jung, J., Lee, W., & Lee, C. (2025). Characterization of lignin stabilized waste magnesite refractory bricks for potential applications as construction aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 22(December 2024), e04577.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04577>
- Yu, L., Zhai, J., Cao, W., & Ren, J. (2024). Prediction of temperature-dependent yield strength of refractory high entropy alloy based on stacking integrated framework. *Journal of materials Informatics*, 4(4).
<https://doi.org/10.20517/jmi.2024.39>
- Zhang, J., Xu, F., & Hou, J. (2023). Diagnosis of health state and prediction of residual life of gasifier refractory bricks. *Journal of China Coal Society*, 48(S1), 275–287.
<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.0237>
- Zhang, M., Larsson, M., Alibasic, E., & Landell, H. (2022). Self-Healing Castable Repairs Its Own Cracks (I) --Effect of Expansive Materials on Self-healing Behaviors of Mullite Based Castables. *International Colloquium on Refractories (ICR) 2021, January*.
- Zhang, W., Meng, Q., & Dai, W. (2013). Research on application of kyanite in plastic refractory. *Chinese Journal of Geochemistry*, 32(3), 326–330.
<https://doi.org/10.1007/s11631-013-0639-x>
- Zhuo, L., Liu, C., Yin, E., Zhao, Z., & Pang, S. (2022). Low-cost and low-temperature 3D printing for refractory composite inspired by fused deposition modeling and binder jetting. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 162, 107147.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107147>



ÜSTYAPI YÖNETİM SİSTEMİNDE YAPAY ZEKÂ YAKLAŞIMLARI

“ ”

Özlem BATTAL ŞAL¹

¹ Karabük Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Karabük, Türkiye,
e-mail: ozlembattal@karabuk.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-2308-7933

1. GİRİŞ

Modern altyapı sistemlerinin geliştirilmesinde, yolların mevcudiyeti temel bir bileşendir. Bu konu, sürdürülebilir ve etkili kalkınma için hayati önem taşır (Afrin ve Yodo, 2020). Son on yılda, altyapı modernizasyonu dünyanın çeşitli bölgelerinde hızlı ve kapsamlı bir şekilde ilerlemiştir. Bu adım, kalkınma hızına paralel olarak ulaşım ihtiyaçlarını destekleyen yol altyapısının entegrasyonunun artırılmasıyla atılmıştır. Ancak, büyük ölçekte yol altyapısı inşa edildikten sonra, hasarlı yolların yönetimi organizatörler için zorlu hale gelmektedir (Chen ve Zheng, 2021). Yol bakımının düşük verimliliği, ulaşım sisteminin hizmet verilebilirliğini azaltır. Bu durum, seyahat faaliyetlerini aksatabilir ve kaynak israfına neden olabilir. Ayrıca, çeşitli yol hasarları trafik kazalarına yol açabilir. Doğal olarak, sürdürülebilir kalkınma, bütçe kısıtlamaları ve öncelik değişiklikleri nedeniyle uzun vadede şüphesiz sınırlı kalacaktır (Chundi vd., 2022). Bu durum, her ülkedeki yol altyapısı hizmet sağlayıcılarını en yeni sorun çözme yaklaşımlarını aramaya teşvik edebilir.

Ancak, çok sayıda yol ve yol ağının karmaşıklığı, yol koşullarının değerlendirilmesini sorunlu bir görev haline getirebilir. Ayrıca, yol koşullarının değerlendirilmesi genellikle müfettişin beceri ve deneyimine dayanır ve bu da kişiden kişiye değişir. İnsan kaynağı eksikliği ve işin yanlışlığı, yol koşullarının değerlendirilmesinde performansın düşmesine neden olabilir. Bu nedenle, bu koşullar, sigortalıların karar alma konusunda daha iyi olmalarına neden olabilir. Kabul edilebilir risk, bazı hasarlı yolların zamanında onarılmasını ve bu da yol hasarını hızlandırabilir (Liu vd., 2022). Bu arada, koşullar normal olmasına rağmen birkaç yol tekrar tekrar onarıldı. Bu durum kısmen sahadaki sık veri anormalliklerinden kaynaklanıyordu.

Değişen zamanlarla birlikte, bu dijitalleşme çağında, düşük verimli ulaşım altyapısının bakımı ile sürekli artan araç sayısı arasındaki çelişkiye derhal bir çözüm bulunması gerekmektedir. Bilgi teknolojileri, sivil altyapı sistemlerinin sürdürülebilir yönetimini destekleyebilir. Doğru politika, yeterli verilere ve doğru yorumlara dayanarak geliştirilebilir (Rifai vd., 2016). Yol ve köprülerin bakımı, altyapının durumunu kabul edilebilir bir seviyede tutmak için teknik ve idari bir faaliyettir. Çeşitli alanlardaki yıkıcı teknolojik gelişmeler ve dijital devrim, tarafları derhal harekete geçmeye yöneltmiştir. Bu durum, altyapının inşası ve bakımında da görülmektedir.

Üstyapı yönetim sistemleri literatürü incelendiğinde, yapay zekâ temelli yaklaşımların sayıca sınırlı olduğu görülmektedir. Bandara ve Gunaratne (2001), Sri Lanka'da geliştirdikleri çalışmada, mevcut üstyapı performansını değerlendiren ve bakım önceliklerini sıralayan bir model oluşturmak amacıyla bulanık mantık yöntemini kullanmışlardır. Modelde, timsah sırtı çatlakları, oyulmalar, kenar bozuklukları ve sökülme gibi bozukluk tipleri giriş verisi olarak alınmış ve üstyapı performans oranlaması yöntemiyle elde edi-

len verilerle kalibrasyonu yapılmıştır. Ardından, Markov modeli ile bulanık mantık yaklaşımı birleştirilerek, bakım ve onarım öncelikleri konusunda öneriler geliştirilmiştir.

Lin vd., (2003), yapay sinir ağları yaklaşımı ile bir tahmin modeli geliştirmişlerdir. Modelin kalibrasyonu ile elde edilen veriler üzerinden gerçekleştirilmiş ve modele, tespit edilen bozulmalar ile bu bozulmaların yoğunluklarını içeren toplam 14 veri tipi girdi olarak aktarılmıştır. Çalışmada ayrıca, görüntü işleme tekniği aracılığıyla, 125 farklı yol kesiminden bozulma tespiti yapılmıştır. Böylece, düzgünsüzlük ölçebilen cihazlara erişimi olmayan birimlerin de üstyapı bozulma değerlerini belirleyebileceği bir sistem tasarlanmıştır.

Terzi (2004), üstyapıda ortaya çıkabilecek bozulmalar ile bu bozulmalara yol açabilecek etkenleri dikkate alan servis düzeyi tahmin modelleri geliştirmiştir. Söz konusu modeller, Visual Basic programlama dili kullanılarak kodlanmış ve bu sayede üstyapının mevcut performansının yanı sıra, gelecekte beklenen trafik koşullarına göre de performans tahminleri yapılabilmektedir. Ayrıca, geliştirilen program, fayda-maliyet oranı değerlendirme kriterine göre bakım ve onarım periyotlarını belirleyebilen ve Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) altyapısını kullanabilen bir program tasarlanmıştır.

Marcelino vd. (2019) çalışmalarında üstyapı yönetim sistemlerinde üstyapı performansı tahmin modellerinin geliştirilmesi için genel bir makine öğrenimi yaklaşımı önermektedir. Önerilen modeller, yani makine öğrenimi modellerinin, Uluslararası Pürüzlülük Endeksi (IRI) bozulmasının fiziksel süreci nedeniyle beklenen şekilde önceki IRI değerlerine karşı özellikle hassas olduğunu göstermiştir. Kalan değişkenlerdeki varyasyonlar makine öğrenimi modelleri üzerinde çok az etki göstermiştir.

Damirchilo vd. (2021) araştırmalarında asfalt beton kaplama için 1989'dan 2018'e kadar ABD'nin 50 eyaletinde ve Columbia Bölgesi'nde 1.390 yol ve otoyol için Uzun Vadeli Üstyapı Kaplama Performansı veri kümesindeki 12.637 gözleme dayanarak tahmin edilmiştir. IRI tahmini için kullanılan makine öğrenimi tekniklerine ilişkin kapsamlı bir görüş geliştirmek üzere sistematik bir literatür incelemesi yapılmıştır. IRI'yi tahmin etmek için önerilen modelin daha ortalama mutlak hata ve belirleme katsayısı açısından daha iyi bir model uyumu sağladığını göstermektedir.

Cano-Ortiz vd. (2022) çalışmalarının temel amacı makine öğrenmesi algoritmaları aracılığıyla asfalt durumunu tespit etmek için rekabetçi, düşük maliyetli ve gerçek yollara uygulanabilir teknolojiler geliştirme ihtiyacını ortaya koymaktadır. Çalışmalarında yapay sinir ağları ile analizler yapmışlardır. Bu analizler için metodoloji, problem türü, veri kaynağı, hesaplama kaynakları, tartışma ve gelecekteki araştırmaları vurgulamışlardır.

2. ÜSTYAPI YÖNETİM SİSTEMİ

2.1. Üstyapı Yönetim Sistemlerinin Genel Yapısı

Üstyapı yönetimi kavramı, ilk olarak 1960'lı yıllarda ortaya çıkmıştır. Başlangıç dönemlerinde üstyapı performansının belirlenmesinde görsel değerlendirme yöntemleri kullanılmıştır; ancak, zamanla bu yöntemlerin yeri ni çeşitli tahribatlı deneyler almıştır. Tahribatlı deneylerin uygulanmasının zorlukları ve sahip olduğu bazı sınırlamalar nedeniyle, daha sonra tahribatsız deneyler geliştirilmiş ve yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Her ne kadar bu yöntemler üstyapının taşıma kapasitesi ve yapısal durumu hakkında bilgi sağlasa da özellikle kullanıcıların sürüş konforunu yansıtan fonksiyonel durum hakkında yeterli veri sunmamaktadır.

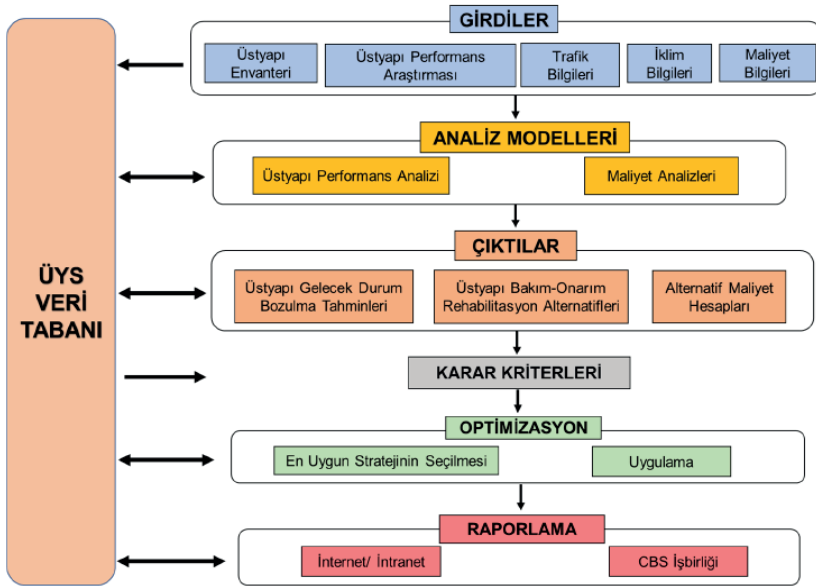
Üstyapının performansını belirlemek amacıyla, Amerikan Karayolu ve Ulaştırma Çalışanları Derneği (AASHTO), tarafından bir gösterge geliştirilmiştir. Bu gösterge ile üç üstyapı puanlayıcısının bir taşıt üzerinde seyahat ederken yaptığı puanlamaların ortalaması alınmaktadır. Ancak bu değerlendirme göreceli nitelikte olduğundan, güvensizlik oluşturmuş ve üstyapı şirketleri ile kurumlarını, daha güvenilir yöntemler geliştirmeye ve uygulamaya yönlendirmiştir.

Takip eden yıllarda, üstyapının hizmet yeteneğinin, üstyapı düzgünsüzlüğü ile ilişkili olabileceği öne sürülmüştür. Düzgünsüzlük ölçümleri ilk olarak AASHTO profilometresi kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra, yalnızca düzgünsüzlük ölçen cihazlara ek olarak, üstyapı bozulmalarını fotoğraf teknikleri ile toplayan ve bu verileri görüntü işleme algoritmalarıyla analiz eden sistemler geliştirilmiş; söz konusu yöntemler, tüm bu işlemleri bir arada yürütebilen birleşik bir yapıya dönüştürülmüştür.

Yapılan bu ilerlemeler bir araya getirilerek, tüm yol ağı performansını kapsamlı bir biçimde değerlendirebilen Üstyapı Yönetimi Sistemi (ÜYS) kavramı geliştirilmiştir. ÜYS yaklaşımına ek olarak, üstyapı bozulmalarını toplamak ve analiz etmek amacıyla bozulma etüdü örnekleri oluşturulmuştur. ÜYS'yi kuran ve işleten kuruluşlar, bu bozulma etüdü uygulamasını sistem kapsamına dahil etmişlerdir. Söz konusu süreç, mühendislik temelli kararlar doğrultusunda genel üstyapı performansını sınıflandırmayı, özgün bozulma tiplerinin ayrıntılı planını çıkarmayı ve detaylı ölçümleri kapsamaktadır. Literatürde öne çıkan iki bozulma etüdü örneği PAVER ve MTCO (Municipal Transportation Commission of Ontario) sistemleridir. Shahin ve Becker (1984), PAVER sistemi kapsamında kullanılmak üzere üstyapı performansını ölçen Üstyapı Performans İndeksi (PCI) adlı bir model geliştirmişlerdir (Haas vd., 1994).

Ülkemizde ÜYS çalışmalarına, Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 1994 yılında, Pavement Management System Limited (PMSL) ile iş birliği ya-

pılarak başlanmıştır. Çalışmanın amacı, Türkiye şartlarına uygun, uygulanabilir ve geliştirilebilir bir program ortaya koymak ve ilgili teknoloji transferini sağlamaktır. İlk aşamada, Ankara ili çevresindeki devlet yollarında ağ düzeyinde bir yönetim sistemi oluşturulmuş; ikinci aşamada ise, Dünya Bankası'ndan sağlanması planlanan kredi ile ülke çapında bir sistem tasarlanması öngörülmüş, ancak yaşanan ekonomik kriz nedeniyle proje geçici olarak durdurulmuştur. Sonraki yıllarda, Mersin'de asfalt betonu kaplamalı yollarda profilometre cihazlarıyla düzgünlük ölçümleri yapılmış, bakım ve onarım stratejileri belirlenmiş ve yollara ait maliyet-verimlilik değerleri hesaplanmıştır. Ancak, ülkemizde sıkça karşılaşılan tekerlek izi oturmaları biçimindeki enine düzgünlüklerin sağlıklı ölçülebilmesi nedeniyle proje bazı yönleriyle ihmal edilmiştir (Ay, 2001). Günümüzde ise, Karayolları Genel Müdürlüğü bünyesinde 2009 yılında başlatılan çok yönlü çalışmalar ile ÜYS uygulamaları giderek daha profesyonel bir hâl almış; özellikle Merkez Araştırma ve Geliştirme Teşkilatı ile birçok bölgeye alınan profilometreler sayesinde üstyapı IRI ölçümleri toplanmakta ve işleyen bir ÜYS'nin temelleri güçlendirilmektedir.



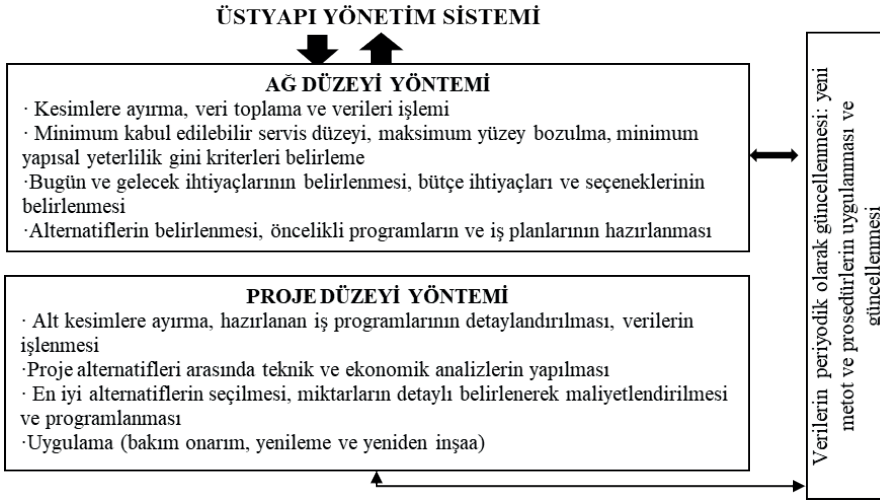
Şekil 1. Üstyapı Yönetim Sistemi Bileşenleri (ÜYS Rehberi, 2024).

Üstyapı Yönetim Sistemleri, karayolu ağlarının mevcut durumunu analiz eden, performans tahminleri yapan ve bakım-onarım stratejileri geliştiren bütünsel sistemlerdir. Üstyapı Yönetim Sistemi'nin tipik bileşenleri Şekil 1'de verilmiştir.

2.2. Üstyapı Yönetim Sistemi Düzeyleri

ÜYS'den beklenen temel amaç, mevcut bütçe olanakları çerçevesinde en doğru, güvenli ve ekonomik üstyapı işletimini sağlamaktır. Bu doğrultuda, etkili bir ÜYS'nin; minimum gereksinimlerle sisteme uyum sağlayabilmesi, etkin bir biçimde işletilebilmesi, pratik ve uygulanabilir sonuçlar üretebilmesi, niteliksel verilere dayalı kararlar alınmasına imkân tanınması ve güvenilir yorum bilgileri sağlayabilmesi beklenmektedir (Haas vd., 1994).

Üstyapı yönetim sistemi, ağ seviyesi ve proje seviyesi olmak üzere iki seviyede çalışan bir sistemdir. Ağ seviyesi, yol şebekesi üzerinde yapılması planlanan işlere öncelik vererek iş programını hazırlamayı amaçlamaktadır. Proje seviyesi ise yapılmasına karar verilen işleri projelendirmeyi amaçlar. Ağ düzeyi için yüzeysel bilgiler yeterli olurken, proje düzeyi için detaylı bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 2'de ÜYS'nin temel yönetim sistemleri ve ana birleşenleri kısaca açıklanmıştır.



Şekil 2. Üstyapı yönetim sisteminin temel yönetim seviyeleri ve ana birleşenleri (Haas vd., 1994)

Tabloda, bakım ve onarım çalışmalarında kullanılan veriler sınıflandırılarak ilgili alanlar sunulmaktadır. İşletme politikaları ve mali harcamalarla ilişkili veriler dışındaki veriler, üstyapı performansının değerlendirilmesi ve analizinde sıklıkla başvurulmuş temel verilerdir. Bu verilerin, ilgili merkezlerde titizlikle ve standart bir formatta toplanarak saklanması, ayrıca kolay erişilebilir olması büyük önem taşımaktadır. Geçmiş yıllara ait verilerin güncel verilerle birlikte değerlendirilmesi, üstyapı performansına ilişkin daha etkili tahminlerin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, verilerin ağ düzeyi ve proje düzeyi kullanım amaçları birbirinden farklılık göstermekte-

dir (Haas vd., 1994).

2.2.1. Ağ Düzeyi

Ağ düzeyinde üstyapı yönetim sistemi belirli aşamalar doğrultusunda ilerleyerek karar vericilere ve bütçe yöneticilerine yol gösterici nitelikte bilgiler sunar. Bu nedenle, ÜYS'nin en güçlü bileşenlerinden biri olarak kabul edilir. Bu aşamalar şu şekilde sıralanabilir:

- Üstyapı envanteri ve mevcut durumun belirlenmesi
- Performans tahmini
- Bütçe tahmini
- Bakım ve onarım programı ile iş planlaması

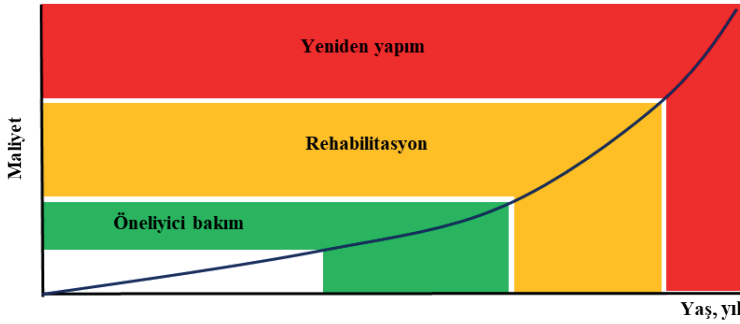
Mevcut üstyapı durumunun belirlenmesi sürecinde, ilk olarak yol ağı tanımlanarak uygun kesimlere ayrılmaktadır. Bu kesimlerde, yüzey düzgünsüzlüğü ve kayma direnci gibi parametreler ağ düzeyinde analiz açısından büyük önem taşır. Ayrıca, defleksiyon ölçümleri, tabaka malzemeleri gibi veriler de tamamlayıcı nitelikte olup ikinci derecede öneme sahiptir. Bu şekilde, üstyapının yaşı, sınıfı, tipi ve bulunduğu bölge gibi temel özellikleri bir veri tabanına aktarılır. Bu veri tabanı üzerinden gerekli sorgulamaları yapabilmekte; istatistiksel değerlendirmeler ve sonuçları rapor halinde elde edebilmektedir. Ancak, özellikle yoğun trafik yükünün olduğu yollar için bu verilere erişim oldukça güç ve zaman alıcı olabilmektedir. Bu nedenle, verilerin dikkatli, düzenli ve standart bir biçimde toplanarak depolanması büyük önem arz etmektedir.

Veri cinsi	Ağ Düzeyi	Proje Düzeyi
1. Performansla ilgili veriler		
Düzgünsüzlük	• Mevcut durumun tanımlarında kullanılır. • Gelecek durumu tahmin etmede kullanılır. • Analiz ve programlama öncelikleri için temeller oluşturur	• Kalite garantisidir (imalatın kalitesini gösterir). • Bozulma eğrilerinin yaratılmasına yardımcı olur. • Kaplama niteliğinin belirlenmesini sağlar.
2. Önceki yıllara ait veriler		

Trafik	• Programlama önceliğini belirlemede kullanılır. • Genel performans/bozulma eğiliminin tahminine girdi teşkil eder.	• Üstyapı tasarım için girdi olarak kabul edilir. • Trafik tahmin yöntemlerini tanımlama kullanılır. • Kalan servis ömrünün tahminine yardımcı olur.
3. Çevre ile ilgili veriler		
İklim	• Ağın genel performans değerlendirilmesini sağlar.	• Kesimin genel performans değerlendirilmesinin yapılmasını sağlar.

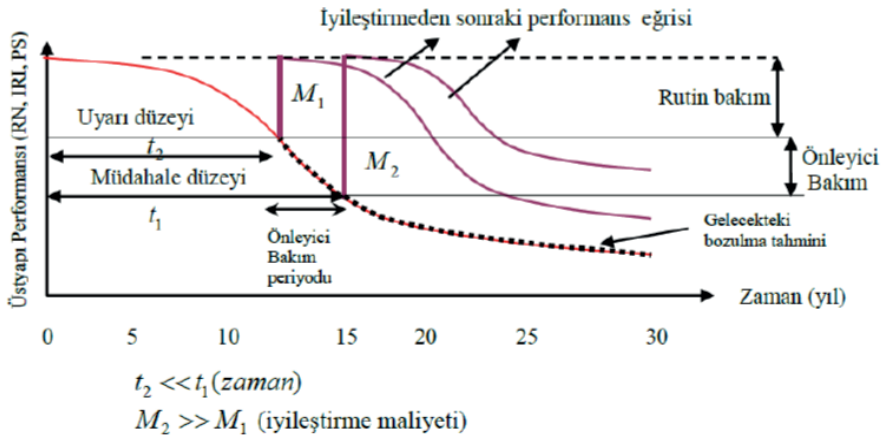
Tablo 1. Üstyapı verilerinin kullanım amaçları (Haas vd., 1994)

Performans modellemesi, ÜYS'nin ömrünü ve tasarımını belirlemenin yanı sıra, üstyapının finansal etkilerini de önemli ölçüde yönlendirmektedir. Bu nedenle, performans modellemesi hem ağ düzeyindeki analizlerde hem de proje düzeyindeki değerlendirmelerde temel bir yapı taşı olarak kabul edilmektedir. Yolların performansının korunabilmesi için, üstyapının performans ve bozulma tahminlerinin mümkün olan en doğru şekilde yapılması gerekmektedir. Aksi takdirde, aşamalı bozulmalar zamanla iyileştirilmezse, bakım ve onarım maliyetleri önemli ölçüde artmakta ve sınırlı bütçeye olan kazanımlar olumsuz etkilenmektedir.



Şekil 3. Üstyapının zamana bağlı maliyet ve iyileştirme ilişkisi (Hergüner, 2009)

Üstyapının gelecekteki durumu doğrudan gözlemlenemeyeceğinden, bu durum tahmin edilebilir olmalıdır. Performans eğrileri kullanılarak, belirli bir zaman dilimi için üstyapının gelecekteki durumu öngörülebilmektedir. Klasik performans eğrileri, yolun gelecekteki bozulma sürecine bağlı olarak bakım ve onarım zamanlarını göstermekte; ayrıca, farklı rehabilitasyon seçeneklerinin etkilerini de analiz etme imkânı sağlamaktadır.



ve yapısal kapasitesinin belirlenmesine imkân sağlamaktadır. Yol üstyapısının özelliklerini izleyerek veya ölçerek yapısal kapasitenin tespiti aracılığıyla yapılmaktadır. Örneğin, bu ölçümler tabaka kalınlığı verilerini yeniden hesaplamak ve malzeme özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır.

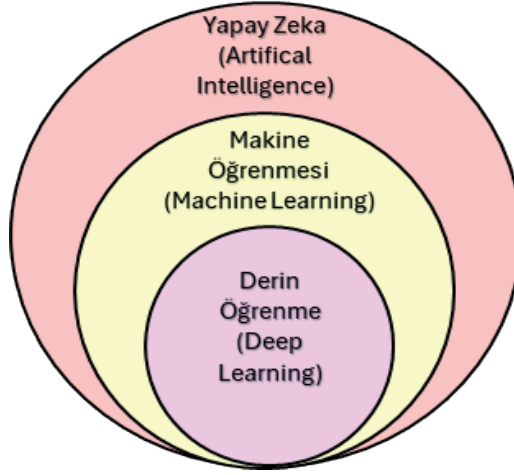
3. Yapay Zekâ Yaklaşımları ve Üstyapı Uygulamaları

Yapay zekâ uygulamaları, üstyapı yönetiminde karar verme süreçlerinin otomatikleştirilmesi ve doğruluğunun artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Başlıca yaklaşımlar arasında makine öğrenmesi, derin öğrenme, yapay sinir ağları, bulanık mantık ve uzman sistemler bulunmaktadır.

Yapay zekâ alanındaki ilk çalışmalar, 1943 yılında McCulloch ve Pitts tarafından beynin Boolean devresi ile modellenmesi ile başlamıştır. 1980'li yıllarda ise yapay zekâ bir endüstri hâline gelmiş ve 1988 yılı itibarıyla yapay zekâ, bağımsız bir bilim dalı olarak kabul edilmiştir. Günümüzde, birçok problem ve bu problemlere yönelik çözüm teknikleri, basit seviyeden karmaşık seviyelere kadar uygulanmaktadır. Yapay zekâ, herhangi bir problemin modellenmesi ve uygun algoritmalar kullanılarak çözülmesi sürecinde etkin bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu modellerin geliştirilmesinde iki yaklaşım öne çıkmaktadır: sezgisel ve rasyonel yaklaşım. Sezgisel yaklaşım, insan gibi düşünebilme ve hareket edebilme yeteneğini modellemeyi amaçlarken, rasyonel yaklaşım ise mantıksal ve akılcı hareketleri temel almaktadır. Modellerin gerçek dünyaya uygulanabilir olması, çalışan ve güvenilir bir yapay zekâ sistemi elde edilmesini sağlamaktadır.

Yapay zekâ, doğadaki canlıların akıllıca davranışlarını, insan zekâsı taklit edilerek yapay biçimde canlandırmaktadır. İnsan beynini model alan bu sistemler, topladıkları veriler üzerinden sonuç üretmekte ve elde edilen sonuçlara göre kendilerini geliştirebilmektedir. Özetle, yapay zekâ, insan zekâsının modellenerek makinelerde uygulanması olarak tanımlanabilir. Bu kapsamda, makine öğrenimi, yapay zekânın bir evresi olarak değerlendirilmektedir. Başlıca yapay zekâ teknolojileri arasında uzman sistemler, bulanık mantık, genetik algoritmalar, yapay sinir ağları ve makine öğrenmesi yer almaktadır (Öztürk ve Şahin, 2018). Günlük yaşamda farklı alanlarda kullanılması yanı sıra, yapay zekâ teknikleri tahmin, sınıflandırma ve kümeleme amacıyla da etkin biçimde uygulanmaktadır.

Yapay zekâ, makine öğrenmesi ve derin öğrenme terimleri zaman zaman birbirinin yerine kullanılsa da bu kavramlar hiyerarşik bir yapıya sahiptir. Şekil 5'te bu ilişki gösterilmiştir.

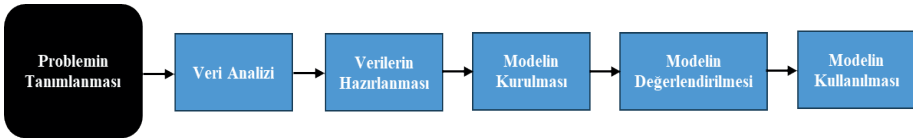


Şekil 5. Yapay zekânın hiyerarşik yapısı

3.1. Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesi, yapay zekâ alanının bir alt dalıdır ve bilgisayar sistemlerinin verilerden öğrenerek belirli görevleri gerçekleştirmesine olanak tanır. Makine öğrenmesi algoritmalar ve istatistiksel modeller kullanarak, bir modelin verilerden örüntüler çıkarmasını ve bu örüntüleri yeni veriler üzerinde uygulayarak tahminler yapmasını sağlamaktadır. “Arthur Lee Samuel” tarafından 1959 senesinde dama oyunu kurgulanırken makine öğrenimi terimi orada kullanılmıştır. Samuel, makine öğrenimini bilgisayarların doğrudan programlama yapılmadan öğrenmesini mümkün kılacak bir araştırma alanı olarak tanımlamıştır (Mockenhaupt, 2021).

Makine öğrenmesi, geçmiş verilerden öğrenerek yeni veriler üzerinde tahmin yapabilen algoritmalarla. Makine öğrenmesi çalışmaları, geleceğe yönelik tahminlerin yapılabilmesine imkân sağlamaktadır. Bu nedenle, karar verme sürecine ihtiyaç duyan birçok alanda, ilgili kurumların karar destek sistemleri için oldukça değerli bir araç olarak değerlendirilmektedir. Makine öğrenmesi uygulamalarında Şekil 6’da gösterildiği gibi işleyişi vardır.

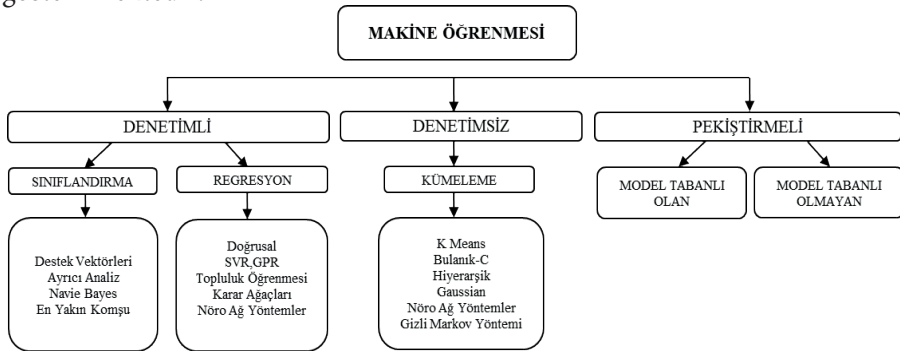


Şekil 6. Makine öğreniminin işleyişi

Makine öğrenmesi süreci, amacı olan bir problemin tanımlanması ile başlamaktadır ve verilerin hazırlanması şeklindedir. Bu süreçte, verilerin kullanılması kaçınılmaz olarak bazı sorunlara yol açabilmektedir. Boş, eksik

veya belirsiz veriler, yanlış sonuçlara sebep olabileceğinden, öncelikli olarak bu sorunların öncelikle çözülmesi gerekmektedir. Verilerin anlamsız veya özelliklerinin bilinmediği durumlarda makine öğrenmesinde kullanılan algoritmalar güçlü olsa da fayda sağlaması mümkün değildir. Bu nedenle, veriler sürece dâhil edilmeden önce detaylı bir şekilde analiz edilmelidir.

Makine öğrenmesi algoritmaları, bilgileri doğrudan geçmiş verilerden veya deneyimlerden “öğrenmek” için hesaplama yöntemlerini kullanır. Makine öğrenmesi algoritmaları, daha iyi tahminlere dayalı bilinçli kararlar almak için büyük veri kümelerindeki doğal kalıpları işleyip bulabildikleri için günümüzde popüler hale gelmiştir. Makine öğrenimi modelleri Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7. Makine öğrenimi algoritmalarının özeti. (Silva vd., 2021)

Denetimli makine öğrenmesi teknikleri

Makine öğreniminde en yaygın olarak kullanılan ve en çok ilgi gören yöntem olan denetimli öğrenme bazı kaynaklarda “gözetimli öğrenme” olarak da isimlendirilmektedir. Her bir eğitim etiketi bir sonuç etiketi oluşturur. Sistem, etiketli verilerle eğitilir ve bu sayede belirli sorunları öğrenmesi sağlanır. Eğitim süreci, manuel olarak etiketlenmiş veri (örneğin, resimler veya kelimeler) kullanılarak gerçekleştirilir (Çoban, 2016). Tahmin işlemleri sırasında regresyon veya sınıflandırma yöntemlerinden yararlanır.

Denetimli öğrenme-proje düzeyinde veya ağ düzeyinde üstyapı performans yönetimi için kullanılabilir. Giriş verilerini ve çıktı verilerini kullanır. Yeni verilere uygulandığında yararlı tahminler yapmak için bir model oluşturur. (Silva vd., 2021)

Denetimsiz makine öğrenmesi teknikleri

Denetimsiz öğrenme ya da diğer adıyla gözetimsiz öğrenme keşifsel ve kümeleme analizi için kullanılabilir. Sistem, etiketlenmemiş verilerdeki iç görüler ve ilişkileri ortaya çıkarmaya odaklanır. Bu veriler; anlamlandırma, tanıma ve keşif amaçlı kullanılır. Bu nedenle sistemin ürettiği sonuçlar önceden tahmin edilemez. Eğitim süreci, herhangi bir gözetim veya doğru

cevapla desteklenmemiştir. Sistem, kendi başına kalıpları tespit etmekle sorumludur.

Denetimsiz öğrenme, verilerdeki kalıpları bulmak yalnızca girdi verilerine sahip veri kümelerinden çıkarımlar yapmak için genellikle keşifsel veri analizi kümeleme için kullanılır. (Silva vd, 2021). Tahmin işlemleri sırasında kümeleme yöntemlerinden yararlanır.

Pekiştirmeli makine öğrenmesi teknikleri

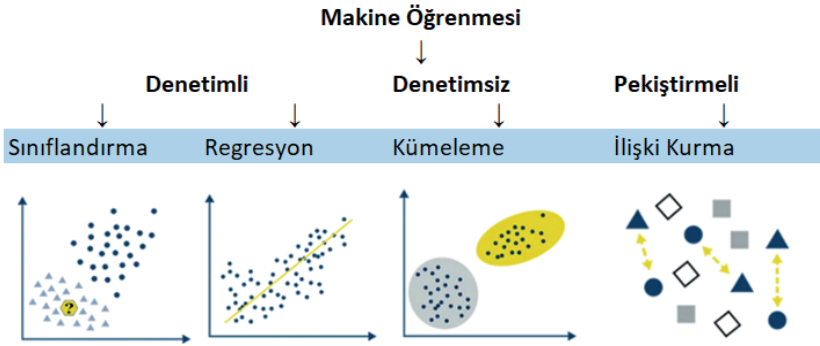
Pekiştirmeli öğrenme, bir yapay zekâ modelinin bir ortam içinde kararlar alarak bu kararların sonuçlarına göre ödül veya ceza alarak öğrenmesini sağlayan bir makine öğrenimi yöntemidir. Bu yöntem, davranışların optimizasyonuna odaklanır özellikle belirsiz veya dinamik ortamlarda etkili çözümler üretmek için kullanılır. Pekiştirmeli öğrenme-karar vericilere hem proje hem de ağ düzeyinde kaldırım yönetimi için yardımcı olmak amacıyla kullanılabilir. Denetlenen ve denetlenmeyen öğrenmenin aksine, dinamik bir ortamdan gelen verilerle çalışır.

Pekiştirmeli öğrenme yönteminde, sistem çevresinden aldığı geri bildirimlere göre kendini adapte ederek en olumlu değerlendirme sonuçlarını elde etmeye çalışır (Sutton ve Barto, 1998). Bu yöntemde eğitim ve test aşamaları eş zamanlı olarak gerçekleştirilir ve sistem sürekli olarak bir denetçiyle etkileşim halindedir. Eğitim setinde her girdi için beklenen çıktılar mevcut değildir; denetçi, sistemin ürettiği çıktıları girdilerle karşılaştırarak ödül veya ceza vererek (ödül) sistemin öğrenmesini sağlar. Burada önemli olan tekil sonuçlar değil, genel süreçtir. Sistem, aldığı değerlendirmelere göre kendini geliştirir ve en yüksek ödülü almak için çalışır. Örneğin, satranç oyunu bu yöntemle iyi bir örnektir. Satranç, basit kurallara sahip olmasına rağmen birçok farklı hamle kombinasyonu sunar bu da rakibin stratejisini tahmin etmeyi zorlaştırır. Pekiştirmeli öğrenme yöntemi ile eğitilen bir sistem, rakibinin her hamlesini değerlendirerek en etkili hamleyi yapmaya çalışır ve rakibinin stratejisini analiz ederek gelecekteki hamleleri öngörüp doğru pozisyonu alabilir (Alpaydin, 2021).

Şekil 8’de de gösterilen işlevleri açısından, regresyon, kümeleme, sınıflandırma, ilişki kurma makine öğrenmesinin çeşitli uygulamalarında önemli rol oynayan teknik yöntemler olup, farklı problemleri çözmek için farklı yaklaşımlar sunar.

Regresyon: Sürekli bir çıktı değeri tahmin etmek için kullanılan bir denetimli öğrenme tekniği olup girdi değişkenleri ile bir hedef değişken arasındaki ilişkiyi modelleyerek belirli bir girdi için sürekli bir değer tahmin eder. Regresyon sınıflar veya ayrı değerler kullanmak yerine verileri sürekli olarak gerçek değerlere bölecek bir model veya fonksiyon oluşturma sürecidir.

Kümeleme: Denetimsiz öğrenme tekniğidir ve verileri benzer özelliklere sahip gruplara ayırır.



Şekil 8. Makine öğrenmesi algoritmaları (Akca, 2024).

Sınıflandırma: Verileri belirli kategorilere ayırmak için kullanılan bir denetimli öğrenme tekniği olup belirli bir girdi verisi için hangi sınıfa ait olduğunu tahmin eder. Başka bir deyişle; verileri birden fazla kategorik sınıfa, yani ayrı değerlere ayırmaya yardımcı olan bir model veya işlevi bulma veya keşfetme sürecidir. Sınıflandırmada, veriler girdide verilen bazı parametrelere göre farklı etiketler altında kategorilere ayrılır ve ardından veriler için etiketler tahmin edilir.

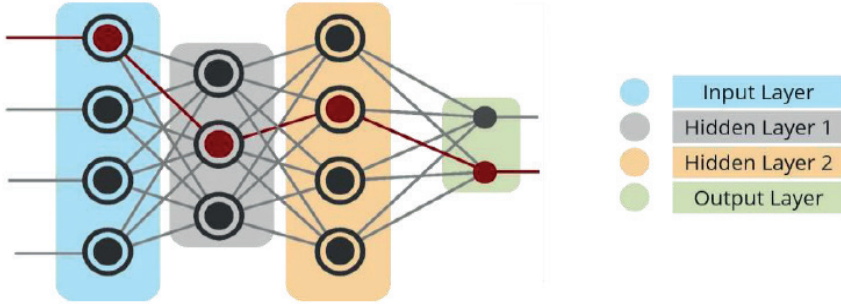
İlişki Kurma: Veriler arasındaki ilişki ve bağıntıları keşfetmek için kullanılan bir yöntemdir.

3.2. Derin Öğrenme

Derin öğrenme, büyük veri kümelerinden öğrenebilen yapay sinir ağlarını kullanarak veriden karmaşık örüntüleri öğrenmeyi sağlayan yapay zekâ ve makine öğrenmesinin bir alt dalıdır. Yapay sinir ağları, insan beyninin çalışma yapısını taklit edecek şekilde tasarlanmış algoritmalardır ve özellikle büyük veri ile yüksek hesaplama gücüne ihtiyaç duyarlar. Manuel özellik çıkarımı yerine, veriden otomatik olarak özellikleri öğrenirler. Basit bir ifadeyle derin öğrenme; Şekil 9’da görüldüğü gibi çok sayıda katmandan oluşan sinir ağlarını ifade eder. Katmanlar bir önceki katmanın çıktısını girdi olarak kullanır (Seker vd., 2017).

Bu ağlar, fotoğraflar, sesler gibi gözlemsel verileri işlemek ve anlamlandırmak için kullanılır. Süreç ham verilerin giriş katmanından geçmesiyle başlamakla beraber gerçek öğrenmenin gerçekleştiği çoklu gizli katmanlara gelir. Birbirine bağlı düğümlerden oluşan katmanlar boyunca ilerler. Her bir düğüm, gelen veri üzerinde matematiksel işlemler gerçekleştirir ve işlenmiş bilgiyi bir sonraki katmana aktarır. Her katman, bir öncekine göre daha karmaşık ve soyut özellikleri öğrenir; bu süreç, nihai çıktıya ulaşılan kadar de-

vam eder. Çıktı katmanı tüm bu işlemler temelinde sonuçlar veya tahminler üretmek süreci sonlandırır.



Şekil 9. Yapay sinir ağı

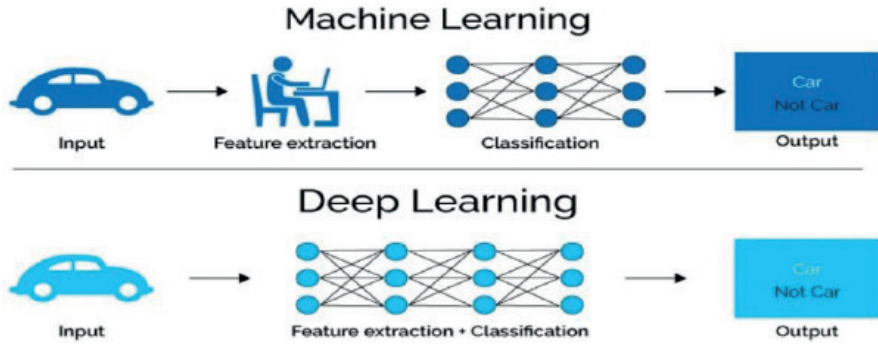
Derin öğrenme yöntemleri, büyük veri kümelerini işleyerek karmaşık örüntüleri öğrenme yeteneği sayesinde sağlık hizmetlerinden eğitime, üretimden ulaşıma, finansal hizmetlerden robotik ve doğal dil işlemeye kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ulaşımında otonom araçların gelişimini desteklerken (Kang ve Cha, 2018) doğal dil işlemeye insan dilini analiz ve sentez edebilmektedir (Lecun vd., 2015). Tüm alanlardaki başarısı, derin öğrenme yöntemlerinin ulaştırma mühendisliğinde, özellikle havaalanı kaplamalı sahalardaki bozulmaların nedenlerini analiz etmek ve önleyici stratejiler geliştirmek amacıyla da etkin biçimde kullanılabileceğini göstermektedir.

Sahip olduğu becerilerle makine öğrenmesinden farklı olmakla beraber temelde derin öğrenme, makine öğrenmesi içerisinde bir alt daldır. Makine öğrenmesi algoritmaları yanlış bir tahmin yaptığında, genellikle bir uzmanın müdahale edip modeli yeniden düzenlemesi gerekir. Buna karşılık, derin öğrenme algoritmaları tahminlerinin doğruluğunu kendi başlarına değerlendirebilir ve hatalarından öğrenerek performanslarını iyileştirebilir. Bu yöntemlerde, bilgisayara bir veri kümesi verilir ve bilgisayar bu veriler üzerinden öğrenerek genelleme yapmayı başarır.

Derin öğrenme ve makine öğrenmesi yaklaşımları arasındaki temel kavramsal ve yapısal farklar Tablo 2 ve Şekil 10'da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 2. Derin öğrenme ile makine öğrenmesi arasındaki temel farklar

Özellik	Makine Öğrenmesi	Derin Öğrenme
Özellik çıkarımı	İnsan tarafından yapılır	Otomatik olarak öğrenir
Performans	Orta düzeyde	Büyük veriyle yüksek başarı
Gerekli veri miktarı	Daha az	Çok büyük ver, gerektirir
Hesaplama gücü ihtiyacı	Düşük-orta	Yüksek (GPU/TPU gerektirir)

**Şekil 10.** Derin öğrenme ile makine öğrenmesi arasındaki temel farklar

3.3. Bulanık Mantık ve Uzman Sistemler

Üstyapı yönetim sistemlerinde karar verme süreçleri genellikle belirsizlik, veri eksikliği ve insan yargısına dayalı değerlendirmelerle karşı karşıyadır. Bu tür durumlarda klasik matematiksel yaklaşımlar yetersiz kalmakta, çünkü gerçek dünyadaki pek çok mühendislik değişkeni keskin sınırlarla tanımlanamaz. Bulanık mantık yaklaşımı, belirsizlik içeren bu karar süreçlerinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Klasik mantığın “doğru” ya da “yanlış” gibi ikili değerlendirmeleri yerine, bulanık mantık bir durumun belirli bir ölçüde “doğru” veya “uygun” olabileceğini kabul eder. Böylece, yol yüzeyi durumu, çatlak yoğunluğu, pürüzlülük, sürüş konforu veya bakım önceliği gibi değişkenler daha esnek ve gerçekçi biçimde modellenabilir.

Bulanık mantık sistemlerinde, uzman mühendislerin deneyimlerinden elde edilen bilgi “eğer-o halde” (if-then) kuralları biçiminde modellenir. Örneğin, “Eğer çatlak oranı yüksek ve pürüzlülük değeri düşükse, bakım önceliği orta düzeydedir” gibi bir kural, mühendislerin sezgisel karar mekanizmasını sayısallaştırır. Bu kurallar, farklı yol bileşenlerinin (örneğin asfalt, temel, alt temel tabakaları) durumu hakkında daha bütüncül bir değerlendirme yapılmasını sağlar. Böylece bakım stratejileri, yalnızca ölçülen veriye değil, aynı zamanda uzman bilgisine dayalı olarak optimize edilir. Bu yönüyle bulanık

mantık, ÜYS içerisinde hem veri tabanlı hem de bilgi tabanlı karar desteği sunar.

Uzman sistemler ise, mühendislik bilgisini ve karar verme mantığını bir bilgisayar programı aracılığıyla taklit eden bilgi tabanlı sistemlerdir. Üstyapı mühendisliğinde, bu sistemler genellikle yol muayene verileri, trafik hacimleri ve iklim koşullarını analiz ederek, uygun bakım ve onarım stratejilerini önerir. Uzman sistemin temel bileşenleri olan bilgi tabanı, çıkarım motoru ve kullanıcı arayüzü aracılığıyla, mühendislik tecrübeleri bilgisayar ortamına aktarılır. Bu sayede sistem, insan müdahalesi olmadan farklı senaryoları değerlendirebilir, bakım önceliğini belirleyebilir veya alternatif malzeme ve yöntem önerilerinde bulunabilir.

Bulanık mantık ve uzman sistemlerin birlikte kullanımı, ÜYS'nin karar verme kabiliyetini daha da güçlendirmektedir. Bu birleşim sayesinde sistem hem sayısal verilerin hem de uzman yorumlarının bütünlüklü bir analizini yapabilir. Örneğin, bir yol kesiminde sensörlerden alınan pürüzlülük değerleriyle birlikte mühendislerin saha gözlemleri entegre edilerek, bakım planlama algoritması daha gerçekçi sonuçlar üretebilir. Bu tür hibrit yaklaşımlar, özellikle bakım-onarım zamanlamasında hata payını azaltmakta ve kaynak kullanımında etkinlik sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bulanık mantık ve uzman sistemler, üstyapı yönetim sistemlerinin “karar destek bileşeni” içinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu yöntemler sayesinde mühendislik yargısı sayısallaştırılmakta, belirsizlik içeren veriler anlamlı hale getirilmektedir. Günümüzde birçok ülkenin ulusal karayolu kurumları, bu sistemleri kendi ÜYS yazılımlarına entegre etmekte ve yapay zekâ destekli bakım stratejileri geliştirmektedir. Dolayısıyla, ÜYS'lerde bulanık mantık ve uzman sistem uygulamaları, geleneksel değerlendirme yöntemlerinden yapay zekâ tabanlı, öngörücü ve adaptif bir yönetim anlayışına geçişin en önemli adımlarından birini temsil etmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Üstyapı yönetim sistemlerinde yapay zekâ uygulamaları, karayolu alt yapılarının planlanması, bakımı ve rehabilitasyonu süreçlerinde önemli bir dönüşüm sağlamaktadır. Geleneksel yöntemlerin sınırlı kaldığı veri işleme ve karar verme aşamalarında, yapay zekâ modelleri (özellikle bulanık mantık, uzman sistemler, yapay sinir ağları ve makine öğrenmesi algoritmaları) hem doğruluk hem de verimlilik açısından kayda değer iyileşmeler sunmaktadır. Yapay zekâ destekli sistemler, saha ölçümlerinden, sensörlerden ve geçmiş bakım verilerinden elde edilen çok boyutlu verileri analiz ederek, yol yüzeyi bozulma tiplerini, performans düşüş hızlarını ve bakım önceliklerini daha doğru biçimde tahmin edebilmektedir. Bu sayede karar verme süreci daha bilimsel, sistematik ve öngörücü bir yapıya kavuşmaktadır.

Bulgular genel olarak göstermektedir ki, yapay zekâ tabanlı ÜYS uygulamaları, yalnızca mevcut üstyapının durum değerlendirmesinde değil, aynı zamanda kaynak tahsisi, bütçe optimizasyonu ve uzun vadeli bakım planlamasında da etkili olmaktadır. Özellikle yapay sinir ağları, çok katmanlı regresyon analizleriyle üstyapı performansının gelecekteki durumunu yüksek doğrulukla öngörebilmektedir. Bulanık mantık modelleri ise mühendislik sezgilerini sayısallaştırarak karar sürecindeki belirsizlikleri azaltmaktadır. Bu iki yaklaşımın uzman sistemlerle bütünleştirildiği hibrit modeller, sistemin kendi kendine öğrenen, uyarlanabilir ve açıklanabilir bir yapıya evrilmesini sağlamaktadır. Böylece mühendisler, geçmişte büyük ölçüde kişisel deneyimlere dayanan kararları artık veri temelli olarak destekleyebilmektedir.

Ancak yapay zekâ uygulamalarının ÜYS’lerde yaygın biçimde kullanılabilmesi için bazı sınırlılıkların aşılması gerekmektedir. En önemli zorluk, sistemlerin sağlıklı çalışabilmesi için gerekli olan geniş ve kaliteli veri tabanlarının oluşturulmasıdır. Türkiye gibi geniş karayolu ağlarına sahip ülkelerde, veri toplama altyapısının (örneğin sensör ağları, mobil ölçüm sistemleri, drone temelli görsel analiz araçları) henüz yeterince yaygın olmaması, model doğruluğunu sınırlandırmaktadır. Ayrıca, yapay zekâ algoritmalarının karar süreçlerini “açıklanabilir” biçimde sunması, mühendislerin bu sistemlere güvenini artırmak açısından önemlidir. Dolayısıyla, veri bütünlüğü, model şeffaflığı ve karar güvenilirliği konuları, gelecek çalışmaların odak noktası olmalıdır.

Yapay zekânın ÜYS’ye entegrasyonu, sadece teknik bir yenilik değil, aynı zamanda kurumsal bir dönüşüm gerektirmektedir. Bu kapsamda, kamu kurumları, üniversiteler ve özel sektör arasında güçlü bir iş birliği modeli geliştirilmelidir. Yerli veri tabanlarının oluşturulması, standartlaştırılmış performans göstergelerinin belirlenmesi ve yapay zekâ algoritmalarının Türkiye koşullarına özgü şekilde uyarlanması, sistemin sürdürülebilirliğini sağlayacaktır. Ayrıca, mühendislik eğitimi müfredatlarına “akıllı altyapı yönetimi”, “veri analitiği” ve “yapay zekâ uygulamaları” gibi derslerin eklenmesi, insan kaynağı kapasitesinin artırılmasında kritik rol oynayacaktır.

Sonuç olarak, yapay zekâ temelli üstyapı yönetim sistemleri, karayolu altyapılarının planlı, verimli ve sürdürülebilir biçimde yönetilmesi için büyük bir potansiyele sahiptir. Bu sistemler sayesinde, bakım-onarım kararları daha doğru verilmekte, ekonomik kayıplar azalmaktadır ve yol kullanıcı güvenliği artmaktadır. Gelecekte, sensör teknolojileriyle birlikte çalışan, gerçek zamanlı veri akışına dayalı, kendi kendine öğrenen üstyapı yönetim sistemlerinin geliştirilmesi mümkün görünmektedir. Böylece yapay zekâ, sadece mühendislik hesaplamalarında değil, karar verme süreçlerinin merkezinde yer alarak, akıllı ulaşım altyapılarının temel bileşeni haline gelecektir.

Son olarak, gelecekteki araştırmalarda sürdürülebilirlik, enerji verimlili-

ği ve karbon emisyonu azaltımı gibi çevresel boyutların da yapay zekâ temelli ÜYS modellerine entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır. Akıllı bakım planlaması sayesinde, yalnızca maliyet etkin değil aynı zamanda çevresel etkileri minimize eden bir yönetim yaklaşımı geliştirilebilir. Bu kapsamda, “yaşam döngüsü maliyeti” ve “yaşam döngüsü emisyonu” analizlerinin yapay zekâ ile modellenmesi, sürdürülebilir ulaştırma hedefleriyle uyumlu sonuçlar sağlayacaktır.

Genel olarak, geleceğin üstyapı yönetim sistemleri, yapay zekânın ön-görü, öğrenme ve uyum sağlama yetenekleriyle desteklenmiş, veri merkezli ve kendi kendine karar verebilen sistemler olacaktır. Bu dönüşüm, yalnızca mühendislik uygulamalarında değil, kamu politikaları, yatırım planlaması ve sürdürülebilir ulaşım vizyonlarında da köklü değişiklikler yaratacaktır. Dolayısıyla, yapay zekâ odaklı ÜYS araştırmaları, gelecekte altyapı mühendisliğinin en stratejik ve yenilikçi çalışma alanlarından biri olmayı sürdürecektir.

KAYNAKLAR

- Afrin, T., Yodo, N. 2020. "A survey of road traffic congestion measures towards a sustainable and resilient transportation system". Sustainability ,12(11), 4660.
- Akca, N. "Makine Öğreniminde Model Değerlendirme Teknikleri" Erişim adresi: <https://medium.com/@banu.akca/maki%CC%87ne-%C3%B6%C4%9Freni%C-C%87mi%CC%87nde-model-de%C4%9Ferlendi%CC%87rme-tekn%C-C%87kleri%CC%87-5d6b71391bc7/Erişim tarihi:4.09.2025>
- Alpaydin, E. 2021. "Machine learning". MIT press.
- Ay S. 2001, "Antalya Bölgesindeki Devlet Yollarının Üstyapı Performanslarının Analizi ve İyileştirme Çalışmaları", Yüksek Lisans Tezi, Antalya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bandara N., Gunaratne M. 2001. "Current And Future Pavement Maintenance Prioritization Based On Rapid Visual Condition Evaluation". Journal Of Transportation Engineering, 127(2):116-123.
- Cano-Ortiz, S., Pascual-Muñoz, P., Castro-Fresno, D. 2022. "Machine learning algorithms for monitoring pavement performance". Automation in Construction,139, 104309.
- Chen, W., Zheng, M. 2021. "Multi-objective optimization for pavement maintenance and rehabilitation decision-making: A critical review and future directions". Automation in Construction, 130, 103840.
- Chundi, V., Raju, S., Waim, A. R., Swain, S. S. 2022. "Priority ranking of road pavements for maintenance using analytical hierarchy process and VIKOR method". Innovative Infrastructure Solutions, 7(1), 28.
- Çoban, Ö. 2016. "Metin sınıflandırma teknikleri ile Türkçe twitter duygu analizi". Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Damirchilo, F., Hosseini, A., Mellat Parast, M., Fini, E. H. 2021. "Machine learning approach to predict international roughness index using long-term pavement performance data". Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 147(4), 04021058.
- Haas R., Hudson W. R., Zaniewski J., 1994. "Modern Pavement Management", Krieger Publishing Company, Florida.
- Hergüner, A. T. 2009. "Türkiye Otoyol Ağı için Üstyapı Yönetim Sistemi". Doktora Tezi,İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Justo-Silva, R., Ferreira, A., Flintsch, G. 2021. "Review on machine learning techniques for developing pavement performance prediction models". Sustainability, 13(9), 5248.
- Kang, D., Cha, Y. 2018. "Autonomous UAVs for structural health monitoring using deep learning and an ultrasonic beacon system with geo-tagging". Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 33(10), 885–902. <https://doi.org/10.1111/mice.12375>

- Lecun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. 2015. "Deep learning". *Nature*, 521(7553), 436-444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Liu, S. S., Arifin, M. F. A., Chen, W. T. 2022. An Integrated Optimization Model for Life Cycle Pavement Maintenance Budgeting Problems. *IEEE Access*, 10, 13884-13900.
- Lin J. D., Yau J. T., Hsiao L. T. 2003. "Correlation Analysis Between International Roughness Index (IRI) and Pavement Distress by Neural Networks, Transportation Research Board, 2003 Annual Meeting Cd-Rom.
- Marcelino, P., Antunes, M. L., Fortunato, E. 2019. "Improved methods for the imputation of missing data in pavement management systems".
- Mockenhaupt, A. 2021. "Maschinelles Lernen. Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Produktion". Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Öztürk, K., Şahin, M. E. 2018. "Yapay sinir ağları ve ya pay zekâya genel bir bakış". *Takvimi Vekayi*, 6(2), 25-36.
- Rifai, A. I., Hadiwardoyo, S. P., Correia, A. G., Pereira, P. 2016. "Genetic Algorithm Applied for Optimization of Pavement Maintenance under Overload Traffic: Case Study Indonesia National Highway". *Applied Mechanics and Materials*, 845, 369-378.
- Seker, S.E., 2015. "Doğal Dil İşleme (Natural Language Processing)", İstanbul Medeniyet Üniversitesi.
- Shahin, M. Y., Becker, J. M. 1984. "Development of performance prediction models for airfield pavements". *Transportation Research Record*, 985, 25.
- Sutton, R. S., Barto, A. G. 1998. "Reinforcement learning: An introduction". Cambridge: MIT press, Vol. 1, No. 1, pp. 9-11.
- Terzi S. 2004. "Coğrafi Bilgi Sistemi Yardımıyla Karayolu Üstyapı Bakım Yönetim Modeli Geliştirilmesi", Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- ÜYS Rehberi. 2024. Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şube Müdürlüğü Ankara



ZEMİNDE OLUŞAN GERİLMELER: GERİLME TEORİLERİ VE MÜHENDİSLİK ÇÖZÜMLERİ

“ ”

Damla KÜÇÜKAY KAYAALP¹

Hüseyin Suha AKSOY²

1 Araş. Gör. Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye. ORCID: (0000-0003-2021-1318)

2 Doç. Dr. Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye. ORCID: (0000-0003-0564-457X)

1. Giriş

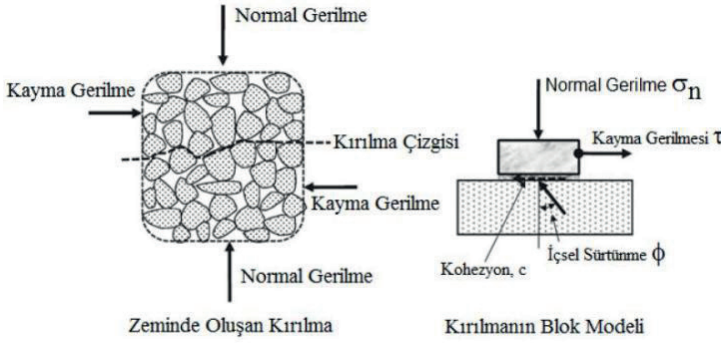
Zemindeki gerilme dağılımı, geoteknik mühendisliğinin temel kavramlarından biridir. Düşey, yatay ve kayma gerilmeleri gibi bileşenleri dikkate alarak, bu gerilmelerin zemin katmanları arasında nasıl iletilildiğini anlamak büyük önem taşır. Gerilme hesaplamalarının doğru şekilde kavranması; temellerin, istinat duvarlarının ve zeminle etkileşim halinde olan üst yapılarının güvenli ve etkin bir şekilde tasarlanabilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Aksoy et al., 2019).

Gerilme dağılımı analizleri, mühendislik uygulamalarında doğrudan temel tasarımı, şev stabilitesi değerlendirmeleri gibi alanlarda uygulanmaktadır. Gerilme teorilerinin doğru anlaşılması, laboratuvar ve saha deneylerinden elde edilen bulgularla gerçek zemin davranışının yükleme altındaki tepkisini daha doğru bir şekilde yansıtmak için gereklidir.

Zeminlerin çoğunlukla doğrusal olmayan, karmaşık ve anizotropik özellikler göstermesi nedeniyle, bu teoriler zemin tepkisinin mühendislik açısından güvenilir biçimde öngörülmesini sağlar. Böylece geoteknik mühendislerinin hem tasarım hem de inşaat süreçlerinde daha bilinçli ve güvenilir kararlar almasına yardımcı olur. Bu kitap bölümü, zeminlerdeki gerilme dağılımını tanımlamak, gerilme teorilerini anlamak ve mühendislik hesaplamalarındaki kullanımının anlaşılması açısından kolaylık sağlamak amacıyla tasarlanmıştır.

Geoteknik mühendisliğinde, zemin içindeki gerilme hesaplamaları, zemin-yapı etkileşim problemlerinin çözümü ve analizi için temel öneme sahiptir. Zemin gerilmesi, dış yükler veya mevcut zeminin ağırlığı nedeniyle zemin kütleleri içinde birim alanda oluşan iç kuvvetleri ifade eder. Bu gerilmeler normal ve kayma gerilmesi olarak iki bileşene ayrılır (Şekil 1). Bu bileşenlerin her biri, zeminin mekanik davranışında ve stabilitesinde kritik bir rol oynar (Ateş & Şadoğlu, 2020). Zeminin anizotrop yapıda olmasından dolayı zemin içerisinde meydana gelen gerilme dağılışı merak konusu olmuştur. (Boussinesq, 1885), homojen, izotrop ve lineer elastik özelliklere sahip,

Poisson oranı 0,5 olan yarı sonsuz ortamda tekil yük etkisiyle oluşan gerilme artışları için bir çözüm geliştirmiştir.



Şekil 1. Zeminde meydana gelen gerilmeler

(Westergaard, 1938) ise, özellikle rijit zemin tabakalarında yüzey yüklerinin zemin içinde nasıl dağıldığını belirlemek için kullanılır. Bu çözüm, elastisite teorisine dayanır ancak klasik Boussinesq çözümünden farklı varsayımlar içerir. Boussinesq çözümü, homojen ve izotrop (her yönde aynı özellikte) zemin varsayımına dayanırken, (Westergaard, 1938), daha rijit ve tabakalı katmanlardan oluşan ortamları dikkate alır. Düşey tekil yükün neden olduğu gerilme artışlarına dair bir çözüm önermiştir. Bu çözümler, çeşitli araştırmacılar tarafından farklı yüzey yüklemeleri için entegre edilerek o yüklemelere özgü çözümler elde edilmiştir (Algin, 2000; Newmark, 1935, 1942; Taylor, 1948). (Poulos H. G, 1967), sınırlı kalınlıktaki lineer elastik bir tabakanın yüzeyine etkiyen üniform şerit yük için bir çözüm geliştirmiştir. Laboratuvar ortamında farklı yükleme koşulları, temel boyutları, zemin cinsi ve sıklık derecesi vb. parametreler dikkate alınarak zemindeki gerilme değişimleri model deneyler yardımıyla incelenmiştir (Aksoy & Küçükay Kayaalp, 2025; Cicek et al., 2014; Keskin, S., Laman, M., & Baran, 2008; Laman, M., Keskin, 2004; Luo et al., 2024; Yazici et al., 2020). Bununla birlikte laboratuvar ortamında gerçekleştirilen gerilme ölçerlerin avantajları ve dezavantajları ile ilgili çalışmalar mevcuttur.

Zemin mekaniğinde, doğal koşullar altında veya dış yüklemeler sonucu zeminde meydana gelen gerilmeler ile bu gerilmelerin büyüklüğü ve dağılımı, temel araştırma konularından birini oluşturmaktadır. Zemin kütlesi içerisinde herhangi bir nokta ya da derinlik düzeyi dikkate alındığında, o seviyenin üzerindeki zemin tabakalarının ağırlığına ve/veya uygulanan yüzey yüklerine bağlı olarak düşey ve yatay doğrultularda gerilmeler meydana gelir. Bunun yanı sıra, zemindeki su varlığı da gerilme dağılımını etkileyen önemli bir faktör olarak karşımıza çıkar.

Zemin yüzeyine dış yükler uygulandığında, gerilmeler parçacıklar arası temas kuvvetleri aracılığıyla zemin matrisi boyunca iletilir. Bu gerilmelerin büyüklüğü ve dağılımı, yükün türü, büyüklüğü ve geometrisine bağlıdır. Aynı zamanda, zemin kütlesi içindeki derinlik, yoğunluk ve anizotropi vb. zeminin mekanik özelliklerini ifade eden faktörlere de bağlıdır (Bowles, 2012).

Geoteknik ve tasarım mühendisleri, zemindeki gerilme oluşumunun temel nedenlerini ve mekanizmalarını anlayarak daha güvenli geoteknik yapılar tasarlayabilirler. Bu durum aynı zamanda zeminlerin davranışlarının yorumlanmasına katkı sunmaktadır.

2. Zemindeki Gerilme Tanımı

Geoteknik mühendisliğinde, çeşitli yükleme koşulları altında zemin kütlelerinin mekanik davranışını tahmin etmek için gerilmelerin temel kavramlarının kapsamlı bir şekilde anlaşılması esastır. Klasik bir gerilme tanımı yerine, daneler arasında oluşan sürtünmeler dikkate alarak tanımlama yapılması gerekmektedir. İdealize edilmiş katı malzemelerin aksine, zeminlerdeki gerilme, zemin daneleri, boşluk suları ve yüklemeler arasındaki etkileşimlerin meydana getirdiği iç kuvvet olarak tanımlanır. Bu durum gerilmelerin ölçülmesini ve hesaplanmasını oldukça zorlaştıran bir durumdur. Bu bölüm, farklı gerilme türlerinin tanımı ve sınıflandırılmasını sunmakta, ayrıca çeşitli yükleme koşulları altında gerilme hesaplamaları ile ilgili yöntemleri ve hesap abaklarını kapsamaktadır.

2.1. Zemindeki Gerilme Türleri

Zeminler daneli bir yapıda olmalarına rağmen mühendislik davranışı bakımından sürekli bir ortam olarak olarak davranacağı varsayımı yapılarak hesaplama yapılır (Das, 2010).

Zemin içerisindeki gerilmeler genel olarak iki ana kategori altında sınıflandırılabilir; geostatik gerilme: zemin ağırlığından ve su basıncından kaynaklı gerilme, ek gerilme: temeller, dolgular veya istinat yapıları gibi yüzey yüklerinin uygulanmasından kaynaklanan sürşarj yükleridir. Geostatik gerilmeler, herhangi bir insan müdahalesinden önce zeminde mevcut olan doğal gerilme durumunu ifade eder. Bu gerilmeler, öncelikle üstteki zemin katmanlarının kendi ağırlığından ve sedimantasyon, erozyon ve tektonik aktivite gibi uzun vadeli jeolojik süreçlerden kaynaklanır. Bu gerilme inşaat faaliyetlerinin olmadığı durumlarda temel veya denge gerilme alanını temsil eder. Buna karşılık, ek gerilmeler ise, dış yüklemeler nedeniyle ortaya çıkan gerilmelerdir. Yani, yapıların temelleri, dolgular, kazılar, trafik yükleri gibi dış etkiler zemine aktarıldığında zeminin içindeki mevcut gerilme durumuna ek yükler biner.

Bu etkiler, önceden var olan gerilme dengesini değiştirerek zemin kütlesi içindeki gerilmelerin yeniden dağılmasına neden olur. Bu değişiklikler, uygulanan yüklerin niteliğine, büyüklüğüne ve zeminin mekanik özelliklerine bağlı olarak değişebilir.

Zemin mekaniğinde, farklı gerilme türlerini anlamak, zemin davranışını analiz etmek, temel tasarımında ve oturmaları tahmin etmede oldukça önemlidir. Zemindeki başlıca gerilme türleri şunlardır;

Toplam gerilme (σ):

Bir zemin kütlesinin herhangi bir noktasındaki toplam gerilme, başlangıç gerilmesi ile inşaat faaliyetleri sonucu oluşan ek gerilmenin toplamı olarak ifade edilebilir. Üzerindeki zeminin ağırlığından (üst yük basıncı), zemin yüzeyine uygulanan dış yüklerden (örneğin binalar, dolgular) ve zemin gözeneklerindeki suyun ağırlığından kaynaklanır. Hem zemin daneleri, hem

de boşluk suyu tarafından taşınan toplam gerilmeyi temsil eder. Efektif gerilme ve boşluksuyu basıncının toplamını şeklinde ifade edilir (Eşitlik 1).

$$\sigma_{(\text{toplam gerilme})} = \sigma'_{(\text{efektif gerilme})} + u_{(\text{boşluk suyu basıncı})} \quad (1)$$

Boşluksuyu basıncı (u):

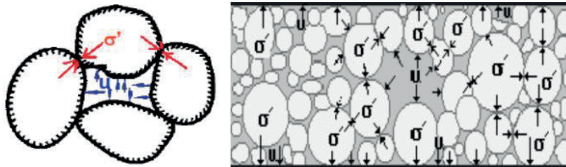
Zemin daneleri arasında tutulan yer altı suyu basıncıdır. Her yöne eşit şekilde etki eder ve su akışı olmadığında hidrostatiktir. Yer altı su seviyesinin altında, boşluk suyu basıncı genellikle pozitiftir. Yer altı su seviyesinin üzerinde, doymamış bölgede, kılcal etki nedeniyle negatif olabilir (emme basıncı olarak bilinir). Su seviyesindeki dalgalanmalar veya uygulanan yükler, boşluk suyu basıncında değişikliklere neden olabilir. Boşluksuyu basıncı, zemin parçacıkları tarafından taşınan gerilmeyi azaltarak zeminin mekanik davranışını etkiler.

Efektif gerilme (σ')

Zemin mekaniğindeki en temel kavramdır ve ilk kez (Terzaghi, 1943) tarafından önerilmiştir. Katı zemin iskeleti tarafından taşınan kısımdır (zemin daneleri arası kuvvetler). Zeminin dayanımından (kayma dayanımı) ve hacim değişiminden (sıkıştırma veya genleşme) sorumludur.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2)$$

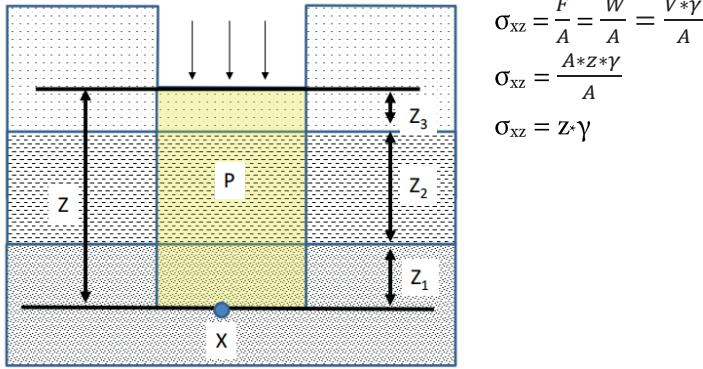
Eşitlik (2)'deki denklemde σ , toplam gerilmeyi, σ' efektif gerilmeyi, u ise boşluksuyu basıncını temsil etmektedir. Zemin dayanımının öncelikle zemin daneleri arası sürtünmeden kaynaklı olarak ortaya çıkmaktadır (Şekil 2). Bu durum da normal gerilme ile orantılıdır. Boşluksuyu basıncı normal gerilmeyi azaltarak zeminin kayma dayanımını azaltır.



Şekil 2. Zemin daneleri arasındaki efektif gerilme ve boşluk suyu basıncı
Düşey gerilme (σ_v , σ_z):

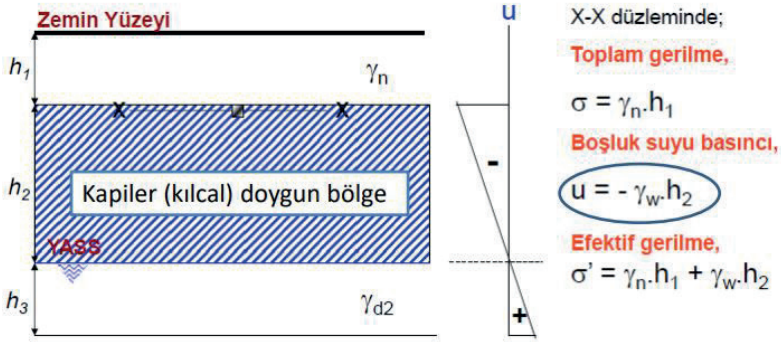
Doğal zeminin ve boşluk suyunun ağırlığından kaynaklanır. Yükün doğrudan uygulandığı noktanın altında artar ve derinlikle birlikte genellikle azalır. Temellerin oturmasında kritik rol oynar. Genellikle derinliğin artmasıyla düşey gerilme değeri artar. Düşey gerilmeler, Eşitlik 3'teki gibi hesaplanır. Şekil 3'te örnek bir zemin profili ve derinlikle birlikte değişen gerilme hesabı eşitliği verilmiştir. Bu eşitlikte σ_z , düşey gerilmeyi, γ , zeminin doğal birim hacim ağırlığını ve h ise derinliği ifade etmektedir.

$$\sigma_z = \gamma \cdot h \quad (3)$$



Şekil 3. Bir zemin profilinde düşey gerilme hesaplamaları

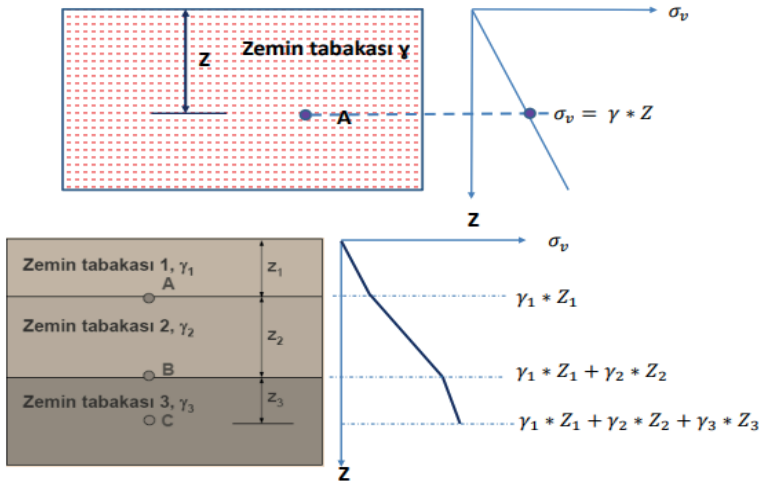
Doğal zeminler tabakalı bir ortam oluştururlar. Bu ortamda farklı tabaka kalınlıkları boyunca düşey gerilme artışlarını bulabilmek için zeminin kuru, suya doymun veya doğal birim hacim ağırlıklarının kullanılması gerekmektedir. Yeraltı su seviyesi (YASS) itibarıyla boşluk suyu basıncı lineer olarak artış göstermektedir. Ancak yüzeysel gerilme etkisiyle suyun, yeraltı su seviyesinin üzerine yükseldiği kapiler bölgede, boşluk suyu basıncı negatif değerlere ulaşır (Şekil 4). Bu bölgedeki su, çekme gerilmeleri altında bulunduğu için $u < 0$ olur ve yaklaşık olarak gerilme, bu bölgedeki yükseklik (h_c) ve suyun birim hacim ağırlığının (γ_{su}) çarpılmasıyla elde edilir.

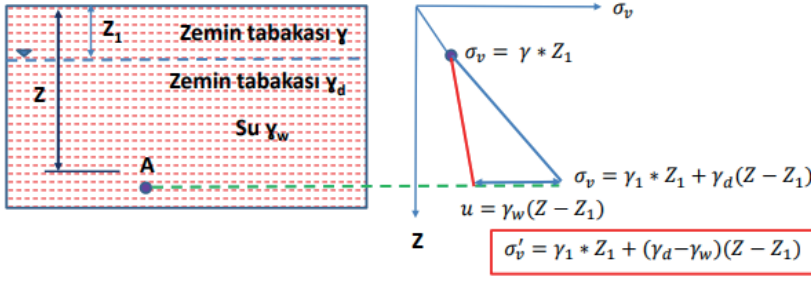


Şekil 4. Kapiler (kılcal) doymun bölgenin meydana geldiği kısımda örnek düşey gerilme hesaplamaları

Düşey gerilmelerin ve boşluk suyunun derinlikle değişimi

Zeminlerde derinliğin artmasıyla birlikte düşey gerilmeler de artar. Bu kısımda örnek bir zemin profili verilmiştir. Boşluk suyuna bağlı olarak gerilmenin derinlikle değişiminin hesaplamaları ve şematik gösterimi sunulmuştur (Şekil 5).





Şekil 5. Değişen derinlik ve boşluk suyu basıncına bağlı düşey gerilme hesabı

Yanal gerilme (σ_h , σ_x)

Yüzey yüklemesi, zeminde sadece düşey değil aynı zamanda yatay yönde de gerilme oluşturur. Bu gerilme genellikle düşey gerilmenin bir oranı şeklinde ifade edilir. Yanal gerilmelerin nasıl hesaplanması gerektiğine dair eşitlikler, özellikle zemin-yapı etkileşimlerinde ve istinat duvarı tasarımlarında önemlidir. Eşitlik 4'teki gibi hesaplanır. Bu eşitlikte, σ_h yatay gerilme, σ_v düşey gerilme, K sükunet halindeki toprak basıncıdır. Bu katsayı gerilme tarihçesine, zemin cinsine vb. faktörlere bağlı olarak değişmektedir.

$$\sigma_h = K \cdot \sigma_v \quad (4)$$

Zeminin doğal durumunda, sükunet halindeki toprak basıncı katsayısı K_0 olarak ifade edilir (Eşitlik 5).

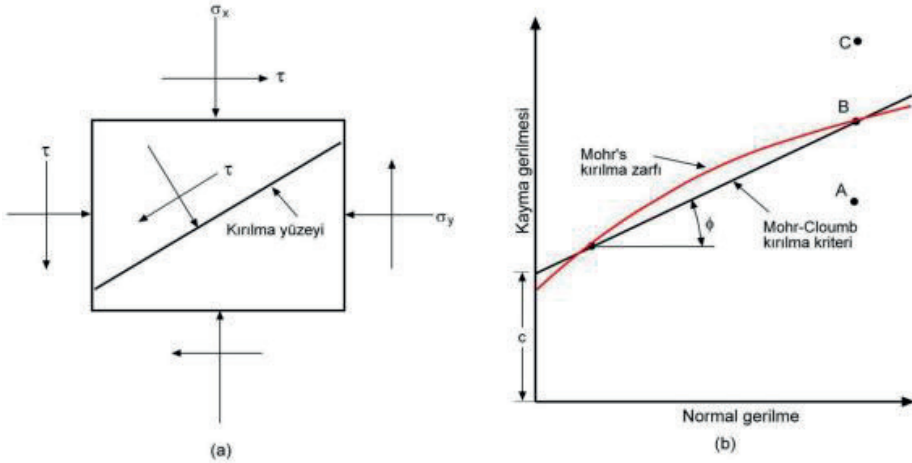
$$K_0 = \sigma_h / \sigma_v \quad (5)$$

Kayma Gerilmesi (τ)

Zeminlerde kayma gerilmesi, göçme oluşmadan zeminin karşı koyabileceği en büyük kayma direnci olarak tanımlanır. Başka bir deyişle göçme düzlemi boyunca kaymaya karşı gösterilen dirence denir. Genel olarak göçme belirli bir kayma düzlemi üzerine etkiyen normal ve kayma gerilmelerinin ortaklaşa etkisi sonucu ortaya çıkmaktadır. Zeminde göçme kriteri Mohr-Coloumb bağıntısına dayanarak hesaplanır (Eşitlik 6). Bu eşitlikte τ ; zeminin kayma dayanımı, c ; zemindeki kohezyon, ϕ ; zeminin içsel sürtünme açısıdır.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (6)$$

Bu eşitlikteki (ϕ) içsel sürtünme açısı daneler arası sürtünmeden kaynaklanan direnci değil aynı zamanda danelerin birbirilerinin hareketini engelleyen toplam direnci ifade etmektedir. Normal gerilme, kayma gerilmesi ve zemindeki göçme eğrisi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. (a) Zemindeki normal ve kayma gerilmesi (b) Zemindeki göçme eğrisi

3. Gerilme teorileri

Boussinesq (1885), uygulanan bir dış yükten dolayı homojen, izotrop ve yarı sonsuz bir ortam için gerilmelerin elastisite teorisinden yararlanarak hesaplanabileceği bir yöntem geliştirmiştir. Her ne kadar zeminlerin malzeme davranışının tamamen elastik olmadığı bilinse de, düşey gerilmelerin hesaplanmasında elastisite teorisine dayalı bu yaklaşım kullanılmaktadır.

3.1. Boussinesq Yaklaşımı

Yaygın olarak kullanılan Boussinesq teorisi, izotropik ve homojen zeminlerdeki düşey gerilme dağılımını elastisite teorisıyla hesaplamaktadır. Bu teori, düzlemsel yüzeyindeki bir nokta yükünü hesaba katarak elastik, izotropik, yarı sonsuz bir ortamda gerilme dağılımı problemini çözmüştür.

Bu teori kullanılırken (Boussinesq, 1885)'e göre;

1. Zemin elastik bir malzeme olarak kabul edilip gerilme deformasyon arasında doğrusal bir ilişki vardır.

2. Zemin yapısı homojen kabul edilir, başka bir deyişle elastisite modülü ve poisson oranı her noktada aynıdır.
3. Zemin yapısı izotropiktir, her doğrultuda aynıdır.
4. Zemin ortamı yarı sonsuzdur, yani düzlemsel alanda her doğrultuda sonsuz uzunlukta değişebilir.

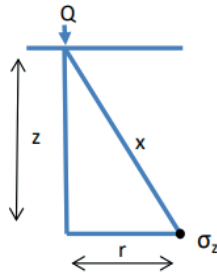
Boussinesq yöntemiyle geliştirilen farklı yükleme türleri ve farklı yaklaşık yöntemler için gerilme hesapları mevcuttur;

- **Noktasal Yük:**

Şekilde gösterildiği üzere, düzleme dik yönde etkiyen tekil (noktasal) yük (Q) elastik bir ortamda meydana getirdiği genel gerilme ifadeleri, kartezyen koordinat sistemi (Şekil 7) esas alınarak aşağıdaki formüllerle ifade edilmiştir. Eşitlik 7’de Q; noktasal yük, z; derinlik, r; yükün etki ettiği z derinliğinde x mesafesindeki uzaklıktır. Eşitlik 8’de verilen I ise etki faktörüdür. Noktasal yükün oluşturduğu gerilme değişimi Şekil 9’da verilmiştir. Etki faktörünün derinlik ve uzaklık ile ilişkisinin yer aldığı tesir faktörü tablosu Tablo 1’de verilmiştir.

$$\sigma_z = \frac{\frac{Q}{3z^3}}{2\pi(r^2+z^2)^{5/2}} = \frac{Q}{z^2 * I} \quad (7)$$

$$I \text{ (Tesir faktörü)} = \frac{3}{2\pi} * \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2} \right]^{5/2} \quad (8)$$



Şekil 7. Noktasal yükün oluşturduğu gerilme değişimi

Tablo 1. Noktasal yük için tesir faktörü tablosu

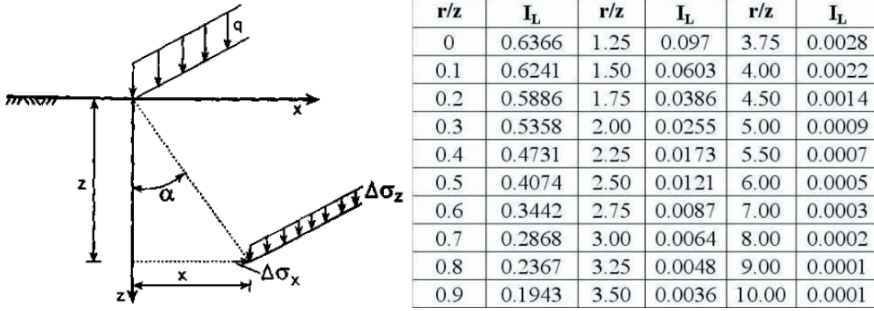
r/z	I	r/z	I	r/z	I	r/z	I	r/z	I
0.00	0.4775	0.50	0.2373	1.00	0.0944	1.50	0.0251	2.00	0.0085
0.01	0.4773	0.51	0.2579	1.01	0.0823	1.51	0.0265	2.01	0.0084
0.02	0.4770	0.52	0.2625	1.02	0.0803	1.52	0.0240	2.02	0.0082
0.03	0.4764	0.53	0.2571	1.03	0.0783	1.53	0.0234	2.03	0.0081
0.04	0.4756	0.54	0.2518	1.04	0.0764	1.54	0.0229	2.04	0.0079
0.05	0.4745	0.55	0.2466	1.05	0.0744	1.55	0.0224	2.05	0.0078
0.06	0.4733	0.56	0.2414	1.06	0.0727	1.56	0.0219	2.06	0.0076
0.07	0.4717	0.57	0.2363	1.07	0.0709	1.57	0.0214	2.07	0.0075
0.08	0.4699	0.58	0.2313	1.08	0.0691	1.58	0.0209	2.08	0.0073
0.09	0.4679	0.59	0.2263	1.09	0.0674	1.59	0.0204	2.09	0.0072
0.10	0.4657	0.60	0.2214	1.10	0.0658	1.60	0.0200	2.10	0.0070
0.11	0.4633	0.61	0.2165	1.11	0.0641	1.61	0.0195	2.11	0.0069
0.12	0.4607	0.62	0.2117	1.12	0.0626	1.62	0.0191	2.12	0.0068
0.13	0.4579	0.63	0.2070	1.13	0.0610	1.63	0.0187	2.13	0.0066
0.14	0.4548	0.64	0.2040	1.14	0.0595	1.64	0.0183	2.14	0.0065
0.15	0.4516	0.65	0.1973	1.15	0.0581	1.65	0.0179	2.15	0.0064
0.16	0.4482	0.66	0.1934	1.16	0.0567	1.66	0.0175	2.16	0.0063
0.17	0.4446	0.67	0.1889	1.17	0.0553	1.67	0.0171	2.17	0.0062
0.18	0.4409	0.68	0.1846	1.18	0.0539	1.68	0.0167	2.18	0.0060
0.19	0.4370	0.69	0.1804	1.19	0.0526	1.69	0.0163	2.19	0.0059
0.20	0.4329	0.70	0.1762	1.20	0.0513	1.70	0.0160	2.20	0.0058
0.21	0.4286	0.71	0.1721	1.21	0.0501	1.71	0.0157	2.21	0.0057
0.22	0.4242	0.72	0.1681	1.22	0.0489	1.72	0.0153	2.22	0.0056
0.23	0.4197	0.73	0.1641	1.23	0.0477	1.73	0.0151	2.23	0.0055
0.24	0.4151	0.74	0.1603	1.24	0.0466	1.74	0.0147	2.24	0.0054
0.25	0.4103	0.75	0.1565	1.25	0.0454	1.75	0.0144	2.25	0.0053
0.26	0.4054	0.76	0.1527	1.26	0.0443	1.76	0.0141	2.26	0.0052
0.27	0.4004	0.77	0.1491	1.27	0.0433	1.77	0.0138	2.27	0.0051
0.28	0.3954	0.78	0.1455	1.28	0.0422	1.78	0.0135	2.28	0.0050
0.29	0.3902	0.79	0.1420	1.29	0.0412	1.79	0.0132	2.29	0.0049
0.30	0.3849	0.80	0.1386	1.30	0.0393	1.80	0.0129	2.30	0.0048
0.31	0.3796	0.81	0.1353	1.31	0.0393	1.81	0.0126	2.31	0.0047
0.32	0.3742	0.82	0.1320	1.32	0.0384	1.82	0.0124	2.32	0.0047
0.33	0.3687	0.83	0.1288	1.33	0.0374	1.83	0.0121	2.33	0.0046
0.34	0.3632	0.84	0.1257	1.34	0.0365	1.84	0.0119	2.34	0.0045
0.35	0.3577	0.85	0.1226	1.35	0.0357	1.85	0.0116	2.35	0.0044
0.36	0.3521	0.86	0.1196	1.36	0.0348	1.86	0.0114	2.36	0.0043
0.37	0.3465	0.87	0.1166	1.37	0.0340	1.87	0.0112	2.37	0.0043
0.38	0.3408	0.88	0.1138	1.38	0.0332	1.88	0.0109	2.38	0.0042
0.39	0.3351	0.89	0.1110	1.39	0.0324	1.89	0.0107	2.39	0.0041
0.40	0.3294	0.90	0.1083	1.40	0.0317	1.90	0.0105	2.40	0.0040
0.41	0.3238	0.91	0.1057	1.41	0.0309	1.91	0.0103	2.41	0.0040
0.42	0.3181	0.92	0.1031	1.42	0.0302	1.92	0.0101	2.42	0.0039
0.43	0.3124	0.93	0.1005	1.43	0.0295	1.93	0.0099	2.43	0.0038
0.44	0.3068	0.94	0.0981	1.44	0.0288	1.94	0.0097	2.44	0.0038
0.45	0.3011	0.95	0.0956	1.45	0.0282	1.95	0.0095	2.45	0.0037
0.46	0.2955	0.96	0.0933	1.46	0.0275	1.96	0.0093	2.46	0.0036
0.47	0.2899	0.97	0.0910	1.47	0.0269	1.97	0.0091	2.47	0.0036
0.48	0.2843	0.98	0.0887	1.48	0.0263	1.98	0.0089	2.48	0.0035
0.49	0.2788	0.99	0.0865	1.49	0.0257	1.99	0.0087	2.49	0.0034

Yapılardan zemine iletilen yükler çoğunlukla temeller aracılığıyla aktarıldığından, noktasal yük varsayımıyla elde edilen gerilme dağılımları birçok inşaat mühendisliği probleminde gerçeği yeterince yansıtamamaktadır. Bu nedenle nokta yük çözümlerinin integrali alınarak yayılı yüklerin zemindeki gerilme dağılımlarını bulmak mümkündür. Bu yöntemle geometrik olarak tanımlanabilen (dikdörtgen, dairesel vb) yayılı yükler için çözüm yöntemleri geliştirilmiştir.

• Üniform Düşey Çizgisel Yük (Sonsuz Uzunlukta)

Çizgisel yükün (kuvvet/uzunluk) normal eksenden x uzaklığında ve z derinliğinde (Şekil 8) oluşturacağı gerilmeler ve uzaklık ve derinlikle ilişkili tesir faktörü verilmiştir. Eşitlik 9'da verilen denklemde; Q : çizgisel yük, z :derinlik, I : tesir faktörüdür.

$$\sigma_z = \frac{2qz^3}{\pi(x^2+z^2)^2} = \frac{Q}{Z} \cdot I \quad (9)$$

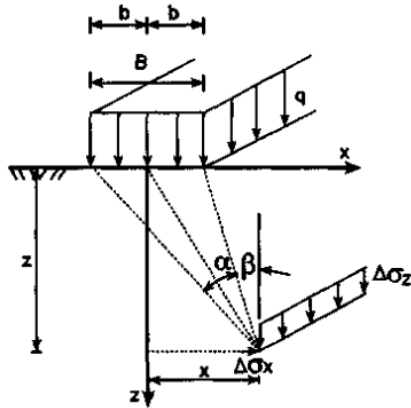


Şekil 8. Çizgisel yükün oluşturduğu gerilme dağılışı ve tesir faktörü tablosu

• Üniform Şerit Yük

B genişliğinde temelin z derinliğinde oluşturduğu (Şekil 9) gerilmeler aşağıdaki Eşitlik 10'daki gibi hesaplanır. Üniform şerit yüke ait tesir katsayısı hesaplama tablosu Tablo 2'de verilmiştir. Eşitlik 10'da verilen denklemde; q: üniform şerit yük, I: tesir faktörüdür.

$$\sigma_z = q * I \quad (10)$$



Şekil 9. Üniform şerit yükün oluşturduğu gerilme değişimi

Tablo 2. Üniform şerit yük için tesir faktörü tablosu

x/b	x/b												
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0	1.25	1.50	2.0	3.0	5.0	10.0
0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	0.997	0.996	0.992	0.979	0.909	0.775	0.500	0.059	0.011	0.001	0.000	0.000	0.000
0.4	0.977	0.973	0.955	0.906	0.773	0.651	0.498	0.178	0.059	0.011	0.000	0.000	0.000
0.6	0.937	0.928	0.896	0.825	0.691	0.598	0.495	0.258	0.120	0.030	0.004	0.000	0.000
0.8	0.881	0.869	0.829	0.755	0.638	0.566	0.489	0.305	0.173	0.056	0.010	0.001	0.000
1.0	0.818	0.805	0.766	0.696	0.598	0.540	0.480	0.332	0.214	0.084	0.017	0.002	0.000
1.2	0.755	0.743	0.707	0.646	0.564	0.517	0.468	0.347	0.243	0.111	0.026	0.004	0.000
1.4	0.696	0.685	0.653	0.602	0.534	0.495	0.455	0.354	0.263	0.135	0.037	0.005	0.000
1.6	0.642	0.633	0.605	0.562	0.566	0.474	0.440	0.356	0.276	0.155	0.048	0.008	0.000
1.8	0.593	0.585	0.563	0.526	0.497	0.453	0.425	0.353	0.284	0.172	0.060	0.010	0.000
2.0	0.550	0.543	0.524	0.494	0.455	0.433	0.409	0.348	0.288	0.185	0.071	0.013	0.001
2.5	0.462	0.458	0.445	0.426	0.400	0.386	0.370	0.328	0.285	0.205	0.095	0.022	0.002
3.0	0.396	0.393	0.385	0.372	0.355	0.345	0.334	0.305	0.274	0.211	0.114	0.032	0.003
3.5	0.345	0.343	0.338	0.329	0.317	0.310	0.302	0.281	0.258	0.210	0.127	0.042	0.004
4.0	0.306	0.304	0.301	0.294	0.285	0.280	0.275	0.259	0.242	0.205	0.134	0.051	0.006
5.0	0.248	0.247	0.245	0.242	0.237	0.234	0.231	0.222	0.212	0.188	0.139	0.065	0.010
6.0	0.208	0.208	0.207	0.205	0.202	0.200	0.198	0.192	0.186	0.171	0.136	0.075	0.015
8.0	0.158	0.157	0.157	0.156	0.155	0.154	0.153	0.150	0.147	0.140	0.122	0.083	0.025
10	0.126	0.126	0.126	0.126	0.125	0.125	0.124	0.123	0.121	0.117	0.107	0.082	0.032
15	0.085	0.085	0.085	0.084	0.084	0.084	0.084	0.083	0.083	0.087	0.078	0.069	0.041
20	0.064	0.064	0.064	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.062	0.061	0.056	0.041
50	0.025												
100	0.013												

- **Üçgen Şerit Yük**

Üçgen şeklinde bir geometrik yükleme altında meydana gelen gerilme hesabı Eşitlik 11'deki gibi hesaplanır. Üçgen şerit yüklemeye ait tesir faktörü Tablo 3'te verilmiştir. Eşitlik 11'de verilen denklemde; q: üçgen şerit yük, I: tesir faktörüdür.

$$\sigma_z = q * I \quad (11)$$

Tablo 3. Üçgen şerit yük için tesir faktörü hesap tablosu

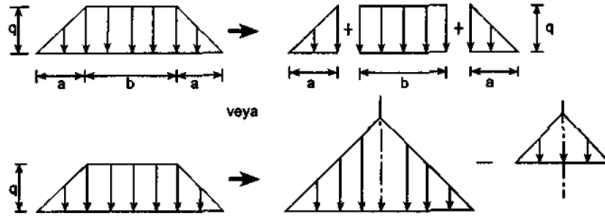
x/b	x/b													
	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0	1.25	1.5	2.0
0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000	0.200	0.400	0.600	0.800	0.900	0.500	0.000	0.000	0.000
0.2	0.000	0.000	0.000	0.002	0.061	0.209	0.395	0.577	0.697	0.648	0.437	0.050	0.009	0.001
0.4	0.00	0.001	0.003	0.013	0.110	0.227	0.372	0.497	0.527	0.475	0.379	0.136	0.042	0.007
0.6	0.001	0.003	0.008	0.031	0.140	0.232	0.334	0.409	0.414	0.380	0.328	0.177	0.080	0.018
0.8	0.003	0.006	0.016	0.0149	0.155	0.225	0.294	0.339	0.337	0.317	0.285	0.187	0.106	0.032
1.0	0.005	0.011	0.025	0.064	0.159	0.211	0.258	0.286	0.283	0.270	0.250	0.184	0.121	0.046
1.2	0.008	0.016	0.034	0.075	0.157	0.195	0.227	0.245	0.243	0.235	0.221	0.175	0.126	0.057
1.4	0.011	0.021	0.041	0.083	0.151	0.179	0.202	0.215	0.213	0.207	0.197	0.165	0.127	0.066
1.6	0.015	0.026	0.048	0.087	0.143	0.165	0.182	0.190	0.189	0.184	0.178	0.154	0.124	0.072
1.8	0.018	0.031	0.053	0.089	0.135	0.152	0.164	0.171	0.170	0.166	0.161	0.143	0.120	0.076
2.0	0.021	0.035	0.057	0.089	0.127	0.140	0.150	0.155	0.154	0.151	0.148		0.115	0.078
2.5	0.028	0.042	0.062	0.086	0.110	0.117	0.122	0.125	0.124	0.123	0.121	0.134	0.103	0.078
3.0	0.033	0.046	0.062	0.080	0.095	0.100	0.103	0.105	0.104	0.104	0.102	0.113	0.091	0.074
3.5	0.037	0.048	0.060	0.0073	0.084	0.087	0.089	0.090	0.090	0.089	0.089	0.098	0.081	0.069
4.0	0.038	0.048	0.058	0.067	0.075	0.077	0.078	0.079	0.079	0.079	0.078	0.085	0.073	0.064
5.0	0.039	0.045	0.051	0.0057	0.061	0.062	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.062	0.060	0.055
6.0	0.037	0.041	0.046	0.049	0.052	0.052	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.052	0.051	0.048
8.0	0.032	0.035	0.037	0.038	0.039	0.039	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.039	0.039	0.038
10.0	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.031	0.031
15.0	0.020	0.020	0.021	→										0.021
20.0	0.015	0.016	0.016	→										0.016
50.0	0.006	→												0.006

- **Yamuk Şerit Yük**

Yamuk şerit yük, uzun ve en kesiti yamuk şeklinde olan bir yükle şeklidir (Şekil 10). Yamuk şerit yükten oluşan gerilme artışları; bir üniform şerit yük ve iki üçgen yükün toplamı olarak ifade edilir ve tesir katsayısı Tablo 4'te

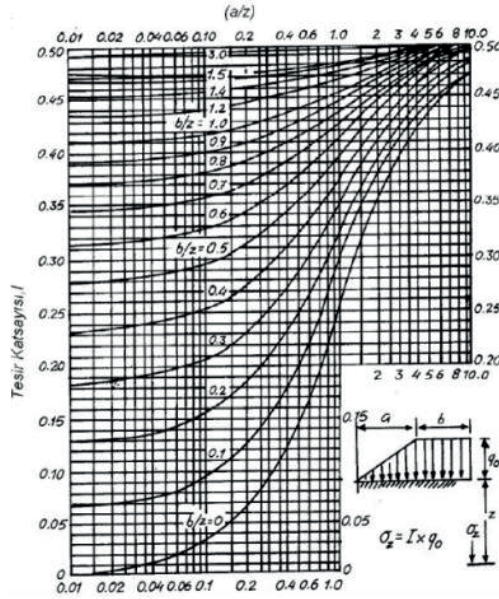
verilen hesap tablosu yardımıyla hesaplanır. Eşitlik 12'deki gibi hesaplanır. q: yamuk şerit yük, I: tesir faktörüdür.

$$\sigma_z = q \cdot I \quad (12)$$



Şekil 10. Yamuk şerit yük

Tablo 4. Yamuk şerit yük için tesir faktörü hesap abacı



- **Üniform yüklü dairesel alan**

Üniform yüklü bir dairesel alan altında meydana gelen gerilmeler aşağıdaki Eşitlik 13'de verilen denklemdeki gibi hesaplanır. Tesir katsayısı hesap tablosu Tablo 5'te verilmiştir. q: üniform yüklü dairesel yük, I: tesir faktörüdür.

$$\sigma_z = q * I \quad (13)$$

Tablo 5. Dairesel yük için tesir faktörü tablosu

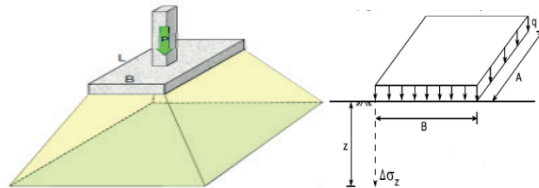
	a/r																	
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00
z/r	0,25	0,9824	0,9657	0,8825	0,4519	0,0723	0,0141	0,0016	0,0004	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,50	0,8961	0,8393	0,6913	0,4157	0,1683	0,0601	0,0104	0,0028	0,0010	0,0004	0,0002	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,75	0,7625	0,6912	0,5569	0,3737	0,2063	0,1019	0,0255	0,0080	0,0030	0,0014	0,0007	0,0004	0,0002	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
	1,00	0,6254	0,5620	0,4584	0,3318	0,2134	0,1264	0,0417	0,0151	0,0062	0,0029	0,0015	0,0008	0,0005	0,0002	0,0001	0,0000	0,0000
	1,25	0,5068	0,4575	0,3816	0,2922	0,2062	0,1367	0,0553	0,0228	0,0102	0,0050	0,0027	0,0015	0,0009	0,0004	0,0002	0,0001	0,0000
	1,50	0,4112	0,3749	0,3202	0,2560	0,1925	0,1378	0,0649	0,0301	0,0145	0,0075	0,0041	0,0024	0,0014	0,0008	0,0003	0,0001	0,0001
	1,75	0,3362	0,3099	0,2706	0,2239	0,1765	0,1335	0,0707	0,0361	0,0187	0,0101	0,0058	0,0034	0,0021	0,0009	0,0004	0,0002	0,0001
	2,00	0,2777	0,2588	0,2302	0,1959	0,1601	0,1264	0,0733	0,0406	0,0225	0,0128	0,0075	0,0046	0,0029	0,0013	0,0006	0,0003	0,0002
	2,25	0,2320	0,2182	0,1972	0,1717	0,1444	0,1179	0,0735	0,0436	0,0256	0,0152	0,0092	0,0058	0,0037	0,0017	0,0008	0,0004	0,0003
	2,50	0,1960	0,1858	0,1702	0,1509	0,1299	0,1090	0,0721	0,0454	0,0280	0,0174	0,0109	0,0070	0,0046	0,0021	0,0011	0,0006	0,0003
	2,75	0,1673	0,1597	0,1479	0,1332	0,1169	0,1002	0,0697	0,0461	0,0298	0,0192	0,0124	0,0082	0,0055	0,0026	0,0014	0,0007	0,0004
	3,00	0,1441	0,1384	0,1294	0,1180	0,1052	0,0919	0,0666	0,0460	0,0309	0,0206	0,0138	0,0093	0,0064	0,0031	0,0016	0,0009	0,0005
	3,25	0,1253	0,1209	0,1139	0,1051	0,0949	0,0842	0,0632	0,0452	0,0315	0,0217	0,0149	0,0103	0,0072	0,0036	0,0020	0,0011	0,0007
	3,50	0,1098	0,1064	0,1009	0,0939	0,0858	0,0771	0,0596	0,0441	0,0317	0,0224	0,0158	0,0112	0,0079	0,0041	0,0023	0,0013	0,0008
	3,75	0,0969	0,0942	0,0899	0,0843	0,0778	0,0706	0,0560	0,0426	0,0315	0,0229	0,0165	0,0119	0,0086	0,0046	0,0026	0,0015	0,0009
	4,00	0,0861	0,0840	0,0805	0,0760	0,0707	0,0648	0,0526	0,0410	0,0311	0,0231	0,0170	0,0125	0,0092	0,0051	0,0029	0,0017	0,0011
	4,25	0,0770	0,0753	0,0725	0,0688	0,0644	0,0596	0,0493	0,0392	0,0304	0,0231	0,0174	0,0130	0,0097	0,0055	0,0032	0,0019	0,0012
	4,50	0,0692	0,0678	0,0655	0,0625	0,0589	0,0549	0,0461	0,0374	0,0296	0,0229	0,0176	0,0134	0,0102	0,0059	0,0035	0,0021	0,0014
	4,75	0,0626	0,0614	0,0595	0,0570	0,0540	0,0506	0,0432	0,0357	0,0287	0,0226	0,0176	0,0136	0,0105	0,0063	0,0038	0,0024	0,0015

• Üniform yüklü dikdörtgen alan

Üniform yüklü dikdörtgen alan altında meydana gelen gerilmeler farklı yöntemlerle hesaplanabilir. Konuyla ilgili gerilme hesapları ve abakları aşağıda verilmiştir. Şekil 11’de dikdörtgen yüklü alan altında meydana gelen gerilme dağılışı verilmiştir. Tablo 6’da ise üniform yüklü dikdörtgen alan için etki faktörleri hesap tablosu verilmiştir. Eşitlik 14’te verilen denklemlerde, q; yük, I: tesir faktörüdür. Eşitlik 15’te verilen denklemde $m = B/z$ (temel genişliği / derinlik), $n = L/z$ (Temel uzunluğu / derinlik).

$$\Delta\sigma_z = q * I \quad (14)$$

$$I = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+m^2n^2+1} \right) \left(\frac{m^2+n^2+2}{m^2+n^2+1} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2-m^2n^2+1} \right) \quad (15)$$

**Şekil 11.** Dikdörtgen yüklü alan altında meydana gelen gerilmeler

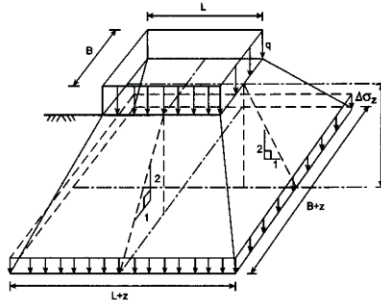
Tablo 6. Üniform yüklü dikdörtgen alan için tesir faktörü tablosu

$m=B/z$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	$m=L/z$	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.1	0.0047	0.0092	0.0132	0.0168	0.0198	0.0222	0.0242	0.0258	0.0270	0.0279	0.0287
0.2	0.0092	0.0179	0.0259	0.0328	0.0387	0.0435	0.0474	0.0504	0.0528	0.0547	0.0567
0.3	0.0132	0.0259	0.0374	0.0474	0.0559	0.0629	0.0686	0.0731	0.0766	0.0794	0.0813
0.4	0.0168	0.0328	0.0474	0.0602	0.0711	0.0801	0.0873	0.0931	0.0977	0.1013	0.1039
0.5	0.0198	0.0387	0.0559	0.0711	0.0840	0.0947	0.1034	0.1104	0.1158	0.1202	0.1237
0.6	0.0222	0.0435	0.0629	0.0801	0.0947	0.1069	0.1168	0.1247	0.1311	0.1361	0.1396
0.7	0.0242	0.0474	0.0686	0.0873	0.1034	0.1168	0.1277	0.1365	0.1436	0.1491	0.1537
0.8	0.0258	0.0504	0.0731	0.0931	0.1104	0.1247	0.1365	0.1461	0.1537	0.1598	0.1654
0.9	0.0270	0.0528	0.0766	0.0977	0.1158	0.1311	0.1436	0.1537	0.1619	0.1684	0.1732
1.0	0.0279	0.0547	0.0794	0.1013	0.1202	0.1361	0.1491	0.1598	0.1684	0.1752	0.1815
1.2	0.0293	0.0573	0.0832	0.1063	0.1263	0.1431	0.1570	0.1684	0.1777	0.1851	0.1914
1.4	0.0301	0.0589	0.0856	0.1094	0.1300	0.1475	0.1620	0.1739	0.1836	0.1914	0.1981
1.6	0.0306	0.0599	0.0871	0.1114	0.1324	0.1503	0.1652	0.1774	0.1874	0.1955	0.2024
1.8	0.0309	0.0606	0.0880	0.1126	0.1340	0.1521	0.1672	0.1797	0.1899	0.1981	0.2044
2.0	0.0311	0.0610	0.0887	0.1134	0.1350	0.1533	0.1686	0.1812	0.1915	0.1999	0.2064
2.5	0.0314	0.0616	0.0895	0.1145	0.1363	0.1548	0.1704	0.1832	0.1938	0.2024	0.2094
3.0	0.0315	0.0618	0.0898	0.1150	0.1368	0.1555	0.1711	0.1841	0.1947	0.2034	0.2104
5.0	0.0316	0.0620	0.0901	0.1154	0.1374	0.1561	0.1719	0.1849	0.1956	0.2044	0.2114
10.0	0.0316	0.0620	0.0902	0.1154	0.1375	0.1562	0.1720	0.1850	0.1958	0.2046	0.2116
∞	0.0316	0.0620	0.0902	0.1154	0.1375	0.1562	0.1720	0.1850	0.1958	0.2046	0.2116

n	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	5.0	10.0	∞
0.1	0.0293	0.0301	0.0306	0.0309	0.0311	0.0314	0.0315	0.0316	0.0316	0.0316
0.2	0.0573	0.0589	0.0599	0.0606	0.0610	0.0616	0.0618	0.0620	0.0620	0.0620
0.3	0.0832	0.0856	0.0871	0.0880	0.0887	0.0895	0.0898	0.0901	0.0902	0.0902
0.4	0.1063	0.1094	0.1114	0.1126	0.1134	0.1141	0.1145	0.1148	0.1150	0.1151
0.5	0.1263	0.1300	0.1324	0.1340	0.1350	0.1363	0.1368	0.1374	0.1375	0.1375
0.6	0.1431	0.1475	0.1503	0.1521	0.1533	0.1548	0.1555	0.1561	0.1562	0.1562
0.7	0.1570	0.1620	0.1652	0.1672	0.1686	0.1704	0.1711	0.1719	0.1720	0.1720
0.8	0.1684	0.1739	0.1774	0.1797	0.1812	0.1832	0.1841	0.1849	0.1850	0.1850
0.9	0.1777	0.1836	0.1874	0.1898	0.1915	0.1930	0.1947	0.1956	0.1958	0.1958
1.0	0.1851	0.1914	0.1955	0.1981	0.1999	0.2024	0.2034	0.2044	0.2046	0.2046
1.2	0.1958	0.2028	0.2073	0.2103	0.2124	0.2151	0.2163	0.2175	0.2177	0.2177
1.4	0.2028	0.2102	0.2151	0.2184	0.2206	0.2236	0.2250	0.2263	0.2265	0.2266
1.6	0.2073	0.2151	0.2203	0.2237	0.2261	0.2294	0.2309	0.2324	0.2326	0.2326
1.8	0.2103	0.2184	0.2237	0.2274	0.2299	0.2333	0.2350	0.2366	0.2368	0.2369
2.0	0.2124	0.2206	0.2261	0.2299	0.2325	0.2361	0.2378	0.2395	0.2399	0.2399
2.5	0.2151	0.2236	0.2294	0.2333	0.2361	0.2401	0.2420	0.2439	0.2443	0.2443
3.0	0.2163	0.2250	0.2309	0.2350	0.2378	0.2420	0.2439	0.2461	0.2465	0.2465
5.0	0.2175	0.2263	0.2324	0.2366	0.2395	0.2439	0.2461	0.2486	0.2491	0.2492
10.0	0.2177	0.2265	0.2326	0.2368	0.2399	0.2443	0.2465	0.2491	0.2498	0.2499
∞	0.2177	0.2266	0.2326	0.2369	0.2399	0.2443	0.2465	0.2492	0.2499	0.2500

• **Üniform yüklü dikdörtgen alan için yaklaşık yöntem 1 (2:1 Yöntemi /tan 63,5° yöntemi)**

Yüklenmiş bir alan için gerilmenin derinlikle dağılımını hesaplamada kullanılan en pratik yöntemlerden birisi (2:1) yöntemidir. Bu yaklaşım, üzerine yük uygulanan alanın derinlikle sistematik bir şekilde arttığı varsayımına dayanan bir ampirik yaklaşımdır (Bowles, 2012). Şekil 12’de gösterildiği gibi, aynı düşey kuvvet gittikçe daha geniş bir alan üzerine yayıldığı için birim gerilme derinlikle azalır. Eşitlik (16) da verilen denklem yardımıyla hesaplanır. Bu eşitlikte q: sürşarj yükü, B: temel genişliği L: temel uzunluğu z: zemin yüzeyinden σ_z elde edilmek istendiği yere kadar olan mesafe



Şekil 12. 2:1 Yöntemi /tan 63,5° yöntemi

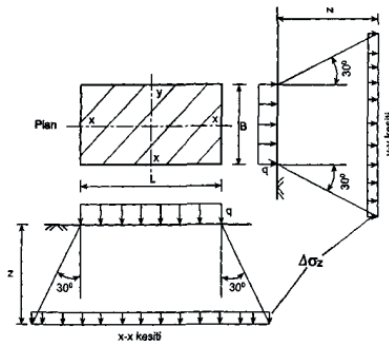
$$\Delta\sigma_z = \frac{qBL}{(B+z)(L+z)} = q^*I \quad (16)$$

• **Üniform yüklü dikdörtgen alan için yaklaşık yöntem 2 (tan 60° yöntemi)**

Üniform yüklü dikdörtgen alan için kullanılan bir diğer yaklaşım yöntemi tan 60° yöntemidir. Burada da yükün yatayla yaptığı açı değişmektedir (Şekil 13). Eşitlik 17'de verilen denklem yardımıyla hesaplanır. Bu eşitlikte q: sürşarj yükü, B: temel genişliği L: temel uzunluğu z: zemin yüzeyinden σ_z elde edilmek istendiği yere kadar olan mesafe

Yaklaşık yöntemle hesaplanan gerilmenin ortalama bir gerilme olduğunu bilmek önemlidir. Bir temel altındaki gerilme dağılımı, temelin rijitliğine ve genel itibarıyla kohezyonlu veya iri daneli olup olmadığına bağlıdır (Das, 2018). tan 63.5° ve tan 60° yöntemleri, basit, hızlı ve kullanımı kolay olduğu için yaygın şekilde kullanılır.

$$\Delta\sigma_z = \frac{qBL}{(B+1.155z)(L+1.155z)} \quad (17)$$



Şekil 13. tan 60° yöntemi

3.2. Westergaard yöntemi

Doğal zemin tabakaları içinde, yatay düzlemlerde oluşan sürtünme kuvvetlerinden dolayı düşey yüklemeler altında yatay şekil değiştirmeler oldukça sınırlıdır. (Westergaard, 1938), yatay şekil değiştirmesi sıfır olan

elastik ortamdaki gerilme dağılışını aşağıdaki gibi ifade etmiştir. Doğal zemin tabakalarında, yatay düzlemler boyunca gelişen sürtünme kuvvetleri nedeniyle düşey yüklemeler altında yatay deformasyonlar oldukça kısıtlıdır. Bu duruma dayanarak, yatay şekil değiştirmenin sıfır kabul edildiği elastik ortam için gerilme dağılımı aşağıdaki şekilde ortaya konulmuştur. Eşitlik 18 ve 19'da verilen denklemlerde; σ_z :düşey gerilme, Q: yük, z: derinlik, I: tesir faktörü r: yükün σ_z 'nin elde edilmek istendiği yere olan yatay mesafedir.

$$\sigma_z = \left(\frac{Q}{z^2 * I} \right) \quad (18)$$

$$I = \frac{\frac{1}{\pi}}{\left(1 + 2 \left(\frac{r}{z} \right)^2 \right)^{3/2}} \quad (19)$$

3.3. Newmark (1942) yöntemi

Bu yöntem de üniform yüklü dikdörtgen bir alan altında meydana gelen gerilmelerin hesaplanmasında kullanılır (Newmark, 1942). Bu yönteme göre,

1. Üniform yüklü alanın ölçekli bir planı şeffaf kağıda çizilir.
2. Planı çizilen kağıt üzerinde, artışı aranılan nokta diyagramın merkezine getirilerek, alan sınırları içinde kalan elemanlar sayılır (N).
- 3.Elde edilen veriler kullanılarak gerilme artışı aşağıdaki formül (Eşitlik 20) kullanılarak hesaplanır.

$$\sigma_z = i \times n \times q \quad (20)$$

KAYNAKLAR

- Aksoy, H. S., Küçükay, D., & Gör, M. (2019). kum zemine oturan kare temel altında oluşan yanıl gerilmelerin deneysel ve teorik incelemei. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*.
<https://doi.org/10.28948/ngumuh.598237>
- Aksoy, H. S., & Küçükay Kayaalp, D. (2025). Experimental Investigation of Lateral Stresses and Bearing Capacity of Sandy Soil Under Shallow Foundation Loads. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(12), 1–22.
<https://doi.org/10.3390/app15126699>
- Algin, H. M. (2000). Stresses from linearly distributed pressures over rectangular areas. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 24(8), 681–692.
- Ateş, B., & Şadoğlu, E. (2020). Donatılı Kum Zeminlerde Düzlem Deformasyon Koşullarında Düşey Gerilme Dağılışı. *Teknik Dergi*, 31(3), 9967–9985.
<https://doi.org/10.18400/tekderg.449897>
- Boussinesq, J. (1885). *Application des potentiels a l'etude de l'equilibre et due mouvement des solids elastiques*.
- Bowles, J. E. (2012). *Foundation Analysis and Design* (5th ed). McGraw-Hill.
- Cicek, E., Guler, E., & Yetimoglu, T. (2014). Comparison of Measured and Theoretical Pressure Distribution below Strip Footings on Sand Soil. *International Journal of Geomechanics*, 14(5), 1–8. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000347](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000347)
- Das, B. M. (2010). *Geotechnical Engineering Handbook*. J. Ross Publishing.
- Das, B. M. (2018). *Principle of Geotechnical Engineering* (9 (ed.)). Global Engineering, Cengage Learning.
- Keskin, S., Laman, M., & Baran, T. (2008). Keskin, S., Laman, M., & Baran, T. (2008). Experimental determination and numerical analysis of vertical stresses under square footings resting on sand. *Teknik Dergi*, 19(4), 4521–4538. *Teknik Dergi*, 19(4), 4521–4538.
- Laman, M., Keskin, M. S. (2004). Kumlu Zeminlere Oturan Kare Temeller Altında Düşey Gerilme Analizi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 3(431), 53–57.
- Luo, Z., Ding, X., Zhang, X., Ou, Q., Yang, F., Zhang, T., & Cao, G. (2024). Experimental and numerical investigation of the bearing capacity and deformation behavior of coral sand foundations under shallow footing loads. *Ocean Engineering*, 310(P1), 118601.

<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118601>

- Newmark, N. . (1935). *Simplified computation of vertical stress below foundations*. 19.
- Newmark, N. M. (1942). Influence chart for computation of stresses in elastic foundations. *University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin Series*, 61(338).
- Poulos H. G. (1967). Stresses and displacements in an elastic layer underlain by a rough rigid base. *Ge'otechnique*, 17(4), 378–410.
- Taylor, D. . (1948). *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley & Sons.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
- Westergaard, H. (1938). *A problem of elasticity suggested by a problem in soil mechanics: soft material reinforced by numerous strong horizontal sheets*.
- Yazici, M. F., Akan, R., & Keskin, S. N. (2020). *Kum Zeminlerde İlave Düşey Gerilmenin Derinlikle Değişiminin Farklı Yöntemlerle İncelenmesi* 9(3), 1327–1336.