

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ DEĞERLENDİRMELERİ

Editör: Doç.Dr. Emre TOPÇU

yaz
yayınları

İnşaat Mühendisliği Değerlendirmeleri

Editör

Doç.Dr. Emre TOPÇU

yaz
yayınları

2025

İnşaat Mühendisliği Değerlendirmeleri

Editör: Doç.Dr. Emre TOPÇU

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-5838-86-5

Ekim 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

M5p-Tree, Gaussian, Random Forest ve Elasticnet Modelleri ile Geopolimer Harçların Mekanik Performansının Tahmini.....	1
<i>Şinasi BİNGÖL</i>	
Betonarme Kirişlerde Boyut Etkisi	12
<i>Kağan SÖĞÜT</i>	
Tramvay Sistemlerinde Yağmur Suyu Drenajının Önemi	23
<i>Polat YALINIZ</i>	
İnsansız Hava Araçlarının (İHA) İnşaat Mühendisliği Alanında Kullanımı: Avantajları, Sınırlılıkları ve Geleceği	32
<i>Orhan KAYA</i>	
The Evolution of Road Transportation in Anatolia: Routes, Construction Techniques and Organizations	45
<i>Ebru ARIKAN ÖZTÜRK, Ahmet GÖKDEMİR, Fatih KARAÇOR, Ömer Faruk IŞIK</i>	
İnşaat ve Gayrimenkul Sektörlerinin Yalıtım ve Enerji Tüketimi Yönünden Analizi ve Değerlendirmesi	86
<i>Arif Hikmet ÇAKOĞLU</i>	
Dayanma Yapılarında Geoteknik Tasarım, Dayanıklılık ve Sürdürülebilir Malzeme Entegrasyonu.....	104
<i>Onur YAVAN, Saadet Gökçe GÖK</i>	

Ağustos-Eylül 2025 Sındırgı Deprem Dizisinden Yer Hareketine Dair Bulgular: Ana Şok-Artçı Dinamikleri	123
--	------------

Süleyman GÜCEK, Kamil Bekir AFACAN

Türkiye’de Motorlu Taşıt Yaşlarının Eğilimleri ve Etkileri.....	147
--	------------

Eren DAĞLI

Betonarme Yapılarda Frp Kompozit Malzemelerin Kullanımı.....	168
---	------------

Yasin DUYSAK

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

M5P-TREE, GAUSSIAN, RANDOM FOREST VE ELASTICNET MODELLERİ İLE GEOPOLİMER HARÇLARIN MEKANİK PERFORMANSININ TAHMİNİ

Şinasi BİNGÖL¹

1. GİRİŞ

Geleneksel Portland çimentosu (PÇ), dünya genelinde en yaygın kullanılan yapı malzemesi olmasına rağmen, üretim süreci önemli çevresel sorunları beraberinde getirmektedir. Çimento üretimi, küresel karbondioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık %8'inden sorumlu olup, yüksek enerji tüketimi ve doğal kaynakların hızla tükenmesi gibi olumsuz etkilere sahiptir (Scrivener, Juilland, and Monteiro 2015). Bu çevresel baskılar, araştırmacıları ve endüstriyi, PÇ'ye alternatif olabilecek daha sürdürülebilir ve çevre dostu bağlayıcı malzemeler geliştirmeye yöneltmiştir. Bu alternatifler arasında, geopolimerler son yıllarda öne çıkan en dikkat çekici teknolojilerden biri olarak kabul edilmektedir (Davidovits 1991).

Geopolimerler, alüminosilikat kaynakların (örneğin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu veya metakaolin) yüksek alkali bir aktivatör çözeltisi (genellikle sodyum hidroksit ve sodyum silikat kombinasyonu) ile reaksiyona girmesi sonucu oluşan inorganik polimerlerdir (Provis 2009). Bu reaksiyon, "geopolimerizasyon" olarak adlandırılan bir süreçle gerçekleşir ve sonuçta amorf veya yarı kristal yapıda, üç boyutlu bir alüminosilikat ağ yapısı meydana gelir. Bu yapı, geopolimerlere

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, sinasi.bingol@gop.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3708-3079.

yüksek mekanik dayanım, hızlı priz alma, yüksek sıcaklıklara ve kimyasal etkilere karşı üstün direnç gibi özellikler kazandırır (Duxson et al. 2007). Geopolimer teknolojisi, ince agrega (kum) ile birleştirildiğinde, onarım, güçlendirme ve kaplama gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilen geopolimer harçları oluşturur.

Geopolimer harçlar, geleneksel çimento bazlı harçlara kıyasla bir dizi avantaja sahiptir. Düşük karbon ayak izine sahip olmaları, endüstriyel atıkların (uçucu kül ve cüruf gibi) yeniden değerlendirilmesini sağlayarak döngüsel ekonomiye katkıda bulunmaları en önemli çevresel faydalarıdır (McLellan et al. 2011). Teknik olarak ise sülfat ve asit ataklarına karşı daha yüksek dayanıklılık göstermeleri, klorür iyonu geçirimsizliklerinin düşük olması ve yangına karşı mükemmel direnç sergilemeleri, onları özellikle agresif çevre koşullarına maruz kalacak yapılar için ideal bir malzeme haline getirmektedir (Bakharev 2005). Bu üstün özellikleri sayesinde geopolimer harçlar, sadece geleneksel harçlara bir alternatif olmakla kalmayıp, aynı zamanda yapı endüstrisinin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında kilit bir rol oynama potansiyeli taşımaktadır.

Bu çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda, YFC ve ÇÇ üç farklı oranda seçilerek, 10 farklı oranda aktivatör ile aktive edilmiş ve harç sıcaklığı, ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı belirlenmiştir. İkinci kısımda ise elde edilen harç sıcaklığı ve harç karışım oranları (YFC, ÇÇ ve Na oranları) kullanılarak basınç dayanımı tahmini yapılmıştır. Buradaki amaç, harç üzerinde herhangi bir eğilme-basınç testi yapılmaksızın basınç dayanımını önceden tahmin edebilmektir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

2.1.1. Yüksek Fırın Cürufu

Adana Çimento A.Ş.'den temin edilen öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. YFC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. YFC'ye ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Kimyasal İçerik	Analiz sonucu (%)
<i>SiO₂</i>	38.89
<i>CaO</i>	28.94
<i>Al₂O₃</i>	13.48
<i>MgO</i>	5.53
<i>SO₃</i>	1.51
<i>Fe₂O₃</i>	1.36
<i>MnO</i>	1.16
<i>K₂O</i>	0.78
<i>TiO₂</i>	0.53
<i>BaO</i>	0.45
<i>P₂O₅</i>	0.41
<i>Na₂O</i>	0.36
<i>SrO</i>	0.10
<i>Kızdırma Kaybı</i>	6.50
<i>Özgül yüzöl alanı</i>	5990 cm ² /g
<i>Yoğunluk</i>	2.88 g/cm ³

2.1.2. Çelikhane Cürufu

Kardemir demir-çelik fabrikasının atığı olan çelikhane cürufu ikincil bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Çelikhane cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. ÇC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal İçerik	Analiz sonucu (%)
<i>SiO₂</i>	13.53
<i>CaO</i>	52.83
<i>Al₂O₃</i>	3.16
<i>MgO</i>	5.49
<i>SO₃</i>	0.99
<i>Fe₂O₃</i>	12.74
<i>MnO</i>	1.73
<i>K₂O</i>	0.16
<i>TiO₂</i>	0.58
<i>BaO</i>	-
<i>P₂O₅</i>	0.50
<i>Na₂O</i>	0.02
<i>SrO</i>	0.03
<i>V₂O₅</i>	0.77
<i>Kızdırma Kaybı</i>	7.24
<i>Özgül yüzöl alanı</i>	6800 cm ² /g
<i>Yoğunluk</i>	3.18 g/cm ³

2.1.3. Kum

Çalışmada Tokat bölgesinden temin edilen 0-4 mm aralığında çapa sahip dere agregası kullanılmıştır. Özgül ağırlığı 2.4 g/cm³'tür.

2.1.4. Su

Harçların üretilmesinde TS EN 1008'e uygun içilebilir temiz şebeke suyu kullanılmıştır (TS EN 1008 2003).

2.1.5. Aktivatör

Tekkim Kimya Sanayi ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilen sodyum silikat kullanılmıştır.

2.2. Yöntem

Endüstriyel atıklar kullanılarak TS EN 196-7'ye uygun şekilde harç karışımları üretilmiştir (TS EN 196-7 2010). Üretilen harçlar 40*40*160 mm'lik prizma kalıplara dökülerek 1 gün süreyle 75 °C'de etüvde bekletilmiştir. Harç üretiminde YFC ve ÇC; %90 YFC+ %10 ÇC, %80 YFC+ %20 ÇC ve %70 YFC+ %30 olmak üzere üç farklı oranda seçilmiştir. Harçların aktivasyonu için cüruף ağırlığının %1, %2, %3, %4, %5, %6, %7, %8, %9 ve %10'u oranında Na₂SiO₃ katılmıştır. Harç karışım oranları Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. Harç karışım oranları

Cüruף ikame oranları	YFC	ÇC	Su	Aktivatör	Kum
%90+%10	405 g	45 g	225 ml	12; 24; 36; 48; 60; 72; 84; 96; 108; 120 g	1350 g
%80+%20	360 g	90 g	225 ml	12; 24; 36; 48; 60; 72; 84; 96; 108; 120 g	1350 g
%70+%30	315 g	135 g	225 ml	12; 24; 36; 48; 60; 72; 84; 96; 108; 120 g	1350 g

Üretilen harçlar taze haldeyken termometre yardımıyla sıcaklıkları ölçülmüştür. Numuneler kür sürelerini tamamladıktan sonra ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Dayanım tahmini için Weka 3.8.6 programı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında; M5P-tree regresyon modeli, Gaussian regresyon modeli, Random forest regresyon modeli ve ElasticNet regresyon modeli kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Üretilen geopolimer harçların taze haldeyken sıcaklığı ölçülmüştür. Daha sonra 1 gün etüvde 75 °C'de kür edilmiştir.

Kür süresinin sonunda numunelerin ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Elde edilen deneysel verilerle, harçlara ait basınç dayanımını tahmin etmek için harç karışım oranları ve harç sıcaklığı kullanılmıştır.

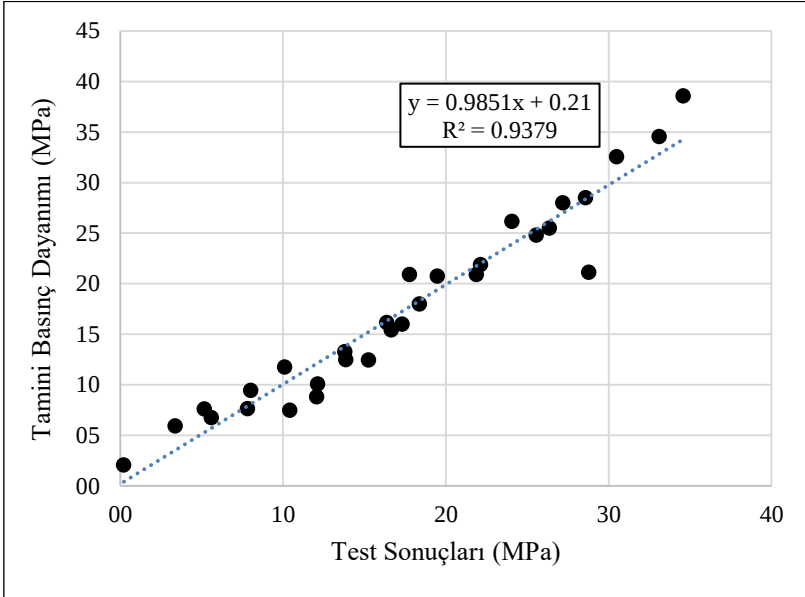
3.1. M5P-Tree modeli regresyon sonuçları

M5P-tree regresyon modeli (1) numaralı formülde verilmektedir.

$$BD = (0.1061 * YFC) + (0.0986 * Na) + (1.1185 * S) - 2.4623 \quad (1)$$

Denklemden, BD; Basınç dayanımı, YFC; kullanılan Yüksek fırın cürufu oranını, S; harç sıcaklığını, Na; kullanılan aktivatör oranını temsil etmektedir.

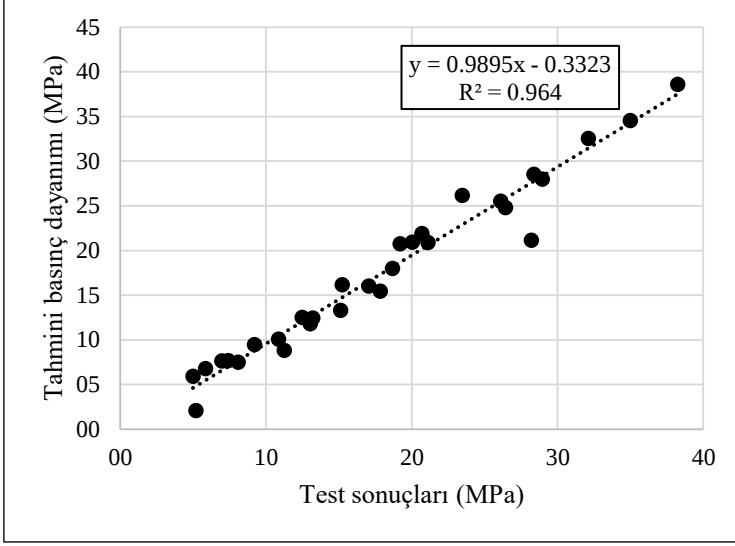
M5P-tree modeliyle basınç dayanımı %96.95 doğrulukla elde edilmektedir. Denkleme göre RMSE değeri 2.2586, MAE değeri 1.7034 olarak belirlenmiştir. Tahmin sonuçları ile test sonuçları arasındaki ilişki Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. M5P-tree modeline ait sonuçlar

3.2. Gaussian Regresyonu Sonuçları

Gaussian regresyon modeliyle basınç dayanımı %96.9 doğrulukla elde edilmektedir. Denkleme göre RMSE değeri 3.1271, MAE değeri 2.4828 olarak belirlenmiştir. Test sonuçları ile tahmin sonuçları arasındaki ilişki Şekil 2’de verilmektedir.

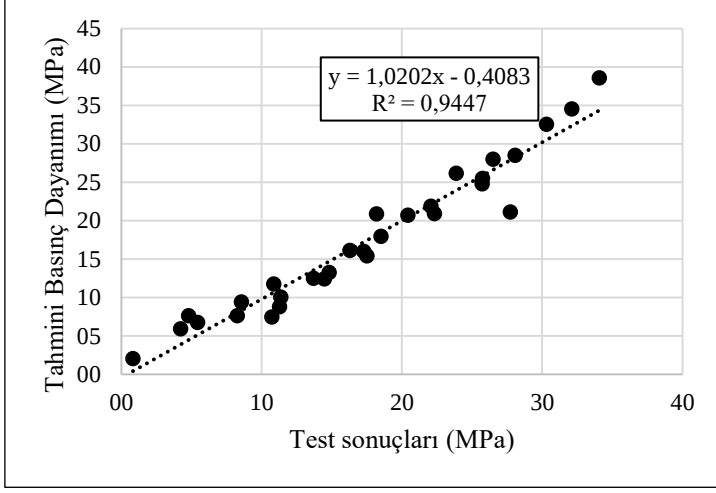


Şekil 2. Gaussian modeline ait sonuçlar

1.1. Random Forest Regresyonu Sonuçları

Random forest regresyon modeli ile dayanım tahmini %95.51 doğrulukla yapılabilmektedir. Denkleme göre RMSE değeri 2.7566, MAE değeri 2.0272 olarak belirlenmiştir.

Test sonuçları ile tahmin sonuçları arasındaki ilişki Şekil 3’te verilmektedir.



Şekil 3. Random forest modeline ait sonuçlar

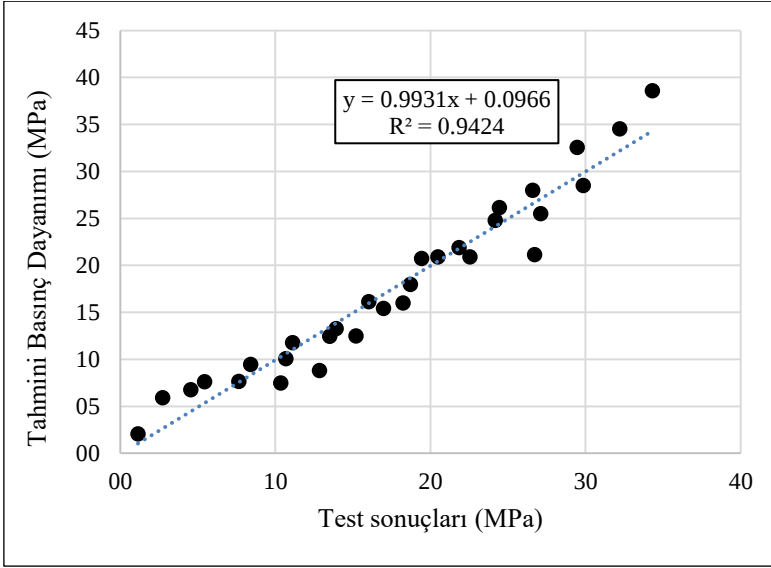
3.3. ElasticNet Regresyonu Sonuçları

ElasticNet regresyon modeli ile dayanım tahmini (2) numaralı formülle elde edilebilmektedir.

$$BD = (-0.053 * YFC) + (0.053 * \text{ÇC}) + 0.207 * Na + 0.222 * S + 8.055 \quad (2)$$

Denklemden, BD; Basınç dayanımı, YFC; kullanılan Yüksek fırın cürufu oranını, ÇC: Çelikhane cürufu oranını, S; harç sıcaklığını, Na; kullanılan aktivatör oranını temsil etmektedir.

ElasticNet regresyon modeli ile basınç dayanımı %97.08 doğrulukla tahmin edilebilmektedir. Denkleme göre RMSE değeri 2.2086, MAE değeri 1.7767 olarak belirlenmiştir. Test sonuçları ile tahmin sonuçları arasındaki ilişki Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 4. ElasticNet modeline ait sonuçlar

4. SONUÇ

Bu çalışmada, endüstriyel yan ürünler olan yüksek fırın cürufu (YFC) ve çelikhane cürufu (ÇC) kullanılarak geopolimer harçlar üretilmiş ve bu harçların basınç dayanımlarının tahmini için farklı regresyon modelleri uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, karışım oranları ve harç sıcaklığı parametrelerinin basınç dayanımı üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. M5P-tree, Gaussian süreç, Random Forest ve ElasticNet regresyon modelleri yüksek doğruluk oranlarıyla başarılı tahminler üretmiş; özellikle ElasticNet modelinde %97'nin üzerinde bir doğruluk değeri elde edilmiştir.

Sonuçlar, geopolimer harçlarda basınç dayanımının deneysel testlere gerek kalmaksızın istatistiksel yöntemlerle öngörülebileceğini göstermektedir. Bu durum, hem zamandan hem de maliyetten tasarruf sağlayarak deneysel süreçlerin verimliliğini artırma potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca,

endüstriyel atıkların yapı malzemesi üretiminde değerlendirilmesi, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sunmakta ve döngüsel ekonomiye hizmet etmektedir.

Genel olarak, çalışma hem malzeme bilimi hem de yapay zekâ destekli tahmin yöntemleri açısından gelecek araştırmalar için yol gösterici niteliktedir. Daha geniş veri setleriyle yapılacak ek çalışmalar, modellerin genellenebilirliğini artıracak ve farklı çevresel koşullarda geopolimer harçların performansını öngörmeye imkân tanıyacaktır.

Çıkar Çatışması: Yazarlar arasında çıkar çatışması olmadığı beyan edilmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %19

KAYNAKLAR

- Bakharev, T. (2005.) “Resistance of Geopolymer Materials to Acid Attack.” *Cement and Concrete Research* 35(4):658–70.
- Davidovits, J. (1991). “Geopolymers.” *Journal OfThamalAnalysis* 37:1633–56.
- Duxson, P., A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. Van Deventer. (2007). “Geopolymer Technology: The Current State of the Art.” *Journal of Materials Science* 42(9):2917–33.
- McLellan, Benjamin C., Ross P. Williams, Janine Lay, Arie Van Riessen, and Glen D. Corder. (2011). “Costs and Carbon Emissions for Geopolymer Pastes in Comparison to Ordinary Portland Cement.” *Journal of Cleaner Production* 19(9–10):1080–90.
- Provis, J. L. & Van Deventer. (2009). *Geopolymers Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. Woodhead Publishing.
- Scrivener, Karen L., Patrick Juilland & Paulo J. M. Monteiro. (2015). “Advances in Understanding Hydration of Portland Cement.” *Cement and Concrete Research* 78:38–56.
- TS EN 1008. (2003). *Mixing Water for Concrete - Specifications for Sampling, Testing and Assessing the Suitability of Water, Including Water Recovered from Processes in the Concrete Industry, as Mixing Water for Concrete*. Turkish Standardization Institute.
- TS EN 196-7. (2010). *Çimento Deney Yöntemleri - Bölüm 7: Çimentodan Numune Alma ve Numune Hazırlama Yöntemleri*. Ankara: TSE.

BETONARME KİRİŞLERDE BOYUT ETKİSİ

Kağan SÖĞÜT¹

1. GİRİŞ

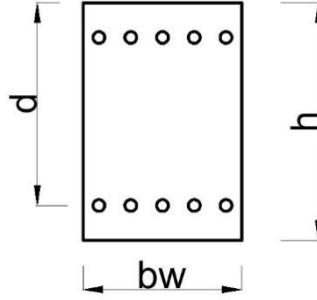
Betonarme kirişlerde kesme dayanımı, yapısal tasarımın ve kullanılabilirliğin temelini oluşturur (Subramanian, 2013). Kesme dayanımının yetersiz olması, gevrek ve ani bir kırılmayla sonuçlanabilir. Kesme donatısı bulunmayan betonarme kirişlerin kesme davranışını etkileyen en önemli parametrelerden biri, ASCE-ACI Committee 445 (1998)'de de belirtildiği üzere, boyut etkisidir. Boyut etkisi, betonarme kirişin boyutlarının artmasıyla kesme gerilmesinin azalması şeklinde ifade edilebilir (Bažant ve Kim, 1984; Benzeguir vd., 2019). Literatürde boyut etkisi üzerine yapılan temel çalışmalarda (örneğin Kani, 1967; Bažant ve Kim, 1984; Bažant, 1997), kiriş etkili yüksekliğinin artmasının kesme gerilmesinde azalmaya neden olduğu gösterilmiştir. Kiriş boyutlarındaki artışın kesme davranışına olan etkisi üzerine literatürde pek çok çalışma yapılmış olmasına rağmen henüz tam anlamıyla anlaşılamamıştır (Zhang ve Tan, 2007; Yu ve Bažant, 2011; Syroka-Korol ve Tejchman, 2014; Jeong vd., 2019; Fan vd., 2023). Bu çalışmanın amacı kesme donatısı bulunmayan betonarme kirişlerde boyut etkisini analiz etmektir. Bu kapsamda mevcut literatürde deneysel sonuçları olan betonarme kirişler Response-2000 (Bentz, 2000) programı kullanılarak modellenmiş ve sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Daha sonra boyut analizi yapılmış ve mevcut yönetmeliklerden ACI-318 (2014) ve TS500 (2000) tahminleri değerlendirilmiştir. Ayrıca maksimum agrega boyutunun etkisi de değerlendirilmiştir.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, kagan.sogut@kilis.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0601-6420.

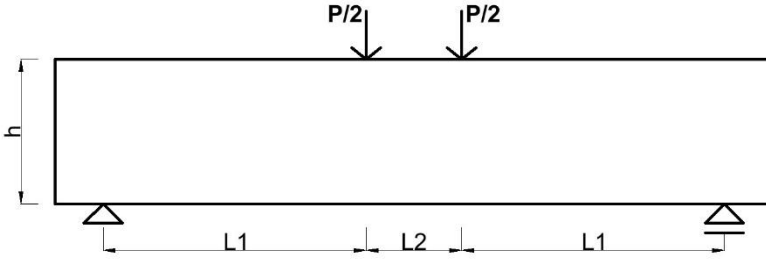
2. MODELLEME

Etriyesiz olarak tasarlanmış betonarme kirişlerde boyut etkisini analiz etmek amacıyla Kawano ve Watanabe (1997) tarafından test edilen kirişler, Response-2000 (Bentz, 2000) programı kullanılarak modellenmiştir. Test edilen betonarme kirişler farklı yükseklik ve genişliklere sahip olup, her bir kiriş iki kez test edilmiştir (Kawano ve Watanabe, 1997). Betonarme kirişlere ait enkesit ve boy kesit detayları Şekil 1 ve Tablo 1’de verilmiştir. Kirişler A-1, A-2 ve A-3 olarak adlandırılmış olup, yükseklikleri sırasıyla 300 milimetre (mm), 500 mm ve 950 mm’dir. Benzer şekilde, kiriş genişlikleri A-1’den A-3’e doğru artarak 105 mm, 176 mm ve 350 mm’dir (Kawano ve Watanabe, 1997). A-1 kirişinde eğilme donatısı olarak tek sıra hâlinde 2 adet, 16 mm çapında çelik donatı kullanılmıştır. A-2 kirişinde ise eğilme donatısı iki sıra halinde düzenlenmiş olup, her sırada 3 adet 16 mm çapında çelik donatı yer almaktadır. A-3 kirişinin eğilme donatısı benzer şekilde iki sıra halinde teşkil edilmiş olup, her sırada 4 adet 25 mm çapında çelik donatı kullanılmıştır. A-1 ve A-2 kirişleri ve tekrarlanan test numuneleri olan A-1x ve A-2x kirişleri sırasıyla 24.8 MPa ve 27.3 MPa beton basınç dayanımlarına sahiptirler. A-3 kirişi ve tekrarlanan test numunesi olan A-3x kirişi ise sırasıyla 20.7 ve 20.6 MPa beton basınç dayanımına sahiptirler. Bütün kirişler için maksimum agrega boyutu 20 mm’dir (Kawano ve Watanabe, 1997).

Kawano ve Watanabe (1997) tarafından test edilen kirişler, Response-2000 (Bentz, 2000) programı kullanılarak modellenmiş olup beton ve çelik malzeme için kullanılan malzeme modelleri Şekil 2’de verilmiştir. Malzeme modelleri için Response-2000 programının önerdiği ön tanımlı modeller kullanılmıştır.



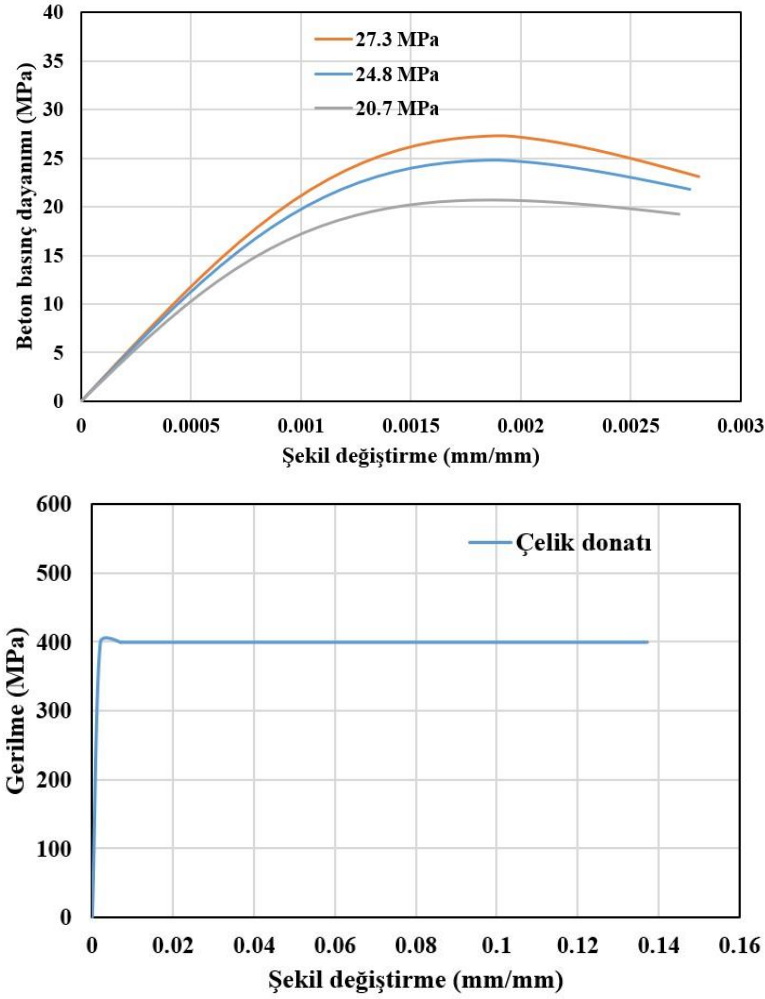
Şekil 1. Ka



wano ve Watanabe (1997) tarafından test edilen kirişlerin şematik gösterimi

Tablo 1. Kawano ve Watanabe (1997) tarafından test edilen kirişlerin boyutları

	A-1	A-2	A-3
L1 (mm)	900	1500	2850
L2 (mm)	400	600	800
h (mm)	330	570	1050
d (mm)	300	500	950
b_w (mm)	105	176	350



Şekil 2. Malzeme modelleri

3. BOYUT ETKİSİ

Kawano ve Watanabe (1997) tarafından test edilen kirişlerin deney sonuçları, Response-2000 (Bentz, 2000) programı kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve Tablo 2’de gösterilmiştir. Response-2000 programı deneysel sonuçları ortalama 1.07 oranında tahmin etmiş olup, bu tahmine ait standart sapma değeri 0.09 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2. Deney sonuçları ile model sonuçlarının karşılaştırılması

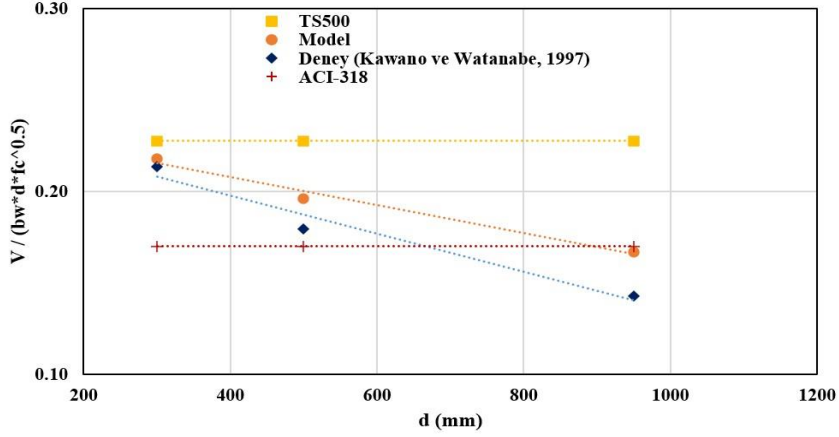
	V_{deney}	V_{model}	V_{model} / V_{deney}
A-1	33.5	34.2	1.02
A-2	82.5	90.2	1.09
A-3	216	252.4	1.17
A-1x	29.5	34.2	1.16
A-2x	101.5	90.2	0.89
A-3x	237.5	252.4	1.06
		<i>Ortalama</i>	1.07
		<i>Standart Sapma</i>	0.09

Şekil 3'te gerilmenin kiriş etkili yüksekliği ile değişimi gösterilmiştir. Gerilme değeri kırılma anındaki kesme kuvvetinin (V), kiriş genişliği (b_w) ile kiriş etkili yükseliğinin (d) çarpımına bölünmesiyle hesaplanabilir. Fakat daha önce de belirtildiği üzere kirişlerin beton basınç dayanımları farklı olduğu için bu değer tekrar karekök içerisinde beton basınç dayanımına ($\sqrt{f_c}$) bölünerek hesaplanmıştır. Şekil 3'te gösterildiği üzere, Kawano ve Watanabe (1997) tarafından yayınlanan deneysel değerler; hem modelleme sonucunda elde edilen değerlerle hem de ACI-318 (2014) ve TS500 (2000) yönetmeliklerinin tahminleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar A-1, A-2 ve A-3 kiriş sonuçları üzerinden yapılmış olup tekrarlanan test sonuçları karşılaştırmaya katılmamıştır.

ACI-318 (2014) yönetmeliği etriyesiz betonarme kirişin kesme kuvveti kapasitesini aşağıdaki verilen Denklem 1'e göre hesaplanmasını önermektedir. TS500 (2000) yönetmeliği ise Denklem 2'ye göre hesap yapılmasını önermektedir. Hem ACI-318 hem de TS500 yönetmeliklerinde önerilen güvenlik katsayıları adil bir karşılaştırma yapılabilmesi için 1 alınmıştır.

$$V_c = 0.17 * \sqrt{f_c} * b_w * d \quad (1)$$

$$V_{cr} = 0.65 * f_{ctk} * b_w * d \quad f_{ctk} = 0.35 *$$



$$\sqrt{f_c} \quad (3)$$

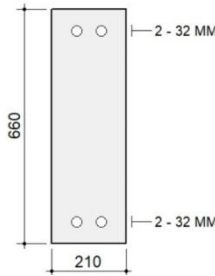
Şekil 3. Boyut etkisi

Şekil 3'te görüldüğü üzere, hem deneysel sonuçlardan elde edilen normalize edilmiş gerilme değerleri (Kawano ve Watanabe, 1997) hem de Response-2000 programı kullanılarak hesaplanan normalize edilmiş gerilme değerleri, kirişin etkili yüksekliği arttıkça azalmıştır. Bu durum, literatürde klasik olarak tanımlanan boyut etkisiyle, yani boyut arttıkça gerilmenin azalmasıyla uyumludur (Kani, 1967; Bažant ve Kim, 1984; Bažant, 1997). Örneğin, modelleme sonucunda elde edilen normalize edilmiş gerilme değeri, kiriş etkili yüksekliğinin 300 mm'den 950 mm'ye çıkmasıyla 0.22'den 0.17'ye düşmüştür. Benzer şekilde, Kawano ve Watanabe (1997) tarafından yayımlanan deneysel sonuçlar, kiriş etkili yüksekliğinin 300 mm'den 950 mm'ye çıkması durumunda normalize edilmiş gerilme değerinin 0.21'den 0.14'e düştüğünü göstermiştir. Buna karşın, hem ACI-318 hem de TS500 yönetmeliklerinin

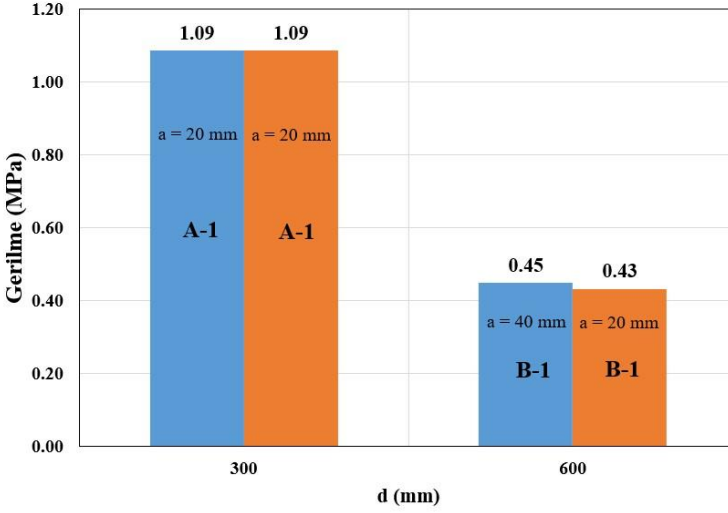
tahminlerinin sabit kaldığı görülmüştür. ACI-318 ve TS500 yönetmelikleri, kiriş boyutlarından bağımsız olarak normalize edilmiş gerilme değerlerini sırasıyla 0.17 ve 0.23 olarak öngörmüştür. Bu da her iki yönetmeliğin de betonarme kirişlerin tasarımında boyut etkisini dikkate almadığını göstermiştir.

Maksimum agrega çapının kesme davranışına etkisini incelemek amacıyla, A-1 kirişiyle geometrik olarak benzer fakat tüm ölçüleri 2 ile çarpılarak elde edilen B-1 kirişi, Response-2000 programı kullanılarak modellenmiştir. B-1 kirişinin eğilme donatısı oranı A-1 kirişininkiyle aynı olup, maksimum agrega çapı da 2 ile çarpılarak 40 mm olarak seçilmiştir. Şekil 3'te B-1 kirişine ait enkesit verilmiştir.

Şekil 4, gerilme değerlerinin kirişin etkili yüksekliği ile değişimini göstermektedir. Maksimum agrega çapının 20 mm olduğu durumda, kiriş boyutlarının iki katına çıkarılması gerilme değerinde 1.09 MPa'dan 0.43 MPa'a, yani yaklaşık %60'lık bir düşüşe neden olmuştur. Bu durum, literatürde klasik olarak tanımlanan boyut etkisiyle, yani boyut arttıkça gerilmenin azalmasıyla uyumludur (Kani, 1967). Agreg a çapının 20 mm'den 40 mm'ye çıkarılması durumunda B-1 kirişinin kesme kuvveti taşıma kapasitesi artmış ve buna bağlı olarak gerilme 0.43 MPa'dan 0.45 MPa'a yükselmiştir. Tüm boyutların, agreg a boyutu da dahil olmak üzere, iki katına çıkarılması durumunda ise gerilme değeri 1.09 MPa'dan 0.45 MPa'a (yaklaşık %59) düşmüştür.



Şekil 4. B-1 kirişi (ölçüler milimetre cinsindendir)



Şekil 5. Maksimum agrega çapı ve boyut etkisi

4. SONUÇ

Kesme donatısı olmadan tasarlanmış betonarme kirişlerde boyut etkisini analiz etmek amacıyla Kawano ve Watanabe (1997) tarafından fiziksel olarak test edilen betonarme kirişler, Response-2000 (Bentz, 2000) programı kullanılarak modellenmiştir. Response-2000 programı deneysel sonuçları ortalama 1.07 oranında tahmin etmiş olup, bu tahmine ait standart sapma değeri 0.09 olarak hesaplanmıştır. Boyut etkisini analiz edebilmek için normalize edilmiş gerilme değerleri kullanılmıştır. Kawano ve Watanabe (1997) tarafından yayımlanmış deneysel sonuçlardan elde edilen normalize edilmiş gerilme değerleri ve Response-2000 programı kullanılarak hesaplanan normalize edilmiş gerilme değerleri, kirişin etkili yüksekliği arttıkça azalmıştır. Modelleme sonucunda elde edilen normalize edilmiş gerilme değeri, kiriş etkili yüksekliğinin artmasıyla 0.22'den 0.17'ye düşmüştür. ACI-318 ve TS500 yönetmeliklerinin tahminlerinde, kiriş

boyutlarından bağımsız olarak normalize edilmiş gerilme değerleri sabit kalmıştır. Bu da her iki yönetmeliğin de betonarme kirişlerin tasarımında boyut etkisini dikkate almadığını göstermiştir. Agreg a çapının 20 mm'den 40 mm'ye çıkarılması durumunda kesme kuvveti taşıma kapasitesi artmış ve buna bağlı olarak nihai gerilme de artmıştır. Tüm boyutların, agreg a boyutu da dahil olmak üzere, iki katına çıkarılması durumunda ise gerilme değeri 1.09 MPa'dan 0.45 MPa'a (yaklaşık %59) düşmüştür.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 318 (2014). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary (ACI 318R-14)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- ACI Committee 445 on Shear and Torsion (1998). Recent approaches to shear design of structural concrete. *Journal of Structural Engineering*, 124(12): 1375-1417.
- Bažant, Z.P. & Kim J.K. (1984). Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beams. *ACI Journal Proceedings*, 81(5): 456-468.
- Bažant, Z. P. (1997). Fracturing truss model: Size effect in shear failure of reinforced concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(12): 1276-1288.
- Bentz, E.C. (2000). Response-2000 user manual, Appendix A: Program Manuals of Phd Thesis Titled: Sectional analysis of reinforced concrete members, University of Toronto, Canada.
- Benzeguir, Z.E.A., El-Saikaly, G. ve Chaallal, O. (2019). Size effect in RC T-beams strengthened in shear with externally bonded CFRP sheets: Experimental study. *ASCE Journal of Composites for Construction*, 23(6): 04019048.
- Fan, S., Lim, T. Y. D., Teng, S. Ve Tan, K. H. (2023). Size effect of large high strength concrete beams with or without shear reinforcement, *Engineering Structures*, 281: 115733.
- Jeong, C.Y., Kim, H.G., Kim, S.W., Lee, K.S. & Kim, K.H. (2017) Size effect on shear strength of reinforced concrete beams with tension reinforcement ratio. *Advances in Structural Engineering*, 20(4):582-594.

- Kani, G.N.J. (1967). How safe are our large reinforced concrete beams? *ACI Journal Proceedings*, 64 (3): 128-141.
- Kawano, H. & Watanabe, H. (1997). Shear strength of reinforced concrete columns–Effect of specimen size and load reversal. *Proceedings of the Second Italy-Japan Workshop on Seismic Design and Retrofit of Bridges*, Rome, Italy, 27-28 February 1997, 141-154.
- Syroka-Korol, E. & Tejchman, J. (2014). Experimental investigations of size effect in reinforced concrete beams failing by shear, *Engineering Structures*, 58: 63-78.
- Subramanian, N. (2013). *Design of Reinforced Concrete Structures*. Oxford University Press, India.
- TS 500 (2000). *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*, Türk Standardı.
- Yu, Q. & Bažant, P. (2011). Can stirrups suppress size effect on shear strength of RC beams? *ASCE Journal of Structural Engineering*, 137 (5): 607-617.
- Zhang, N. & Tan, K.H. (2007) Size effect in RC deep beams: Experimental investigation and STM verification. *Engineering Structures*, 29(12): 3241-3254.

TRAMVAY SİSTEMLERİNDE YAĞMUR SUYU DRENAJININ ÖNEMİ

Polat YALINIZ¹

1. GİRİŞ

Kentsel ulaşımında tramvay sistemleri, çevreci ve sürdürülebilir bir çözüm olarak giderek yaygınlaşmaktadır. Ancak özellikle yağışlı iklimlerde, ray yüzeyinde biriken su, yağ, yaprak kalıntıları ve kar erimesi sonucu ortaya çıkan ıslak ray sorunu, tekerlek-ray arasındaki yapışmayı (adhezyon) azaltarak patinaj ve frenleme problemlerine yol açmaktadır. Bu durum hem yolcu güvenliği hem de ray-tekerlek aşınması açısından önemli bir risk oluşturmaktadır.

Raylı sistemler, kent içi ulaşımında çevresel ve ekonomik açıdan avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Tramvay hatları ise özellikle şehir merkezlerinde karayolu ile entegre şekilde çalıştıkları için yağmur sularına doğrudan maruz kalmaktadır. Peronlarda veya gömülü hat kesitlerinde su birikmesi, yolcu güvenliğini riske atmakta, kayma ve patinaj sorunlarına sebep olmaktadır. Patinaj sebebiyle durağa gelen tramvay, yolcu indirme bindirme işleminin devamında kapıların kapanmasının ardından duraktan ayrılamamaktadır. Bunun sonucunda tramvay hatlarına giren lastik tekerlekli otobüsler vasıtası ile yolcular taşınması gibi zorlama çözümler üretilmektedir. Bu nedenle, drenaj sistemlerinin doğru boyutlandırılması ve düzenli bakımının yapılması hem işletme sürekliliği hem de yolcu güvenliği açısından zorunludur.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, polat.yaliniz@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0373-9727.

Tramvay raylı sistemlerinde yağmur sularının etkin şekilde uzaklaştırılması, sistemin güvenli ve verimli çalışması açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle yoğun yağış alan bölgelerde, drenaj sistemlerinin düzenli bakımının yapılmaması, tramvay duraklarında tramvayların dur-kalk işlemleri sırasında patinaj yaşanmasına ve aracın duraktan ayrılmakta zorlanmasına yol açabilir. Bu tür drenaj eksikliklerinin tramvay toplu taşıma sisteminde gecikmelerin artmasına ve toplu taşımanın cazibesinin düşmesine sebep olmaktadır. Bunun sonucunda toplu taşımanın zayıflaması, özel otomobil kullanımının artması gibi vahim durumlar ile karşılaşmak mümkün olabilir. Bu durumda kentsel yapıda sürdürülebilir ulaşım prensiplerine ters bir tabloyu doğurur.

Tramvay hatlarında güvenli ve konforlu işletmeciliğin en önemli şartlarından biri, tekerlek–ray arasındaki adhezyonun (tutunma kuvveti) yeterli seviyede olmasıdır. Adhezyon, tramvay tekerleklerinin ray yüzeyi üzerinde kaymadan ilerlemesini sağlar. Ancak bazı çevresel ve işletme koşullarında ray yüzeyinde farklı maddelerin birikmesi sonucunda adhezyon değerleri ciddi şekilde düşer. Bu durum literatürde “düşük adhezyon” veya “ıslak ray etkisi” olarak tanımlanır. Özellikle yağmurlu havalarda, yaprak dökümü mevsimlerinde ve organik kalıntıların ray yüzeyinde yoğun olduğu bölgelerde bu problem daha sık ortaya çıkar.

Çalışmalar, ray üstü su tabakası kalınlığının adhezyon katsayısını %30–40 oranında düşürdüğünü ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, yaprak ve organik kalıntılar da ray yüzeyinde düşük sürtünme katsayısına neden olmaktadır (Chen, Ishida, & Nakahara, 1998).

2. DÜŞÜK ADHEZYON

Ray ile tekerlek arasındaki sürtünme katsayısının normalden düşük seviyeye inme durumu düşük adhezyon olarak tanımlanmaktadır.

2.1. Düşük Adhezyonun Nedenleri

Ray yüzeyinde düşük adhezyona sebep olan başlıca faktörler şunlardır:

- **Yağmur ve nem:** Ray yüzeyine düşen yağmur damlaları veya yoğun nem, metal yüzeyi kayganlaştırarak adhezyonu azaltır.
- **Yaprak kalıntıları ve organik maddeler:** Sonbahar aylarında ray üzerine düşen yapraklar, araç geçişiyle ezilerek ince bir organik film tabakası oluşturur. Bu tabaka, ray üzerinde kaygan bir yüzey yaratır (Ishizaka, Lewis, Marshall, Allen, Iwnicki, & Watson, 2017).
- **Yağ, gres ve kimyasal kalıntılar:** Araçlardan sızan yağlar veya bakım çalışmaları sırasında ray yüzeyinde kalan kimyasallar da tutunmayı düşürür.
- **Demir oksit (pas) tabakası:** Uzun süre kullanılmayan hatlarda veya sabah ilk seferlerde ray yüzeyinde ince pas tabakası oluşur. Bu tabaka da kayganlığı artırır.
- **Toz ve kir birikimi:** Özellikle kuru yaz aylarında, toz ve kum parçacıkları ray yüzeyinde birikir ve ani yağışla birleştiğinde kaygan bir çamur tabakası meydana getirir.

Düşük adhezyon sorununun önemli nedenlerinden birisi drenaj sorunudur. Tramvay hatlarındaki başlıca drenaj sorunlarını aşağıda gösterilen şekilde sınıflandırabiliriz;

- **Peron alanlarındaki drenaj problemi:** Su birikmesi yolcular için kayma riskini artırır.
- **Gömülü hatlardaki drenaj problemi:** Oluklu ray çevresinde su tutuculuk ve göllenme sık görülür.
- **Balastlı Hatlardaki drenaj problemi:** Balastın zamanla tıkanması drenaj kapasitesini azaltır.
- **Yeşil Hatlardaki drenaj problemi:** Yağmuru emebilseler de yoğun yağışlarda taşkın problemi yaşanabilir.

2.2. Patinaj ve Kayma Problemleri

Düşük adhezyon, tramvayların patinaj (tekerleklerin boşa dönmesi) yapmasına ya da kayma (tekerleklerin ray üzerinde kayarak ilerlemesi) sorunlarına yol açar. Bu durum çeşitli olumsuz sonuçlar doğurur:

- **Hızlanma zorlukları:** Tramvay ilk hareket anında tekerlekler kayar ve hızlanma performansı düşer.
- **Frenleme mesafesinde artış:** Düşük adhezyon koşullarında frenleme kuvveti yeterince ray–tekerlek temasına aktarılamaz, bu da durma mesafesini uzatır.
- **Yolcu güvenliği riski:** Fren mesafesinin uzaması, özellikle kavşak, yaya geçidi ve duraklarda ciddi güvenlik riskleri oluşturur.
- **Tekerlek ve ray hasarı:** Patinaj sırasında tekerlek yüzeyinde düzleşme ve ray yüzeyinde aşınma meydana gelir. Bu da bakım maliyetlerini artırır.
- **Konfor kaybı:** Kayma ve patinaj yolcuların sarsıntılı bir seyahat yaşamasına sebep olur.

3. DÜŞÜK ADHEZYON ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

3.1. Yeşil Hat Uygulaması

Düşük adhezyonun önlenmesi ile ilgili olarak tasarlanan yeşil hat uygulamaları, yağmur suyunu zeminde tutarak doğal filtrasyon sağlaması ve ray yüzeyindeki kayganlığı azaltıcı etkisiyle önemli bir çözüm potansiyeli taşımaktadır. Drenaj sistemlerinin geliştirilmesi ve son yıllarda yaygınlaşan yeşil hat uygulamaları kritik önlemler olarak değerlendirilmektedir. Aşağıdaki Şekil 1. ve Şekil 2. de yeşil hat uygulamalarına ait örneklere yer verilmiştir.



Şekil 1. Örnek Yeşil Hat Uygulaması (TRT Haber, 2023)



Şekil 2. Örnek Yeşil Hat Uygulaması (NTV, 2023)

Yeşil hat uygulamaları konusunda yapılan çalışmalar ise hem yüzey suyu yönetiminde hem de kentsel ekolojiye katkıda bulunma açısından önemli kazanımlar sağlandığını göstermektedir. Berlin, Strasbourg ve Barselona gibi kentlerde yapılan uygulamalar, yağmur suyunun %70'ine kadarının bitki örtüsü tarafından emilebildiğini ortaya koymaktadır (Sikorski & Wińska-Krysiak, 2018).

Yeşil hat, rayların arasının veya kenarlarının çim, sedum veya düşük bakım gerektiren bitkilerle kaplanmasıdır. Bunun avantajları şunlardır:

- *Suyun Yönetimi:* Bitkiler yağmur suyunun önemli kısmını emerek ray üstünde su filmi oluşumunu azaltır.
- *Drenaj ile Entegrasyon:* Geçirgen alt tabaka sayesinde suyun altyapıya zarar vermesi önlenir.
- *Gürültü ve Titreşim Azaltımı:* Bitkisel yüzey, raylardan kaynaklanan titreşim ve sesi emerek konforu artırır.
- *Ekolojik ve Estetik Faydalar:* Şehir merkezlerinde görsel estetik sağlarken aynı zamanda karbon tutma ve ısı adası etkisini azaltma katkısı sunar.

Yeşil hat uygulamaları, yüzey geçirgenliğini artırarak yağmur suyunun emilimini kolaylaştırmakta, böylece suyun ray üstünde birikmesini önlemektedir. Bu durum, düşük adhezyon riskini azaltmakta ve fren performansını iyileştirmektedir. Ayrıca, kök yapılarının doğal filtreleme etkisiyle drenaj sistemine giren suyun kalitesi de artmaktadır. Ancak uygulama sırasında bakım maliyetleri, bitki seçimi ve iklim koşullarına uygunluk kritik öneme sahiptir. Yanlış seçilen bitki örtüsü, uzun vadede drenajı olumsuz etkileyebilir veya ray güvenliğini tehlikeye atabilir.

3.2. Diğer Çözüm Önerileri

Düşük adhezyonun olumsuz etkilerini azaltmak için dünyada ve Türkiye’de çeşitli teknikler kullanılmaktadır:

- 1- **Ray temizliği:** Yüksek basınçlı su püskürtme veya özel fırçalarla ray yüzeyi düzenli olarak temizlenir. Organik kalıntılar ve yağ tabakaları bu şekilde uzaklaştırılır.
- 2- **Kumlama sistemleri:** Tramvaylarda tekerlek önüne az miktarda kuru kum püskürten sistemler bulunur. Kum, ray yüzeyinin sürtünmesini artırarak adhezyonu yükseltir.
- 3- **Kimyasal uygulamalar:** Ray yüzeyine sürtünmeyi artırıcı jel veya yapışkan sıvılar uygulanabilir. Özellikle yaprak dökümü yoğun olan bölgelerde etkili olur.
- 4- **Ray taşlama:** Ray yüzeyinde oluşan pürüzsüz tabakalar taşlanarak temizlenir. Daha pürüzlü bir yüzey elde edilerek tutunma kuvveti artırılır.
- 5- **Hava üfleme sistemleri:** Bazı modern tramvaylarda, ray yüzeyindeki su damlalarını veya yaprak parçacıklarını üfleyen sistemler kullanılır.
- 6- **Sensör ve izleme teknolojileri:** Tekerlek–ray temasındaki kaymayı algılayan sensörler, otomatik olarak kumlama veya frenleme modunu devreye sokar.

SONUÇ

Tramvay raylı sistemlerinde yağmur suyunun etkin şekilde yönetilmesi hem yolcu güvenliği hem de işletme sürekliliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle düşük

adhezyon sorunu, fren mesafelerinin uzamasına, patinaj ve kayma problemlerine ve buna bağlı olarak da işletme maliyetlerinin artmasına yol açmaktadır.

Çalışmada ele alınan yeşil hat uygulamaları, yağmur sularının zeminde emilerek doğal filtrasyon sağlanmasına ve ray yüzeyinde kayganlığın azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Bunun yanı sıra gürültü ve titreşimlerin azalması, kentsel ısı adası etkisinin düşürülmesi ve estetik değerlerin artması gibi çevresel faydalarda sunmaktadır. Düşük adhezyon sorununa yönelik olarak yeşil hat uygulamalarının yanı sıra kumlama sistemleri, ray temizliği, kimyasal uygulamalar, ray taşıma ve sensör tabanlı izleme sistemleri de önemli teknik çözümler arasında yer almaktadır. Ancak optimum faydanın sağlanabilmesi için, yeşil hat uygulamalarında bitki seçiminin yerel iklim koşullarına uygun yapılması, drenaj altyapısıyla bütünleşmiş tasarımların uygulanması ve periyodik bakım planlarının aksatılmaması büyük önem taşımaktadır (Major, Kóczyán, Bartha, & Cziker, 2023).

Sonuç olarak, yeşil hat uygulamaları yalnızca yağmur suyu yönetiminde değil, aynı zamanda düşük adhezyon sorunlarının çözümünde de etkin bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Bu yaklaşım, tramvay sistemlerinin sürdürülebilirliğini güçlendirirken, toplu taşımanın cazibesini artırarak özel araç kullanımını azaltmaya ve kentsel ulaşımın çevresel hedeflerine ulaşmasına katkı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- Chen, H., Ishida, M. & Nakahara, T. (1998). Numerical analysis for the influence of water film on wheel/rail adhesion. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: *Journal of Rail and Rapid Transit*, 212(2), 101–109. doi:10.1243/0954409971531394
- Ishizaka, K., Lewis, R., Marshall, M. B., Allen, P., Iwnicki, S. & Watson, G. (2017). The low adhesion problem due to leaf contamination in the wheel/rail contact: Bonding and low adhesion mechanisms. *Wear*, 378–379, 183–197. doi:10.1016/j.wear.2017.02.003
- Major, Z., Kóczyán, A., Bartha, B., & Cziker, A. (2023). “Green” tram tracks for the sustainability of the urban environment. *Chemical Engineering Transactions*, 107, 295–300. doi:10.3303/CET2317050
- NTV. (2023, Eylül 15). Tramvayla yeşil yolculuk. NTV. <https://www.ntv.com.tr/galeri/dunya/tramvayla-yesil-yolculuk,TOqOSI6HC0aE9wdTdbZ4ZQ/i7InmeOn4UGWHb6PB1DBBw>
- Sikorski, P. & Wińska-Krysiak, M. (2018). Low-maintenance green tram tracks as a socially acceptable solution to greening a city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 31, 157–165. doi:10.1016/j.ufug.2018.01.013
- TRT Haber. (2023, Eylül 10). Çimlendirilmiş tramvay yolu: Yeşil hat ulaşımına ve çevreye es oluyor. TRT Haber. <https://www.trthaber.com/haber/cevre/cimlendirilmis-tramvay-yolu-yesil-hat-ulasima-ve-cevreye-nefes-oluyor-864562.html>

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ (İHA) İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA KULLANIMI: AVANTAJLARI, SINIRLILIKLARI VE GELECEĞİ

Orhan KAYA⁴

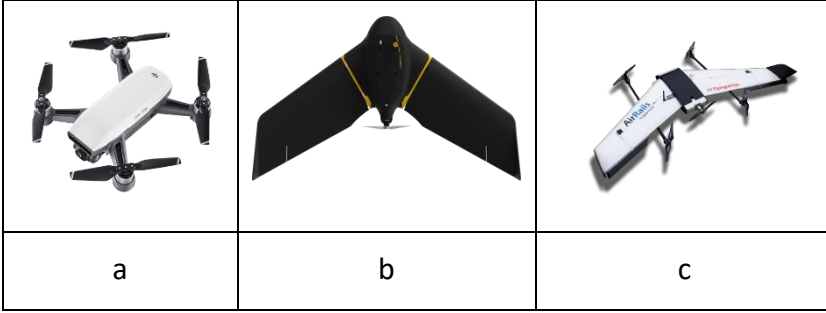
1. GİRİŞ

İnsansız hava aracı (İHA), yaygın olarak bilinen adıyla dron, üzerinde insan pilot, mürettebat veya yolcu bulunmayan bir hava aracıdır (Golizadeh vd., 2019; Greenwood vd., 2019). İHA teknolojisinin geniş ölçekte kullanıma sunulması, havacılık alanında çok çeşitli uygulamaların nispeten güvenli ve uygun maliyetli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlayacak bir sonraki büyük teknolojik atılım olabilir. Her ne kadar İHA'ların ilk çıkışı askeri amaçlarla olsa da, İHA'lar günümüzde güvenlik gözetimi, arama kurtarma, fotoğrafçılık, kitle iletişim araçları, tarım, paket teslimatları ve eğlence amaçlı kullanımlar gibi çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır (Alptekin ve Yakar, 2020).

İHA'lar birçok açıdan sınıflandırılabilir: teknik özelliklerine göre (yakıt/enerji tipine göre, ağırlıklarına göre, kanat yapısına göre, uzaktan kumandalı veya otomatik olmasına göre, vb.), kullanım amaçlarına göre sivil (hobi, bilimsel ve ticari) ve askeri amaçlı (keşif, silah, saldırı vb.) ve uçuş irtifalarına ve menzillerine göre vs. (Elmas, 2019). Sivil amaçlı kullanılan İHA'lar genellikle kanat tiplerine göre döner kanat (rotary wing), sabit kanat (fixed wing), ve hibrit (VTOL-Vertical Takeoff Landing) olmak üzere üç kategoriye ayrılabilir (Şekil 1).

⁴ Doç. Dr., Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, okaya@atu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6072-3882.

Günümüzde ticari amaçla üretilen ve kullanılan İHA'ların inşaat mühendisliğinin farklı uygulama alanlarında kullanımı gittikçe yaygınlaşmakta olup, İHA teknolojisindeki gelişmelerle birlikte uygulamalarının daha da artacağı öngörülmektedir (Greenwood vd., 2019; Shakhathreh vd., 2019). İHA'ların gün geçtikçe daha sessiz, küçük ve hızlı olmaları ve de daha yüksek çözünürlüklü ve hassas kameralarla donatılmaları, bunun yanında da erişimi zor alanlarda kullanılabilmesi ile yüksek manevra kabiliyetleri, İHA'ların inşaat mühendisliğinin farklı uygulama alanlarında kullanımının yaygınlaşmasını sağlamaktadır.



Şekil 1. Sivil amaçlı İHA tipleri: (a) döner kanat (rotary wing), (b) sabit kanat (fixed wing), (c) hibrit (VTOL)
(Tkáč ve Mésároš, 2019)

Bu çalışmada İHA'ların İnşaat Mühendisliğinin farklı uygulama alanlarında kullanımıyla ilgili yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde özetlenecek, İHA'ların İnşaat Mühendisliğinin farklı uygulama alanlarında kullanımının avantaj ve sınırlılıkları anlatılacak, bununla birlikte güncel gelişmeler ışığında İHA'ların İnşaat Mühendisliğinin farklı uygulama alanlarında kullanımının daha da yaygınlaşması için yapılabilecek çalışmalar irdelenecektir.

2. İHA'LARIN İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE KULLANIM ALANLARI

2.1. Yapısal İzleme, Hasar Tespit ve Denetleme

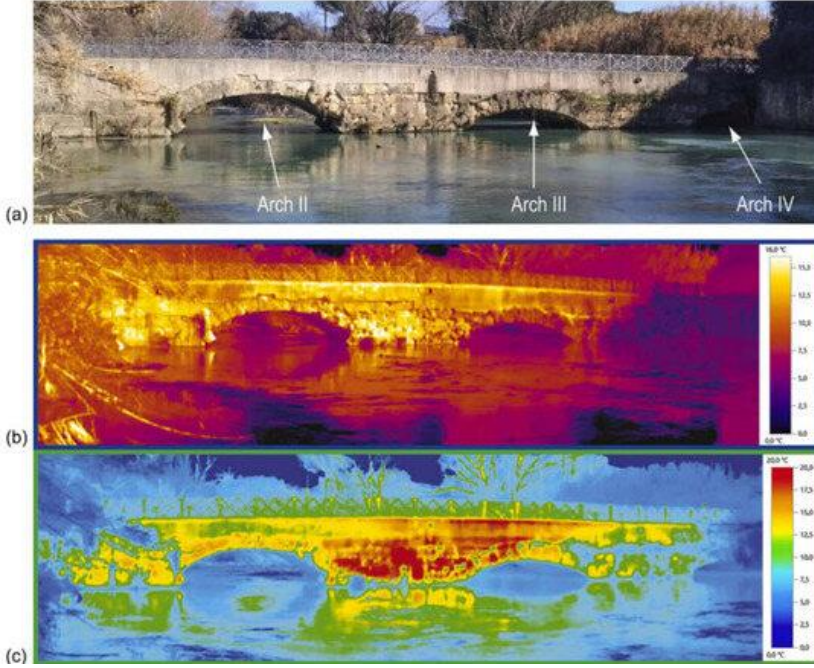
Geleneksel olarak, yapıların genel yapısal durumlarının tespiti ve yapısal kusurlarının belirlenmesi (yapısal çatlakları veya hasarları vs.) manuel olarak uzman teknik personelce yapılmaktadır. Bu süreç, uzman teknik personelin deneyimine bağlı olarak oldukça öznel olabilmekte ve işin yürütülmesi sırasında çeşitli risklerin oluşmasının yanı sıra büyük miktarda zaman ve para gerektirmektedir (Grosso vd., 2020). Çoğu zaman, hasarın meydana gelebileceği "ulaşılması zor" yerleri manuel olarak denetlemek için bir asansör veya vinç kullanılmaktadır. Bu bakımdan, İHA'ların yapısal izleme, hasar tespit ve denetleme çalışmalarında kullanılması, hem hız ve verim sağlamak, maliyetleri düşürmekte hem de teknik personelin güvenlik risklerini minimize etmekte, özellikle köprüler, demiryolları, kuleler vb. gibi normalde erişilmesi zor ya da riskli olan yapıların kolayca ve hızlı bir şekilde hasar tespit ve denetleme işlemleri yapılabilir (Jalinoos vd., 2020).

Büyük inşaat şantiyelerindeki imalatların denetlenmesi, ilerlemelerin izlenmesi ve kayıt altına alınması ve bu şekilde olası gecikmelerin önüne geçilmesi ve bu şekilde zaman ve maliyet açısından fayda sağlanması konusunda da İHA'lar katkı sağlayabilmektedir (Perez vd., 2015). İHA'lar, inşaat sahalarının proje planlaması amacıyla üç boyutlu haritasını ve modelini oluşturmada (LiDAR (Light detection and ranging) (ışık tespiti ve uzaklık tayini) teknolojisi ile) kullanılabilir. Bu şekilde, geleneksel ölçüm yöntemlerine kıyasla zaman ve maliyet tasarrufu sağlanabilmektedir. Bununla birlikte İHA'ların belli aralıklarla inşaat sahasından aldığı görüntüler sonucu proje ilerleme

raporları oluşturulup proje paydaşlarıyla paylaşılabilir ve bu şekilde projenin ilerlemesinde oluşabilecek olası gecikmelerin erken tespiti yapılarak herhangi bir gecikme olmaması için gerekli tedbirler önceden alınabilir.

İHA'lar, yüksek yapılar ve çatılar gibi şantiyelerin göreceli olarak ulaşılması zor alanlarını denetlemek ve bu alanlardaki potansiyel güvenlik risklerini tespit etmek ve bu risklerle ilgili olası iş kazalarının önüne geçmek amacıyla da kullanılabilirler.

Yapısal izleme ve hasar tespiti açısından İHA'ların kullanım alanlarından biri de yapılar ve yapısal elemanlardaki çatlak ve kırıkların tespit edilmesi işlemleridir. Özellikle ulaşılması ve denetlenmesi zor yüksek ve tehlikeli yapıların ve köprü gövdeleri gibi yapısal elemanların yapısal izleme ve hasar tespiti çalışmalarında İHA'lar başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. İHA'lar tarafından yapısal elemanlardan alınan görüntüler ve çeşitli görüntü işleme yöntemleri ve algoritmalar kullanılarak çatlak uzunluğu, genişliği vs. gibi yapıların yapısal performansının kritik verileri sayısal olarak tespit edilebilmektedir (Karle vd., 2019; Congress vd., 2024). Bununla birlikte üç boyutlu fotogrametri (3D photogrammetry) özelliğine sahip İHA'lar termal/kızılötesi kameralar (infrared thermography) ve yeraltı radarı (ground penetrating radar (GPR)) ile beraber kullanıldıklarında hem çatlak tespiti hem de çatlakların oluşumuna sebep olabilecek etkiler hakkında (güçlü sıcaklık değişimi, su tutma vs.) da detaylı bilgiler sunabilmektedir (**Şekil 2**).



Şekil 2. Lucano Köprüsü'nün termografik görüntüsü. (a) genel görünüm (b) düşük sıcaklık ve (c) yüksek sıcaklık. (Jordan vd., 2018)

2.2. Yol Yapım ve Bakım Projeleri İzleme ve Denetleme

Yol yüzey durumunun ölçümü yolların yapısal ve fonksiyonel durumları hakkında bilgi veren ve yolların bakım ve onarım ihtiyaçlarına karar vermede yardımcı olan en temel etmendir. Yol yüzey durumunu belirlemek geleneksel olarak teknik personelin manuel olarak gözlem yoluyla, yolu trafiğe kapatarak, çoğu zaman subjektif olarak değerlendirerek, zaman ve emeğini gerektiren bir yöntemdir. İHA'ların yol yüzey durumunun ölçümünde kullanımı ve değerlendirilmesi özellikle trafikte aksamalara neden olmaması, hızlı ölçüm sağlaması ve ölçümü gerçekleştiren personel için riskleri sınırlandırması ve nesnel ve veriye dayalı bir ölçüm sağlaması açısından oldukça

faydalıdır. Yapılan çalışmalarda yol yüzeyinden İHA'lar kullanılarak alınan görüntüler çeşitli görüntü işleme ve algoritmalar kullanılarak yol yüzeyindeki çatlakların, boyutu, derinliği, kategorisi vs. hızlı bir şekilde tespit edilebilmiştir (Inzerillo vd., 2018)

2.3. Doğal Afet Uygulamaları

İHA'ların hızlı ve güvenilir veri elde edebilme, insanların kolayca ulaşabilemedikleri zor ve riskli bölgelere erişim sağlayabilme gibi özelliklerinden dolayı, doğal afet süreçlerinde İHA'ların kullanımları büyük önem taşımaktadır. İnşaat mühendisliği açısından yapıların deprem, yangın vs. gibi doğal afetler sonucu insanların binaların içine girip hasar tespiti yapabilmelerinin çoğu zaman riskli olduğu yapı hasar tespit çalışmalarının İHA'lar yardımıyla yapılmasının büyük avantajları olacağı açıktır. Bununla birlikte doğal afet sonucu arama ve kurtarma faaliyetlerinde özellikle de çeşitli kamera ve sensörlerle (termal kameralar vs.) donatılmış İHA'lardan yararlanılabilmektedir.

2.4. Alan, Hacim ve Eğim Hesaplamaları ve Haritalandırma Uygulamaları

Çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında haritalandırma, hacim ve eğim hesaplamaları zaman ve işgücü gerektiren ve hassas ölçümlerle yapılması gereken işlemlerdendir. Bu işlemlerin hızlı ve yüksek doğrulukta yapılması noktasında İHA'lar katkı sağlayabilmektedir. Yapılan çeşitli çalışmalarda, İHA'lar yol güzergâh planlamaları, haritalandırma, kazı ve dolgu hacimlerinin hesaplamasında başarılı bir şekilde kullanılmışlardır (Tükenmez, 2021; Kınalı ve Çalışkan, 2022).

3. İHA'LARIN İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE KULLANIMLARININ AVANTAJLARI

İHA'ların inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımının aşağıda sıralanan birçok faydası vardır:

- *Zaman kazancı:* İHA'lar bir yapı ya da arazi ile ilgili veri toplama, analiz ve araştırma yapma konusunda ciddi bir zaman kazancı sağlayabilirler.
- *Güvenlik:* İHA'ların özellikle tehlikeli, riskli ve personel kullanımı gereken işlerin yapılmasında kullanılabilmesi bakımından güvenlik avantajı sağlayan sistemlerdir. Bundan dolayı özellikle geleneksel olarak teknik personel tarafından manuel olarak gerçekleştirilen yüksek yapıların, derin kazı alanlarının, karayollarının vs. incelenmesi ve hasar tespiti yapılması gibi işleri İHA'lar uzaktan gerçekleştirebilmekte bu şekilde de güvenlik riski minimize edilebilmektedir. Bunun yanında özellikle deprem, yangın vs. gibi afetlerin sonrasında arama-kurtarma, hasar tespiti gibi çalışmalarda da İHA'ların kullanımı yaygınlaşmakta, bu şekilde de zaman ve güvenlik açısından fayda sağlanmaktadır.
- *Ölçümlerde hassasiyet:* Çeşitli sensör ve yüksek çözünürlüklü kameralarla donatılmış İHA'lar, hassas ölçümler gerçekleştirebilmekte ve bu şekilde manuel ölçümlerdeki insan hatası kaynaklı ölçüm hatalarını ortadan kaldırarak daha hassas ölçümler gerçekleştirebilmektedir. Bu tip ölçümler, özellikle hassasiyet gerektiren, hacim ve kazı/dolgu hesaplamaları, haritalandırma ve bina modellemesi ya da gözle fark edilemeyecek boyutlardaki yapısal

kusur ve çatlakların tespitinde vs. büyük fayda sağlayacaktır.

- *Maliyet:* İHA'lar yapısal inceleme, analiz, veri toplama vs. işleri hızlandırarak hem zaman kazancı hem de maliyet avantajı sağlamaktadır.
- *Erişebilirlik:* İHA'lar, insanların erişemediği ya da erişiminin riskli ve tehlikeli olduğu yapılara ya da yerlere erişebilmektedir. Geleneksel ölçümlerin pratik ya da mümkün olmadığı tünel kuyuları ve yüksek bacalar gibi dar ve kapalı alanlar, dik yamaçlar, derin su kütleleri, vahşi yaşam alanları vs. İHA'larca incelenebilmektedir.

4. İHA'LARIN İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE KULLANIMLARININ SINIRLILIKLARI

İHA'ların inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımının birçok faydasının yanında bazı sınırlılıklarının da olduğu da göz ardı edilmemelidir:

- *Hava koşulları:* Hava koşulları İHA'ların kullanımını sınırlandırabilmektedir. Yağmur, İHA'ların elektronik parçalarına zarar verebilmekte, rüzgâr, sis ve aşırı sıcak hava İHA'ların kullanımını ve ölçüm hassasiyetini olumsuz etkileyebilmekte ve bu şekilde de zaman ve maliyet kaybı yaşanabilmektedir.
- *Sınırlı pil ömrü:* Sınırlı pil ömrü İHA'ların havada kalma ve ölçüm yapabilme sürelerini sınırlandırmaktadır.
- *Hukuki düzenlemeler:* İHA'ların kullanımı havacılık kurallarına uygun şekilde, lisanslı operatörler tarafından ve izin verilen bölgelerde gerçekleşmelidir.

İHA'ları kullanacak operatörlerin eğitim ve lisans alması, İHA'ların uçuş izinleri alması vs. çoğu zaman ve maliyet gerektirmektedir. Bununla birlikte İHA'lar uçuşları esnasında özel mülklerin, insanların vs. görüntülerini de alabilmekte, bu da kişisel verilerin ve mahremiyetin gizliliği konularında endişeler yaratabilmektedir.

5. İHA'LARIN İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE KULLANIMLARININ GELECEĞİ

İHA'ların inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımının daha da yaygınlaşabilmesi için İHA'ların çeşitli boyut ve özelliklerde sensörler ve ekipmanlarla beraber çalışabilecek bir sistem şeklinde tasarlanmasında büyük fayda olacağı düşünülmektedir. Bu sensör ve ekipmanların bazıları aşağıda özetlenmiştir:

- *Yüksek çözünürlüklü kameralar:* Bu tip kameralar, çeşitli yapısal elemanların ve inşaat uygulamalarının yüksek çözünürlüklü fotoğraflarını çektikten sonra, elde edilen görüntüler çeşitli algoritma ve yazılımlar kullanılarak işlenip iki boyutlu haritalara ve üç boyutlu nokta bulutlarına/ağlarına dönüştürülebilmektedir. Bu şekilde elde edilen görüntü ve veriler, göreceli düşük maliyetli şekilde elde edilebilmiş olmaları ve birçok tip ve özellikte kameralar kullanılarak elde edilebilmeleri sayesinde yapısal gözlem, hasar tespiti, arazi kübaj hesapları ve saha ilerlemesinin haritalanması gibi farklı uygulamalarda kullanılabilir.
- *LiDAR (Light detection and ranging) (ışık tespiti ve uzaklık tayini):* İHA'ların LiDAR teknolojisiyle donatılması sonucu ölçüm yapılacak arazinin ya da

yapıların havadan detaylı ölçümleri yapılarak ilgili arazi ya da yapıların üç boyutlu hassas haritalandırma işlemleri gerçekleştirilir. Bu şekilde LiDAR teknolojisiyle donatılmış İHA'lar, binaları, köprüleri ve arazileri çok hassas bir şekilde üç boyutlu modelleyebilmektedir.

- *Termal/kızılötesi kameralar:* Bu tip kameralar bir yapıdaki ısı radyasyonunu ölçerek ilgili yapının termal görüntüsünü oluşturur. Bu tür kameralarla donatılmış İHA'lar, yapılardaki yalıtım ve ısı kaybı kusurlarını, elektrik arızaları vs. sorunları tespit etmede kullanılabilir.
- *Diğer sensörler:* İHA'lar diğer özelleşmiş sensörlerle donatılarak çeşitli sorunları (gaz sensörleri vs.) çözmede de kullanılabilirler.

Yukarıda özetlenen çeşitli sensör, kamera ve ekipmanlarla beraber çalışabilecek şekilde tasarlanan İHA'larla elde edilen görüntü ve veriler, çeşitli algoritma ve yazılımlarla da işlenerek faydalı bilgi haline getirilerek ilgili inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılarak maliyet, güvenlik ve zaman gibi konularda fayda sağlayabilecektir.

6. SONUÇ

İHA'ların hızlı ve doğru veri toplayabilme özellikleri, ulaşılması zor bölgelere erişim imkânı ile güvenlik risklerini azaltmaları, zaman ve maliyet kazançları gibi birçok faydalarından dolayı inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımları olan, kullanımlarının da zamanla daha da artacağı düşünülen teknolojik sistemlerdir.

İHA'lar, yapısal ve yol izleme, hasar tespit ve denetleme ve doğal afet uygulamaları ile alan, hacim ve eğim

hesaplamaları ve haritalandırma gibi birçok inşaat mühendisliği uygulamalarında başarıyla kullanılmaktadır.

İHA'lar, yapıların görüntülerini veya videolarını çekecek şekilde yüksek çözünürlüklü kameralarla özelleştirilebilir, ardından görüntü işleme veya ilgili yazılımlar kullanılarak görüntüler veya videolar gerekli formatlara dönüştürülebilir. Özel ihtiyaçlar için İHA'lar, kızılötesi termografi (IRT) ve yeraltı radarı (GPR) ile de özelleştirilerek birçok özelliğe sahip İHA'lar geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Alptekin, A. & Yakar, M. (2020). Heyelan bölgesinin İHA kullanarak modellenmesi. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(1), 17-21.
- Congress, S. S. C. Puppala, A. J., Escamilla Iii, J., Jaladurgam, R. & Kumar, P. (2024). Transportation bridge infrastructure asset condition monitoring using uncrewed aerial vehicles (UAVs). *Transportation Geotechnics*, 47, 101268.
- Elmas, E. E. (2019). *Bir insansız hava aracı gerçekleştirme ve hareketli nesnelerin tespit ve takibinde kullanımı* (Doctoral dissertation [Yüksek lisans tezi], Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 122s).
- Golizadeh, H., Hosseini, M. R., Edwards, D. J., Abrishami, S., Taghavi, N. & Banihashemi, S. (2019). Barriers to adoption of RPAs on construction projects: a task–technology fit perspective. *Construction Innovation*, 19(2), 149-169.
- Greenwood, W. W., Lynch, J. P. & Zekkos, D. (2019). Applications of UAVs in civil infrastructure. *Journal of infrastructure systems*, 25(2), 04019002.
- Grosso, R., Mecca, U., Moglia, G., Prizzon, F. & Rebaudengo, M. (2020). Collecting built environment information using UAVs: Time and applicability in building inspection activities. *Sustainability*, 12(11), 4731.
- Inzerillo, L., Di Mino, G. & Roberts, R. (2018). Image-based 3D reconstruction using traditional and UAV datasets for analysis of road pavement distress. *Automation in Construction*, 96, 457-469.

- Jalinoos, F., Amjadian, M., Agrawal, A. K., Brooks, C., & Banach, D. (2020). Experimental evaluation of unmanned aerial system for measuring bridge movement. *Journal of Bridge Engineering*, 25(1), 04019132.
- Jordan, S., Moore, J., Hovet, S., Box, J., Perry, J., Kirsche, K., ... & Tse, Z. T. H. (2018). State-of-the-art technologies for UAV inspections. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 12(2), 151-164.
- Kerle, N., Nex, F., Gerke, M., Duarte, D., & Vetrivel, A. (2019). UAV-based structural damage mapping: A review. *ISPRS international journal of geo-information*, 9(1), 14.
- Kınalı, M., & Çalışkan, E. (2022). Use of unmanned aerial vehicles in forest road projects. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 24(3), 530-541.
- Perez, M. A., Zech, W. C., & Donald, W. N. (2015). Using unmanned aerial vehicles to conduct site inspections of erosion and sediment control practices and track project progression. *Transportation Research Record*, 2528(1), 38-48.
- Shakhatreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., ... & Guizani, M. (2019). Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges. *IEEE access*, 7, 48572-48634.
- Tkáč, M., & Mésároš, P. (2019). Utilizing drone technology in the civil engineering. *Selected Scientific Papers-Journal of Civil Engineering*, 14(1), 27-37.
- Tükenmez, F. (2021). Harita mühendisliğinde İHA ile karayolu projelendirme. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 3(2), 53-61.

THE EVOLUTION OF ROAD TRANSPORTATION IN ANATOLIA: ROUTES, CONSTRUCTION TECHNIQUES AND ORGANIZATIONS

Ebru ARIKAN ÖZTÜRK¹

Ahmet GÖKDEMİR²

Fatih KARAÇOR³

Ömer Faruk IŞIK⁴

1. INTRODUCTION

Humans have traversed uncharted lands for centuries, gradually leaving trails that eventually became the first rudimentary paths (Engin Uçar and Doğan 2012). In prehistoric times, people traveled on foot, but as time progressed, they began to use domesticated animals, primarily horses, for transportation, following trails shaped by animal tracks and natural conditions (Çetin 2014). During the Paleolithic era, from approximately 30,000 BC to 10,000 BC, travel was primarily a struggle for survival. In the Neolithic period, which began around 10,000 BC, the shift to settled life and agricultural activities made travel more integral to daily life. By the first half of the 4th millennium B.C., the use of the papyrus plant in Egypt

¹ Doç. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji, eozturk@gazi.edu.tr, ORCID: 0000 0002 4971 2442.

² Dr. Öğr. Üyesi, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, ahmetgok@gazi.edu.tr, ORCID: 0000 0003 2151 6228.

³ Dr. Öğr. Üyesi, Kafkas Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, fkaracor@kafkas.edu.tr, ORCID: 0000 0003 1201 7857.

⁴ İnşaat Mühendisi, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, usomerfaruk@gmail.com, ORCID: 0009 0005 6274 1837.

led to the creation of canoes and rafts, enabling the Egyptians to explore the world and make discoveries. By around 2700 BC, sturdy wooden boats replaced simple rafts, and soon after, fleets capable of navigating stormy seas emerged, allowing travel between islands, peninsulas, and continents. The invention of the wheel by the Sumerians around 3500 BC marked a new era in land travel, significantly enhancing commercial activity. With the wheel, humans could travel greater distances with less physical effort.

During the Middle Ages, up until the late 16th century, people led relatively static lives, seldom venturing beyond their immediate surroundings. However, there was a rise in religious-themed travels during this period. The Renaissance sparked socio-cultural and political transformations worldwide in the Modern Era, boosting travel and cultural activities. Until the 18th century, transportation relied on horses, horse-drawn carriages, and waterways. The discovery of steam power revolutionized transportation, making travel more accessible to the general populace, previously a privilege of the wealthy (Çallı 2015). The advent of steam locomotives and steamships mitigated the challenges of geographic distances. The early 20th century saw the creation of the first automobiles powered by petroleum-derived fuels, followed by mass production, making motorized transportation more feasible. Significant advancements in various transportation sectors, particularly aviation, occurred during this period. Road transport became the preferred mode of transportation in many countries due to its door-to-door service, adaptability to various terrains, regular and frequent schedules, and relatively lower fixed investment requirements than other transportation modes.

Anatolia, geographically bridging Europe and Asia, has hosted many different cultures, from the Greeks to the Romans, Byzantines, Seljuks, Anatolian Turkish principalities, and the

Ottomans. Throughout history, this region has witnessed human and goods movement, housing significant transit routes (Temir 2023). Roads inherited from one civilization to another in Anatolia were always preserved, improved, and developed by local and central administrations, passing them on to subsequent generations (Kemer 2018). These roads impacted the regional geography and served as a bridge between the eastern and western continents, influencing global societal life, cultures, military, and commercial activities.

This study, prepared using document analysis, examines roads in Anatolia, factors affecting route selection, road construction techniques, institutions, and organizations, and reveals the changes and transformations that have occurred from the past to the present.

2. ROADS IN ANATOLIA

The Anatolian Peninsula, situated at the westernmost edge of Asia, spans approximately 755,000 km² between the Black Sea, the Mediterranean Sea, and the Aegean Sea (Anadolu 2012). The central plateaus of the peninsula are bordered by mountain ranges that separate them from the sea to the north and south. The Taurus Mountains, beginning from the Aegean and extending into the Asian mainland, feature deep valleys carved by rivers, allowing military passage at several points. The intermittent mountains in the northern part of Anatolia have dictated the east-west routes of roads. These roads nestled between mountain chains can be accessed from numerous points. Although some Asian raids into Europe followed northern routes, Anatolia has predominantly facilitated westward movements. Most eastbound journeys also traversed Anatolian lands, with crusaders, traders, pilgrims, ambassadors, and invading armies utilizing these routes (Gümüşçü and

Doğandor 2020). Significant historical roads in this region include:

Babylon-Thapsacus Road: In the 2000s B.C., Assyrians and Babylonians developed this road in Mesopotamia and Syria, running along the left bank of the Euphrates River. It connected routes from Asia and the south near Aleppo, converging at Thapsacus (Babür et al. 1973). The road linking Thapsacus to Babylon was partly overland and partly over water. One of the critical road routes extended to Syria was via Thapsacus, Hama (Epiphania), Damascus, and Aleppo. Another significant route began in Mosul (Nimiv), passed through Nusaybin (Nisibin) to Urfa (Edessa), crossed the Euphrates at Birecik (Biradjik), and stretched into the interior of Anatolia (Demirci and Karamağaralı 2021).

Hittite Roads: Between 1700 and 1200 BC, new civilizations emerged in Anatolia, creating new road networks between densely populated centers. The strong trade relationship between the Assyrians and the Hittites facilitated the development of the most critical roads in Anatolia (Kemer 2018). With the collapse of the Hittite State, the region experienced political instability. While some elements of the old Hittite culture persisted, Anatolia still needs to reclaim its golden age for centuries (Yavuzcan and Aghdam 2011). From the Hittites to the Hellenistic era, the primary characteristic of Anatolian roads was their concentration around a central capital, giving rise to regional roads. The road networks developed around Boğazkale (Hatuşas) during the Hittite period, Sazılar (Gordion) for the Phrygians, Sart (Sardes) for the Lydians, and around Malazgirt for the Urartians exhibit this trait. Main routes during the Hittite period included Kars-Erzurum-Erzincan-Sivas-Boğazkale and Özalp-Van-Muş-Palu-Elazığ-Başkil-Darende-Kayseri-Boğazkale in the east; Halep-Kilis-Narlı-Kayseri-Boğazkale in the southeast; Sinop-Amasya-Mecitözü-

Boğazkale for the Black Sea connection; and Milet-Efes-Sart-Kula-Uşak-Afyon-Emirdağ-Bala-Boğazkale for the Aegean connection (Babür et al. 1973).

Royal Road: This historical road was built by King Gyges of Lydia to promote trade in his country (Yükçü and Atağan 2011). When the capital of Lydia, Sardes, fell under Persian control in 546 BC, the Royal Road was repaired and made more comprehensive, more usable, and secure, marking the beginning of the golden age of Anatolian roads (Çetin 2014; Afshari and Akarsu 2021). The Royal Road traversed Anatolia like a main artery, relegating other regional roads to secondary status. Despite differing views on its exact route, the commonly accepted path is Ephesus (Ephesus)-Sardes (Sardis)-Dinar (Apameia)-Sivrihisar (Pessinus)-Sazılar (Gordion)-Ankara (Ancyra)-Nefesköy (Tavion)-Turha (Gaziura)-Sivas (Sebasteia)-Malatya (Melitene)-Amida and Sus. The significance of this road persisted until Byzantium (Istanbul) became the capital of the Eastern Roman Empire, after which it was superseded by the Roman road passing south of Salt Lake (Babür et al. 1973).

Alexander's Road: The Hellenistic Period began with Alexander the Great's conquests, during which Greek influence peaked in the Ancient World. In 334 BC, Alexander entered Anatolia via the Dardanelles and followed a route from west to east, reaching Egypt. Without roads along the Aegean coast, Alexander's troops built their paths as they advanced. The southern route turned from Side (Sidetes) to Dinar (Apameia), followed the path of Eskişehir (Dorylaeum) and Sazılar (Gordion), turned south from Ankara (Ancyra), passed through Gülek Pass, and reached Tarsus (Babür et al. 1973).

Roman Roads: Following the Hellenistic Period, Anatolia, once under Classical Greek dominance, fell under the rule of the Roman Empire. The Romans, who ruled Anatolia for

an extended period, constructed numerous roads to expand the empire and connect all cities. Although these roads were primarily built for military campaigns, they were also used for trade. Adhering to the principle "The Roman Empire is where its roads extend" the Romans meticulously built layered roads and equipped them with milestones, garrisons, inns, and other features (Kemer 2018). Anatolia was divided into six significant provinces (Provincia) during the Roman period, with Roman roads connecting the provincial cities. The Roman roads in these six provinces followed these routes (Babür et al. 1973):

- *Asia Province:* Bergama (Pergamum), İzmir (Smyrna), Denizli (Laodiceia), Dinar (Apameia), Eskişehir (Dorylaeum), Hacıhamza (Amarium).
- *Cilicia Province:* Tarsus, Misis (Mapsuestia).
- *Bithynia and Pontus Province:* Bursa (Prusa), İzmit (Nicaca), Samsun (Amisus).
- *Galatia Province:* Ankara (Ancyra), Konya (Iconium), Nefesköy (Tavium), Amasya (Amesias), Zile (Zela), Turhal (Gaziura).
- *Lycia and Pamphylia Province:* Antalya (Attaleia), Side.
- *Cappadocia Province:* Aksaray (Garsaura Archelais), Kayseri (Caesarea), Sivas (Sebasteia), Kilisehisar (Tyana), Göksun (Cacussos), Malatya (Melitene).

Byzantine Roads: Byzantine roads largely comprised the network built during the Roman Empire. Anatolian roads were divided into three main routes in the Roman and Byzantine periods: north, south, and central. The primary difference between Roman and Byzantine roads was that while the Roman period's routes originated from Ephesus, the Byzantine period's routes began from İzmit and later from Istanbul (Babür et al.

1973). The Roman southern route advanced from Ephesus through Manisa, Konya, Pozantı, and Tarsus to Antakya, while during the Byzantine period, the southern route started from Üsküdar, passed through İzmit, and reached Konya (Çetin 2014). Major routes during the Byzantine period included (Babür et al. 1973):

- Tarsus-Pozantı-Ereğli-Konya-Hacıhamza-Sandıklı-Sakarya-Seyitgazi-Eskişehir-Istanbul.
- Silvan-Harpüt-Tall Arsanos (near the Murat River)-Malatya Tohma river-Kemah-Kızılırmak-Ankara-İzmit-Kadıköy-Istanbul.
- Azerbaijan - Çoruh Valley - Bayburt - Kelkit river valley - Sivas - Tokat - Niksar - Amasya - Lower Kızılırmak.
- Western Iran-Along the Aras River-Pasinler Plain-Erzurum - Erzincan - Kemah - Sivas - Tohma river - Malatya.
- Van Lake basin-Ahlat-Silvan-Diyarbakır-El Cezire.

Seljuk Roads: The Seljuk dominion marked a significant turning point in Anatolian history. The peninsula witnessed the settlement of Turkish populations, and the civilization shaped by Turkish-Islamic synthesis left a lasting impact on the geography. During the Seljuk period, the road routes in Anatolia mostly retained their main outlines, but roads developed not only in the east-west direction but also in the north-south direction (Yavuzcan and Aghdam 2011; Çetin 2014; Eskikurt 2014). The Seljuks transformed these roads into trade routes by constructing caravanserais, Hans, and ribats along the roads to meet the needs of travelers for lodging and protection, turning the cities along these roads into essential trade centers. Tabriz, Baghdad, Aleppo, Ayas, Alaiye, Antalya, İzmir, Foça, Istanbul, Sinop,

Samsun, and Trabzon were the trade centers where the roads of Anatolia converged (Babür et al. 1973). During the Seljuk period, Anatolia was connected to Iran through the Tebriz-Aleppo road, Tebriz-Ayas road, and Tebriz-Black Sea coast road. Roads connecting Anatolia to Mesopotamia and Syria included the Baghdad-Malatya Road, Malatya-Ankara Road, Malatya-Aleppo Road, and Kayseri-Aleppo Road. While the Sinop-Alanya-Antalya road and Samsun-Ayas road connected the Black Sea and Mediterranean regions, the Konya-Burdur road and Burdur-Izmir road provided connections to the ports in the Aegean region. Connection from the Mediterranean region to Istanbul was established through the Antalya-Dinar, Dinar-Afyon, and Afyon-Kütahya-Istanbul roads (Eskikurt 2014; Babür et al. 1973).

Ottoman Roads: The roads during the Ottoman period were similar to those of the Byzantine and Seljuk periods. The most significant difference during the Ottoman period was the development of regional roads extending from coastal cities into the interior of Anatolia. The discovery of the Cape of Good Hope and especially the opening of the Suez Canal were the most critical factors contributing to this development. Nevertheless, maritime transportation was necessary during the Ottoman period and was used safely and successfully. Due to the economic advantages of maritime transportation, the use of caravan routes in Anatolia decreased. During the six centuries of Ottoman rule in Anatolia, although road networks within the provincial boundaries expanded under administrations prioritizing public works, some rulers needed to give the necessary attention to road networks. The road networks constructed by the army during the period of conquest weakened as the era of conquests ended in the empire (Babür et al. 1973). However, the "Hajj Road" has always existed in Anatolia.

In the Ottoman Empire, the roads in Anatolia consisted of three main routes: the right arm, the central arm, and the left arm, along with secondary roads connected to them. From these main roads, the Anatolian correct arm route extended from Istanbul to Mecca and Medina via Şam through Istanbul-Izmit-İznik-Eskişehir-Akşehir-Konya-Adana-Antakya-Halep road. Known as the Hajj Road, this route was the most frequently used for military and commercial purposes and for pilgrimage from the Balkans, Istanbul, and Anatolia to the Holy Land. The Anatolian central arm route followed the Istanbul-Gebze-Izmit-Sapanca-Geyve-Hendek-Düzce-Bolu-Tosya-Merzifon-Amasya-Tokat-Sivas-Malatya-Diyarbakır-Nusaybin-Mosul-Kirkuk route to reach Baghdad and Basra. The Anatolian left arm route followed the middle arm from Istanbul to Merzifon, and from there, it reached Kars and Tabriz via Ladik-Niksar-Karahisar-ı Şarki-Bayburt-Tercan-Erzurum road (Çetin 2014; Karaca 2022). Besides the right, central, and left arms, there was also another vital route that followed the Istanbul-Gebze-Gemlik-Mudanya-Uluabad - Çanakkale - Susığırlığı - Manisa - İzmir - Urla route, extending to Cesme (Çetin 2014).

Republic Roads: During World War I, all road construction in Anatolia ceased, and the existing road network remained neglected for many years. This process continued during the Turkish War of Independence. After the proclamation of the Republic, the road network in Anatolia consisted of a total of 18,350 km of roads, including 13,900 km of macadam and 4,450 km of dirt roads, inherited from the Ottoman period (KGMa 2025).

The greatest challenge faced in highway construction from the proclamation of the Republic until 1938 was the inadequacy of financial resources. During this period, the primary focus was on legislative efforts to establish tax regulations to finance road construction. Although highway

length increased to 40,235 km in 1938, the road network was unsuitable for all-season passage, deteriorated quickly, and failed to meet the country's needs. Furthermore, the narrow width, steep slopes, and poor quality of much of the existing road network made it difficult for vehicles to use these roads. In 1938, the total highway length was 40,235 km, but by the end of World War II in 1945, it had reached 43,511 km. The mechanization era, which would revolutionize highway operations, began in 1948, and the need for an organization to organize roadworks led to the establishment of the General Directorate of Highways (KGM) on March 1, 1950 (As 2006, Özdemir 2006). Following the establishment of KGM, road maintenance and repair work accelerated, along with the construction of new roads along major routes. These efforts resulted in a 60,000-kilometer highway network by the 1960s, and between 1960 and 1970, the goal of expanding the asphalt road network was prioritized. With the establishment of the motor vehicle industry in the 1970s, the construction of high-standard, multi-lane expressways and highways on busy roads and around major cities became a priority. In the 1980s, the highway initiative was launched, focusing on the construction of high-standard highways, and highway construction continued throughout the 1990s. The total highway length, which was 152 km by 1990, was increased to 1,674 km by 2000. The divided highway initiative was launched in 2003, and highway construction continued. In the 2010s, as part of efforts to develop the highway network using alternative financing methods in addition to public resources, the Build-Operate-Transfer system, a Public-Private Partnership model, was implemented (KGMA 2025).

As of 2025, KGM has a total road network of 68,617 km, including 30,725 km of asphalt concrete, 34,856 km of surface treatment, 259 km of stone roads, 267 km of stabilized roads,

318 km of unpaved roads, and 2,192 km of other roads (KGMB 2025). Of this road network, 28,068 km (41%) are divided roads, of which 3,796 km are motorways, 21,858 km are state roads, and 2,417 km are provincial roads. The international road routes located in Anatolia are as follows (KGMc 2025):

International E-Roads (AGR - Accord Grand Routes)

- ESCAP (Economic and Social Commission for Asia and the Pacific Highway Network)
- EATL (Euro-Asian Transport Links)
- TEM (Trans-European North–South Motorways)
- TRACECA (Transport Corridor Europe-Caucasus-Asia)
- BSEC (Black Sea Economic Cooperation Highway Network)
- ECO (Economic Cooperation Organization Highway Network)
- TEN-T (Turkish Trans-European Network)

3. FACTORS INFLUENCING THE SELECTION OF ROAD ROUTES

In ancient times, as in all regions of the world, road routes in Anatolia were determined based on factors such as ease of travel for people and animals, terrain, climatic and environmental conditions that posed the least difficulty, and the availability of safe shelter and food. With the transition to settled life and the beginning of social life, routes were

determined based on communication with nearby communities, commercial activities, and military activities.

During historical periods, road routes followed the most straightforward path connecting points of economic and strategic importance, such as valleys abundant in water and food, waterways, mountain passes, wide and open mountain ridges, and open plains. While historical roads generally connected communities and cultures in a single line in the early periods, alternative routes were formed with additional roads developing over time, and extensive road networks spreading across continents were formed (Kemer 2018).

In Anatolia, the most critical factor shaping road route selection throughout history was military activity, both to facilitate conquests and to secure conquered or occupied territories. At the same time, roads that enabled movement between settlements also fostered commercial activities. While primary functions such as the passage and supply of armies, the delivery of taxes to central authorities, and the maintenance of communication continued to play a decisive role in route selection, commercial mobility gradually gained importance as a secondary factor. Moreover, road safety consistently remained a crucial determinant in route choice. Religious pilgrimages- particularly prominent during the Middle Ages- also influenced route development. In the modern era, with socio-cultural and political transformations, journeys oriented toward travel, culture, and art emerged as new factors shaping route selection.

Until the Roman Empire period, the main routes in Anatolia mostly followed the east-west direction due to the extensive series of passes and mountain ranges (Eravşar, Tükel Yavuz and Toprak 2013), mainly following the east-west direction. Still, during the Roman and Byzantine periods, three main routes were divided into north-south-center directions.

Many new roads were built north-south to strengthen communication between all cities during peacetime.

The arrival of the Turks in Anatolia in 1071 was a turning point in geography, and a new era began in the road systems along with some political, administrative, and cultural changes. The selection of Konya as the administrative center of the Seljuk State, just like in the Hittite period, paved the way for the road network to be centralized again in the interior of Anatolia. One of the most important elements of the Seljuk period road system was the caravanserais, where caravans stayed and met all their needs during their journey. Especially in the 13th century, numerous caravanserais were built (Bakırcı 2014). During the Seljuk period, road routes developed not only in the east-west direction but also in the north-south direction (Yavuzcan and Aghdam 2011; Özcan 2015; Kemer 2018; Aydın and Oral 2019; Gümüşçü and Yiğit 2020) and connections were established between these three main routes, covering the entire Anatolian geography with a network of roads.

When Seljuk's dominance weakened with the Mongol invasions in the 13th century, road routes in Anatolia became deserted, and commercial activities significantly declined. But, with the establishment of the Ottoman State, trade regained its former vitality. Unlike the Seljuk period, in the Ottoman period, more importance was attached to the connection of inland cities with coastal cities, and Istanbul became the capital in the Ottoman period, as in the Byzantine period, shaped the road network towards Istanbul and formed a hub here (Bakırcı 2014). In the Ottoman period, roads in Anatolia also followed three main routes: the right arm, the middle arm, and the left arm. In the Roman, Byzantine, Seljuk, and Ottoman periods, the road networks, primarily established for military purposes, remained effective as road networks where trade flourished.

In the period from the proclamation of the Republic to World War II, road construction works were carried out by taking into consideration the priority needs such as the country's geopolitics, economy and tourism as well as military and political priorities and the road routes were determined by taking the opinions of the General Staff and the Ministry of Economy. In order to ensure national unity, the idea of preparing a highway plan that would connect the country from one end to the other, connect the capital to the borders of all neighboring countries, connect the Eastern Black Sea Region, Central and Eastern Anatolia to the Syrian border, establish a transit connection between Trabzon and Iran and include strategic and commercial directions was adopted (Özdemir 2006). The construction of highways in Türkiye gained momentum after 1947, and with the establishment of the KGM in 1950, the construction of new roads began on main routes, and the planned era in highway construction began in the 1960s. In the road construction works during the planned era; The process of determining the route of a road is as follows (Babur et al. 1973):

- Priorities are determined by considering population, industry and industrial centers, agricultural areas, tourism potential, and traffic volume and characteristics.
- The planned road is approved by the State Planning Organization (DPT) and the High Planning Council.
- Initial surveys are conducted on 1/25,000 scale maps to identify alternative routes.
- A preliminary investigation (reconnaissance) report is prepared.
- Based on this report, the routes are examined on site, and an alternative decision is made. Road construction costs, the geological and morphological

structure of the land, landslide and drainage factors all play a role in the selection of alternatives.

Today, the process followed in route selection is similar, and the “Transport Master Plan” which sets long-term policies, objectives, and investment priorities, is used as a basis for determining new routes. New road routes are determined through a combination of traffic studies, economic analyses, regional development goals, strategic priorities, and local demands. Technically, this process is coordinated by the General Directorate of Transportation, while strategic approval is granted by the Ministry of Transportation and the Presidency. Türkiye's first Transportation Master Plan, covering the years 1983-1993, was not implemented for various reasons. The second National Transportation Master Plan, with a final projection year of 2035, was completed in 2017. Due to changing socio-economic conditions, this second plan was updated in 2022 to incorporate amendments related to the Türkiye Logistics Master Plan and entered into force as the 2053 Transportation and Logistics Master Plan.

4. ROAD CONSTRUCTION TECHNIQUES

Information about Hitite and Assyrian roads is very limited in written sources. However, commercial inscriptions indicate the existence of a highly developed and well-preserved road system between the Hittites and the Assyrians. The Phrygians, especially, constructed advanced roads in the central Anatolian plains for their chariots. The theories suggest that some carvings on soft limestone rocks in the Phrygian Valley in Central-West Anatolia, which can still be seen today, are traces of Phrygian chariot wheels (Kemer 2018). In their study titled "Ortaköy-Şapinuva Hittite Road," Reyhan, Ozulu and Tombuş (2012) examined the roads and connections of the city with

other cities in Şapinuva and stated that the width of the roads passing through the city's outskirts is 3.2 meters, while the width of the streets used in the town is 2.8 meters. They mentioned that the roads were paved with blocks of stones stacked on each other according to the width of the road, and the edge contours were reinforced with larger stones.

The Royal Road, approximately 2,500 km long, was repaired, expanded, and reorganized during the reign of Persian King Darius (Demir 2020). It has been improved and united by improving the road base and joining the pieces together. According to archaeological studies, pavement stone pieces were used to construct the Royal Road (Afshari 2021). The Persians also erected stone monuments (milestones) that measured the distances on the main routes connecting the empire. In the Hellenistic Period, milestone traditions continued, and milestones were erected on main roads (Adak 2021). Historian Herodotus reports the annual journeys of the king and many officials to the capitals of the Persian Empire. These regular visits ensured the preservation and maintenance of the Royal Road (Afshari and Akarsu 2021). Along the Royal Road, there are stops connected to the surrounding villages at regular intervals. These stops include inns where the king's messengers would stay (Afshari 2021). In the Hellenistic Period, which began with Alexander the Great's occupation of neighboring peoples, repairs were made to the Persian roads and new cities were founded in locations suitable for economic development (Ön 2019). Roads in this period were constructed by leveling the ground surface (Durugönül and Kaplan 2014). Most intercity roads were dirt roads that were difficult to walk on, and carts pulled by animals could barely move on them.

Historical roads in Anatolia were primarily constructed in layers until the Roman Empire Period, mainly consisting of leveling the earth base and laying various-sized paving stones on

some routes. However, archaeological studies indicate that using these stones was rare in road construction. Historically, roads passing over mountains were often established in a zigzag pattern uphill, while those passing along the hillside were terraced. In these steep roads, the passage of wheeled vehicles was possible but very difficult, and the width of the roads needed to be more significant for two cars traveling in opposite directions (encyclopedia.com 1992). Ancient Roman roads, called "Via Sebaste" in Latin, were vital in the growth and development of the empire. During the peak periods of the Roman Empire, the total road network covered 85,000 km of roads, consisting of 372 connections (Ekinci 2016). Nicolas Bernier pioneered Roman road research and estimates that approximately 275,000 km of road network was built during the empire, with 75,000 km of main and 200,000 km of side roads (Adak 2021). Main routes were constructed to enable the rapid and safe movement of soldiers and military equipment and to facilitate trade. Side roads were built to allow small settlements to be controlled by the center. Romans often laid out roads in a straight line over long distances to shorten the distance and reduce costs. However, this was impossible in mountainous regions like the Taurus Mountains. Roads were often built on slopes or valleys, and the terrain was challenging in such rugged areas. Steps were constructed on steep slopes, or curves were used to reduce the gradient, especially in steep areas (Adak 2014). Accessibility to materials used in road construction also played a decisive role in route selection. What distinguished the Romans from previous states was their systematic, disciplined approach and unprecedented technical expertise in road construction (Adak 2021). Early Roman roads showed simple craftsmanship, consisting of gravel poured over compacted soil. Starting from the 1st century A.D., during the Pax Romana (Roman Peace) period, the technique of using volcanic stones for pavement began. In this technique, the ground was first

leveled until reaching a solid base; where the ground did not allow it, reinforcement was done with wooden beams. Then, drainage channels were dug along both sides of the road, and a set approximately 1 meter high was created using the soil from these channels to facilitate the road's protection. The support layer, called statumen, was 25-60 cm high and consisted mainly of vertically placed stones. On top of this layer were smaller, fist-sized stones fixed with mortar, known as rudus or ruderatio. On top of this, a 30 cm thick layer of more minor, walnut-sized rocks mixed with sand and hot lime mortar, called nucleus, was laid. The top layer, consisting of slab stones approximately 60x60 cm in size and 25 cm thick, was called summa curusta (top layer), pavimentum (pavement), or summum dorsum (top hump) (Takmer and Onen Tuner 2007). The Romans also placed cylindrical milestone stones indicating the direction and distance to the center at intervals of 1 Roman mile (1,000 Roman steps = 1.485m) (Acımaz 2021).

Road engineering and technology remained relatively the same from the Roman Empire to the Byzantine (Eastern Roman Empire), Seljuk, and Ottoman Empire periods (Karaca 2020). During the Byzantine Empire, the successor of the Roman Empire, there were only changes in the road network once the capital moved to Istanbul. The Byzantines maintained and occasionally expanded the Roman road network. The Byzantine state roads, characterized by their paved, flat, and solid construction, sometimes reached widths of 6.5 meters. The formation of this road network was influenced by the soil structure and the locations of settlements (Elam 2015). Archaeological studies indicate that during the early Byzantine period (until AD 650), new roads were often laid over or next to older road surfaces. These roads had larger surface stones and appeared smoother than those from the Roman period (Belke 2020).

The Seljuks established dominance over the roads passing through the territories they conquered in Anatolia and improved these roads. While the streets themselves did not change significantly, their primary functions did. The Seljuks' approach to benefiting from transportation expanded the functions of the roads. The significant difference during this period was the perception of controlling international trade alongside military and administrative needs as a primary transportation direction. During the Seljuk period, securing trade routes and achieving economic goals were paramount (Yavuzcan and Aghdam 2011). Recognizing the importance of road safety for the development of trade, Seljuk sultans built numerous caravanserais at approximately 30 km intervals (a nine-hour camel journey) where caravans could rest and meet their needs (Aydın and Oral 2019). The Seljuk rulers also constructed infrastructure like bridges connecting caravan routes and developed urban facilities. Clean water channels were built along the roads, and the main roads were paved with stone. The streets included ventilation (maintenance holes), people's seating areas, and animal drinking troughs (Ergün 2022). During wartime, selected individuals from the army responsible for the roads would clear stones, cut trees, build bridges, remove obstacles blocking river crossings, and address other issues encountered during travel (Yenidoğan 2021).

Seljuk roads were predominantly used in the Ottoman Empire from its establishment until the conquest of Istanbul. Over time, the emergence of new political centers also influenced and altered the Anatolian road network (Aydın and Oral 2019). During the Ottoman period, similar to the Seljuk era, efforts continued to ensure comfortable and secure travel by constructing caravanserais and hans (Ergün 2022). There is little evidence of extensive road construction during peace in the Ottoman era. However, roads were maintained and repaired to

facilitate military movements during wars, including constructing numerous bridges, particularly along military routes (Karaca 2022). The physical structure of roads in the Ottoman period did not undergo significant development, remaining more suited for mule paths rather than wheeled vehicles (Ertuş 2011). Due to the high construction costs, stone-paved roads could only be built in some of the cities' neighborhoods. Intercity roads, on the other hand, were created by crushing the soil on routes frequently used by passengers, animals, and vehicles (Sarı 2019). Road construction gained significant governmental attention with the Tanzimat reforms, focusing on maintaining existing roads rather than creating new ones (Çadırcı 1991). Roads were categorized into four classes: major roads connecting provinces to Istanbul, provincial roads between the city centers, sanjak roads connecting the district to major roads, railways and piers, and roads that were not open all the time. These roads varied in width from 4.50 to 7.50 meters, with gradients not exceeding 6%. The construction involved layers of gravel or crushed stone, with large rocks beneath smaller surface stones, and roads typically had a slight slope for drainage (Babür et al. 1973). Despite recognizing railways' political and economic importance during the Industrial Revolution, the Ottoman Empire faced technical and financial challenges, often receiving assistance from foreign states for railway construction and granting them significant privileges (Akçakaya 2022).

The roads inherited from the Ottoman period in 1923 were characterized by good macadam, rough macadam, leveled road, and dirt roads. In the early years of the Republic, due to economic difficulties and the diversion of resources to railway construction, highway construction was largely ignored, except for a few essential ones. Due to the lack of machinery used in road construction, no progress was made in the road network.

Due to the lack of attention to maintenance, the roads constructed often quickly became impassable. Until 1947, no machinery other than diesel and steam rollers and trucks was used in road construction. In a very limited number of locations, such as Istanbul and Izmir, asphalt boilers, fixed and mobile crushers of various sizes, and a very small number of compressors were available (Özdemir 2006). Very few asphalt roads were built during this period, and the majority of the roads constructed until 1947 were of the same quality as those inherited from the Ottoman period.

In order to establish a road network in the Western sense and to ensure that this network was constructed in accordance with the requirements of modern life, the Deputy Administrator of the United States (US) Federal Highway Administration was invited to Türkiye in 1947 and asked to prepare a report. The report was accepted by the government, and the purchase of modern machinery began. Thus, in August 1948, Türkiye entered the era of mechanized road construction (the modern road construction era). The report strongly emphasized the need for an organization to carry out road construction work, resulting in the establishment of the General Directorate of Highways (KGM) in 1950 (Babür et al. 1973). Following the establishment of the KGM, the US provided financial assistance to Türkiye, known as the Marshall Aid. With this aid, US methodologies and standards were adopted in the machinery, equipment, and engineering services used in highway construction technologies. In the 1960s, the KGM began work on “Highway Geometric Standards,” preparing templates and tables for office and field work that were used in project work for many years (KGMd 2016). Currently, the flow diagram shown in Figure 1 is used in new road construction and road improvement projects.

The road pavement is a layered structure consisting of a subbase, base, and binder-surface course that transfers traffic loads to the subgrade, and it accounts for a large portion of construction costs. Two types of pavements are used on highways in Türkiye: flexible and rigid. The use of rigid pavement (concrete roads), which is only applied in some trial sections, is extremely low. In flexible (asphalt) pavement projects, KGM bases its design criteria on those of the AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

5. ROAD ADMINISTRATION, AND ORGANIZATIONS

Transportation and its primary element, roads, are shaped, determined, and controlled by the political power dominant in a given geography. Ultimately, the authority of a state can only be established and sustained where it can 'reach.' Apart from its military and administrative aspects, this authority becomes visible with the defining characteristics of the state it represents. Thus, the quality of roads, one of the main elements of transportation, is closely related to the nature of the state's dominance over them (Yavuzcan and Aghdam 2011).

Information about road construction, road administration, institutions, and organizations during the early states period in Anatolia mainly relies on archaeological studies, and the information that can be identified needs to be improved. During these periods, the transportation system had a more military-oriented structure, and road construction and public works activities were the responsibility and under the control of rulers.

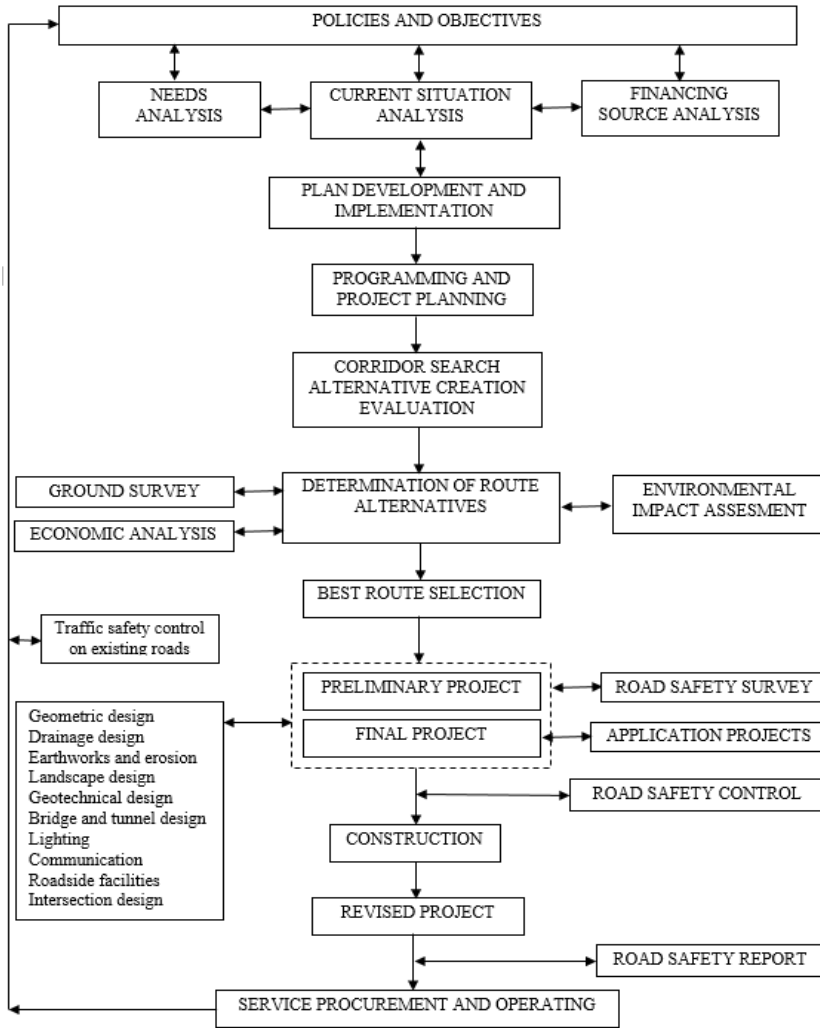


Figure 1. Road Planning, Design, and Construction Stages Flowchart (KGMd 2016)

Although ensuring the safety of trade routes was mostly the caravans' responsibility, state-appointed guards were also responsible for providing road security. During the Assyrian period, roads were mainly used by imperial officials such as royal messengers and military couriers. Village garrisons along the road network also provided accommodation and supplies for royal

messengers (Afshari and Akarsu 2021). According to the famous historian Herodotus, the Persians built 111 structures at certain intervals along the Royal Road for travelers to rest and meet their needs (Takmer and Onen Tuner 2007). The Persians also had military forces to ensure security on the roads and civilian populations for general services. Most historians acknowledge the presence of skilled and experienced Iranian engineers during the Persian Empire period in road and bridge construction. Some Persepolis tablets mention a group of officials responsible for protecting and building roads. However, information on this subject could be more extensive (Afshari and Akarsu 2021).

The Romans, who initiated qualified road construction in Anatolia, divided roads into public roads (via public) and private roads (via private). Private roads were roads open to use by private individuals or specific neighbor groups within indefinite boundaries. On the other hand, public roads were open to the public (Özer Sarıtaş 2009). Roman roads were constructed and supervised by high-ranking officials. Usually, the province's first governor was appointed by the emperor, under the supervision of the emperor, and was often built by soldiers and residents. The considerable construction costs of roads were required to be covered by the province's inhabitants. However, in some cases, the emperor also contributed to these expenses from his treasury (Takmer and Onen Tuner 2007). Most of the laws during the Roman Republic period were related to the construction and maintenance of public roads. The management, supervision, maintenance, and cleaning of roads were the duties of municipal officials (aediles) responsible for municipal services. Notable public officials (curators) were appointed to maintain the main roads. Landowners along the route of the main roads were responsible for their maintenance (Özer Sarıtaş 2009). The Roman state established resting points called "mansions" along the roads so that official travelers and animals could meet their

needs. Additionally, postal stations called "mutatio" were established at specific points along the roads where horses and carts could be changed (Kazancıoğlu 2014). The construction of resting points dates back to the first emperor, Augustus, regulation in 20 B.C. The distance between mansions built in a day's journey is generally 40 km and consists of military observation-protection structures, guesthouses, and baths. The number of mansions identified in Anatolia is quite limited (Adak 2021). Military structures are only present in essential locations and customs points. Furthermore, the courier organization (cursus publicus) transporting news from provinces to the central administration allowed the empire to be governed from Rome (Takmer and Onen Tuner 2007).

During the Byzantine period, as in the Roman era, the essential functions of the road system were to keep the provinces connected to the center, facilitate the movement of the army, and facilitate the flow of goods and passengers between provinces/cities (Yavuzcan and Aghdam 2011). In the Byzantine period, the road network included public roads, royal roads, central roads called strata, leoforos, or trios, provincial roads connecting small towns to major city centers and villages, and rural roads connecting villages to surrounding cities. Byzantine public roads, inherited from the Roman era, are paved, straight, and sturdy roads. The lines where settlements were located played a decisive role in forming this road network, which sometimes reached a width of 6.50 meters. The Byzantines, who continued the Roman tradition, successfully preserved and occasionally expanded the Roman road network (Elam 2011). Like in other aspects such as administration, law, and institutions, the Byzantines also used Roman road administration and organization systems.

The Seljuks preferred to settle in existing cities rather than establish new ones in Anatolia. The Seljuk state aimed to

establish transportation connections between Sinop and Samsun in the north and Alâîyye and Antalya ports in the south, with Konya as the center, to attract international trade potential to the geography of Anatolia. For this purpose, a transportation system supported by social, economic, and military structures such as ribat, caravanserais, and bridges, built as a waqf by the ruling class to serve the needs of caravans in terms of accommodation, security, and health, as well as communication and intelligence activities, was established. The most visible effect of Seljuk administrative approaches on transportation in Anatolia is caravanserais (Yavuzcan and Aghdam 2011). During the Seljuk period, caravanserais were of 5 different types: Başhan, Büyükhane, Konak, Alayhan, and Sultan (Ergün 2022). Caravanserais built by the state or by philanthropists provided free accommodation for caravans. In Anatolia, there are 232 caravanserais from the Seljuk period that have been identified until today (Gümüşçü and Yiğit 2020). During the Seljuk period, a "Berid" communication organization was established to provide official communication and deliver intelligence information. The system included messengers known as "peykan" and "tatar," who used fast-running horses and single-humped camels. Pigeons were also used for communication. In the Seljuk state, military units were responsible for road security and protecting caravans. These were the Kervanbaşı, responsible for guiding the caravan and determining the route and resting places; the Tutkavul, accountable for protecting the caravan from thieves and bandits; and the Shahne, responsible for regional defense. In addition, officials were appointed to collect taxes to ensure the security of traders and goods (Ergün 2022). In Seljuk state, the maliks/governors were responsible for all kinds of administrative, financial, judicial, and public order affairs in the regions for which they were responsible. Their duties included making sea and land routes and passages safe for merchants and travelers,

inspecting officials, and cooperating with the shapes accountable for security (Keleş 2019).

Until the early 19th century in the Ottoman Empire, main roads were largely constructed by the state using surplus revenue, while the construction and maintenance of secondary roads were left to timar and zeâmet holders (Ekin 2017). road regulations were carried out by the Derbentçiler (Derbent guards), Köprücüler (Bridge builders), and Kaldırımcılar (Pavement builders) in line with the state's priorities, public demands, and complaints (Ertaş 2011). Derbent guards were officials in the “Derbent” organization, established to protect roads, especially in mountainous and pass areas, to ensure the safety of people and property, to repair damaged roads, and to make deserted places safer. Although the Derbent organization was established during the time of Orhan Bey, official records (tahrir registers) from the reigns of Murat II and Mehmet II also mention the Derbent organization. Derbents are divided into three groups: castles with derbent characteristics, large derbents in the form of foundations, and derbents at bridge locations. Bridge builders are responsible for bridge construction, maintenance, and repair. Pavement builders are the people who build the roads. Pavement builders are under the command and supervision of the Chief Architect in the city. Pavement builders inspect the condition of roads along the routes the army will follow in times of war and carry out road construction work within the city in times of peace (Babür et al. 1973). There is a strong civil initiative in matters such as the organization of roads, the improvement of their physical conditions, the construction of bridges, and the provision of road safety. It is known that the local population, and especially wealthy philanthropists, established numerous foundations throughout the country to improve roads (Ertaş 2011). With the Tanzimat, road construction and maintenance works began to be carried out by the state with a centralist approach and through

decrees issued (Babür et al. 1973). Until the Tanzimat period, the Menzil Organization played a major role in the formation of road networks and communication (Bazna 2023). In the Ottoman Empire, official transportation and communication were largely provided through menzilhânes until the establishment of the postal administration (1839-1840) (Çetin 2011; Ekin 2022). A “menzilci” was in charge of the menzilhânes. The officials working in the postal service were called “peyk,” “ulak,” and “tatar.” Menzilhânes employed “kulaksızlar” (guards) who ensured security and guided drivers, and “hademeler” (servants) who took care of the animals (Çadırcı 1976). Communication via the menzil organization consisted of administrative communications between the center and the provinces; menzilhânes were not established for civilian communication. However, on rare occasions, civilians could obtain mounts from menzilhânes by paying in advance (Çetin 2011).

Until the Tanzimat period, the construction of the country's infrastructure was managed through a decentralized system by provinces and sanjaks, which covered their own infrastructure needs, such as roads and bridges. After Tanzimat, some steps were taken to improve transportation services. Temporary reconstruction councils were formed to determine the roads to be built nationwide. 1845-1847, the Nafia Treasury Directorate was established to finance the country's reconstruction works. In 1848, the Nafia Ministry was established to oversee public works such as building construction, road and bridge construction, and small forest preservation. After the proclamation of the Reform Edict, some laws and regulations regarding public works were enacted. The working conditions of the Meclis-i Maâbir were defined by a regulation dated September 14, 1858, and matters regarding road, street, avenue, sea, and river transportation were referred to this council. Meclis-i Maâbir prepared a regulation consisting of six sections and 31

articles regarding highways in 1863, and this regulation remained in force until August 1869 (Açikel and Hanılçe 2011). This regulation divided roads into four categories based on their suitability for carriage in the first three. The first section of the regulation describes the technical specifications of roads to be built. In contrast, the second section covers the principles for repairing and rectifying existing roads and mentions engineers, assistant engineers, and three classes of foremen who would be involved in road construction. The third section introduces compulsory labor obligations for the public in road construction and repair (Keklik 2022). After this regulation was repealed, a new regulation titled "Regulation on Turuk & Maâbir" consisting of four chapters and 28 articles, was issued (Yazıcı 1992). In 1879, a comprehensive project covering all Imperial Public Works was prepared for the first time and submitted to the Grand Vizier by Hasan Fehmi Efendi, the Director of Nafia. This project addressed technical aspects of road issues and prepared various construction specifications. Determining the qualities of materials was one of the essential features of these specifications. In addition, the "Road Budget" was prepared after 1879. During this period, a directive consisting of 98 articles was adopted, covering the establishment, technical specifications, and working methods of the General Directorate of Highways and shedding light on this subject (Babür et al. 1973).

In the early years of the Republic, road construction and maintenance work was left to local administrators. The Ministry of Public Works (Nafia Vekaleti), which was responsible for the technical management of the roads built, did not have a good organization throughout the country and therefore did not pay sufficient attention to the priority and necessity of road construction work. In order to secure the necessary financing for road construction, the "Law on Tarik Bedel-i Nakdisi " was passed by the Grand National Assembly on February 21, 1921.

Under this law, which was based on cash payments, men between the ages of 18 and 65 were subject to taxation. In order to overcome ongoing financing problems, this law was amended and the “Road Taxation Law” was enacted on January 19, 1925, introducing a system of physical labor. Contrary to the Tarik Bedel-i Nakdisi Law, physical labor, i.e., working on road and bridge construction projects designated by the state, was adopted before monetary payment. This obligation was applied particularly to the construction of provincial roads. The success of the roads built in the early years of the Republic depended on the personal interest, effort, and energy of the governors. Governors were encouraged by the governments to build roads, which were considered a primary tool for ensuring the internal integrity of the country. From World War II until 1950, road construction work throughout the country was again carried out by the provinces (Özdemir 2006). With the start of the revolutionary era of mechanized work in highway activities in 1948, there was a need for an organization to regulate road works. Accordingly, on March 1, 1950, the General Directorate of Highways was established as the institution responsible for the construction, maintenance, repair, and safety of state and provincial roads and highways. The KGM is a public legal entity affiliated with the Ministry of Transport and Infrastructure, consisting of a General Directorate, a central organization, and a provincial organization. The institution's main duties are as follows (KGMe 2025):

- Define the highway, state, and provincial road network, prepare changes to the network, construct and repair roads and bridges, and ensure their safe use.
- Prepare standards and technical specifications related to design, construction, maintenance, and repair.
- Define and implement road and traffic safety principles and install road signs.

- To carry out or commission mapping, survey, and project work.
- To establish, operate, and maintain facilities, garages, warehouses, laboratories, rest areas, and social facilities related to road construction and maintenance.
- Procure, operate, and repair the necessary vehicles, machinery, and materials for the performance of duties.
- Expropriate, purchase, or lease real estate necessary for road construction and traffic safety.

6. CONCLUSION

The Anatolian geography has been a significant artery for extensive caravan routes, migrations, and trade since ancient times, evolving into communication channels for states. Anatolia, the center of the Hittite culture 2,000 years before Christ, experienced its golden age politically and culturally. However, with the collapse of the Hittite state, political stability in the geography was lost, and this golden age could not be relived for centuries. The settlement of Anatolia by the Turks became a turning point not only in the political course of Turkish and world history but also in Anatolia's destiny, turning the Anatolian plateau into a boundary between the East and the West in history. On this battleground, the spirits of the East and the West clashed (Ramsey 1960).

Throughout history, in this geography, which has been a transit area for many tribes and a field of influence and struggle for some ancient civilizations and great empires, a new transportation network emerged and developed with every significant political organization. Depending on this, roads changed their places and directions. While the substantial

characteristic in Anatolian roads from the Hittites to the Hellenistic age was the concentration around the capital, thus giving rise to regional roads, in later periods, depending on the organizational structure of the state, sometimes port cities and sometimes administrative cities in the inland became areas where roads converged. Thus, different lines stood out and played an active role in the road system in each period.

This study aimed to demonstrate the changes in land transportation over time in Anatolia's timeline, focusing on four aspects: roads, route selection, road construction techniques, and organizations. Table 1 summarizes the construction, management and safety of roads in Anatolia and the historical development of institutions and organizations involved in this process, along with the characteristic features of the period, within the framework of a periodic classification.

In conclusion, there were not many changes in the main road routes in Anatolia from historical periods to the early years of the Republic. The terrain, military and commercial activities, and road safety were influential in route selection in every period. Road engineering and technology did not change significantly after the Roman Empire. During the Roman, Seljuk, and Ottoman periods, many similar structures and institutions were established for road construction, maintenance, security, and meeting the needs of travelers. Today, Türkiye, a key country connecting Europe to Asia and located at the intersection of the Mediterranean, Black Sea, Middle East, and Caucasus, boasts a well-developed highway network that provides accessibility to every point in the country, contributing to its competitiveness and improving the quality of life of its people. Türkiye's modern highway network is built upon this transportation heritage spanning thousands of years, and Anatolian roads continue to serve as a strategic artery, bearing the traces of the past while shaping the vision of the future.

Table 1. Road Transport in the Time Tunnel of Anatolian Geography

Period	Factors Affecting Route Selection				Construction Techniques	Road Administration
	Geographical & Topographical	Military	Economic & Commercial	Social & Cultural		
Early States	Roads followed terrain suitability; valleys and plains preferred; Taurus and Northern Anatolian mountains dictated directions.	Roads mainly military-oriented; used for royal messengers and armies.	Early trade routes facilitated exchange between Mesopotamia and Anatolia.	Travel linked to daily life, communication between settlements.	-Hittite-Asyrian roads were well preserved. -Hittite roads paved with stone blocks, 3.2 m wide. -Persians organized the "Royal Road" 2,500 km with milestones. -Hellenistic roads mostly earthen, sometimes paved. -Zigzag or terraced- roads on slopes.	-Roads mainly served military and administrative functions. -Security ensured by garrisons and couriers. -Persians built 111 stations along the Royal Road. -Both military and civil society contributed to road safety.
Romans	Roads often built in straight lines, but adapted to mountains with terraces, steps, switchbacks.	Built primarily for rapid troop and equipment movement.	Trade was also vital, roads connected cities, ports, and provinces.	Mansio (lodging) and mutatio (relay stations) supported official and civil travel.	-First systematic, multi-layered construction technique. -Main roads in straight lines; stepped or curved in mountainous terrain. -Route selection based on material availability.	-Roads classified as viae publicae (public) and viae privatae (private). -Construction inspection supervised by high officials. -Costs charged to provincial populations; sometimes subsidized by the emperor. -Aediles (municipal roads), Curatores (main roads) responsible for maintenance. -Mansio (lodging) and "mutatio" (relay station). -Cursus publicus as the official communication network.
Byzantine	Maintained Roman networks; solid, paved roads up to 6.5m wide; aligned with topography.	Network aimed at facilitating army movement and connecting provinces.	Supported regional trade and administrative unity.	Road use linked to imperial control and pilgrimage routes.	-Adopted Roman road network (northern, southern, central routes). -Public roads paved, durable, up to 6.5 m wide. -New roads often built over earlier surfaces. -Paved with larger stones for smoother surfaces.	-Functions: connecting provinces to the capital, military mobility, trade, passenger transport. -Roman road institutions largely preserved. -Relocation of the capital to Constantinople reshaped the network.
Seljuk	Expanded both east-west and north-south corridors; built bridges, caravan roads.	Combined military-administrative control with trade security.	Focused on international trade; caravanserais, hans, ribats fostered commerce.	Caravanserais provided lodging, healthcare, cultural exchange	-Preserved previous road axes, shifted focus to trade. -Expanded roads in both east-west and north-south directions. -Built caravanserais, hans, ribats -Bridges, water channels, and stone-paved highways constructed. -During wars, army cleared and repaired roads.	-Aimed at controlling international trade routes. -Caravanserais built at ~30 km intervals. -Endowed as "waqf", provided free services. -Communication via Bend system (couriers, messengers, pigeons). -Military security roles: Caravan head (Kervanbaş), guards (Tutkavul, Şahne). -Regional safety supervised by governors (melik).
Ottoman Empire	Routes mainly pack-animal paths; costly paved roads limited to urban areas.	Roads repaired during wars for troop mobility; "Hajj Road" had military use.	Cape of Good Hope & Suez Canal reduced caravan importance; focus on linking inland to ports.	Hajj pilgrimages influenced routes; strong civil initiative via "waqfs".	- Main roads maintained by the state, secondary roads by "imam/zames" -Regulated by Darbent Guards, Bridge Builders, and Pavement Builders. -"Darbent Organization" secured road safety. -Endowments (waqfs) contributed to road repairs. -"Menzil Organization" ensured official transport and communication	

Period	Factors Affecting Route Selection				Construction Techniques	Road Administration
	Geographical & Topographical	Military	Economic & Commercial	Social & Cultural		
Ottoman Empire (After Tanzimat)	Roads classified into 4 levels; slopes <6%; gravel/stone layers used; new road standards (1879).	State centralization meant more 'planned' strategic roads".	Improved inland connections supported "trade and administration".	Travel grew with reforms; infrastructure modernization started.	-Roadworks mostly repairs of existing roads. -Four categories: main, provincial, district, local roads. -Width 4.5–7.5 m; slope $\leq 6\%$. -Gravel/crushed stone bases with drainage. -1879 road construction regulations issued.	-Road construction centralized. -Nafia Treasury (1845–47) and Ministry of Nafia (1848). -Meclis-i Maabur (1863 regulation, compulsory labor). -From 1879, a separate "Road Budget" established.
Republic of Türkiye	Initially neglected; inherited 18,350 km. Post-1948: mechanized construction, asphalt roads, AASHTO standards	Routes aligned with geopolitical & military priorities.	Focused on economic growth, industry, agriculture, tourism.	Road building tied to national unity and governors' efforts.	-Roads deteriorated quickly due to lack of machinery. -1948: U.S. equipment introduced mechanized road construction. -1960s: Geometric Road Standard adopted. -Present: multi-layered system (subbase, base, asphalt/concrete surface). -Based on AASHTO standard	-Early years: road affairs left to local administrators. -Financing via 1925 "Road Tax Law". -Success depended on governors' initiatives. -1950: General Directorate of Highways (KGM) established. -KGM responsible for construction, maintenance, standards. -Transport Master Plans (1983–1993, 2035, 2053). -Road security remained under state supervision.

REFERENCES

- Acımaz, Ö. (2021). Antik Roma Yolları. <https://arkeofili.com/antik-roma-yollari-imparatorlugun-altiyapisini-olusturuyordu/> [20 Eylül 2023].
- Açıkel, A. & M. Hanılçe. (2011). Sivas Vilayetinde Ulaşım (1867-1907). International Pre-Ottoman and Ottoman Historical Research 6th Intermediate Symposium. 14-16 Nisan 2011, Uşak Üniversitesi, Türkiye.
- Adak, M. (2014). Likya Yarımadası Ulaşım Sistemi. İletişim Yolları Konferansı: Prehistorik Çağlar'dan Selçuklu Dönemi'ne kadar Anadolu'daki Yol Güzergâhları 20-22 Mart 2014, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Adak, M. (2021). Küçük Asya'da Roma İmparatorluğu Dönemi'nde Ulaşım, İletişim ve Taşımacılık Tekin O (ed), Hellenistik ve Roma Dönemlerinde Anadolu: Krallar, İmparatorlar, Kent Devletleri. İstanbul: Yapı Kredi Press, 432-449.
- Afshari, L. (2021). Yeni Veriler Işığında Güneybatı İran'da Ramhormoz Ovasında Akhaimenid Dönem Yerleşimlerinin Dağılımı ve İran, Mezopotamya, Anadolu'daki Diğer Bölgeler İle İlişkiler. Doktora Tezi, Atatürk niversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Arkeoloji Bölümü, Erzurum.
- Afshari, L. & R. Akarsu. (2021). Akhaimenid döneminde yol ağları. Anasay 5(16), 133-150. <https://doi.org/10.33404/anasay.891845>
- Akçakaya, U. (2022). Bir Karış Fazla Şimendifer: Osmanlı'dan Cumhuriyet'e Demiryolu Politikasının Değişimi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Tarih Dergisi, 5(1), 29-61. <https://doi.org/10.47437/esogutd.1078259>
- Anadolu (2012). https://tr.wikipedia.org/wiki/Anadolu#cite_note-6 [20 Mart 2024]

- As, E. (2006). Cumhuriyet Dönemi Ulaşım Politikaları 1923-1960 [Doktora Tezi], Dokuz Eylül Üniversitesi, Atatürk İlkeleri ve İnkılâp Tarihi Enstitüsü, İzmir.
- Aydın, F. and M. Oral. (2019). Türkiye’de karayolu ulaşımının tarihsel gelişimi. *Journal of Awareness* 3(5), 257-266. <https://doi.org/10.26809/joa.2018548635>
- Babür M., F.İ. Atalay, İ. İlter, T. Ergün & H. Balcı. (1973). Cumhuriyetin 50. Yılında Karayollarımız. Ankara: Bayındırlık Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Yayını.
- Bakırcı, M. (2014). Coğrafi Açıdan Anadolu’nun tarihi ulaşım ağı ve İpek Yolu. *Avrasya Etütleri* 20(45), 63-86.
- Bazna, A.Y. (2023). Tanzimat Dönemi Osmanlı Yol Çalışmaları Örneğinde İnebolu Yolu Yapım Faaliyetleri (1862-1876). *Vakanüvis - International Journal of Historical Researches* 8(1), 232-291. <https://doi.org/10.24186/vakanuvis.1250054>
- Belke, K. (2020). Roads and Routes in Northwestern and Adjoining Parts of Central Asia Minor: From the Romans to Byzantium, with Some Remarks on their Fate during the Ottoman Period up to the 17th Century. *Gephyra*, 20, 79-98. <https://doi.org/10.37095/gephyra.742745>
- Çadırcı, M. (1976). Posta Teşkilatı Kurulmadan Önce Osmanlı İmparatorluğunda Menzilhane ve Kiracıbaşılık. *VIII. Türk Tarih Kongresi*, 11-15 October 1976, Ankara, Türkiye.
- Çadırcı, M. (1991). Tanzimat döneminde karayolu yapımı. *Journal of Historical Research (TAD)*, 15(26), 153-167. https://doi.org/10.1501/Tarar_0000000051

- Çallı, D.S. (2015). Uluslararası seyahatlerin tarihi gelişimi ve son seyahat trendleri doğrultusunda Türkiye'nin konumu. *TurAr Tourism and Research Journal* 4(1), 4-28. <https://doi.org/10.37095/gephyra.742745>
- Çetin, C. (2011). Osmanlı Devleti'nde Ulaşım ve İletişimin Örgütlenmesi. *Tarihin Peşinde Dergisi* 5, 17-38.
- Çetin, E. (2014). Franz Taeschner'in muhtelif devirlerde Anadolu'nun yolları ve cihan münakalatına nazaran vaziyeti isimli eseri üzerine notlar. *Journal of History School* 7(XVII), 321-343. <https://doi.org/10.14225/Joh458>
- Demir, M. (2020). Herodotos'ta Küçük Asya Pers Kraliyet Yolu: Diğer antik yazarları ile karşılaştırılarak incelenmesi ve açıklanması. *Tarih İncelemeleri Dergisi*, 35(2), 439-472. <https://doi.org/10.18513/egetid.849637>
- Demirci, H. & N. Karamağaralı (2021). Development and Typology of the Roman and Turkish Bridge Architecture in and Around the Vicinity of the Greater Menderes Basin. *Gazi University Journal of Science Part B: Art Humanities Design and Planning* 9(1), 75-90.
- Durugönül, S. & D. Kaplan. (2014). Kilikia'da Hellenistik ve Roma dönemlerinde yollar ve rotalar: Kent ve sosyal yaşam. İletişim Yolları Konferansı: Prehistorik Çağlar'dan Selçuklu Dönemi'ne kadar Anadolu'daki Yol Güzergâhları 20-22 Mart 2014, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Ekin, Ü. (2017). Klasik Dönemde Osmanlı İmparatorluğu'nda Karayolu Ulaşımını ve Nakliyatı Etkileyen Faktörler (1500-1800). *Belleten*, 81(291), 387-418. <https://doi.org/10.37879/belleten.2017.387>
- Ekin, Ü. (2022). Osmanlı İmparatorluğu'nda Ulaşım ve İletim Örgütlenmesi. *Kadim* 3, 31-52. <https://doi.org/10.54462/kadim.1075652>

- Ekinci, N. (2016). Antik Yunan'dan Roma'ya retorikten propagandaya. *MANAS Journal of Social Studies* 5(4), 149-174.
- Elam, N. (2011). Bizans Anadolu'sunun Ticarî, Dinî (Hac) ve Askerî Yol Ağı. CIEPO International Pre-Ottoman and Ottoman Historical Research 6th Intermediate Symposium. 14-16 Nisan 2011, Uşak UÜniversitesi, Türkiye.
- Elam, N. (2015). Konstantinopolis'te ulaşım. Erişim tarihi: 20 Ocak 2024. <https://istanbultarihi.ist/218-konstantinopoliste-ulasim>
- Encyclopedia.com (1982). Roads and Land Traffic: Construction Techniques of Greek roads Erişim tarihi: 20 Mart 2024. <https://www.encyclopedia.com/history/news-wires-white-papers-and-books/roads-and-land-traffic#A>
- Engin V., A. Uçar & ve O. Doğan. (2012). Osmanlı'da Ulaşım: Kara-Deniz-Demiryolu. İstanbul: Çamlıca Press.
- Eravşar, O., P.A.Tükel Yavuz & G.M.V. Toprak. (2013). Ortaçağ'da Kuzey Anadolu yolları ve yol üstü kuruluşları. TÜBİTAK-SOBAG. Proje No: 109K369.
- Ergün, D. 2022. Roma ve Selçuklu Dönemi Yol Güvenliği. [Yüksek Lisans Tezi], Department of Transport Safety and Management, *Police Academy Institute of Traffic*, Ankara.
- Ertaş, M.Y. (2011). Savaşlarla şekillenen yollar: Osmanlı Devleti'nde yol sistemi CIEPO International Pre-Ottoman and Ottoman Historical Research 6th Intermediate Symposium. 14-16 Nisan 2011, Uşak Üniversitesi, Türkiye.

- Eskikurt, A. (2014). Ortaçağ Anadolu ticaret yolları. *Muğla University Journal of the Institute of Social Sciences*. 33, 15-40.
- Gümüşçü, O. & E. Doğandor. (2020). On the W. M. Ramsay and “The geographical conditions determining history and religion in Asia Minor”. *Journal of Medieval Studies* 3(2), 334-355. <https://doi.org/10.48120/oad.820577>
- Gümüşçü, O. & İ. Yiğit. (2020). The Seljuks who Seal the Toponymy: An Evaluation on Named/Affixed Khan and Caravanserai Place and Settlement Names in 1/200.000 Scale Topographic Maps of Türkiye. *Journal of Seljuk Civilisational Studies (JSCS)* 5, 97-109. <https://doi.org/10.47702/sematr.2020.6>
- Karaca, E. (2020). Arkeolojik verilere göre Doğu Trakya Kuzey Yolu. *Belleten* 84(299), 29-42. <https://doi.org/10.37879/belleten.2020.29>
- Karaca, Ö. 2022. Selçuklu ve Osmanlı devletleri döneminde yollar. *SSRN Electronic Journal* ISSN: 1556-5068. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.6604225>
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGMa). 2025. Tarihçe. (Çevrimiçi) <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/Tarihce.aspx>, [17.03.2025]
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGMB). 2025. Yol Ağı Bilgileri. 11.05.2025 <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx>
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGMc). 2025. Uluslararası Karayolu Güzergâhları. Erişim tarihi: 15.05.2025 <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/GlobalProjeler.aspx>

- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGMD). 2016. Karayolu Tasarım El Kitabı, KGM Yayını
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGME). 2025. Görevleri. <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/Gorevleri.aspx> [13.06.2025]
- Kazancıoğlu, H. (2014). Osmanlı Dönemi Kervansaraylarının Sosyo-Kültürel ve Ekonomik Fonksiyonları. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İslam Tarihi ve Sanatları Bölümü, İstanbul.
- Keklik, E. (2022). Turuk ve Maâbir Mektebi ve İlk Nizamnamesi (1862). *Külliyat The Journal of Ottoman Studies* 17, 219-236. <https://doi.org/10.51592/kulliyat.1144963>
- Keleş, N. (2019). Büyük Selçuklular Devrinde Şehirlerin İdaresi. *Mimar Sinan Fine Arts University Journal of Social Sciences* 3(20), 292-311.
- Kemer, N. (2018). Anadolu'nun tarihi yolları ve Ankara için bir yeşil yol planlama olanağı. *The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University* 9(2), 136-143. <https://doi.org/10.29048/makufebd.407963>
- Ön, E. (2019). Helenistik ve Roma Döneminde Lykaonia [Yüksek Lisans Tezi], Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Tarih Bölümü, Konya.
- Özcan, K. (2015). Selçuklu çağında Anadolu kentleşme koridoru. *Bilig* 73, 185-206.
- Özdemir, N. (2006). Cumhuriyet Dönemi Karayolu Politikası 1923-1960 [Doktora Tezi], Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Tarih Bölümü, Ankara.
- Özer Sarıtaş, D. (2009). Roma Devleti'nde ulaştırma ve haberleşme sistemi, Cursus Publicus. *Maltepe Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi* 8(2), 205-225.

- Ramsey, W.M. (1960). Anadolu'nun Tarihî Coğrafyası, Mihri Pektaş (trans.), Turkish Ministry of National Education Press.
- Reyhan, E., İ.M. Ozulu & F.E.Tombuş. (2011). Ortaköy-Şapınuva Hitit Yolu. 2. Çorum Kazı ve Araştırmalar Sempozyumu, 26 Eylül 2011, Çorum Türkiye.
- Sarı, A. (2019). Osmanlı kara taşımacılığında deve ve Türkmen deveçiler. *Dokuz Eylul University The Journal of Graduate School of Social Sciences*, 21(1), 303-322. <https://doi.org/10.16953/deusosbil.527854>
- Takmer, B. & N. Onen Tuner. (2007). Via Sebaste. Antalya: Varsak Municipality Press.
- Temir, H. (2023) Türkiye’de göçün dış politika perspektifinden değerlendirilmesi. *Selcuk University the Journal of Social and Technical Researches* 21(01), 26-40. <http://dx.doi.org/10.59768/sustad.2023.3>
- Yavuzcan, A. & G. Aghdam. (2011). Türkiye Selçukluları’nda ulaşım ve iktidar. CIEPO International Pre-Ottoman and Ottoman Historical Research 6th Intermediate Symposium. 14-16 Nisan 2011, Uşak Üniversitesi, Türkiye.
- Yazıcı, N. (1992). Tanzimatta Haberleşme ve Kara Taşımacılığı. OTAM Ankara Üniversitesi *Osmanlı Tarihi Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi* 3(3), 333-377. https://doi.org/10.1501/OTAM_0000000129
- Yenidoğan, H. (2021). Büyük Selçuklu Ordusunda Sefer Organizasyonu [Doktora Tezi], Gaziantep Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Tarih Bölümü, Gaziantep.
- Yükçü, S. and G. Atağan (2011). Ortadoğu’da zaman tüneline ticaret. *Accounting and Financial History Research Journal* 1(1), 86-109.

İNŞAAT ve GAYRİMENKUL SEKTÖRLERİNİN YALITIM ve ENERJİ TÜKETİMİ YÖNÜNDEN ANALİZİ VE DEĞERLENDİRMESİ

Arif Hikmet ÇAKOĞLU¹

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun 1950’lerde 3 milyardan günümüzde 8 milyarı aşması ve arazi miktarının sabit olması nedeniyle kıt olan kaynakların daha verimli kullanımı önem kazanmıştır. Dünya genelinde yaşanan küresel ısınmanın etkisiyle ülkeler, fosil yakıttan uzaklaşıp yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaya başlamışlardır. Bunun yanı sıra artan nüfusun neden olduğu konut ve sanayi yapılarında enerji tüketimini düşürmek de sorunun çözümüne yönelik bir başka tedbir olarak da söylenebilir. Ülkemizde fosil yakıt üretimi çok yetersiz olduğundan dışa bağımlı durumdayız. Son dönemlerde Batı Karadeniz Bölgesinde doğal gaz ve güneydoğu illerimizde petrol bulunmuş ise de tüm ihtiyacımıza göre oldukça yetersiz kaldığından ithal edilmekte dolayısıyla cari açığın yükselmesine neden olmaktadır. Yine, Mersin Akkuyu’da nükleer enerji santrali hizmete açıldığında enerji ihtiyacımızın ancak %5’i karşılanabilecektir.

Türkiye’de tüketilen enerjinin, 2021 yılı sonu itibariyle %31 kadarı konutlarda ve hemen biraz fazlası (%33,8) sanayi ve hizmet alanlarında kullanılmaktadır (ÇŞB, 2022). Enerji tüketimini bir yandan temiz, yenilenebilir kaynaklardan temin etmenin yanı sıra diğer taraftan da yalıtımlı yapı malzemeleri kullanılarak da tasarruf edilebilir. Bu nedenle, başta Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı olmak üzere kanun, yönetmelik ve yönergeler ile bu amaca yönelik teşvik edici

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Sinop Üniversitesi, Boyabat İİBF, Gayrimenkul Geliştirme ve Yönetimi, acakoglu@sinop.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8055-7858.

düzenlemeler yapılmıştır. Enerji Performansına bağlı olarak binalar için düzenlenen Enerji Kimlik Belgeleri (EKB) zorunlu hale getirilirken, mevcut yapılar için de süre verilmesine rağmen maalesef yapı maliklerinde tercih düşük oranda kalmıştır. Bunun yanı sıra, küresel iklim değişikliğinin artarak hissedilmesi ve yakıt masraflarını düşürmek isteyen bilinçli yapı sahiplerince dış cephelerde ısı yalıtımı yapılması konusunda artış da gözlemlenmektedir. Isı yalıtımının yapılması ile aynı zamanda;

Doğal kaynak kullanımı düşmektedir. Çevreye salınan zehirli atık azalmaktadır. Ekonomik anlamda getirisi artmaktadır. İç ortamlarda yaşam konforu olumlu yönde değişmektedir. Yapılarda dış kaynaklı ısı etkilere ortak davranım artmaktadır. Yangına karşı yalıtım ve ses izolasyonu da elde edilmektedir (D.Alessandro F. vd, 2016).

Gayrimenkul kelimesi sadece bina olmayıp taşınmaz olan tarla, bağ, bahçe, arsa vb. alanları da kapsamaktadır. Özellikle, pandemi sonrası arsa ve bahçe gibi gayrimenkullere rağbet artmıştır. Keza, ülkemizde gerçekleşen büyük depremler sonrası da apartman yerine müstakil evlere yönelim olmuştur. Müstakil evlerde yaşamak isteyenler ekonomik durumlarına göre arsa ya da tarla, bahçe almayı tercih etmektedirler ki, bu taşınmazların da er ya da geç bina yapım gereksinimi nedeniyle inşaat sektörüne de katkı yapacağı dolayısıyla her binanın enerji tüketimi de dikkate alındığında yalıtımlı yapı malzemelerin tercih edilmesi önem kazanmaktadır. Türkiye’de son 10 yılda inşaat sektöründe inişli-çıkışlı görünüm olsa da genel anlamda gayrimenkul sektörü büyümeye devam etmektedir. Enerji konusunda doğalgaz, petrol ve türevleri gibi fosil yakıtlardaki dışa bağımlılık, ithalat rakamları içerisinde önemli bileşen olarak yer almaktadır. Taşınmaz, bina ve enerji tüketimleri birbirleriyle orantılı olmakla birlikte, gerek bireysel tüketim giderlerinin düşürülmesi gerekse ülkenin enerji ithalatının düşürülmesi ve küresel ısınma tehdidine

karşı tedbir alınması bakımından doğru yatırımın doğru yalıtım ile desteklenmesi gerekliliği önem kazanmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Ülkemiz gelişmekte olması nedeniyle her geçen yıl enerjiye olan ihtiyacı artmaktadır. Ortalama olarak %74 oranında dışa bağımlı olduğumuz söylenebilir. Bu oran yıldan yıla farklılık göstermekle birlikte ekonomik açıdan da cari açığın içerisinde önemli bir yer teşkil etmektedir. Dışişleri Bakanlığı tarafından da Türkiye'nin enerji stratejisinin çok yönlü yapısı ve enerjide dışa bağımlılığı ve bu alanda uluslararası ilişkilerin önemine vurgu yapılmaktadır[5].

Yapılan bir çalışmada ülkemizde bulunan 2000 yılı ve öncesinde yapılmış 7,5 milyon binada yalıtım yapılması halinde enerji sınıfının F'den C'ye çıkarılması halinde %40, enerji sınıfını B'ye çıkarılması halinde ise %60 enerji tasarrufu sağlanacağı ve bunun ekonomik olarak karşılığının yıllık 2,25 milyar dolar olacağı hesaplanmıştır (İzoder, 2017)

Doğu Anadolu Bölgesi için yapılan bir çalışmada 10 cm kalınlığında ısı yalıtımı yapılması halinde %53 oranında enerji tasarrufu sağlanacağı belirlenmiştir (Çomaklı K. ve Yüksel B., 2004).

Enerji harcamalarını düşüren yapı malzemesi seçimi ve bilinçli tüketim ile ülkemizin ekonomik açıdan dışa bağımlılığını azaltabileceğimiz gibi aynı zamanda artan nüfus ve tüketim nedeniyle küresel iklim değişikliğine karşı hedeflenen sınırların altında kalmak için tedbir alınmış olacaktır.

Binaların ilk yapım aşamalarında yalıtımın yanı sıra deprem performansına olumlu katkısı yönünden hafif olması da amaçlandığı takdirde hafif ve ısı yalıtım özelliğine sahip yapı malzemelerinin tercih edilmesi önem kazanmaktadır.

Dış cephe yalıtımı yapılırken klasik tuğla ile örülen dış duvarların yüzeyine daha çok polistren köpük levha (EPS), ekstrüde polistren köpük levha (XPS) yalıtım levhaları kullanılmakta ya da alüminyum kompozit kaplamaların arasına taş yünü tercih edilmektedir. Isı yalıtım levhalarının kalınlığı arttıkça ısı direnç bir başka deyişle ısı yalıtım özelliği artar ve tüketilen enerji miktarı düşer. Isı yalıtım levhalarının en çok aranan özelliği ısı iletkenlik katsayısının (λ) düşük olmasıdır. Isı iletkenlik katsayısı, bir malzemenin, 1 m²'lik iki yüzeyi arasından sıcaklık farkının 1°C'lik değişiminde birim zamanda geçen ısı miktarıdır ve birimi W/MK'dir. Bu katsayı ne kadar düşük olursa o kadar yalıtım özelliği iyi düzeydedir. ISO ve CEN Standardına göre ısı iletim katsayısı 0,065 W/MK değerinden küçük olan malzemeler ısı yalıtım malzemesi olarak tanımlanır ve ısı yalıtım malzemelerinin seçiminde en belirleyici özelliktir (İzoder, 2023). Diğer önemli özellikleri arasında yangın dayanımı, birim hacim ağırlığının düşük olması ve su emme oranları da söylenebilir. Yalıtım levhasının kalınlığı arttıkça ısı direnç (R) artar ve yapı elemanının ısı geçiş katsayısı (U) azalır ve bu da harcanan enerji de önemli miktarda tasarrufa neden olur.

Binaların kullanım amacına ve yapısal özelliklerine göre yalıtım malzemesi tercihi yapılmalı, kanun ve yönetmeliklerin izin verdiği ölçüde ısı, ses, yangına duyarlılığı, yatay yüklere karşı dayanımı, malzemenin kullanım ömrü ile yapını kalan servis ömrü de dikkate alınmalıdır (Arıoğlu, 1993). Ülkemizde TS 825 ile yalıtım konusunda malzeme özellikleri ve yapım kuralları standart halinde açıklanmıştır.

Gayrimenkul ve inşaat sektörleri birbiriyle yakın ilgili olmasından dolayı isim olarak birlikte söylene bile, gayrimenkulün kapsama alanı sadece bina olmadığından taşınmaz olan tarla, arazi, arsa, bağ, bahçe vb. çeşitlilikleri de ihtiva eder. Bu nedenle bu iki sektördeki gelişmeler her zaman birbirine paralel olmayabilir.

Bir gayrimenkulün değerini etkileyen ana unsurlar: yasal kriterlere uyumlu olması, bulunduğu lokasyon ve fiziksel unsurlar olarak bilinmektedir. Fiziksel unsurlar denince, binanın yaşı, bulunduğu kat, otopark, yalıtımlı olup olmaması gibi başlıca etkenler sayılabilir. Yalıtımlı konut ya da binalar artık konfor artırıcı özellikler arasında ön sıralarda yer almaktadır. Gerek enerji masraflarının düşürülmesi gerekse küresel iklim değişikliğine karşı tedbirler arasında yer alması tercih nedeni olmalarını sağlamıştır. Mevcut binalarda yapılan dış cephe yalıtımına yapılan masrafın 4-5 yılda geri döndüğü yani kendini amorti ettiği görüldüğünden bilinçli insanların binaları için ısı yalıtıma yönelmesi her geçen yıl artmaktadır.

2.1. Yalıtımlı Yapılar Üzerine Yasal Düzenlemeler

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından İmar Kanunu, Kat Mülkiyeti Kanunu, Çevre Kanunu, Yapı Denetim Kanunu, Enerji Verimliliği Kanunu ve yönetmelikleri ile, olası afetlere ve küresel iklim değişikliği ile ilgili düzenlemeler yapılarak sürdürülebilir ve konforlu yaşam alanları oluşturulması amaçlanmaktadır.

634 s. Kat Mülkiyeti Kanunu'na göre ortak mahallerde yeni yapılacak inşaat vb. ilaveler için oy birliği ile karar almak gerekirken, 2005 yılında yapılan düzenlemenin 42. maddesine göre “faydalı yenilik ve ilaveler” olarak nitelendirilebilecek onarım, ısı ve su yalıtımı gibi işler için ise oy çokluğu ile karar alınması gerekmektedir (KMK, 1965). Oy çokluğu ifadesi, apartman/bina genel kuruluna katılanların bağımsız bölüm ve arsa payı oranlarının yarısından bir fazlası olarak nitelendirilmektedir ki bazen toplantılara katılımın yetersiz sayı nedeniyle karar alınması da güçleşmektedir. Halbuki binalara ısı yalıtımının konfor artırıcı özelliğinin yanı sıra ekonomik açıdan geri dönüşü ortalama 5 yıl olan ve küresel iklim değişikliğine karşı da alınabilecek tedbirlerden biri olması nedeniyle, söz

konusu Kat Mülkiyeti Kanunu'nda yer alan “oy çokluğu” ibaresi birey-ülke menfaatleri düşünülerek gözden geçirilmelidir.

Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar (nSEB) kavramı, yıl boyunca tüketeceği enerjinin büyük çoğunluğunu kendisi üreten ve bunu da yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılayan binalar olarak tanımlanmaktadır. Ülkemizde de gerek ekonomik gerekse küresel ısınma etkilerine karşı yapılaşma alanında bu konuyla ilgili yeni düzenlemeler getirilmektedir. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığınca yayınlanan yönetmelik (BEP, 2022) ile, 1 Ocak 2025'e kadar aynı parselde kapalı alanı 5000 m² ve üzeri olan binaların nSEB olarak inşa edilmeleri, enerji performans sınıfının en az B olmaları ve binanın birincil enerji ihtiyacının en az %5'inin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması istenmiştir. Bu kriterler, 1 Ocak 2025 sonrası kapalı alanı 2000 m²'ye ve birincil enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması oranı ise %10 olarak güncellenecektir.

2.2. Enerji Performansı - Yapı Yalıtımı İlişkisi

Enerji Kimlik Belgesi (EKB) düzenlenmesi 1 Ocak 2011'den itibaren yapı kullanma izni düzenlenen tüm binalarda alınmakla birlikte mevcut binalar için de EKB alınması zorunluluğu getirilmiş ve 2 Mayıs 2017'den itibaren bu belgeye sahip olmayan binalar için alım, satım, devir işlemleri yapılmayacağı yönünde yönetmelik yayınlanmış olsa da yürürlüğe girmeden uygulanması ertelenmiştir (Enerji Verimliliği Kanunu, 2007).

Bankacılık Düzenleme ve Denetleme Kurulu (BDDK), enerji verimliliği konusuna destek olmak amacıyla daha önce 2006 yılında çıkardığı Bankaların Kredi İşlemlerine Yönelik Yönetmelikte, "Tüketicilere, konut edinmeleri amacıyla kullanılacak kredilerde ve taşıt kredileri hariç konut teminatlı kredilerde kredi tutarının teminat olarak alınan konutun değerine

oranı %80 aşamaz." İfadesini, 25.01.2019 tarihli Resmi Gazete’de yayınlanan yönetmelik ile bu oranı “..enerji performansı A olan binalar için %90, enerji performansı B olan binalar için %85’i aşamaz.” şeklinde güncellemiştir (BDDK, 2019).

Binalarda dış cephe yalıtımı olarak en fazla XPS, EPS, Taş yünü kullanılmakta ise de bunlardan XPS ve EPS’nin yangına karşı hassasiyetinin düşük olması menfi yönleri olsa da ekonomik olması nedeniyle tercih edilmektedir. Oysa, yapıların ömrü boyunca karşılaşılabileceği olumsuzluklar da dikkate alınarak yalıtım malzemelerinin kalınlıklarının da; inşa edildiği yerleşim yerine ve TS 825’de belirtilen kriterlere göre belirlenerek A sınıfı malzemeler tercih edilmelidir (Şimşek Z., 2019)

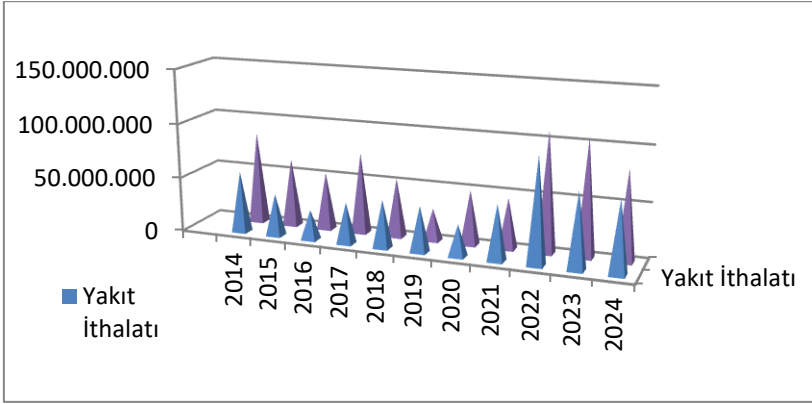
2.3. Yakıt İthalatı-Cari Açık İlişkisi

Ülkemizin enerji konusunda dışa bağımlılığını ve ithalat/ihracat oranındaki olumsuz görünümüne katkısını gösteren veriler aşağıdaki Tablo 1 ve Şekil 1’ de verilmiştir.

Tablo 1. Ülkemizin Yakıt İthalatı ve Cari Açık Rakamları (1000 Dolar, kaynak:

<i>Yıllar</i>	<i>Yakıt İthalatı</i> <i>Cari Açık</i>		<i>İhracat/</i> <i>İthalat(%)</i>	<i>Yakıt İthalatı/</i> <i>Cari Açık</i>
2014	56.175.583	84.637.567	66,30	0,6637
2015	38.651.587	62.637.098	70,70	0,6171
2016	27.464.819	52.942.243	73,80	0,5188
2017	37.654.929	74.220.509	68,90	0,5073
2018	43.613.270	53.983.726	76,60	0,8079
2019	41.731.207	29.512.481	86,00	1,4140
2020	28.925.037	49.879.052	77,30	0,5799
2021	50.691.986	46.211.095	83,00	1,0970
2022	96.548.874	109.540.827	69,90	0,8814
2023	69.113.809	106.228.264	70,60	0,6506
2024	65.589.736	82.232.142	76,00	0,7936

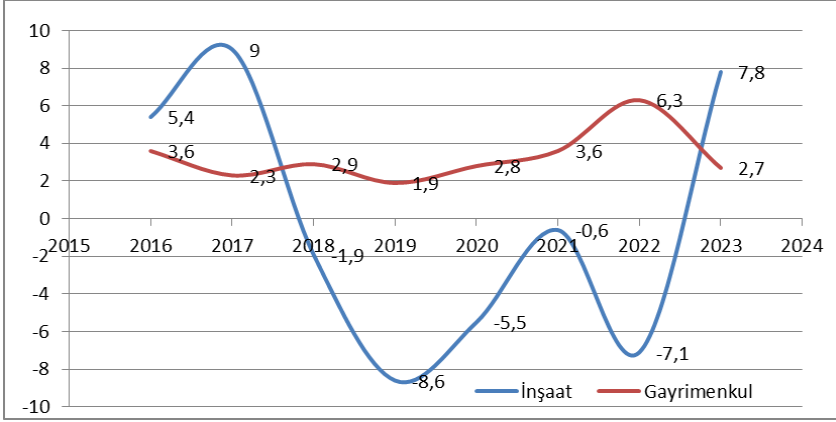
Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, enerji için ödenen rakamların büyüklüğü cari açığa önemli bir yer teşkil etmektedir. Bu menfi görünümde haliyle ülke ekonomisine olumsuz yönde tesir etmektedir. Isınma amaçlı kullanılan doğalgazın kış şartlarına bağlı olarak tüketim miktarlarının değişken olabilmesi farklı meteorolojik koşullara bağlı olduğu da düşünülmelidir.



Şekil 1. Ülkemizde Son 11 Yılda Yakıt İthalatı ve Cari Açık Arasındaki ilişki (TÜİK)

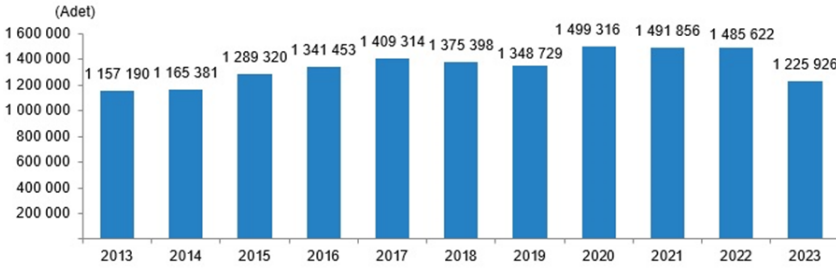
2.4. Gayrimenkul ve İnşaat Sektöründeki Görünüm

Birbiriyle yakın ilgili olan gayrimenkul ve inşaat sektörlerinde, ekonomik, bölgesel siyasi gelişmeler ve doğal afetlere bağlı olarak değişimler olabilmektedir. Nitekim 2016-2023 yılları arasındaki bu iki sektöre ait büyüme oranları Şekil 2’ de gösterilmiştir. Söz konusu sekiz yılda inşaat sektörü sadece iki yıl (2017 ve 2023) büyürken diğer yıllarda küçülme görülmüştür. Gayrimenkul alanında ise bu sekiz yıllık süre içinde sürekli pozitif yönde büyüme olmuştur. Bu arada, gayrimenkul olarak bina dışı taşınmazlara yapılan yatırımların gelecek dönemlerde bina inşaatına da katkı sağlayacağı bilinen bir gerçektir.



Şekil 2. Gayrimenkul ve İnşaat Sektörlerinde (%) Olarak Büyüme Oranları (TÜİK)

Gayrimenkul alanındaki gelişmeler inşaat sektörünü doğrudan etkilemektedir. Türkiye’de gayrimenkul sektöründeki faaliyetlerde özellikle ilk aşama olarak nitelendirilen gayrimenkul proje geliştirme sürecinin ardından inşaat faaliyetleri devreye girmektedir. İnşaatın ve projenin bitirilmesi aşamasında veya sonrasında satış, kiralama, yönetim ve bakım hizmetleri süreci yer almaktadır.



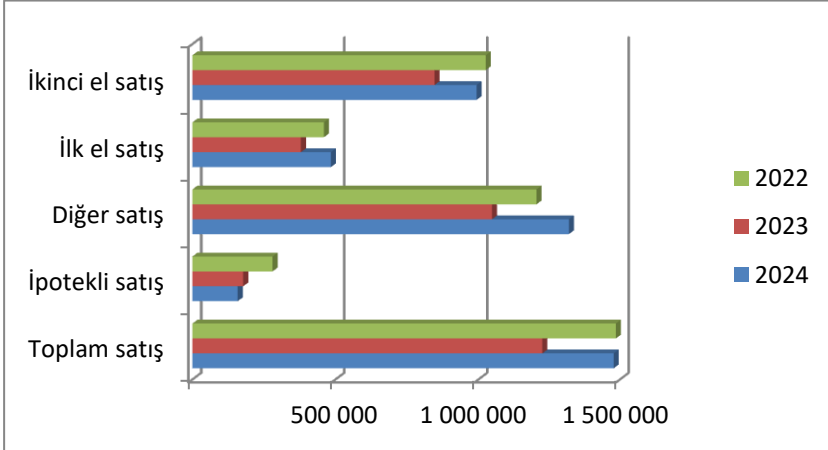
Şekil 3. Türkiye’de Yıllara Göre Toplam Konut Satışları

Yukarıdaki Şekil 3’ den de görüleceği üzere Türkiye’de konut satışları her yıl 1 milyonun üzerinde olmakla birlikte, 2020’de yaklaşık 1,5 milyon olan satış, 2023 sonu itibarıyla %17,50 oranında düşüş göstermiştir.

Tablo 2. Konut Satış Durumu ve Şekline Göre Son 3 Yıla Ait Veriler

	2024	2023	2022	Değişim (%)
Toplam satış	1478 025	1225926	1485622	-17,50
İpotekli satış	158 486	177748	280320	-36,60
Diğer satış	1319 539	1048178	1205302	-13,00
İlk el satış	484 461	379542	460079	-17,50
İkinci el satış	993 564	846384	1025543	-17,50

Geçtiğimiz 2023 yılına ait konut satışlarındaki azalmalar satış durumu ve satış şekline göre Tablo 2 ve Şekil 4’ de gösterilmiştir. Özellikle ipotekli satış şeklindeki düşüşte, ekonomideki görünümün yanında 6 Şubat 2023 tarihli K. Maraş merkezli depremlerin de önemli etken olduğu söylenebilir. Büyük depremler sonrasında alıcılar arasında yapı güvenliği öncelikli düşünülerek ipotekli ve ikinci el satışlarını menfi yönde etkilediği düşünülmektedir.

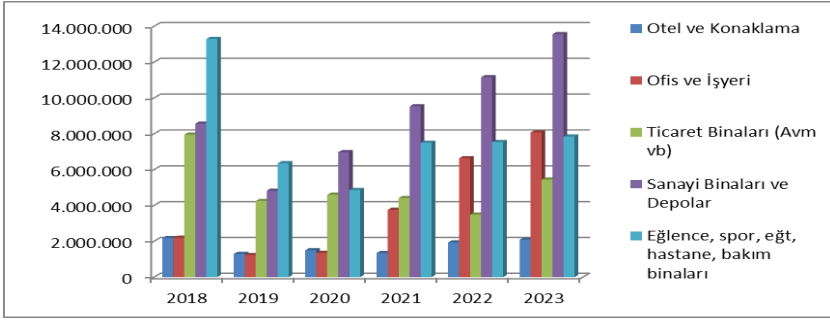


Şekil 4. 2022, 2023 ve 2024 Yıllarına Ait İlk ve İkinci El Toplam Konut Satışları

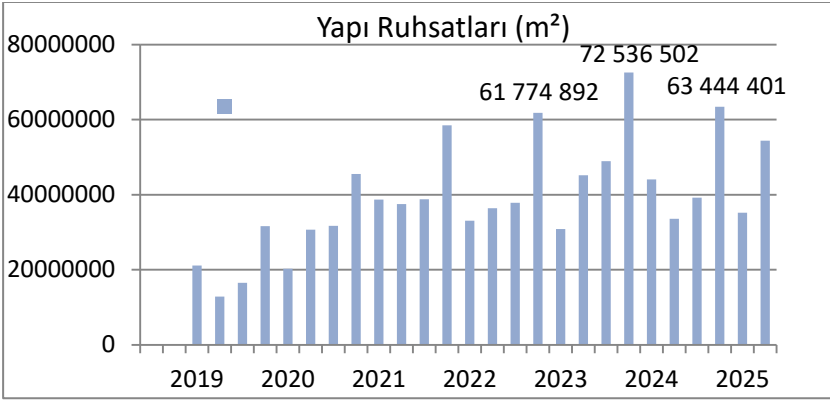
Tablo 3. Konut Dışı Binalar İçin Alınan Yapı Ruhsatları (TÜİK)

	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Otel ve Konaklama	2.179.505	1.296.104	1.496.990	1.345.764	1.937.387	2.090.829
Ofis ve İşyeri	2.193.383	1.233.303	1.351.106	3.753.098	6.633.708	8.072.791
Ticaret Binaları (Avm vb)	7.954.979	4.250.369	4.595.528	4.415.058	3.488.900	5.443.898
Sanayi Binaları ve Depolar	8.565.120	4.823.856	6.970.108	9.528.906	11.158.971	13.564.535
Eğlence, spor, eğt, hastane, bakım binaları	13.285.942	6.356.330	4.858.693	7.498.594	7.531.877	7.846.167

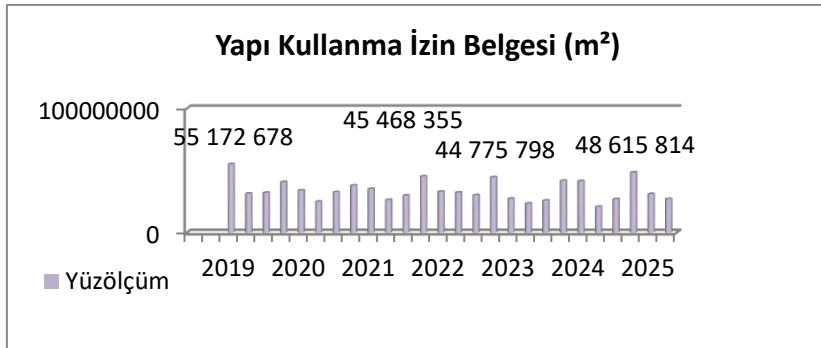
Yapı ruhsatları, ilgili yerel idareye projeler ile müracaat edilmesi üzerine belediye tarafından düzenlenen ve 5 yıl geçerliliği olan belgedir. Bu süre içerisinde yapının tamamlanmaması üzerine ilave süre verilebilir (İK, 1985). Gayrimenkul alanında konut dışındaki yapıların inşa aşaması için gerekli olan ilk belge yapı ruhsatları sayıları incelendiğinde Tablo 3 ve Şekil 5’den de görüldüğü gibi 2018 yılında kapalı kullanım alanı (m²) olarak en fazla eğlence, spor, hastane, bakım binaları yer alırken o yıldan sonra neredeyse yarı yarıya düşüş gözlenmiştir. Otel ve konaklama binaları için alınan yapı ruhsatlarının toplam alanları fazla değişiklik göstermezken, sanayi binaları ve depolar alanında önemli miktarda artış gözlemlenmiştir. Konut dışı yapılar için sektörel gelişimin yıldan yıla farklılık göstermesi arz-talep ilişkisinin yanı sıra dönemsel ekonomik ve siyasi gelişmelere de bağlıdır.



Şekil 5 . Konut Dışı binalar için alınan yapı ruhsatları



Şekil 6. Toplam verilen yapı ruhsatlarının yüzölçümü

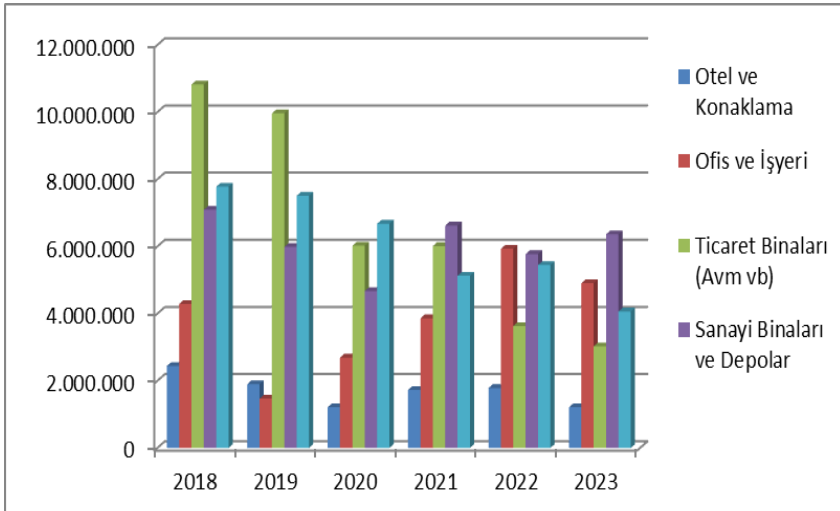


Şekil 7. Toplam verilen yapı kullanma izin belgeleri

Şekil 6 ve 7’de ülkemizde verilen toplam yapı ruhsatları ve yapı kullanma izin belgeleri kapalı kullanım alanlarının yüzölçümü (m²) olarak gösterilmiştir (TÜİK, 2025).

Tablo 4. Konut Dışı Binalar İçin Alınan Yapı Kullanım İzin Belgeleri (TÜİK)

	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Otel ve Konaklama	2.436.087	1.897.896	1.208.080	1.725.720	1.782.555	1.209.390
Ofis ve İşyeri	4.286.035	1.464.709	2.688.058	3.859.617	5.926.802	4.904.453
Ticaret Binaları (Avm vb)	10.823.045	9.960.055	6.019.413	6.008.918	3.628.646	3.024.849
Sanayi Binaları ve Depolar	7.088.880	5.983.754	4.670.276	6.621.441	5.771.082	6.356.832
Eğlence, spor, eğt, hastane, bakım binaları	7.777.947	7.506.966	6.675.073	5.123.014	5.443.235	4.060.190



Şekil 8. Konut dışı binalar için alınan yapı kullanım izin belgeleri

Yapı kullanma izin belgeleri ise inşaatın tamamlanmasını müteakip alındığından, yapıların kullanıma açılarak hizmet vermeye başlaması bitim zamanındaki ekonomik, bölgesel siyasi gelişmelere ve elbette doğal afetlere de bağlıdır. Konut dışı binalar için yapı kullanma izin belgelerindeki toplam alanların (m²) büyüklükleri Tablo 4 ve Şekil 8 incelendiğinde 2018 yılındaki alışveriş merkezleri gibi hizmete açılan ticari binaların toplam büyüklüğü, 2023 yılında neredeyse %30'una kadar düşüş göstermiştir. 2018-2023 yılları arasında otel ve konaklama tesislerinin kullanıma açılan toplam büyüklüğünde yarı yarıya, eğlence, spor, eğitim hastane, bakım merkezleri alanlarında ise %40 civarında azalma görülmüştür.

Bu değerlendirmede konut ya da konut dışı yapılar olsun, yapı ruhsat süreleri 5 yıl da olsa yapının inşa edilen alan büyüklüğü, ekonomik gerekçeler gibi başlıca etkenlerden dolayı kullanım izni alınıncaya kadar geçen süre kısa ya da daha uzun olabilir. İhtiyacın fazla olması ve yapının kapalı alan büyüklüğü maddi kaynak sorunu yoksa ya da çözülebilir boyutta ise bu sürenin kısılmasına sebep olabilir.

İster konut, ister konut dışı yapılar olsun inşaat sektörü ekonominin lokomotif olması yanı sıra, ekonomiye başka bir katkısının da doğru malzeme tercihleriyle enerji tüketimini düşürerek bu konudaki dışa bağımlılığın azaltılmasına da katkı sağlamalıdır. Bu amaçla, inşa edilecek yapılarda kullanılacak malzeme tercihlerinde ilgili teknik elemanların da önem vermeleri gerekmekte ve hatta belediyeler de bu konuda müdahil olarak yönlendirme yapmaları kamu yararına olacaktır.

3. SONUÇLAR

- 1- İkinci el konut ya da bina satışlarının öncesi ya da sonrasında ısı yalıtımı yapılması zorunluluğu getirilmesi ve bunun için de gerekirse alıcı ya da satıcıya düşük faizle kredi verilerek teşvik edilmesi enerji giderlerinin düşürülmesinde katkı sağlayacaktır. Isı yalıtım malzemesi tercihinde karbon salınımı düşük olanların tercih edilmesi yönünde yasal düzenleme yapılmalıdır.
- 2- Özellikle binaların yapım aşamasında hafif ve yalıtımlı malzeme tercih edilmesi, gerek enerji harcamalarının azaltılması gerekse binaların hafiflemesi nedeniyle deprem performansını artıracığından özendirilmelidir.
- 3- Gayrimenkul alanı daha kapsamlı olmakla birlikte inşaat sektörü ile de yakın ilişkilidir. İnşaat sektöründeki durgunluk ya da düşüş gözlenen dönemlerde bile pozitif görünüm vermiştir. Bu nedenle, sadece merkezi yönetim değil yerel yönetimler tarafından da gayrimenkul alanındaki geleceğe yönelik planlamalarının doğru yönde olması hem inşaat alanında hem de kullanılacak yapı malzemeleri tercihi ile küresel ısınmaya karşı tedbirli olunması yönünde adım atılmalıdır. Bu amaçla, yerel yönetimler yapılacak bina inşaatlarında kullanılacak malzeme tercihlerine müdahil olmalıdır.
- 4- Mevcut binalara ısı yalıtımı yapılabilmesi için; Kat Mülkiyeti Kanunu'nda yer alan ifadeye göre oy çokluğu alınması yerine tıpkı deprem dayanım performansı düşük olan binalarda olduğu gibi tek bir hissedarın ya da 1/5 gibi düşük oranda kat malikinin alabileceği kararın yeterli olması şeklinde düzenleme yapılmalıdır. Isı yalıtımının, enerji giderlerinde büyük oranda dışa bağımlı olmamız nedeniyle kamu

yararı olarak değerlendirilmesi ülke menfaatine olacaktır.

KAYNAKLAR

- Arıoğlu, N. (1993). Yapı Ürünlerinin Seçimi İçin Bir Yöntem [Doktora Tezi], Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- BDDK. (2019). Bankaların Kredi İşlemlerine İlişkin Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, *Resmi Gazete*, 25.01.2019, Sayı:30666
- Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği, (2022). 19.02.2022 Sayı :31755.
- Çomaklı, K. ve Yüksel, B., (2004). Environmental Impact of Thermal Insulation Thickness in Buildings. *Applied Thermal Engineering*. 24:933–940.
- ÇŞB. (2024). Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/sektorelere-gore-nihai-enerji-tuketimi>, [11.10.2024]
- D'Alessandro, F., Schiavoni, S., Bianchi, F. & Asdrubali, F., (2016). Materials for The Building Sector: A Review and Comparative Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 6298.
- Enerji Verimliliği Kanunu. (2007). *Resmi Gazete*, 18 Nisan 2007, Sayı:26510TÜİK. (2024).
- İmar Kanunu. (1985). *Resmi Gazete*, 9 Mayıs 1985, Sayı: 18749
- İMSAD. (2024). Türkiye Yapı Sektörü Raporu 2023, Ağustos 2024 İstanbul-Türkiye
- İzoder. (2017). <https://www.izoder.org.tr/dergiler/izoder-123.pdf> Ocak/Şubat 2017.
- İzoder. (2023). <https://www.izoder.org.tr/dergiler/izoder-160-e-dergi/> Mart/Nisan 2023.

Kat Mülkiyeti Kanunu. (1965). *Resmi Gazete*, 2 Temmuz 1965, Sayı: 12038

Şimşek Z. (2019). Konut Yapılarında Kullanılan Isı Yalıtım Malzemelerinin Kullanılması. *Technological Applied Sciences*, ISSN: 1308-7223 (NWSATAS)

T.C. Dışişleri Bakanlığı. https://www.mfa.gov.tr/turkiye_nin-enerji-stratejisi.tr.mfa

TSE 825. (2013). Türk Standartları Enstitüsü. Binalarda Isı Yalıtım Kuralları.

Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/> [09.08.2025].

DAYANMA YAPILARINDA GEOTEKNİK TASARIM, DAYANIKLILIK VE SÜRDÜRÜLEBİLİR MALZEME ENTEGRASYONU

Onur YAVAN¹

Saadet Gökçe GÖK²

1. GİRİŞ

Dayanma yapıları (istinat duvarları), özellikle ulaşım amaçlı yapılan köprüler ve köprü ayakları ile bunlar için gerekli derin kazıların stabilizasyonunda kritik rol oynayan, sivil altyapının çok önemli bir parçası olan yapılardır (Samtani & Nowatzki, 2006; Yavan, 2015; Das & Sivakugan, 2018). Dayanma yapılarının gerektirdiği temel mühendislik özellikleri, zemin kütlelerinin yatay deplasmanını önlemeyi ve zeminler arası kot farkını koruyarak şev stabilitesini sağlamayı amaçlamaktadır (Lemnitzer & Tavarez, 2022; Nowak, 2023; Roy, 2024; Amritha & Chithra, 2025). Bu yapıların şev stabilitesini sağlayabilmeleri ve güvenli bir şekilde inşa edilebilmeleri için literatürde tasarım parametreleri verilmiştir (Morris & Delphia, 1999; Samtani & Nowatzki, 2006; Das, & Sivakugan, 2018; Sari vd., 2020; Lemnitzer & Tavarez, 2022; Brown vd., 2023; Nowak, 2023). Dayanma yapılarının tasarım kriterleri; kaymaya karşı, devrilmeye karşı ve taşıma kapasitesi yetersizliğine karşı olan genel stabilite durumlarıdır. Dayanma yapılarının taşıdıkları yükleri güvenli bir şekilde taşıyabilmesi

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, oyavan@klu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9615-253X.

² Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, saadet.gokce.gok@klu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7879-1610.

için, tasarım aşamasında belirlenen minimum Güvenlik Faktörü (F.S.) değerlerini sağlamaları gerekmektedir (Das, & Sivakugan, 2018). Günümüzde dayanma yapılarının tasarımları, genellikle kullanılan “ağırlıklı istinat duvarı”, “konsol istinat duvarı” ve “payandalı istinat duvarı” gibi klasik çözümlerden, “mekanik olarak stabilize edilmiş (MSE) duvarlar” gibi daha esnek ve modern çözümlere kadar önemli ölçüde çeşitlilik göstermektedir (Muteb & Falah, 2021; Lemnitzer & Tavarez, 2022; Falah & Muteb, 2024).

Geoteknik ve malzeme mühendisliğinde bu dayanma yapılarının uzun vadeli performansı ve sürdürülebilirliği üzerine çalışmalar yapılmaktadır (Liu vd., 2022; Speranza vd., 2022; Moncada vd., 2024). MSE duvarlarının uzun ömürlülüğünü, durabilitesini ve güvenilirliğini belirleyen temel konu, inşa sırasında kullanılan yapı elemanlarının dayanıklılığıdır (Gladstone vd., 2006; Bathurst, 2020; Momani vd., 2021; Lee & Basu, 2025). MSE duvarlarda dolgu malzemesinin özellikleri (pH, elektriksel iletkenlik vb.) bozulma sürecinde önemli bir rol oynar ve metalik malzemelerin korozyonuna veya geotekstil malzemelerin kimyasal bozulmasına neden olabilir (Abbaspour & Tanyu, 2019; Du vd., 2024). Özellikle, pH, elektriksel direnç ve agresif iyonların (örneğin klorürler ve sülfatlar) konsantrasyonu gibi dolgu malzemesi parametreleri, galvanizli çeliğin cidar kalınlığını ve uzun vadede davranışını belirlemede çok önemlidir (Aydin & Topuz, 2016; Hu vd., 2017; Chowdhury & Aisyah, 2018). Kötü karakterize edilmiş dolgu malzemesi, korozyonu önemli ölçüde hızlandırabilir ve potansiyel olarak yapıda erken stabilite bozulmalarına neden olabilir.

Dayanma yapılarının yapıldığı bölge ve ortam şartları da yapı stabilitesini olumsuz etkileyebilir. Nemli ve soğuk hava koşullarının dayanma yapıları veya dayanma yapıları ile birlikte kullanılan yapı elemanlarının bütünlüğü üzerindeki etkisi de

önemlidir. Özellikle, kullanılan malzemelerin donma-çözülme etkisine karşı direncinin düşük olması ve betonun çeşitli kimyasal etkilere karşı dayanıklılığının az olması, önemli durabilite sorunlarına neden olur (Chong vd., 2014; Gu vd., 2016; Kilic & Gok, 2021a; Kılıc & Gok, 2021b, Orcesi vd., 2022; Hancock, 2024).

Sürdürülebilirlik bakımından, birçok inşaat uygulamasında fazlaca kullanılan doğal kırmataşlar yerine, inşaat yıkıntı atıklarından elde edilen geri dönüşüm beton agregaları gibi malzemelerin kullanılabilirliği araştırılmaktadır (Manjunath & Prakash, 2015; Kılıç & Gök, 2021a; Gök vd., 2021; Riyana, 2023; Yavan & Bozbey, 2023). Bu araştırmalar, İnşaat ve Yıkım Atıkları (CDW) malzemelerinin, inşaat uygulamalarında alternatif malzeme olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bu atıkların tekrar kullanımı; doğal kaynakların endüstriyel faaliyetlerle tükenişi, yüksek bertaraf maliyetleri ve çöp sahalarının aşırı kullanımı gibi ekonomik, endüstriyel ve çevresel problemlerle mücadelede temel bir rol oynar. Ancak en önemlisi, bu uygulama sürdürülebilirlik açısından zorunlu ve gereklidir.

Bu çalışma, dayanma yapılarının analizi, tasarımı ve dayanıklılığı üzerine güncel araştırmaları sunmakta, imalatta kullanılan yapı malzemelerinin yapının durabilitesi üzerindeki etkisi ile sürdürülebilirlik için yeni dolgu malzemelerinin önemini açıklamaktadır.

2. DAYANMA YAPILARININ SINIFLANDIRILMASI ve GEOTEKNİK UYGULAMALARI

2.1. Tanım

Dayanma yapıları, zemin yüksekliğindeki değişiklikten dolayı oluşan şevler nedeniyle, zeminlerin yanal basıncını tutabilmesi için tasarlanmış geoteknik uygulamalardır (Diwalkar, 2020). Bunlar, zeminlerin oluşturduğu yanal zemin basınçlarını tutarak deplasmanları önleyen ve zemin kaymalarına karşı duran destek yapılarıdır (Yu, 2023; Roy, 2024). Söz konusu iksa ve destekleme yapılarının temel uygulama alanları; karayolu ve demiryolu projeleri, köprü inşaatları ve yoğun kentleşmenin olduğu bölgelerde kazı ile şevlerin stabilitesinin sağlanmasıdır (Ryan vd., 1990; Das, & Sivakugan, 2018).

2.2. İstinat Duvarı Çeşitleri

İstinat duvarları, yanal stabiliteyi sağlamak amacıyla inşa edilen yapılardır. Bu yapılar, inşa edilecek bölgelere ve zemin özelliklerine göre, farklı kesitlerde ve özelliklerde tasarlanabilirler. Kullanılan yapı malzemesi ve uygulama sistemi bakımından istinat duvarları üçe ayrılır (Özaydın, 2010; Das, & Sivakugan, 2018).

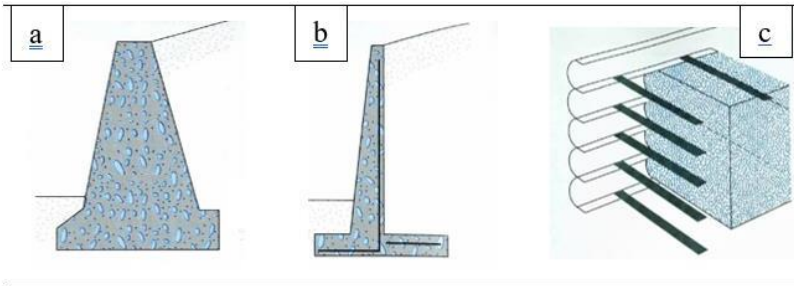
Ağırlıklı İstinat Duvarları: Bu yapılar, duvarın kütlesini kullanarak duvarın arkasındaki zemin basınç kuvvetlerine direnme yoluyla stabilite sağlar. Üretiminde beton, taş, tuğla ve ahşap gibi çeşitli malzemeler kullanılabilir (Zhuang & Chen, 2021).

Konsol İstinat Duvarları: Yaklaşık 6.0 m'ye kadar yükseklikler için yaygın olarak uygulanan tasarımlardır (Day, 1997). Gövde, ayak plakası ve topuk plakasının konsol etkisiyle zemin basıncına direnirler. Bu dayanma yapısının 6.0 m'den fazla yüksekliğe sahip olması gereken durumlarda, destek

elemanları ile istinat yapısına destek verilir ve bu istinat yapısı, payandalı istinat duvarı olarak isimlendirilir (Trenter, 2004; Faldesai & Savoikar, 2020).

Mekanik olarak Stabilize Edilmiş (MSE) Duvarlar: Güçlendirilmiş toprak istinat duvarları olarak da adlandırılan bu sistemler, toprağı stabilize bir kütle haline getirmek için geogrid veya çelik donatı katmanları kullanırlar (Muteb & Falah, 2021). MSE duvar sistemleri, diğer destek sistemlerine kıyasla daha yüksek oturma toleransına sahip olup daha ekonomik bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Muteb & Falah, 2021; Zevgolis & Bourdeau, 2007).

İstinat yapıları genel olarak yukarıda bahsedilen üç başlıkta sınıflandırılabilir. Şekil 1’de ağırlıklı istinat duvarları, konsol istinat duvarları ve MSE duvarları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Dayanma Yapıları: a) Ağırlıklı İstinat Duvarı b) Konsol İstinat Duvarı c) MSE Duvarı (Das, 2011).

3. DAYANMA YAPILARI TASARIM KRİTERLERİ

İstinat duvarlarının tasarımı ve ön boyutlandırma aşaması, yapının güvenliğini sağlamak amacıyla dikkatlice yapılması gereken bir stabilite kontrolü serisi gerektirir; bu kontroller devrilme, kayma, temel taşıma kapasitesi, toptan

göçme ve oturma analizlerini kapsamaktadır. Yapıya etki eden aktif zemin basıncının hesaplanması için, pratikliği ve nispeten daha konservatif sonuçlar vermesi nedeniyle sıklıkla tercih edilen Rankine Teorisi ile Coulomb Teorisi, yaygın olarak kullanılmaktadır (Day, 1997; Das, 2011; Sari vd., 2020).

3.1. Dış Stabilite ve Tasarım Parametreleri

İstinat duvarlarının boyutları ve kesitleri belirlendikten sonra üç ana stabilite kontrolü gerçekleştirilmelidir. Bunlar;

Kaymaya Karşı Stabilite: İstinat duvarının temelindeki harekete karşı yetersiz direnç nedeniyle duvarda meydana gelebilecek yatay yönde kaymanın engellenmesi gereklidir. Yanal zemin basıncı nedeniyle duvarın öne doğru kayma eğilimi hesaplanmalı ve kaymaya karşı minimum 1,5 güvenlik faktörü sağlanmalıdır (Das, 2011).

Devrilmeye Karşı Stabilite: İstinat duvarının kütlesi veya geometrisinden dolayı dayanma yapısı yatay kuvvetleri dengelemek için yetersiz olduğunda, duvarda devrilme eğilimi meydana gelir (Das, 2011).

Devrilmeye karşı Güvenlik Faktörü, direnç momentlerinin devrilme momentlerine oranı olarak belirlenmelidir (Das, 2011). Bu stabilite kontrolünde, tasarıma ve yapının bulunduğu bölgeye bağlı olarak güvenlik faktör değerinin minimum 2,0 olması önerilir (Das, 2011).

Temel Taşıma Gücü Stabilesi: Temel zemininin kayma mukavemeti parametrelerine göre, zeminin taşıma gücü hesaplanır ve zeminin, inşa edilen dayanma yapısından zemine gelen gerilmeleri taşıyıp taşıyamayacağı kontrol edilir. Taşıma kapasitesinin kontrolünde 2,5-3,0 güvenlik faktörü genellikle yeterli kabul edilir (Das, 2011). Temel altında yer altı suyu bulunuyorsa, tasarımda yer altı suyundan kaynaklanan boşluk suyu basınçlarının da dikkate alınması gerekmektedir.

Bu üç stabilite kontrolü yapılan istinat duvarlarının toptan göçme durumu var mı yok mu kontrol edilmelidir. Duvarların zeminin kayma düzlemi içerisinde inşa edilmemesi, şev kayması riskine karşı yapının güvenliği açısından önem arz etmektedir. Bu yapılar, hidrolojik koşullara (yer altı suyu) oldukça duyarlıdır. Dolgu bölgesindeki yetersiz drenaj, istinat duvarının arkasında su birikmesine neden olarak hidrostatik kuvveti artırabilir ve stabiliteyi azaltabilir (Sharma vd., 2024).

Hidrostatik basınca sebep olacak yer altı suyu, temel altı zemininde de ekstra gerilmeler oluşmasına neden olacaktır. Bu ekstra gerilmelerden dolayı, zeminde konsolidasyon oturmaları veya ani oturmalar meydana gelebilir. Bu oturmalardan konsolidasyon oturmaları, zamanla yapıda ekstra gerilmeler oluşmasına neden olabilir ve bu durum da yapı stabilitesinin bozulmasına sebep olur. Buradaki konsolidasyon oturma miktarlarının da dikkatlice hesaplanması ve tasarım aşamasında düşünülmesi gerekmektedir.

3.2. Zemin Parametrelerinin Etkisi

Zemin mekaniğinde bir zeminin mukavemeti, kayma mukavemeti parametrelerinin bilinmesinden geçer. Bu parametreler zeminin içsel sürtünme açısı (ϕ°) ve kohezyon (c) değeridir (Sari vd., 2020). Bu zemin kayma mukavemeti parametreleri kullanılarak zeminin yapıyı taşıyıp taşıyamayacağı hesaplanır. Ayrıca bu parametreler ile inşa edilen yapının güvenlik kontrollerinin hesabında kullanılan önemli değerler olacaktır. Stabilite analizlerinde varsa yer altı suyu da dikkate alınmalıdır. Çünkü yer altı su seviyesinin ve boşluk suyu basıncının artması, gerilmelerin değişmesinden dolayı şevlerin bozulmasına neden olabilir. İstinat yapılarına etki edecek olan suyun uygun drenaj sistemleri ile sistemden uzaklaştırılarak yapıya etki ettirilmemesi, yapının stabilitesi için önemli olacaktır (Sari vd., 2020).

4. DAYANMA YAPILARININ DURABİLİTESİ

Dayanma yapılarının durabilitesi, yapıyı oluşturan malzemeler ile doğrudan ilişkilidir. Ağırlıklı veya konsol istinat duvarlarında kullanılan betonun özelliği, yapı durabilitesinde önemlidir. Aynı şekilde MSE duvarların inşasında kullanılacak olan geosentetik veya galvaniz kaplı donatıların özellikleri de MSE duvarların durabilitesinde önemli olacaktır.

4.1. Betonarme Dayanma Yapılarının Durabilitesi

Betonda tekrarlı donma-çözülme ve ıslanma-kuruma çevrimleri, asit etkisi, sülfat etkisi, gecikmiş etrenjit oluşumu, alkali silika reaksiyonu, don hasarı, buz çözücü tuzların etkisi, çiçeklenme, aşınma, klorür etkisi ya da karbonatlaşma nedeniyle gerçekleşen korozyon hasarı vb. durumlar oluşabilecek durabilite sorunlarından bazılarıdır (Kılıç & Gök, 2021c; Kilic & Gok, 2021d). Betonun geçirimsizliğini azaltacak önlemlerle betonun dayanıklılığı iyileştirilebilir. Su/çimento oranı, çimento dozajı, bağlayıcı türü, betonun sıkıştırılması ve kürü, beton örtü kalınlığı, çevre koşulları gibi faktörler dayanıklılık üzerinde etkilidir.

4.2. Malzeme-Çevre Etkileşimi ve Korozyon Riski

MSE dayanma yapıları için, dolgu malzemesinin kimyasal bileşimi ve MSE duvarı oluşturan donatıların cinsi çok önemlidir. Dolgu malzemesinin kimyası, direkt olarak bu donatıların korozyonuna veya deforme olmasına neden olabileceğinden bunun belirlenmesi, kritik bir dayanıklılık kontrol mekanizmasıdır (Kumar & Parihar, 2025). Özellikle, dolgu malzemesinin pH değeri, metal donatıların bütünlüğünü korumak için 5–11,75 aralığında olması gereken çok önemli bir parametredir (Kumar & Parihar, 2025). Uçucu kül gibi belirli endüstriyel yan ürünlerin varlığı da dayanıklılık açısından önemlidir. Karbonatlaşma oluşumu ($\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3$),

pH değerinin azalmasına neden olur. Bununla birlikte ağır metallerin sızması, birtakım kimyasal reaksiyonlara neden olabilir ve bu da hem yapısal hem de çevresel açıdan bir tehdit oluşturabilir (Sharma vd., 2024).

MSE duvarların geosentetiklerle tasarlanması durumunda ise dolgu malzemesinin kimyası daha fazla önem kazanacaktır. Özellikle polyester bazlı geosentetikler, alkali ortamdan olumsuz etkileneceklerdir. Bu da tasarımı yapılan yapının stabilitesine zamanla etki edecektir.

5. GERİ DOLGU MALZEMESİ ve ALTERNATİF MALZEMELER

Dayanma yapılarında seçilecek geri dolgu malzemesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri bilinmelidir. Sürdürülebilirliğin sağlanması açısından geri dolgu malzemesi olarak alternatif malzemelerin kullanımına yer verilebilir.

5.1. Dolgu Malzemesinin Sağlaması Gereken Geoteknik Özellikler

Dolgu malzemesinin seçimi, güvenli bir dayanma yapısı tasarımı için kritik önem arz etmektedir (Vibha & Divya, 2021; Mandloi & Hegde, 2022). İdeal bir geri dolgu malzemesi, serbestçe drenaj sağlayan granüler bir malzeme olmalıdır (Vibha & Divya, 2021). Geri dolgu malzemesinin ince danelere sahip olması, drenaj performansının zayıf olmasına neden olacaktır. Bu durum, duvara ekstra yüklemelere sebep olarak bunun sonucunda duvar hareketine ve hatta çökmeye neden olabilecektir (Hossain vd., 2012).

5.2. Sıkıştırma ve Yoğunluğun Etkisi

Dayanma yapıları arkasına yerleştirilen geri dolgu malzemesinin yerleştirilmesi sırasında kullanılan sıkıştırma

enerjisi çok önemlidir çünkü kötü sıkıştırılmış dolgu malzemesinin sonuçları arasında, dayanma yapısında daha yüksek gerilmelerin oluşması söz konusudur (Farooq & Naqash, 2020). Ayrıca yetersiz sıkıştırma, duvar sistemindeki iç stabilizasyon kuvvetlerinin azalmasına ve daha yüksek aktif zemin kuvvetlerinin ortaya çıkmasına neden olabilir (Farooq & Naqash, 2020). Dayanma yapılarında kullanılacak geri dolgu malzemesinin fiziksel özellikleri ile genellikle granülometri, plastisite ve korozyon özelliklerine göre dolgu sıkışma kalitesinin kontrol edilmesi gerekmektedir (Morris & Delphia, 1999).

5.3. Sürdürülebilirlik için Alternatif Dolgu Malzemeleri

Dayanma yapılarında kullanılacak geri dolgu malzemesinin granüler olması, yapının stabilitesini sağlayabilmek için gerekli bir durumdur. Bunun için de genellikle doğal maden ocaklarından üretilen kırmataşlar kullanılmaktadır. Ancak doğal kaynaklara olan talep her geçen gün artmaktadır. Bu kaynaklara talebin artması, daha fazla alan tahribatı anlamına gelmektedir. Sürdürülebilirlik anlamında, dolgu malzemesi için inşaat yıkıntı atıklarının alternatif olarak kullanılması, çevresel etkileri azaltmak ve doğal kaynakların tükenmesini önlemek adına yararlı olacaktır (Vibha & Divya, 2021; Yavan & Bozbey, 2023).

İnşaat yıkıntı atıklarının geoteknik özelliklerinin, ideal bir dolgu malzemesi gereksinimlerini karşıladığını gösteren çalışmalar vardır (Vibha & Divya, 2021). Ancak yapı güvenliğini sağlamak için, dolguda kullanılacak inşaat yıkıntı atıklarının fiziksel ve kimyasal özellikleri iyi bilinmelidir. Karbonatlaşma süreci bu malzemelerde de olabilecektir (Abbaspour & Tanyu, 2019). Bu da yapısal sorunlara neden olacaktır.

İnşaat yıkıntı atıkları gibi çelik çürufu da granüler malzeme olarak kullanılabilir. İyi derecelendirilmiş kum (SW)

olarak sınıflandırılan bir endüstriyel yan ürün olan çelik cürufu, dolgu malzemesi olarak kullanıldığında, bu malzemenin geleneksel kuma kıyasla güçlendirilmiş dayanma yapılarında %25 daha az deformasyon sağlama kapasitesine sahip olduğu gösterilmiştir (Mandloi & Hegde, 2022).

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Şev stabilitelerinde kullanılan dayanma yapılarının güvenli bir şekilde inşası, tasarım parametrelerinin kapsamlı ve dikkatli bir şekilde hesaplanmasının sonucunda gerçekleşebilir. Dayanma yapılarının kaymaya karşı direncinin, devrilmeye karşı direncinin ve taşıma kapasitesinin sağlanabilmesi için güvenlik faktör değerleri sırasıyla minimum 1,5, 2,0 ve 2,5 olmalıdır. Bu stabilite faktörlerine ek olarak yapının bulunacağı zeminin analizlerini ve varsa yer altı suyunun konumunu bilmek, yapı tasarımı için gereklidir. Çevresel etkilerin dayanma yapılarının durabilitesine etkisinin olacağı unutulmamalı ve bu etkiler, tasarım aşamasında dikkate ele alınmalıdır.

Dayanma yapıları için kullanılacak olan geri dolgu malzemesinin granüler olması ve bu malzemenin permeabilite değerinin yüksek olması, yapının durabilitesi için gerekli olan bir konudur. Bu geri dolgu malzemesinin kimyasal özelliklerini bilmek MSE duvarlar gibi dayanma yapılarında kullanılacak malzemeleri doğru seçmekte yardımcı olacaktır.

Bütün bu bilgiler ışığında, sürdürülebilirlik açısından alternatif malzeme olarak inşaat yıkıntı atıkları kullanılacaksa, bunların karakterize edilmesi, kullanılacak malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, tüm bu işlemler yapıldıktan sonra dayanma yapıları için dolgu malzemesi olarak kullanılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Abbaspour, A. & Tanyu, B. F. (2019). Tufa precipitation from Recycled Concrete Aggregate (RCA) over geotextile: Mechanism, composition, and affecting parameters. *Construction and Building Materials*, 196, 317-329.
- Amritha, M. & Chithra, S. (2025). Erosion Control and Slope Stabilization: A Critical Review on Analysis and Strengthening Methods of Hilly Terrain. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 13, 3066-3075. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.72765>.
- Aydin, Ö. & Topuz, P. (2016). Effect of hot dip galvanized coating on the corrosion resistance of the external surface of reinforcement steel. *Materials Testing*, 58(2), 146-150. <https://doi.org/10.3139/120.110835>.
- Bathurst, R. J. (2020). Developments in MSE Wall Research and Design. İçinde F. Tatsouka, E. Guler, H. Shehata, & J. P. Giroud (Ed.), *Innovative Infrastructure Solutions using Geosynthetics* (ss. 22-50). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34242-5_3.
- Brown, M., Burland, J., Chapman, T., Higgins, K., Skinner, H. & Toll, D. (Ed.). (2023). *ICE Manual of Geotechnical Engineering, Second edition, Volume II: Geotechnical design, construction and verification*. Emerald Publishing Limited. <https://doi.org/10.1680/icemge.66830>.
- Chong, F. Y., An, Y. N. & Wang, P. (2014). Research on Factors Affecting Reinforced Concrete Durability. *Advanced Materials Research*, 898, 403-406.

- Chowdhury, A. A. & Aisyah, I. S. (2018). Mechanical and Corrosive Nature of Galvanized Steel in Sodium Chloride Solution. *Journal of Energy Mechanical, Material, and Manufacturing Engineering*, 3(2), 69-78.
- Das, B. M. (2011). *Principles of foundation engineering* (7th ed). Cengage Learning.
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2018). *Principles of Foundation Engineering*. <https://researchonline.jcu.edu.au/51845/>.
- Day, R. W. (1997). Design and Construction of Cantilevered Retaining Walls. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2(1), 16-21. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0680\(1997\)2:1\(16\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(1997)2:1(16)).
- Diwalkar, A. (2020). Analysis and Design of Retaining Wall: A Review. *2nd International Conference on Communication & Information Processing (ICCIP)*. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3648731.
- Du, Y., Du, X., Han, W., Huang, B., Huang, S., Liang, P. & Zhang, M. (2024). Failure behavior and mechanical properties of prefabricated cantilever retaining under dynamic effect. *Frontiers in Built Environment*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1343271>.
- Falah, M. W. & Muteb, H. H. (2024). Evaluation of mechanically stabilized earth retaining walls for different soil–structure interaction methods: A review. *Open Engineering*, 14(1), 20220535. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0535>.
- Faldesai, M. & Savoikar, P. (2020). Comparative analysis and behavior of cantilever retaining wall with and without relief shelves. *Advances in Computer Methods and Geomechanics: IACMAG Symposium 2019 Volume 1*, 537-551. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-0886-8_44.

- Farooq, Q. U. & Naqash, M. T. (2020). *Consequences of Poorly Compacted Backfill Material on Concrete Retaining Walls*. 6.
- Gladstone, R. A., Anderson, P. L., Fishman, K. L. & Withiam, J. L. (2006). Durability of Galvanized Soil Reinforcement: More than 30 Years of Experience with Mechanically Stabilized Earth. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1975(1), 49-59.
<https://doi.org/10.1177/0361198106197500106>.
- Gök, S. G., Kilic, I. & Sengül, Ö. (2021). Properties of alkali-activated roller compacted concretes produced from waste aggregates. *Cement-Wapno-Beton = Cement Lime Concrete*, 26(4), 352-363.
<https://doi.org/10.32047/cwb.2021.26.4.7>.
- Gu, X., Jin, X. & Zhou, Y. (2016). Durability of Concrete Structures. İçinde X. Gu, X. Jin, & Y. Zhou, *Basic Principles of Concrete Structures* (ss. 553-597). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-48565-1_12
- Hancock, C. (2024). *Reconstructing Past Climate Change Since the Last Glacial Maximum Using Paleoclimate Proxies, Model Simulations, and Data Assimilation* [PhD Thesis, Northern Arizona University].
https://search.proquest.com/openview/7833d714a5853bb78609c053128db31f/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y&casa_token=qwtFyee6VfAAAAAA:SVTuhDw8_hYAkZ_uOoHVF3KJNCfH46h4qIyANmFhJR3ePjooyTt9vY3GDTwrtYePx-9rC2QrCA.

- Hossain, M. S., Kibria, G., Khan, M. S., Hossain, J. & Taufiq, T. (2012). Effects of Backfill Soil on Excessive Movement of MSE Wall. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 26(6), 793-802. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000281](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000281).
- Hu, D. W., XL M. & Zhang, Y. N. (2017). Research on Anti-Corrosion Performance of Hot-dip Galvanized Coating during Neutral Salt Spray Test. *3rd International Conference on Education and Social Development*, 129, 748-752.
- Kılıç, İ. & Gök, S. G. (2021a). Silindirle Sıkıştırılmış Atık Beton Agregasının Silindirle Sıkıştırılmış Beton Üretiminde Yeniden Değerlendirilmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(3), 999-1008. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.877421>.
- Kilic, I. & Gok, S. G. (2021b). Strength and durability of roller compacted concrete with different types and addition rates of polypropylene fibers. *Revista de La Construcción. Journal of Construction*, 20(2), 205-214. <https://doi.org/10.7764/RDLC.20.2.205>.
- Kılıç, İ. & Gök, S. G. (2021c). Investigation of Freeze-Thaw Resistance of Roller Compacted Concretes Produced with Different Aggregates. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(4), 2849-2859. <https://doi.org/10.21597/jist.908579>.
- Kilic, I. & Gok, S. G. (2021d). A study on investigating the properties of alkali-activated roller compacted concretes. *Advances in Concrete Construction*, 12(2), 117-123.
- Kumar, A. & Parihar, A. (2025). Sustainability evaluation of waste foundry sand as backfill in cantilever retaining walls. *Geomechanics and Geoengeering*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/17486025.2025.2550385>.

- Lee, M. & Basu, D. (2025). Environmental impacts of mechanically stabilised earth walls. *Geosynthetics International*, 32(4), 559-578.
- Lemnitzer, A. & Tavaréz, E. (2022). Earth Retaining Structure Design. *Geostrata Magazine*, 26(2), 42-49. <https://doi.org/10.1061/geosek.0000409>.
- Liu, Y., Zhao, Y., Zhang, D. & Liu, Z. (2022). The long-term mechanical performance of geogrid-reinforced soil retaining walls under cyclic footing loading. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01642.
- Mandloi, P. & Hegde, A. (2022). Performance evaluation of reinforced earth walls with sustainable backfills subjected to railway loading. *Frontiers in Built Environment*, 8, 1048079.
- Manjunath, M. & Prakash, K. B. (2015). Effect of replacement of natural aggregates by recycled aggregates derived from field demolished concrete on the workability and strength characteristics of concrete. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 6(2), 119-128.
- Momani, Z., Beneberu, E. & Yazdani, N. (2021). Effect of earth reinforcement, soil properties and wall properties on bridge MSE walls. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 15(5), 1209-1221. <https://doi.org/10.1007/s11709-021-0764-2>.
- Moncada, A., Damians, I. P., Olivella, S. & Bathurst, R. J. (2024). Study of environmental impact from geosynthetic reinforced soil walls. *E3S Web of Conferences*, 569, 13001. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2024/99/e3sconf_geoamericas2024_13001/e3sconf_geoamericas2024_13001.html.

- Morris, D. V., & Delphia, J. G. (1999). *Specifications for backfill of reinforced-earth retaining walls*. <https://trid.trb.org/View/654093>.
- Muteb, H. H., & Falah, M. W. (2021). Mechanically Stabilized Earth MSE Walls Applications. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 856(1), 012031. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/856/1/012031/meta>.
- Nowak, P. A. (2023). Slope stabilisation methods. İçinde M. Brown, J. Burland, T. Chapman, K. Higgins, H. Skinner, & D. Toll (Ed.), *ICE Manual of Geotechnical Engineering, Volume II: Geotechnical design, construction and verification* (s. 0). Emerald Publishing Limited. <https://doi.org/10.1680/icemge.66830.1183>.
- Orcesi, A., O'Connor, A., Bastidas-Arteaga, E., Stewart, M. G., Imam, B., Kreislova, K., Schoefs, F., Markogiannaki, O., Wu, T., Li, Y., Salman, A., Hawchar, L. & Ryan, P. C. (2022). Investigating the Effects of Climate Change on Material Properties and Structural Performance. *Structural Engineering International*, 32(4), 577-588. <https://doi.org/10.1080/10168664.2022.2107468>.
- Özaydın, A. (2010). *Arkasında Geotekstil İle Güçlendirilmiş Donatılı Kum Zemin bulunan İstinat Duvarı Davranışının İncelenmesi* [PhD Thesis]. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Riyana, M. S. (2023). Deployment of Recycled Aggregates as Granular Material in Concrete Concerning Sustainability-An Experimental Study. *AIJR Proceedings*, 110-123.

- Roy, M. (2024). Erosion Control and Retaining Wall. İçinde M. Roy, Geotechnical and Foundation Engineering Practice in Industrial Projects (ss. 177-193). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7906-6_9.
- Ryan, R. B., Ronald, P. A., Robert, J. R. & Vicky, E. C. C. (1990). Reinforced Soil Highway Slopes. *Transportation Research Record*, 1288, 99.
- Samtani, N. C. & Nowatzki, E. A. (2006). *Soils and Foundations Reference Manual* (No. FHWA-NHI-06-089; s. 594). U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Sari, U., Sholeh, M. & Hermanto, I. (2020). The stability analysis study of conventional retaining walls variation design in vertical slope. *Journal of Physics: Conference Series*, 1444, 012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1444/1/012053>.
- Sharma, R., Singh, M. & Shandilya, A. (2024). Detrimental Effects of Fly Ash Backfill on Retaining Wall Stability and Associated Chemical Reactions. *Journal of Advances in Science and Technology*, 21(1), 375-385. <https://doi.org/10.29070/q8kbew42>.
- Speranza, G., Ferrari, A. & Lassalle, P. L. (2022). Life cycle environmental assessment of retaining walls in unsaturated soils. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 30, 100241.
- Trenter, N. A. (2004). Approaches to the design of cantilever retaining walls. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 157(1), 27-35.
- Vibha, S. & Divya, P. V. (2021). Geosynthetic-Reinforced Soil Walls with Sustainable Backfills. *Indian Geotechnical Journal*, 51(6), 1135-1144. <https://doi.org/10.1007/s40098-020-00450-2>.

- Yavan, O. (2015). *Suya Doygun Kil Zeminlere İnşa Edilen İstinat Duvarlarının Dinamik Yükler Altında Davranışı* [Yüksek Lisans]. Anadolu Üniversitesi.
- Yavan, O. & Bozbey, İ. (2023). Sürdürülebilir İnşaat Sektörü İçin Geri Dönüşüm Beton Agregası. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 155-165.
- Yu, M.-H. (2023). Earth Pressure Theory. İçinde M.-H. Yu, *Soil Mechanics* (ss. 139-167). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2781-4_7.
- Zevgolis, I. & Bourdeau, P. L. (2007). *Mechanically stabilized earth wall abutments for bridge support*. <https://docs.lib.purdue.edu/jtrp/327/>.
- Zhuang, J. & Chen, J. (2021). Stability Analysis of Gravity Retaining Walls with Different Wall-back Types under Equal Section Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 668(1), 012059. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/668/1/012059/meta>.

AĞUSTOS-EYLÜL 2025 SINDIRGI DEPREM DİZİSİNDEN YER HAREKETİNE DAİR BULGULAR: ANA ŞOK-ARTÇI DİNAMİKLERİ

Süleyman GÜCEK¹

Kamil Bekir AFACAN²

1. GİRİŞ

Türkiye, dünyanın en etkin deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya orojenik kuşağı üzerinde yer almakta ve bu nedenle yüksek sismik tehlike altındadır. Özellikle Batı Anadolu, kıta içi genişleme tektoniğinin etkisi altında gelişen yoğun faylanma ağı ile karakterize edilmektedir. Bölgedeki aktif fay zonları, tarihsel ve aletsel dönem boyunca yıkıcı depremler üretmiş, hem mühendislik yapıları hem de yerleşim alanları üzerinde önemli etkiler yaratmıştır. Bu durum, bölgenin sismotektonik özelliklerinin ayrıntılı olarak incelenmesini zorunlu kılmaktadır.

Balıkesir ili, Batı Anadolu'daki bu aktif tektonik ağın merkezinde yer almakta ve farklı doğrultularda gelişmiş çok sayıda diri fayla çevrelenmektedir. Tarihsel belgeler ve deprem katalogları, il sınırları içerisinde ve çevresinde VIII-IX şiddetine ulaşan çok sayıda yıkıcı depremin meydana geldiğini göstermektedir. Örneğin, 1826, 1897 ve 1898 yıllarında yaşanan depremler bölgedeki yerleşimlere ciddi hasar vermiş, ayrıca Midilli ve Ege Denizi odaklı büyük depremler de Balıkesir'i

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, sgucek@aku.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4839-1851.

² Doç. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, kafacan@ogu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3667-4432.

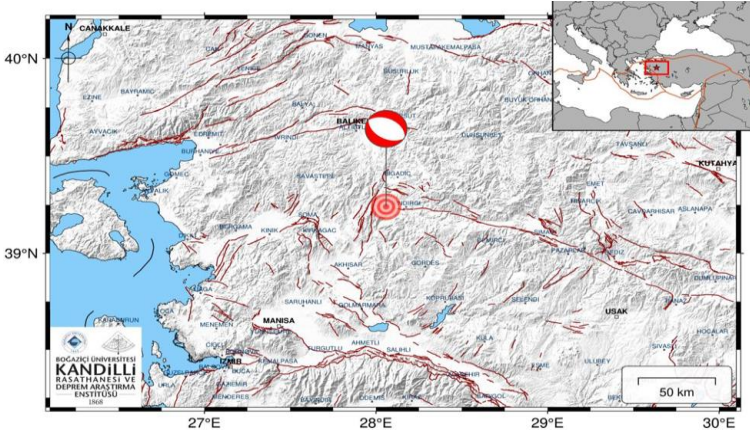
doğrudan etkilemiştir. Aletsel dönemde de (1900-2025), Balıkesir ve çevresinde $M \geq 4.0$ büyüklüğünde çok sayıda deprem kaydedilmiş; özellikle $M \geq 6.5$ depremler il sınırları çevresinde yoğunlaşarak geniş alanda hissedilmiştir. Bu tarihsel ve güncel gözlemler, bölgenin yüksek deprem tehlikesini açıkça ortaya koymaktadır.

Bu bağlamda, 10 Ağustos 2025'te meydana gelen $M_w:6.1$ büyüklüğündeki Sındırgı (Balıkesir) depremi, hem tektonik özellikleri hem de mühendislik açısından yarattığı etkilerle dikkat çekmektedir. Deprem, sığ odaklı oluşu nedeniyle geniş bir alanda hissedilmiş ve özellikle fay hattına yakın yerleşimlerde ağır hasara yol açmıştır. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), Kandilli Rasathanesi ve ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS) tarafından yayımlanan veriler, merkez üssünde $I_0:VIII$ düzeyinde şiddetin gerçekleştiğini doğrulamaktadır. Bu durum, bölgedeki yerel zemin koşullarının kuvvetli yer hareketi parametreleri üzerindeki kritik rolünü bir kez daha ortaya koymuştur.

Çalışmanın odak noktası, bu depreme ilişkin kuvvetli yer hareketi kayıtlarının mühendislik bakış açısıyla değerlendirilmesidir. Sındırgı istasyonunda (TK-1015) elde edilen kayıtlar, deprem sırasında zeminin dinamik davranışını doğrudan yansıtmakta olup, spektral parametreler, Arias şiddeti, PGA-PGV-PGD değerleri ve frekans içerikleri üzerinden analiz edilmiştir. Böylece, yerel zemin özelliklerinin deprem yer hareketi üzerindeki etkisi ayrıntılı şekilde ortaya konulmuştur. Bu makale, öncelikle depremin tektonik arka planını ve odak mekanizmasını sunmakta, ardından kuvvetli yer hareketi karakteristiklerini incelemekte ve elde edilen sonuçları literatürde tanımlanmış ampirik bağıntılarla karşılaştırmaktadır. Sonuçların, hem Balıkesir'in deprem potansiyelinin daha iyi anlaşılmasına hem de bölgesel deprem mühendisliği uygulamalarına katkı sağlaması hedeflenmektedir.

2. BÖLGENİN TEKTONİĞİ, DEPREMSELLİĞİ VE DEPREM TEHLİKESİ

10 Ağustos 2025 tarihinde saat 19:53'te Balıkesir ili Sındırgı ilçesi Alakır mevki merkezli (39.2403°K - 28.0587°D) $M_w:6.1$ ($M_L:6.0$) büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. Odak derinliği 7.7 km olarak belirlenen deprem, sığ odaklı olup geniş bir alanda hissedilmiştir. Depremin yüzeyde yarattığı etkiler, Rapid Earthquake Damage Assessment (REDAS) yazılımı ile değerlendirilen tahmini şiddet haritasına göre merkez üssünde I_0 :VIII olarak belirlenmiştir (KOERİ, 2025). Benzer şekilde, USGS tarafından yayımlanan ShakeMap sonuçları da bölgede en yüksek şiddetin VIII düzeyinde gerçekleştiğini ve özellikle fay hattına yakın yerleşimlerde yoğun hasar gözlemlendiğini göstermektedir (USGS, 2025).



Şekil 2.1. M6.1 Alakır-Sındırgı (Balıkesir) depremi lokasyon haritası.

Balıkesir ili, Batı Anadolu'nun genişlemeli tektonik rejimi içinde yer almakta olup çok sayıda aktif fay zone tarafından çevrelenmektedir. MTA'nın Türkiye Diri Fay Haritası (2011)'na göre il sınırları içinde Balıkesir, Edremit, Havran-Balya, Yenice-Gönen, Manyas ve Edincik fayları, çevresinde ise Biga-Çan, Mustafakemalpaşa, Karacabey,

Eskişehir-Kütahya, Manisa-İzmir ve Midilli-Ege Denizi fay sistemleri bulunmaktadır. Bu fayların çoğu KD-GB ve KB-GD doğrultuludur. Bölgedeki en önemli yapısal unsurlardan biri Simav Fay Zonu olup, Sındırgı (Balıkesir) ile Abide (Kütahya) arasında yaklaşık 150 km uzunluğa sahiptir. Başlangıçta doğrultu atımlı çalışan bu fay, günümüzde baskın olarak normal fay karakteri göstermektedir (Şaroğlu vd., 1987; Kartal ve Kadirioğlu, 2014; Şaroğlu vd., 2020).

Tarihsel dönemde (M.Ö. 1800-M.S. 1900) bölgede I_0 :VIII–IX şiddetinde yıkıcı depremler kaydedilmiş; özellikle 1826, 1897 ve 1898 yıllarında Balıkesir’de etkili sarsıntılar olmuştur (Soysal vd., 1981). Ayrıca Midilli, Ege Denizi ve İzmir’deki büyük depremler de kenti doğrudan etkilemiştir. Aletsel dönemde (1900-2025) KRDAE kataloglarına göre bölgede $M \geq 4.0$ çok sayıda deprem meydana gelmiş, önemli depremler ise M :7.0-7.9 aralığında olmuştur. En yakın yıkıcı deprem, yaklaşık 58 km mesafedeki 1953 Soğucak–Yenice (Çanakkale) depremidir. 10 Ağustos 2025 tarihli Sındırgı depremi ise moment tensör ters çözümüne göre normal faylanma karakteriyle gerçekleşmiş ve Batı Anadolu’nun güncel genişlemeli tektonik rejimiyle uyumlu bulunmuştur.

3. KUVVETLİ YER HAREKETİ KARAKTERİSTİKLERİ

10 Ağustos 2025 tarihinde saat 19:53:47 (TSİ)’de meydana gelen Balıkesir-Sındırgı M_w :6.1 depremi, bölgede konumlanmış AFAD ve KOERI ivmeölçer istasyonları tarafından kaydedilmiştir. Depremi takiben, AFAD-TADAS veri portalı üzerinden bu çalışmada kullanılmak üzere seçilen istasyonlara ait üç bileşenli kuvvetli yer hareketi kayıtlarına erişilmiş ve veriler ASCII (*.asc) formatında indirilmiştir (son erişim: 22.08.2025). Çalışma kapsamındaki kayıtçıların

konumları Şekil 3.1’de, istasyon ve kayıt özellikleri (ör. istasyon kodu, koordinatlar, zemin sınıfı/ V_{s30} , PGA/PGV, etkin süre ve seçili spektral ölçütler) sunulmaktadır (Tablo 1). TK-1015 (Sındırgı) istasyonu ana şoka yakın ve mekânsal dağılımı temsil eden istasyon olarak değerlendirmeye alınmıştır.



Şekil 3.1. Balıkesir Sındırgı İstasyon konumu

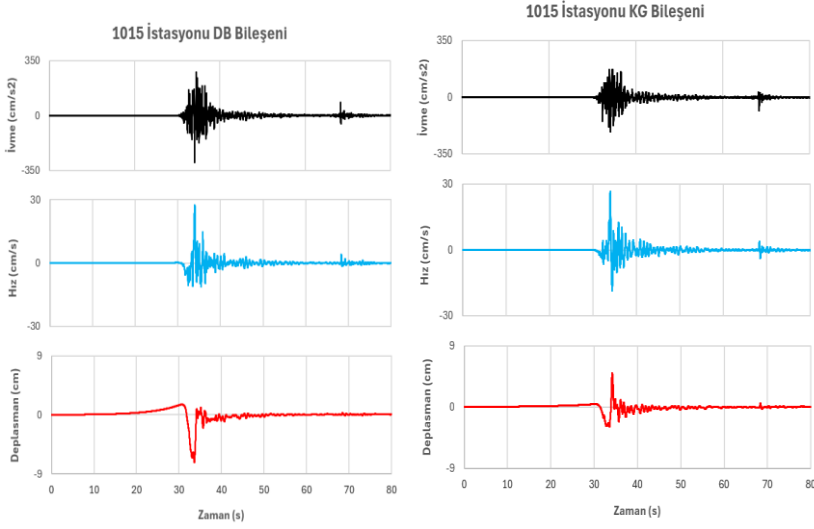
Bu çalışmada kullanılan kayıtlar, TK-1015 kodlu Sındırgı (Balıkesir) istasyonuna aittir. İstasyon 39.23951°N, 28.17140°E koordinatlarında, 233 m kotunda ve serbest alan koşullarında konuşlandırılmış olup 12.03.2013 tarihinden beri faaldir (Adres: Hükümet Konağı). Yüzey sensörü derinliği 0 m’dir. Yerel jeolojik ortam Ayrılmamış Kuvaterner alüvyon dolgularla temsil edilir; morfoloji “akarsu ovası”, topoğrafya sınıfı T1 (düz/çok hafif eğimli) şeklindedir. Ölçülmüş V_{s30} : 238 m/s olup EC8 zemin sınıfı C’ye (TBDY-2018’de ZD) karşılık gelmektedir. İstasyonun hakim yer frekansı f_0 :1.47 Hz (yaklaşık $T_0 \approx 0.68$ s) olarak belirlenmiştir.

Bu özellikler, 1-3 Hz bandında belirgin yerel büyütme potansiyeline ve yaklaşık 5-10 kat aralığındaki yapıların doğal periyotlarıyla rezonans olasılığına işaret etmektedir. Serbest-saha kurulumu sayesinde kayıtlar yapı etkilerinden arındırılmış olup HVSR/Fourier tayfları ve %5 sönümlü elastik tepki spektrumları ile yerel zemin tepkisinin incelenmesi için uygundur.

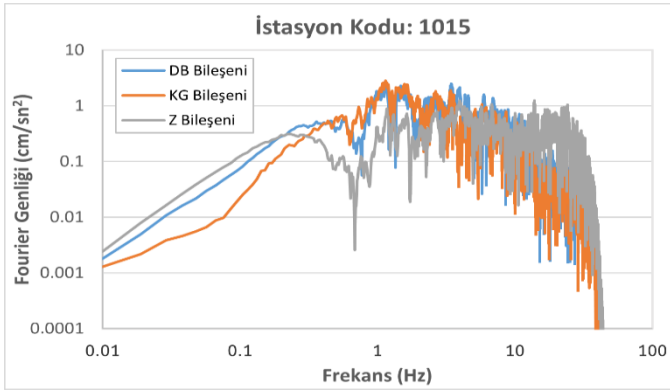
Tablo 1. İstasyon ve kayıt özellikleri.

<i>Kod</i>	<i>İl</i>	<i>Bölge</i>	<i>PGA_NS</i> (<i>cm/s²</i>)	<i>PGA_EW</i> (<i>cm/s²</i>)	<i>PGA_UD</i> (<i>cm/s²</i>)	<i>R_{jb}</i> (<i>km</i>)	<i>R_{rup}</i> (<i>km</i>)
1015	Balıkesir	Sındırgı	216.67	299.39	352.92	1.56	8.94

İlgili depreme ait mühendislik şiddet parametrelerinin hesabında literatürde tanımlı ve geçerliliği kabul görmüş ampirik bağıntılar ve formüller kullanılmıştır. Seçilen istasyon kayıtları için ivme-hız-yer değiştirme zaman serileri üretilmiş ve bu serilerden Arias şiddeti (1970), PGA-PGV-PGD ile frekans içerikleri (Fourier Genlik-Frekans, FAS) hesaplanmıştır. Fourier dönüşümü, sinyallerin frekans alanındaki temsilini sağlayarak lineer sistem davranışının karakterizasyonunda uzun süredir kullanılan bir yöntem olduğundan, kayıtların frekans içeriği bu temelde değerlendirilmiştir.



Şekil 3.2. TK1015 istasyonunda kaydedilen kuvvetli yer hareketine ait karakteristikler (DB-KG)

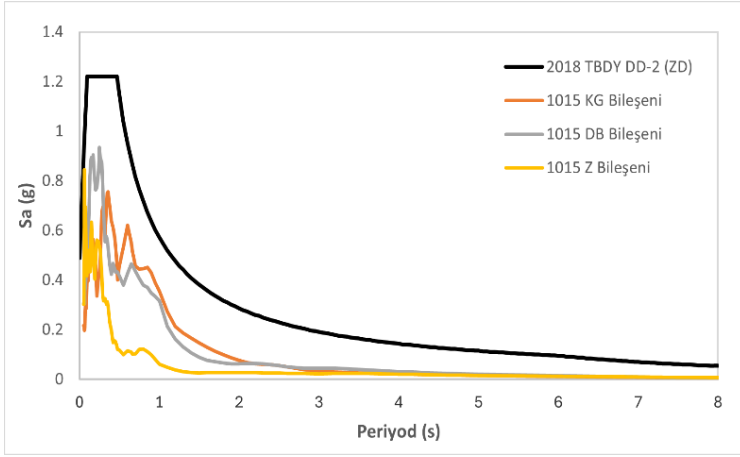


Şekil 3.3. TK1015 istasyonunda kaydedilen kuvvetli yer hareketine ait frekans içerikleri

Binaların deprem etkisi altında tasarımında/ değerlendirilmesinde esas alınacak deprem yer hareketlerine ilişkin veriler, dört farklı deprem yer hareketi düzeyi için, 22/01/2018 tarih ve 2018/11275 sayılı Bakanlar Kurulu kararı ile yürürlüğe konulan Türkiye Deprem Tehlike Haritası tanımlanmıştır.

Deprem merkez üssü ve seçilen kayıtçıların (AFAD) koordinatları dikkate alınarak, Türkiye Deprem Tehlike Haritası üzerinden her istasyon konumu için kısa periyot spektral ivme katsayısı (S_s) ve 1.0 s periyot için spektral ivme katsayısı (S_1) değerleri elde edilmiştir. Deprem yer hareketi spektrumları, DD2 deprem yer hareketi düzeyleri esas alınarak %5 sönüm oranı için; bu S_s - S_1 değerleri ile istasyonların bulunduğu bölgelere ait yerel zemin etki katsayıları dikkate alınarak tanımlanmıştır. DD2, 50 yılda aşılma olasılığı %10 (geri dönüş periyodu yaklaşık 475 yıl) olan tasarım depremini ifade etmektedir.

Her bir istasyonda kaydedilen üç bileşenli ivme kayıtlarından, literatürde yaygın olarak kullanılan adım-adım sayısal entegrasyon temelli Newmark yöntemi (1959) ile %5 sönümlü elastik davranış (tepki) spektrumları hesaplanmıştır. Elde edilen yatay (iki bileşenin uygun ortalaması; düşey davranış spektrumları, istasyon koordinatlarına bağlı olarak ZD yerel zemin sınıfı için TBDY-2018’de tanımlanan yatay ve düşey elastik tasarım spektrumları ile karşılaştırmalı şekilde değerlendirilmiştir. Karşılaştırmalar Şekil 3.4’de sunulmuştur. Bu yaklaşım ile harita temelli tasarım talebi (DD2) ve yerel zemin etkileri altında beklenen spektral talep, ölçülen kuvvetli yer hareketinin gerçek spektral talebi yan yana görülerek; istasyon bazında talep-kapasite tartışmalarına ve hasar gözlemleri ile kayıt-temelli değerlendirmelerin ilişkilendirilmesine imkân sağlanmıştır.

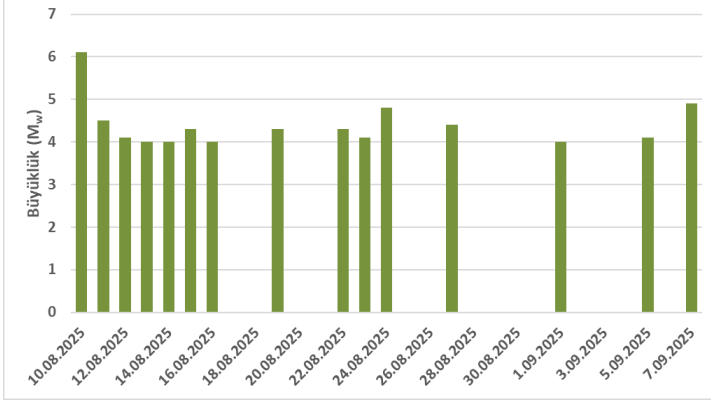


Şekil 3.4. 10 Ağustos 2025 Sındırgı Mw:6.1 Depreminde en yakın istasyonda kaydedilen kuvvetli yer hareketi kayıtlarının davranış spektrumları ile TBDY-2018 tasarım spektrumlarının karşılaştırması

10 Ağustos 2025'te meydana gelen Mw:6.1 büyüklüğündeki Sındırgı (Balıkesir) depremi, bölgedeki sismik aktivitenin tetikleyicisi olmuştur. İstasyona yaklaşık 8.2 km uzaklıkta kaydedilen bu olay, PGA:353 cm/s² ile ay boyunca gözlenen en yüksek yer ivmesini üretmiştir. Bu değer, mühendislik yapıları açısından ciddi düzeyde sismik talep oluşturabilecek nitelikte bir yer hareketine işaret etmektedir. Bu tarihten 1 aylık süreç içinde Mw:4'ten büyük depremler Şekil 3.5'de sunulmuştur. Ana şoktan sonraki ilk 24 saat içinde, Mw:4.0-4.6 aralığında çok sayıda artçı deprem meydana gelmiştir. Bu depremler sırasında ölçülen PGA değerleri 10–53 cm/s² arasında değişmiş, özellikle 11 Ağustos Mw:4.4 (PGA:53 cm/s²) artçısı öne çıkmıştır. Bu durum, ana şok sonrasında bölgede yoğun bir stres transferi yaşandığını ve komşu fay segmentlerinin tetiklendiğini göstermektedir.

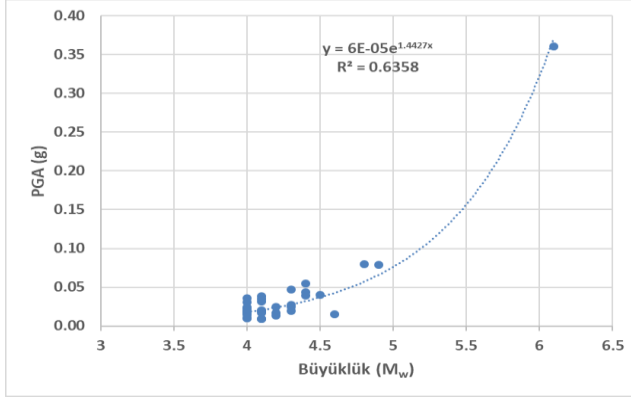
11-16 Ağustos arasındaki dönemde artçı aktivite devam etmiş, büyüklükleri genellikle Mw:4.0-4.5 bandında kalmıştır. Bu sarsıntıların PGA değerleri çoğunlukla 10-40 cm/s² arasında

ölçülmüştür. Bu düzeydeki yer hareketleri doğrudan hasar yaratma potansiyeli düşük olsa da, özellikle daha önce hasar görmüş yapılarda ek riskler oluşturabilmektedir.



Şekil 3.5. 10 Ağustos-7 Eylül arası olan Mw:4'ten büyük depremler

24 Ağustos 2025'te Mw:4.8 büyüklüğündeki deprem (PGA:78.6 cm/s²) ile dikkat çekici bir sismik yığılma gözlenmiştir. Bu olay, ayın en yüksek ikinci ivmesini üretmiş ve birkaç dakika içinde Mw:4.2 ve Mw:4.3 büyüklüğündeki artçılarla takip edilmiştir. Bu ardışık depremler, fay zonunda kırılma sürecinin halen tamamlanmadığını ve bölgesel gerilimin sürdüğünü göstermektedir. 7 Eylül 2025'te meydana gelen Mw:4.9 büyüklüğündeki deprem (PGA:77 cm/s²), ana şoktan yaklaşık bir ay sonra dahi kayda değer sismik aktivitenin devam ettiğini ortaya koymuştur. Bu değer, 24 Ağustos'taki Mw:4.8 artçısına oldukça yakın olup, fay zonunun halen yeniden dengelenme sürecinde olduğunu teyit etmektedir.



Şekil 3.6. 10 Ağustos-7 Eylül arası olan Mw:4'ten büyük depremler için PGA-Büyüklik İlişkisi

PGA ve büyüklük ilişkisi incelendiğinde üstel bir ilişkinin olduğu Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Elde edilen bulgular, Sındırgı depreminin ardından gelişen klasik artçı dizisinin varlığını teyit etmektedir. Özellikle bir ay boyunca Mw:4.0 ve üzeri çok sayıda deprem kaydedilmesi, fay zonunun geniş bir kesiminin halen yeniden dengelenme sürecinde olduğunu göstermektedir.

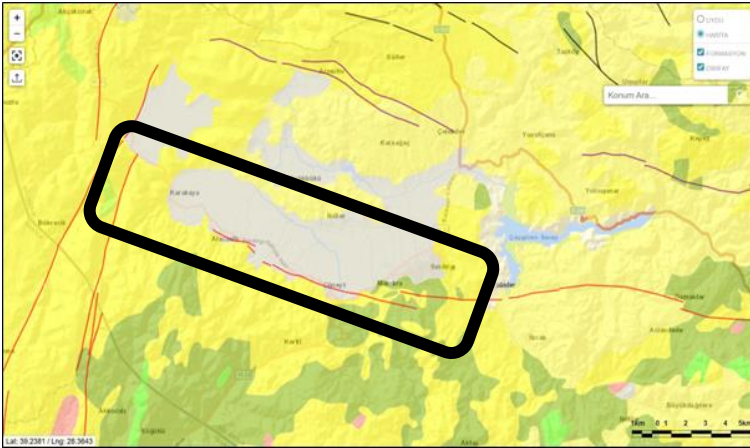
4. GEOTEKNİK DEĞERLENDİRME VE SAHA GÖZLEMLERİ

4.1. Yerel Zemin Etkileri

Geçmiş deprem gözlemleri, yerel zemin koşullarının yapı davranışı ve hasarlar üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Nitekim Mexico City (1985), Loma Prieta (1989), Dinar (1995), Kocaeli (1999), Elazığ (2011), İzmir (2020) ve Kahramanmaraş (2023) depremleri, yerel zemin özelliklerinin deprem dalgalarının genlik parametrelerini ve tepki spektrumlarını önemli ölçüde etkileyen faktörler olduğunu ortaya koymuştur. 10 Ağustos 2025 tarihinde merkez üssü Balıkesir'in Sındırgı ilçesi olan deprem, başta Balıkesir olmak

üzere Manisa'nın kuzey ilçelerinde de etkili olmuştur. Balıkesir'de Sındırgı ve Bigadiç, Manisa'da ise Akhisar, Demirci, Gördes, Kırkağaç, Köprübaşı, Saruhanlı ve Selendi ilçelerinde zemin koşulları ve yapı özelliklerinden kaynaklanan hasarlar gözlenmiştir.

Hasar tespit çalışmalarında 22.930 bina incelenmiş, bunlardan 624'ü Balıkesir'de, 105'i Manisa'da olmak üzere toplam 729 bina ağır hasarlı veya yıkık durumda rapor edilmiştir. Bu verilere göre genel hasar oranı %3,18 olarak hesaplanmıştır. Ağır hasarlı veya yıkık yapıların 610'u yalnızca Sındırgı ilçesinde yer almakta, bunların %91'i depremin gerçekleştiği Gelenbe Fay Zonu ile Simav Fay Zonu-Sındırgı segmenti üzerinde bulunmaktadır. Söz konusu yapıların neredeyse tamamı 2000 yılı öncesinde, alüvyon zeminler üzerinde inşa edilmiş yapılardır. Ayrıca ağır hasarlı veya yıkık yapıların %95'ini şehir merkezi ve köylerdeki 1-2 katlı yığma yapılar oluşturmaktadır.

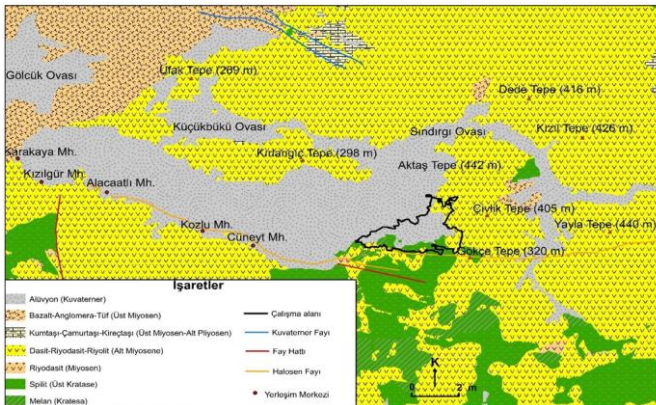


Şekil 4.1. Jeoloji haritası ve hasarın yoğun olduğu bölgeler

Balıkesir'in Sındırgı ilçesinde zemin özelliklerinin çok fazla değişken olmadığı görülmektedir. $V_{s(30)}$:200-280 m/s dağılımları, yumuşak zeminlerin bulunduğunu ortaya

koymaktadır. Bu çeşitlilik, yapı özellikleri ile birlikte değerlendirildiğinde, hasar dağılımı üzerinde etkili olmuştur. MTA'nın 1/25.000 ölçekli jeoloji haritalarına göre Sındırgı ilçe merkezi ve çevresinde farklı jeolojik formasyonlar ve topoğrafik yükseltiler yer almaktadır. Saha incelemeleri, ilçede zeminin genel olarak kil, çakıl ve alüvyon kumlarından oluşan "Ayrılmamış Kuvaterner" malzemelerden meydana geldiğini göstermektedir.

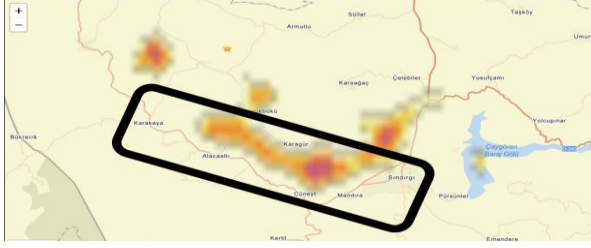
Yerleşim alanı ve yakın çevresi Kuvaterner alüvyon üzerinde konumlanırken, çevrede Miyosen yaşlı volkanik-volkanosedimanter birimler ile yer yer Kretase kökenli spilit-melanj toplulukları yüzeylenmektedir. Alüvyon alanlarda tabakalanma ve tane boyu değişkenliği belirgin olup, yeraltı su seviyesi 5-7 m derinlikte gözlenmektedir. Bu zeminler genel olarak gevşek-orta sıkı dokudur. Saha gözlemlerinde (yol ve parsel kazıları, temel hafriyatları vb.) kum-silt ardaolanmaları, çakıllı mercekler ile ince kil/silt seviyelerinin varlığı dikkat çekmiş, bu durum zemin özelliklerinde önemli farklılıklar olduğunu Şekil 4.2’de ortaya koymuştur (MTA; Sarıkaya, 2020).



Şekil 4.2. Sındırgı ilçesi ve yakın çevresinin genel jeoloji haritası.

Jeofizik ölçümler ve literatür verileri, ova kesimlerinde V_{s30} değerlerinin çoğunlukla ZD sınıfı aralığında olduğunu göstermektedir. Kalın alüvyon tabakaları ile anakaya arasındaki belirgin hız kontrastı, 1-3 Hz frekans bandında yerel zemin büyütmesine yol açmakta ve bu durum yapısal hasarlarda etkili olmaktadır. Söz konusu frekans aralığının orta katlı betonarme yapıların doğal periyotlarıyla çakışması, rezonans etkisini ve artmış kat ötelenmelerini beraberinde getirmektedir. Gevşek kumlu-siltli seviyeler ve yüksek yeraltı suyu koşulları, bölgede sıvılaşma riski oluşturabilecek niteliktedir. Bu nedenle tasarım açısından, TBDY-2018’de öngörülen DD2 deprem yer hareketi düzeylerinin, istasyon veya parsel bazlı yerel zemin etki katsayılarıyla birlikte dikkate alınması gerekmektedir.

USGS’nin deprem sonrası ürettiği Ground Failure (GF) modelleri, heyelan ve sıvılaşma potansiyelini küresel ölçekte tahmin eden haritalar sunmaktadır. Bu haritalar doğrudan Türkiye için detaylı mikrobölgeleme sağlamasa da, deprem sonrası hasar dağılımlarını ön değerlendirmek için yol gösterici niteliktedir. 10 Ağustos 2025 tarihinde Balıkesir’in Sındırgı ilçesinde meydana gelen Mw:6.1 büyüklüğündeki deprem için hazırlanan USGS sıvılaşma olasılığı haritası, özellikle Sındırgı Ovası ve alüvyon dolgu alanlarında yüksek risk göstermektedir. İlçe merkezi ve çevresinde görülen yüksek yeraltı su seviyesi (5-7 m), gevşek–orta sıkı kumlu-siltli zeminler ve kalın alüvyon tabakaları, modelde sıvılaşma potansiyelini artıran başlıca faktörlerdir. Buna karşılık, çevredeki Miyosen volkanitleri ve Kretase spilit-melanj toplulukları üzerinde yer alan alanlarda risk düşük seviyede kalmaktadır. Haritada öngörülen yüksek sıvılaşma zonları ile, deprem sonrası ağır hasar gözlenen yapıların yoğunlaştığı bölgelerin büyük ölçüde örtüştüğü görülmektedir. Bu durum, sıvılaşma ve zemin büyütmesi gibi yerel zemin etkilerinin, özellikle mühendislik hizmeti almamış veya kısmen almış yapılarda hasarlı veya yıkıcı sonuçlar doğurduğunu göstermektedir.



Şekil 4.3. USGS sıvılaşma tahmin haritası (USGS, 2025)

Balıkesir'in Sındırgı ilçesinde yapılan saha gözlemlerinde, farklı dönemlerde inşa edilmiş binaların deprem davranışları arasında belirgin farklılıklar görülmüştür. Yeni deprem yönetmeliklerine uygun olarak radye temel sistemiyle inşa edilen yapılar, zemin etkilerine karşı daha rijit ve bütüncül bir performans sergilemiştir. Radye temel, yükleri zemine daha homojen bir şekilde aktardığından herhangi bir deprem hasarı bulunmamaktadır. Buna karşılık, 2000 yılı öncesinde inşa edilen ve sürekli temel üzerine oturan yapılarda çatlaklar yoğun olarak gözlemlenmiştir. Bu yapı, alüvyon zemin koşullarında, yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu alanlarda yer almakta olup depremden kaynaklı yapısal hasarları da beraberinde getirmiştir. Dolayısıyla sürekli temel üzerine inşa edilen eski yapılar, zemin büyütmesi ve rezonans etkisi karşısında daha kırılgan bir davranış sergilemiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.4. 2000 Yılı Öncesi Yapı (A) ve 2018 Yönetmeliğine Göre Yapılan Yeni Yapı (B)

Sonuç olarak, aynı zemin koşullarında farklı yönetmeliklere göre inşa edilmiş binalar arasında gözlenen hasar farklılıkları, güncel deprem yönetmeliklerinin ve radye temel gibi modern temel sistemlerinin yapı güvenliğinde kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır.

5. ÜST YAPI HASARLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

16 Ağustos 2025 tarihinde T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından açıklanan güncel verilere göre; 729 bina ağır hasarlı veya yıkık olarak tespit edilmiştir. Oldukça geniş bir alanda hissedilen bu depremin, özellikle Balıkesir'in Sındırgı ve Bigadiç ilçelerinde, ayrıca Manisa'nın Akhisar, Demirci, Gördes, Kırkağaç, Köprübaşı, Saruhanlı ve Selendi ilçelerinde hasara yol açtığı belirlenmiştir. Balıkesir'de 624, Manisa'da ise 105 bina ağır hasarlı veya acil yıkılacak olarak tespit edilmiştir. Bu yapıların 610'u Balıkesir'in Sındırgı ilçesinde, 14'ü ise Bigadiç ilçesinde yer almaktadır. Hasar dağılımları incelendiğinde, ağır hasar ve yıkımların özellikle faya yakın kesimlerde ve alüvyon zeminler üzerinde konumlanan yerleşimlerde yoğunlaştığı görülmüştür.

Bununla birlikte, söz konusu depremde en büyük hasar, Sındırgı ilçe merkezi ile yakın çevresindeki köylerde meydana gelmiştir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı verileri, 23 Ağustos 2025). 16 Ağustos 2025 tarihi itibarıyla deprem bölgelerinde, 20 bin 748 binadaki 32 bin 945 bağımsız birimde hasar tespit çalışması yapılmıştır. Hasar tespit çalışması tamamlanan 729 binadaki 1036 bağımsız birimin acil yıkılması gereken, ağır hasarlı ve yıkık olduğu tespit edilmiştir. 2 bin 778 binadaki 4 bin 492 bağımsız birim az hasarlı, 15 bin 155 binadaki 24 bin 465 bağımsız birimin ise hasarsız olduğu tespit edilmiştir. Depremlerin ardından 29 Eylül 2025 tarihi itibarıyla 11 bine yakın artçı deprem meydana gelmiştir.

5.1. Betonarme Yapı Hasarları

Sındırgı depreminde hasar dağılımı incelendiğinde, yıkılan veya ağır hasar gören yapıların büyük çoğunluğunu 2000 yılı öncesinde inşa edilmiş, mühendislik hizmeti almamış geneli 1-2 katlı yığma yapılar oluşturmaktadır. Deprem anında ilçe genelinde toplam 25 yapı tamamen yıkılmış, bunlardan biri de merkezde bulunan betonarme bina olduğu belirlenmiştir. Betonarme yapının göçmesi, taşıyıcı sistem tasarımındaki eksiklikler, düşük malzeme kalitesi, donatı düzenindeki yetersizlikler ve eski yönetmelik koşullarına göre yapılmış olması, gevşek-orta sıkı alüvyon zemin koşulları, yüksek yeraltı su seviyesi, fay hattının üzerinde veya yakın olması ve zemin büyütme etkisi ile birleşerek göçmeyi hızlandırmıştır. Buna karşın, radye temel üzerine oturan ve 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne uygun olarak inşa edilmiş yeni betonarme yapılarda ciddi bir hasar gözlenmemiştir. Bu durum, modern deprem yönetmelikleri ve uygun temel sistemlerinin yapı güvenliği açısından kritik rolünü açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 5.1. Betonarme yapılarda gözlemlenen genel hasarlar.

Bölgedeki hasarlı yapıların büyük çoğunluğu, 2000 yılı öncesinde mühendislik hizmeti almadan inşa edilmiş ve sürekli temel sistemi kullanılan betonarme ile yığma binalardan oluşmaktadır. Saha gözlemlerinde, inşaatlarda genellikle dere kumu kullanıldığı, kırmataş yerine iri daneli yuvarlak taşların tercih edildiği ve bunun beton içinde boşluklara yol açarak düşük beton dayanımına neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca düz donatı, kolonlarda yetersiz boyuna donatı ve enine donatı eksikliği, ağır hasarlı yapılarda ortak kusurlar olarak saptanmıştır. Bu eksiklikler, düşük beton kalitesiyle birleşerek özellikle kesme etkisi altında binaları zayıf bırakmış ve ağır hasarın başlıca nedeni olmuştur (Şekil 5.1).



Şekil 5.2. Betonarme yapılarda gözlemlenen yumuşak/zayıf kat ve çekilme etkisi hasarları.

Betonarme yapılarda ise görece daha az hasar meydana gelmiştir. Yıkılan veya ağır hasarlı betonarme bina sayısı sınırlı olup, bu yapılarda deprem tasarımının temel ilkelerinden “güçlü kolon-zayıf kiriş” kuralına uyulmadığı görülmüştür. Kolon kesitlerinin minimum boyutlarda seçilmesi ve yüksek kirişlerle

bağlanması, deprem sırasında kolonların kirişlerden önce hasar almasına neden olmuş; özellikle ağır tabliyeler, katlar arasında göçmelere yol açmıştır. Ayrıca bazı yapılarda yumuşak/zayıf kat düzensizliği öne çıkmış, giriş katlarının yüksek tasarlanması, dolgu duvarların kaldırılması veya taşıyıcılara müdahaleler sonucu ağır hasarlar meydana gelmiştir (**Şekil 5.2**).

10 Ağustos 2025 Sındırgı Depremi'nde 25 yapı tamamen yıkılmış, bunlardan biri betonarme, diğerleri ise 1-2 katlı yığma yapılardır. Ağır hasarlı 610 bina büyük ölçüde 2000 yılı öncesinde, mühendislik hizmeti almadan, sürekli temel üzerinde inşa edilmiştir. Hasarlı yapılarda en sık rastlanan kusurlar; Düşük beton kalitesi, Düz donatı ve yetersiz boyuna/enine donatı, Güçlü kolon–zayıf kiriş ilkesine aykırı tasarım, Yumuşak kat düzensizliği ve ticari amaçlı duvar kaldırılması, Bitişik nizam yapılarda çekiçleme etkisi olarak ortaya çıkmaktadır.

Yığma yapılarda diyagonal kesme çatlakları, duvar-çerçeve ayrılması ve düzlem dışı göçmeler yaygın gözlenmiştir. Buna karşılık, radye temel kullanılan ve TBDY-2018'e uygun tasarlanan yeni binalarda ciddi hasar oluşmamıştır. Bu tablo, Sındırgı'da meydana gelen hasarların temel nedeninin malzeme, zemin koşulları ve imalat kusurları ile yapısal düzensizlikler olduğunu, güncel deprem yönetmeliğine uygun yapıların ise güvenliği artırdığını göstermektedir.

5.2. Geleneksel Yığma Yapılarda Oluşan Hasarlar

10 Ağustos 2025 Sındırgı Depremi'nde meydana gelen yapısal hasarların yaklaşık %95'i geleneksel yığma yapılarda gözlenmiştir. İlçe merkezinde bulunan yığma binalar genellikle 1-2 katlı konutlar ve zemin katı ticari veya farklı amaçlarla kullanılan yapılardır. Deprem sırasında bu tür yapılarda diyagonal kesme çatlakları, katlar arası ayrılmalar ve kısmi göçmeler yoğun olarak gözlenmiştir. Ayrıca bitişik nizamli merkez yapılarında dilatasyon derzi yetersizlikleri nedeniyle

çekiçleme (pounding) etkisi ortaya çıkmış, farklı kat seviyelerine sahip binalar birbirine çarparak ağır hasar almıştır.

Köylerdeki yığma yapılar ise genellikle kerpiç, taş ve briket malzemelerle, mühendislik hizmeti olmadan inşa edilmiş yapılardır. Çoğunda bağ kirişi bulunmamakta, duvar örgüsü düzensiz ve malzeme kalitesi düşük seviyededir. Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu alüvyon zeminler üzerine oturan bu yapılar, deprem sırasında düzlem dışı duvar göçmeleri, çerçeveden ayrılma ve tamamen yıkılma mekanizmalarıyla ağır hasar almıştır. Özellikle fay hattına yakın köylerdeki yapılar, zemin büyütmesi nedeniyle en yüksek hasar oranlarını göstermiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Geleneksel yığma yapılarda oluşan hasarlar

Sonuç olarak, gerek ilçe merkezinde gerekse köylerde bulunan yığma yapılar, düşük malzeme kalitesi, yetersiz taşıyıcı detaylandırma, alüvyon zemin koşulları ve fay hattına yakınlık nedeniyle deprem karşısında son derece zayıf performans sergilemiştir. Sındırgı özelinde ağır hasarların büyük oranda bu yapılarda yoğunlaşması, geleneksel yığma yapı stokunun ciddi bir risk kaynağı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

6. GENEL DEĞERLENDİRME, ÖNERİLER VE SONUÇLAR

10 Ağustos 2025'te meydana gelen Mw:6.1 büyüklüğündeki Sındırgı Depremi, yerel zemin koşullarının ve yapı özelliklerinin hasar dağılımındaki kritik rolünü bir kez daha göstermiştir. Hasar tespitlerine göre 25 yapı yıkılmış, 729 bina ağır hasarlı olarak sınıflandırılmıştır. Hasarların yaklaşık %95'i, ilçe merkezi ve köylerde yaygın olan, 2000 yılı öncesinde mühendislik hizmeti almadan ve sürekli temel sistemiyle inşa edilmiş geleneksel yığma yapılarda meydana gelmiştir. Fay hattına yakınlık, alüvyon zeminler, yüksek yeraltı su seviyesi ve sıvılaşma potansiyeli hasarın şiddetini artıran başlıca etkenlerdir.

Saha gözlemlerinde, düşük beton dayanımı, dere kumu ve iri yuvarlak taş agregaların kullanımı, düz donatı tercih edilmesi, yetersiz boyuna ve enine donatı, güçlü kolon-zayıf kiriş ilkesine uyulmaması, yumuşak/zayıf kat düzensizlikleri ve bitişik nizam yapılarda çekiçleme etkisi gibi kusurlar öne çıkmıştır. Bu sorunlar, kolonların erken hasar almasına, tabliyelerin katlar arasında göçmesine ve yığma duvarların düzlem dışı kopmasına yol açmıştır. Buna karşılık, radye temel üzerine inşa edilen ve TBDY-2018'e uygun tasarlanan yeni yapılarda ciddi hasar görülmemiştir. Bu durum, çağdaş mühendislik uygulamaları ve güncel yönetmeliklerin önemini bir kez daha ortaya koymuştur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Sındırgı Depremi hem mevcut yapı stokunun kırılganlığını hem de zemin koşullarının etkisini açık biçimde ortaya koymuştur. Benzer sonuçların yaşanmaması için yapı stokunun acilen değerlendirilmesi, özellikle 2000 yılı öncesi yapılar için risk sınıflandırması yapılarak en azından “Göçmenin Önlenmesi/Can Güvenliği” performans düzeyinin sağlanması gereklidir. Bu kapsamda, yapı stoku envanteri ve risk analizi yapılmalı; köylerdeki yığma

yapılar için yerel malzemelere uygun güçlendirme yöntemleri, ilçe merkezindeki eski betonarme yapılar için ise taşıyıcı düzensizlikleri giderecek projeler uygulanmalıdır. Mikrobölgeleme çalışmaları hızla tamamlanmalı; alüvyon, yüksek yeraltı suyu ve sıvılaşma riski taşıyan alanlarda yapılaşma sınırlandırılmalı, TBDY-2018 esasları eksiksiz uygulanmalıdır. Ayrıca üniversiteler, belediyeler ve kamu kurumları arasında sürekli işbirliği sağlanarak araştırma-uygulama faaliyetleri artırılmalıdır.

Sonuç olarak, Sındırgı Depremi, mühendislik hizmeti almamış geleneksel yığma yapıların ve eski betonarme binaların kırılganlığını açıkça ortaya koyarken, çağdaş yönetmeliklere uygun yeni yapıların görece güvenli performans sergilediğini göstermiştir. Gelecekte benzer büyüklükteki depremlerde can ve mal kayıplarının azaltılması, ancak mevcut yapı stokunun güçlendirilmesi, yeni yapıların çağdaş deprem yönetmeliği ilkelerine uygun tasarımı ve yerel zemin koşullarını dikkate alan planlama süreçlerinin hayata geçirilmesiyle mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). (2025). Erişim adresi: <https://tdth.afad.gov.tr/>
- Arias, A. (1970). A measure of earthquake intensity. In R. J. Hansen (Ed.), *Seismic design for nuclear power plants* (pp. 438-483). Cambridge, MA: MIT Press.
- Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE). (2025).
- Kartal, R. F., & Kadirioğlu, F. T. (2014). 2011-2012 Simav depremleri (Ml:5.7, Ml:5.0, Ml:5.4) ve bölgenin tektonik yapısı ile ilişkisi. *Yerbilimleri*, 35(3), 141-168.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA). (2011). *Türkiye diri fay haritası*. Ankara: MTA Genel Müdürlüğü Yayınları.
- Newmark, N. M. (1959). A method of computation for structural dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 85(3), 67-94.
- Soysal, H., Sipahioğlu, S., Kolçak, D., & Altınok, Y. (1981). *Türkiye ve çevresinin tarihsel deprem kataloğu (2100 B.C.-1900 A.D.)*. TÜBİTAK Rapor No: TBAG-341, 171 s.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö., & Boray, A. (1987). *Türkiye'nin diri fayları ve depremsellikleri*. Ankara: MTA Raporu.
- Şaroğlu, F., & Güler, B. (2020). Batı Anadolu Tektonik Kaması'nın güncel deformasyonu: Batıya doğru kaçıştan kaynaklanan blok hareketleri. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 63(2), 161-194.
- Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)*. Ankara: Resmî Gazete.

Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği
Bakanlığı, Yapı İşleri Genel Müdürlüğü-Hasar Tespit
Ekibi (2025).

United States Geological Survey (USGS). (2025). Çevrimiçi
<https://earthquake.usgs.gov/>

TÜRKİYE’DE MOTORLU TAŞIT YAŞLARININ EĞİLİMLERİ VE ETKİLERİ

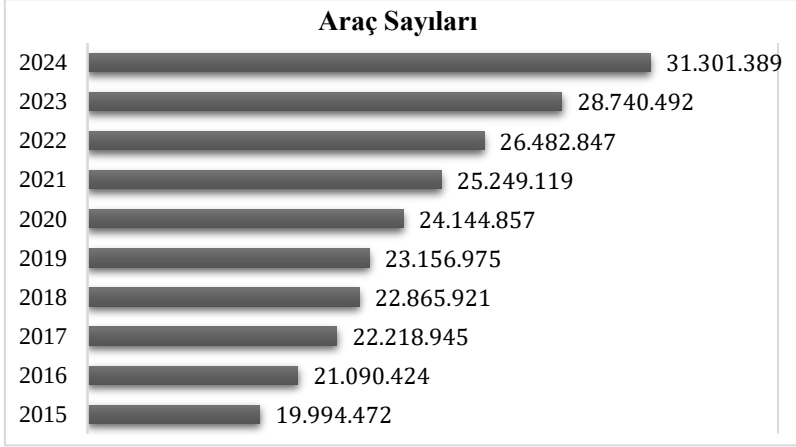
Eren DAĞLI¹

1. GİRİŞ

Türkiye’de karayolu ulaşımı, hem bireysel hareketliliğin hem de ekonomik faaliyetlerin en önemli bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Türkiye gelişmekte olan ülkeler arasında yer almakta olup özellikle büyükşehirlerdeki sanayileşme eğilimi, eğitim ve sağlık hizmetlerindeki erişilebilirliğin artması ile kırsaldan kent merkezlerine bir göç eğilimi görülmektedir. Hem kalabalık kentlerde kısıtlı toplu taşıma imkanları hem de kırsal alanlarda yaşayan bireylerde erişilebilirliği sağlayabilmek adına araç sahipliğinin artması beklenen bir gelişmedir. 2024 yılı sonu itibari ile trafiğe kayıtlı araç sayılarına ait bilgiler (TÜİK, 2025) Şekil 1’de sunulmaktadır. Trafiğe kayıtlı araç sayısı verileri incelendiğinde 2015–2024 yılları arasında Türkiye’de trafiğe kayıtlı araç sayılarında kayda değer bir artış yaşandığı görülmektedir. 2015 yılı verileri incelendiğinde yaklaşık 20 milyon olan motorlu araç sayısı, 2024 yılına gelindiğinde yaklaşık olarak 31,3 milyon araca ulaşmıştır. Bu artış, dikkate alınan zaman diliminde kayıtlı araç sayısı adetlerinde %56’nın üzerinde bir büyüme anlamına gelmektedir. Özellikle 2020’li yıllarda araç sayılarının artış hızının belirgin biçimde yükseldiği dikkat çekmektedir. Bu durum pandemi dönemindeki çip krizi ve araç tedarik sorunu ile birlikte Türkiye’deki ekonomik dalgalanmalar ve kurdaki artış sebebiyle araç fiyatlarının katlanarak artmasına rağmen bireysel araç sahipliğinin

¹ Öğr. Gör. Dr., Selçuk Üniversitesi, Doğanhisar Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, eren.dagli@selcuk.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3892-0270.

yaygınlaştığını göstermektedir. Artışın hızlandığı 2021–2024 dönemi, pandemi sonrası döneme denk gelmekte ve bu yıllarda toplu taşımadan bireysel ulaşımaya yönelimin belirginleştiği bilinmektedir (Dağlı, 2021).



Şekil 1. Yıllara göre trafikte kayıtlı araç sayıları

Ülkedeki toplam taşıt sayısındaki sürekli artış, ulaşımın çevresel, ekonomik ve teknik boyutlarını doğrudan etkilemektedir. Ancak, araç parkının büyüklüğünden daha önemli bir unsur, bu araçların yaş dağılımıdır. Araçların yaşlanması; yakıt verimliliğinde azalma, bakım-onarım maliyetlerinde artış, emisyon değerlerinde yükselme ve genel güvenlik performansında düşüş gibi çok yönlü sonuçlar doğurmaktadır. Ayrıca araç sayılarındaki artış kayıtlı araç sayıları yaş ortalamasının artması ile trafikteki araçlarda güvenlik ve teknolojik farklılıkların derinleşmesi gibi önemli sonuçlar da doğurmaktadır. TÜİK Motorlu Kara Taşıtları Bülteni (2025a) verilerine göre 2024 yılı içerisinde yaklaşık 2.6 milyon yeni aracın tescil işlemleri yapılırken yaklaşık 37 bin aracın ise trafik kaydı silinmiştir (Tablo 1). Kaydı yapılan araç sayısı toplam araç sayısı içerisinde %10'dan bile küçük dilime sahiptir.

Tablo 1. 2024 yılı içerisinde aylara göre trafiğe kaydı yapılan ve silinen araç sayıları (TÜİK, 2025a)

	<i>Kayı Yapılan</i>	<i>Kayı Silinen</i>
Ocak	213.493	2.171
Şubat	193.600	2.382
Mart	226.617	2.239
Nisan	196.309	1.890
Mayıs	232.401	2.938
Haziran	198.581	1.889
Temmuz	276.615	2.997
Ağustos	211.389	3.118
Eylül	212.451	3.338
Ekim	209.401	3.844
Kasım	188.966	4.444
Aralık	238.993	5.407
Toplam	2.598.816	36.657

Yeni araç sayılarının toplam araç sayıları içerisindeki payı göz önüne alındığında trafikteki araçların büyük bir bölümünün eski araçlardan oluştuğunu ifade etmektedir. Dolayısıyla grafikteki artış yalnızca araç sayısının artışını değil, aynı zamanda yaşlı araçların trafikte bulunduğu durumunu da yansıtmaktadır. Sonuç olarak, 2015–2024 dönemi Türkiye kayıtlı araç verileri doğrultusunda niceliksel büyüme fakat niteliksel yaşlanma eğilimi görülmektedir. Bu durum, enerji tüketimi, emisyon kontrolü ve trafik güvenliği açısından ulaşım planlama çalışmalarında dikkatle ele alınması gereken bir konu olarak dikkate alınmalıdır.

Son yıllarda hurda teşvikleri ve yeni araç satış kampanyaları ile mevcut trafikteki araç varlığının yenilenmesi hedeflenmektedir. Ancak ekonomik koşullar ve yüksek vergi yükleri yeni araç satın alma durumunda kısıtlayıcı olmaktadır.

Bu durum da yaşlı araçların trafikte kalma süresini uzatmaktadır. Bunun sonucu olarak Türkiye’de trafikte teknolojik olarak eskiyen ve enerji verimliliği açısından düşük performans gösteren araçlar yoğun şekilde bulunmaktadır. Bu durum yalnızca bireysel düzeyde yakıt tüketimi ve bakım masraflarını artırmakla kalmamakta, aynı zamanda ülke genelinde artan enerji talebi ve zararlı egzoz salımlarıyla çevresel sürdürülebilirliği de olumsuz etkilemektedir.

Trafik kazaları incelendiğinde, araçların kullanım süresi ve teknik yaşı, kaza sonucunda meydana gelen ölüm ve yaralanma olasılığını önemli ölçüde etkileyen bir değişken olarak öne çıkmaktadır. Araç yaşı arttıkça, güvenlik donanımlarındaki yetersizlikler ve mekanik aşınmalar nedeniyle kaza şiddetinin ve yaralanma riskinin yükseldiği görülmektedir. Meydana gelen trafik kazalarında ölüm ve yaralanma riskinde araç yaşı belirleyici bir etkidir (Anderson & Searson, 2015). Meydana gelen trafik kazalarında araç yaşı arttıkça yaralanma riskinin de arttığı tespit edilmiştir (Blows vd., 2003). Başka bir çalışmaya göre ise 5 yaşından büyük araç kullanmak, 5 yaşında veya daha yeni araç kullanmaya kıyasla ölümcül kazalarda sürücü ölüm riskinin önemli ölçüde arttırmaktadır. Ayrıca her sürücü destek teknolojisi, ölümcül kazalarda sürücü ölüm riskini %6 oranında azaltmaktadır (Zhang vd., 2025). Bunun temel nedenleri arasında, eski araçlarda güvenlik donanımlarının yetersizliği, pasif güvenlik sistemlerinin aşınması ve yeni nesil sürücü destek teknolojilerinin bulunmaması yer almaktadır. Öte yandan elde edilen %6’lık kazanım modern güvenlik teknolojilerinin trafik güvenliği üzerindeki koruyucu etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Gelişmekte olan ülkelerde trafikteki mevcut araçlar genellikle ikinci el ve bakımsız araçlar olarak gözlemlenmektedir. Eski araçlardaki emisyon kontrolünde ise kısıtlılıklar bulunmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde motorlu

taşıtlar kentsel kirliliğin başlıca sebeplerinden biri olarak öne çıkmaktadır. (Faiz vd., 1996). Emisyon seviyeleri ile araç yaşları arasında bir korelasyon olup araç yaşları arttıkça araçların çevresel etkiler kötüleşmektedir (Anilovich & Hakkert 1996). Çeşitli araştırmalar, araç yaşı ile emisyon seviyeleri arasında anlamlı bir korelasyon bulunduğunu ortaya koymaktadır. Araçların kullanım süresi uzadıkça motor verimliliği azalmakta, yakıt yanma süreci düzensizleşmekte ve bunun sonucunda zararlı egzoz gazı salımları artmaktadır. Bu durum, özellikle karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x) ve partikül madde (PM) gibi kirleticilerin artmasına sebebiyet vermektedir. Bu nedenle, gelişmekte olan ülkelerde araçların yaşları trafik güvenliği problemlerinin yanı sıra çevre ve halk sağlığı ile enerji verimliliği açısından da ciddi bir sorun teşkil etmektedir.

Bireylerin gelir durumları araç yaşları ile bir ilişki içerisinde olup gelir seviyesi yüksek bölgelerde araç yaşları düşük olup gelir seviyesi daha yüksek olan bölgelerde araçların daha eski olduğu tespit edilmiştir (Miller vd. 2002). Bu durum, ekonomik kapasitenin araç yenileme davranışları üzerinde doğrudan etkili olduğunu ve gelir düzeyinin, ulaştırma sistemlerinin çevresel ve teknik niteliğini dolaylı biçimde şekillendirdiğini ortaya koymaktadır. Araç fiyatlandırmasında ise başlıca etken motor gücüdür. Ayrıca otomobilin yaşı, kilometresi, vites türü, değişen parça sayısı ve markası da araç fiyatlarını etkilemektedir. Aracın boyalı parça sayısı ve sıfır veya 2. el olması durumları ise araç fiyatlarında bariz bir etki göstermemektedir (Büyükdağ, N. 2021). Türkiye’de zaman zaman mevcut araç stokunun gençleştirilmesi amacıyla hurda teşvik kampanyaları düzenlenmektedir. Hurda teşvik düzenlemeleri ve buna bağlı olarak vergi indirimleri araç satışlarına doğrudan etki etmektedir (Buhur, 2017; Tabar & Tokatlıoğlu, 2018). Ancak motorlu araçlara olan talep sadece vergi ve dolayısı ile fiyat kriterinden etkilenmemekte, fiyat

dışındaki diğer ekonomik değişken de talepte belirleyici olabilmektedir (Aras & Acar, 2022). Ayrıca döviz kuru ile ithal otomobil ve hafif ticari araç satışlarının ilişkili olduğu ve döviz kurundaki artışın araç satışlarını negatif etkilediği tespit edilmiştir (Çetin, 2020). Artan döviz kurları ve araç fiyatlarında özellikle pandemi sonrası meydana gelen hızlı artışın yanı sıra yenilikçi ulaşım araçları da bu pazarı oldukça değiştirmiştir. Elektrikli ve hibrit araçlar son yıllarda adından sıklıkla söz ettirmektedir. Elektrikli ve hibrit araç kullanımında öncü olan Avrupa ülkelerinin yanı sıra Çin ve ABD başta olmak üzere gelişmiş ülkelerde vergi teşvikleri ve işletimsel kolaylıklarla yenilikçi ve çevre dostu bu araçların kullanımı teşvik edilmektedir. Türkiye’de de bu araçların kullanımı henüz kısıtlı olsa da devlet teşvikleri ile çevre dostu araçların tercih edilirliliğinin artacağı düşünülmektedir (Şahin, 2021).

Bu çalışma, Türkiye’de illere göre ortalama araç yaşlarının değişimini incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma aynı zamanda, trafikteki mevcut araçların yenilenmesine yönelik politika uygulamalarının etkinliğini de tartışmaktadır.

2. TÜRKİYE’DE ORTALAMA ARAÇ YAŞLARININ İNCELENMESİ

Türkiye’de trafiğe kayıtlı bulunan araçların ortalama yaşlarının incelenmesi ve değişimin ortaya koyulabilmesi amacıyla Türkiye İstatistik Kurumu Merkezi dağılım Sistemi’nde yer alan Motorlu Kara Taşıt İstatistiklerinden (TÜİK, 2025b) yararlanılmıştır. İlgili çalışma kapsamında 2020 – 2024 yılları arasında trafiğe kayıtlı olan taşıtların ortalama yaşları il bazlı olarak verilmiştir. Bu zaman aralığı Covid 19 pandemisi başlangıcı ve pandemi nedeniyle ortaya çıkan çip krizine bağlı tedarik sorunlarının yanı sıra pandemi döneminin araç satışlarına etkisi ve araç fiyatlarında meydana gelen ani artışın etkilerini gözler önüne sermektedir.

Tablo 2’de 2020 ile 2024 yılları arasında Türkiye genelinde farklı araç tipleri için ortalama araç yaşları verilmektedir.

Tablo 2. Trafikte kayıtlı farklı araç tiplerinin yıllara göre ortalama yaşları (TÜİK, 2025b)

	2020	2021	2022	2023	2024
Otomobil	13,2	13,6	14	14,1	14,2
Minibüs	14,4	15	15,5	15,8	16
Otobüs	14,1	14,8	15,4	15,8	16,2
Kamyonet	12,3	12,8	13,3	13,6	13,9
Kamyon	17,2	17,6	17,8	17,9	18,1
Motosiklet	13,7	13,7	13,3	11,6	10,2
Ortalama	14,2	14,5	14,8	14,5	14,3

Otomobiller için ortalama yaş 2020 yılında 13,2 iken, 2024 yılında 14,2'ye yükselmiştir. 2020 yılında ortalama 13,2 olarak elde edilen ortalama otomobil yaşları 2021 yılında 14,2 değerine erişecekken 2021 yılındaki otomobil satışları ile ortalama otomobil yaşları 13,6 olarak elde edilmiştir. Ancak 2022 ile 2024 yılları arasındaki ortalama araç yaşları değerleri incelendiğinde çok ciddi sayıda otomobil satışı gerçekleştiği ve otomobil yaşlarının 2020-2021 ve 2021-2022 yıllarına göre çok düşük kaldığı görülmektedir. 2020 ve 2022 yılları arasında yaşanan Covid 19 pandemisi kaynaklı ekonomik problemler, çip üretim krizi kaynaklı arz ve tedarik sıkıntıları ile sosyal kısıtlamaların bu durumu meydana getirdiği ayrıca 2022 yılından sonra ise özellikle yerli otomobil markası TOGG araçlarının piyasaya sürülmesinin otomobil satışlarında oldukça bariz farklılıklar ortaya çıkardığı düşünülmektedir.

Minibüslerin ortalama yaşı ise 2020'de 14,4 iken, 2024'te 16'ya yükselmiştir. Minibüslerdeki ortalama yaş artışı otomobillere göre daha bariz yaşanmıştır. Özellikle otomobillerle benzer şekilde 2020-2021 yılları arasında ortalama minibüs

yaşlarında 0,6 birimlik artış yaşanırken 2021-2022 yıllarında 0,5 birimlik artış yaşanmıştır. Bu durum da 2020-2022 yılları arası trafiğe yeni kayıtlanan minibüslerin sayısının diğer yıllara göre az olduğunu ifade etmektedir. Araç maliyetlerindeki artış ile birlikte muhtemelen yeni minibüs alımlarının yavaşlaması ve mevcut minibüslerin uzun yıllar kullanılmaya devam edilmesinden kaynaklı bu durum yaşanmaktadır. Otobüslerde de benzer şekilde 2020-2022 yılları arası trafiğe yeni kayıtlanan minibüslerin sayısının diğer yıllara göre az olduğunu görülmektedir. Bu durum özellikle pandemi yıllarında minibüs ve otobüs alımlarının az olduğunu işaret etmekle birlikte, pandemi sürecinde toplu taşıma tercih edilirliliğinin düşmesinin bir etkisi olabileceğini düşündürmektedir. Kamyonet ve kamyonlarda 2020 ve 2022 yıllarındaki ortalama taşıt yaşlarındaki artış diğer araç tipleri ile benzer şekildedir. Ancak 2022 yılından sonra lojistik sektörünün dinamizmini korumasıyla yeni kamyonet ve kamyon alımları ile birlikte ortalama araç yaşları çok kısıtlı şekilde artmıştır.

Diğer araç tiplerine nazaran en dikkat edilmesi gereken değişim motosikletlerde yaşanmıştır. 2020 yılında ortalama 13,7 olan ortalama motosiklet yaşı mevcut stokun korunmasıyla 2021 yılında 14,7 yaşına ulaşacakken yeni motosiklet alımları ile 2021 yılında ortalama 13,7 yaş korunmuştur. Diğer araç türlerinden farklı olarak 2021-2022, 2022-2023 ve 2023-2024 yıllarında yoğun motosiklet satışı ile birlikte ortalama motosiklet yaşları ciddi şekilde düşmüş 2024 yılı itibari ile trafikteki motosikletlerin ortalama yaşı 10,2'dir. Bu durum ciddi oranda kullanıcıların düşük maliyetli ulaşım seçeneği olan motosiklete yöneldiği ve ulaşım planlamalarında motosikletin ciddi bir yer ettiğini göstermektedir.

2020 yılında Türkiye genelinde tüm taşıtların ortalama yaşı 14,2 iken, 2021 ve 2022 yıllarında düşük sayılabilecek bir artış gözlemlense de 2023 ve 2024 yıllarında trafiğe kayıtlı araçların ortalama yaşlarında düşüş trendi başlamıştır. Bu durum

da yeni araç satışlarının arttığı anlamına gelmektedir. Özetle kamyon, otobüs, minibüs ve kamyonet gibi taşıtların yaşları dikkate alınan zaman diliminde hızla artmaktadır. Bu durum, araçların yenilenmesinin yavaşladığını veya ekonomik faktörler nedeniyle eski araçların daha uzun süre kullanıldığını gösterebilir. Motosikletlerdeki yaş ortalamasındaki düşüş ise ulaşım ve araç satın alma durumlarındaki farklılaşmayı ciddi şekilde temsil etmektedir. Türkiye’de genel taşıt yaşı her ne kadar küçük bir artış göstermiş olsa da, özellikle kamyon, otobüs, minibüs ve kamyonet gibi ticari araçların ortalama yaşlarındaki artış taşıtların daha uzun süre kullanıldığını işaret etmektedir. Yıllık bazda taşıt türlerinin yaş değişimi başta ekonomik ve ticari faktörlerden etkilenmekte ve her bir taşıt türü için farklı trendler gözlemlenmektedir.

Motorlu Kara Taşıtları Bülteni’ne göre (TÜİK, 2025a) 2024 yılı sonu itibari ile kayıtlı araç sayı bakımından Türkiye’nin ilk 10 şehri Tablo 3’te verilmektedir.

Tablo 3. Şehirlere göre trafikte kayıtlı araç sayısı (TÜİK, 2025a)

<i>Şehir</i>	<i>Araç Sayısı</i>
İstanbul	5.878.761
Ankara	2.803.694
İzmir	1.963.733
Antalya	1.578.360
Bursa	1.249.142
Konya	932.845
Adana	900.790
Mersin	839.847
Manisa	792.804
Gaziantep	728.284

Veriler incelendiğinde İstanbul nüfus bakımından en kalabalık şehir olmasının yanı sıra trafikte kayıtlı araç sayısı bakımından da en üst sıradaki şehirdir. Ardından nüfusa paralel olarak Ankara ve İzmir şehirleri gelmektedir. Antalya nüfus bakımından Bursa'dan daha kalabalık olmasına rağmen trafikte kayıtlı araç sayısı bakımından Bursa'dan açık ara daha öndedir. Nüfusa doğru orantılı şekilde listenin 6. sırasında Konya yer alırken 7. sırada Adana bulunmaktadır. Nüfus bakımından daha gerilerde olan Mersin ve Manisa ise nüfustan bağımsız olarak trafikte kayıtlı araç sayısı bakımından ilk 10 şehir arasında yer almaktadır. Gaziantep ise nüfusu ile orantılı bir araç sıralaması ile listenin son sırasındadır. Araç sayılarının artması trafiğe yeni kayıtlı araçların ortalama yaşları çok daha az düşüreceği anlamına gelmektedir. Tablo 4'te ise 2020-2024 yılları arasında illere göre trafikte kayıtlı araç sayısı ortalama yaşları sunulmaktadır.

Tablo 4. Trafikte kayıtlı araç sayılarının şehirlere ve yıllara göre dağılımı (TÜİK, 2025b)

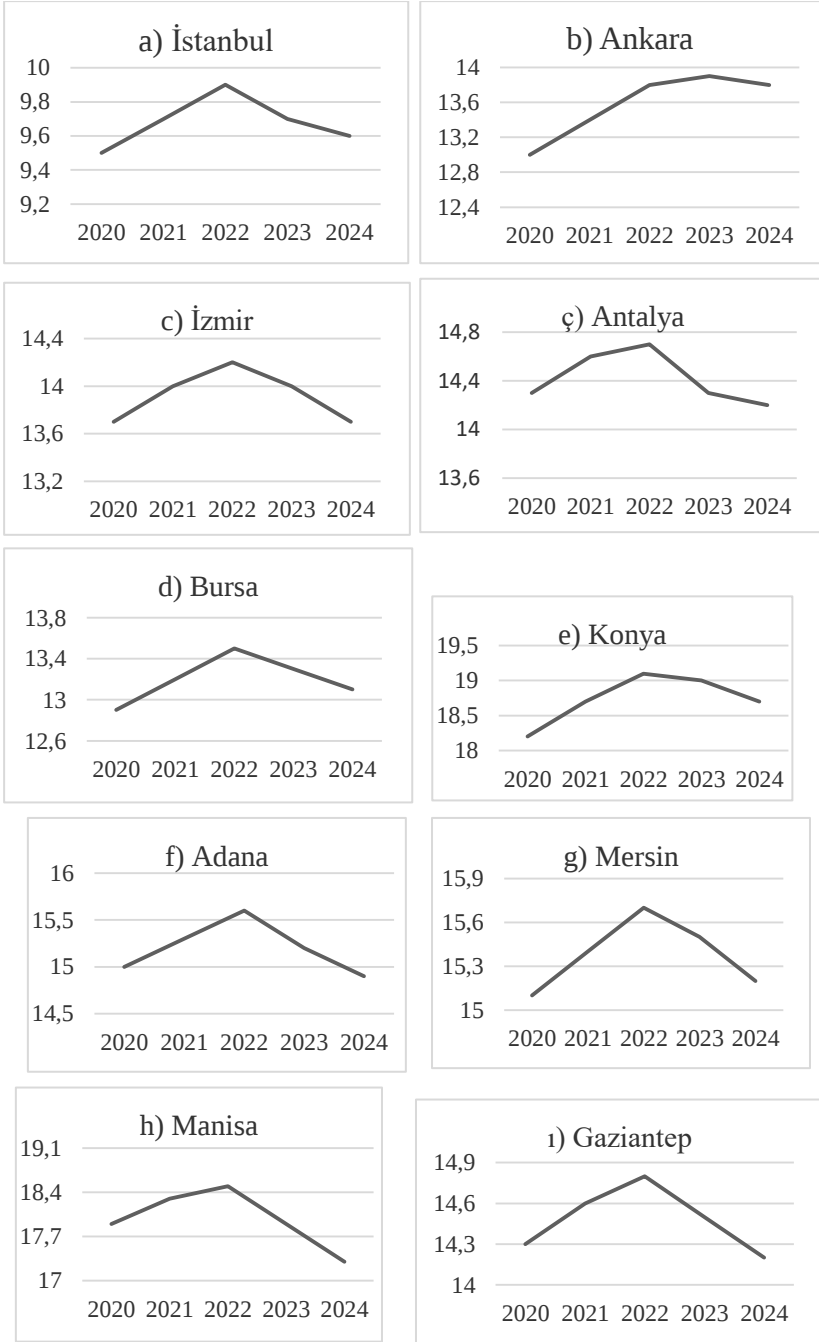
	2020	2021	2022	2023	2024
Adana	15	15,3	15,6	15,2	14,9
Adıyaman	14,3	14,7	14,8	14,4	13,9
Afyonkarahisar	18,2	18,7	19,1	18,8	18,1
Ağrı	14,5	15	15,6	15,7	15,3
Amasya	18,2	18,7	19	18,7	18,3
Ankara	13	13,4	13,8	13,9	13,8
Antalya	14,3	14,6	14,7	14,3	14,2
Artvin	14,5	15	15,6	15,9	16
Aydın	16,6	16,9	17,1	16,7	16,3
Balıkesir	16	16,4	16,7	16,3	15,8
Bilecik	16,8	17,2	17,6	17,3	16,7
Bingöl	9,9	10,1	10,6	10,6	10,1
Bitlis	12,4	12,7	13,1	13	12,5
Bolu	18,3	18,7	19	18,7	18,1

İnşaat Mühendisliği Değerlendirmeleri

	2020	2021	2022	2023	2024
Burdur	19,7	20,2	20,5	20	19,5
Bursa	12,9	13,2	13,5	13,3	13,1
Çanakkale	15,4	15,8	16,1	15,7	14,9
Çankırı	17,2	17,5	17,7	17,2	16,5
Çorum	19,2	19,6	20	19,9	19,4
Denizli	17,1	17,5	17,9	17,6	17,3
Diyarbakır	12,3	12,5	12,7	12,1	11,5
Edirne	16,2	16,6	17	16,9	16,6
Elazığ	13,7	14,1	14,7	14,7	14,5
Erzincan	17,4	17,8	18,1	17,8	17,1
Erzurum	13,1	13,7	14,2	14,3	14,2
Eskişehir	15,8	16,2	16,6	16,4	16,2
Gaziantep	14,3	14,6	14,8	14,5	14,2
Giresun	15,4	15,8	16,3	16,4	16,3
Gümüşhane	15,6	16,2	16,7	16,9	16,6
Hakkâri	13,2	13,5	14,1	13,8	12,8
Hatay	14,5	14,9	15,1	14,7	14,3
Isparta	18,5	19	19,4	19,1	18,6
Mersin	15,1	15,4	15,7	15,5	15,2
İstanbul	9,5	9,7	9,9	9,7	9,6
İzmir	13,7	14	14,2	14	13,7
Kars	13,3	13,8	14,4	14,5	14,4
Kastamonu	20,3	20,8	21,1	20,9	20,6
Kayseri	15,9	16,4	16,8	16,9	16,7
Kırklareli	15,1	15,6	16	15,8	15,4
Kırşehir	17,6	18,1	18,5	18,4	18,1
Kocaeli	12,4	12,8	13	12,7	12,3
Konya	18,2	18,7	19,1	19	18,7
Kütahya	19,5	20,1	20,5	20,1	19,6
Malatya	15,6	16	16,5	16,6	16,5
Manisa	17,9	18,3	18,5	17,9	17,3
Kahramanmaraş	16,1	16,5	17	17	16,7
Mardin	12,3	12,5	12,7	12,2	11,7
Muğla	14,8	15,1	15,1	14,6	14,2
Muş	12,7	13,1	13,5	13,5	13,2
Nevşehir	17,5	17,9	18,2	17,9	17,5

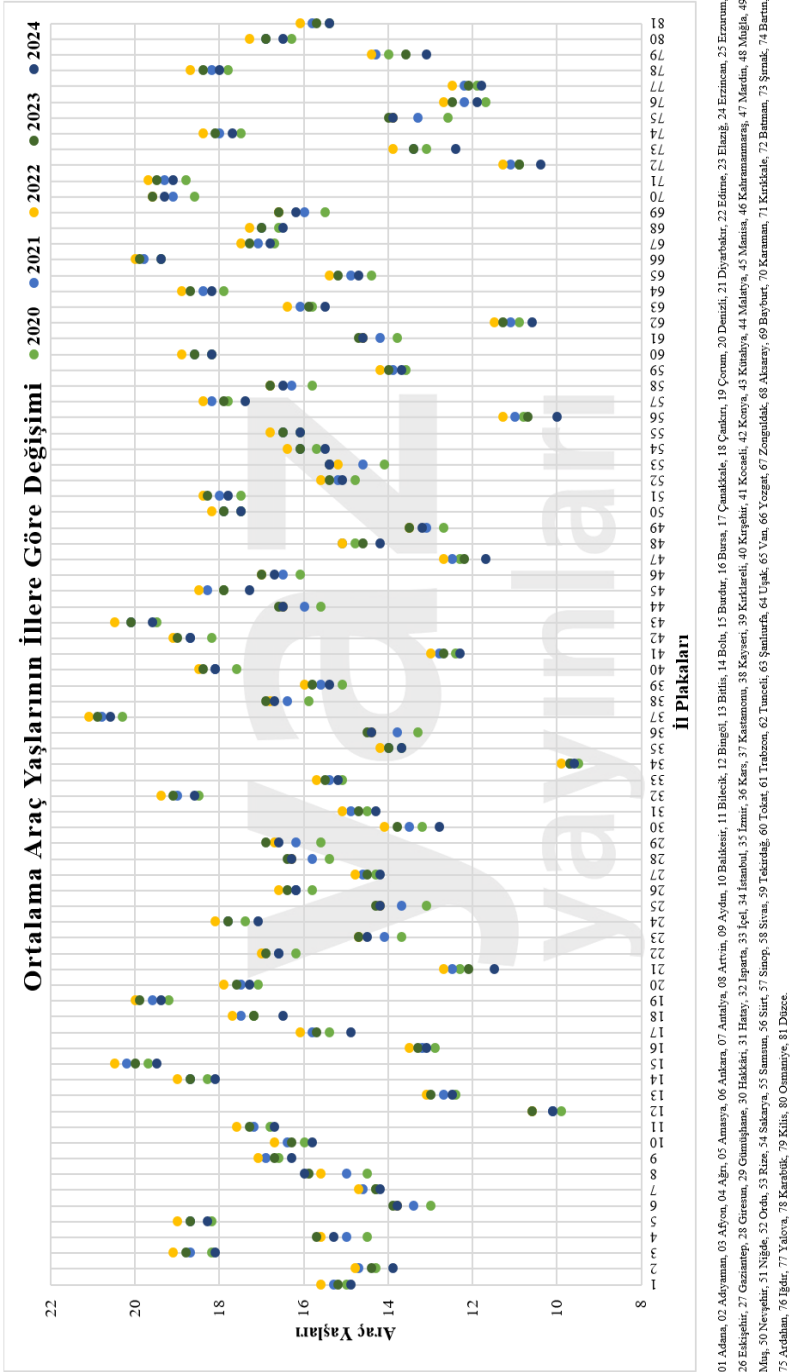
	2020	2021	2022	2023	2024
Niğde	17,5	18	18,4	18,3	17,8
Ordu	14,8	15,2	15,6	15,4	15,1
Rize	14,1	14,6	15,2	15,4	15,4
Sakarya	15,7	16,1	16,4	16,1	15,5
Samsun	16,1	16,5	16,8	16,5	16,1
Siirt	10,8	11	11,3	10,7	10
Sinop	17,8	18,2	18,4	17,9	17,4
Sivas	15,8	16,3	16,8	16,8	16,5
Tekirdağ	13,6	13,9	14,2	14	13,7
Tokat	18,2	18,6	18,9	18,6	18,2
Trabzon	13,8	14,2	14,6	14,7	14,6
Tunceli	10,9	11,1	11,5	11,3	10,6
Şanlıurfa	15,8	16,1	16,4	15,9	15,5
Uşak	17,9	18,4	18,9	18,7	18,2
Van	14,4	14,9	15,4	15,2	14,7
Yozgat	19,4	19,8	20	19,9	19,4
Zonguldak	16,7	17,1	17,5	17,3	16,8
Aksaray	16,6	17	17,3	17	16,5
Bayburt	15,5	16	16,6	16,6	16,2
Karaman	18,6	19,1	19,6	19,6	19,3
Kırıkkale	18,8	19,3	19,7	19,5	19,1
Batman	10,9	11,1	11,3	10,9	10,4
Şırnak	13,1	13,4	13,9	13,4	12,4
Bartın	17,5	18	18,4	18,1	17,7
Ardahan	12,6	13,3	13,9	14	13,9
Iğdır	11,7	12,2	12,7	12,5	11,9
Yalova	11,9	12,2	12,5	12,1	11,8
Karabük	17,8	18,2	18,7	18,4	18
Kilis	14	14,3	14,4	13,6	13,1
Osmaniye	16,3	16,9	17,3	16,9	16,5
Düzce	15,4	15,8	16,1	15,7	15,4
<i>Ortalama</i>	<i>15,36</i>	<i>15,78</i>	<i>16,14</i>	<i>15,92</i>	<i>15,52</i>

2024 yılı sonu itibari ile kayıtlı araç sayı bakımından Türkiye'nin ilk 10 şehrine ait trafikte kayıtlı araç sayısı ortalama yaşlarına ait grafikler verilmektedir.



Şekil 2. En fazla araç sayısına sahip ilk 10 şehirdeki trafikte kayıtlı araçların ortalama yaşları (TÜİK, 2025b)

Grafikler incelendiğinde Ankara hariç tüm şehirlerdeki görünüm birbirine oldukça yakındır. Trafiğe kayıtlı araç sayı bakımından Türkiye'nin ilk 10 şehrine ait trafikte kayıtlı araç sayısı ortalama yaşları 2020 – 2022 yılları arasında ciddi bir artış eğilimi göstermektedir. 2022 yılından sonra Ankara hariç diğer 9 şehirde trafikte kayıtlı araç sayısı ortalama yaşlarında ciddi bir düşüş gözlemlenmektedir. Burada Konya'daki düşüş (Şekil 2.e) daha kısıtlı kalırken Antalya (Şekil 2.ç) için bu düşüş daha keskin şekilde yaşanmıştır. Dikkat çeken diğer bir durum ise Konya ve Manisa'daki ortalama araç yaşlarının diğer şehirlere göre oldukça büyük olmasıdır. 2022 yılından sonraki araç stokundaki gençleşme diğer şehirlerden farklı olarak Ankara'da tersi yönde görülmektedir. Ankara'da 2023 yılında mevcut araç stoku daha yaşlı hale gelmiştir. Şekil 3'te ise Türkiye'deki trafikte kayıtlı araç sayısı ortalama yaşlarına ait grafik verilmektedir.



Sekil 3. Türkiye'deki trafikte kavıtlı araçların sehirler göre ortalama yaşları (TÜİK, 2025b)

Grafik incelendiğinde Türkiye'nin tüm şehirlerinde 2020 ve 2022 yılları arasında trafikte kayıtlı olan araçların ortalama yaşlarında bir artış yaşandığı görülmektedir. 2022 ve 2023 yılları değerlendirildiğinde ise Ağrı, Ankara, Artvin, Erzurum, Giresun, Gümüşhane, Kars, Kayseri, Malatya, Rize, Trabzon ve Ardahan illerinde araç stoku 2022 yılına göre 2023 yılında daha yaşlı haldedir. Mevcut iller incelendiğinde Ankara, Erzurum, Kayseri, Malatya ve Trabzon illeri hariç diğer illerde satış pazarlama kısıtlılığının etki edebileceği düşünülmektedir. Mevcut iller içerisinde sadece Artvin'de 0,3 yaşlık bir yaşlanma mevcutken diğer illerde bu değer 0,1 veya 0,2 olarak yaşanmıştır. 2024 yılına gelindiğinde ise sadece Artvin ve Rize illerinde 2022 yılına göre daha yaşlı araç stoku bulunmaktadır. Hatta Artvin'de araç stoku 2024 yılında 2023 yılına göre bile daha yaşlı hale gelmiştir.

2024 yılı itibari ile en yaşlı ve en genç araç stokuna sahip şehirler Tablo 5'te verilmektedir.

Tablo 5. Trafikte kayıtlı araç sayılarına göre en yaşlı ve en genç araç stokuna sahip ilk 5 şehir (TÜİK, 2025b)

	Sıra	Şehir	Ortalama Yaş
En yaşlı araç stokuna sahip şehirler	1	Kastamonu	20,6
	2	Kütahya	19,6
	3	Burdur	19,5
	4	Çorum	19,4
	5	Yozgat	19,4
En genç araç stokuna sahip şehirler	1	İstanbul	9,6
	2	Siirt	10
	3	Bingöl	10,1
	4	Batman	10,4
	5	Tunceli	10,6

Veriler incelendiğinde şehirler arasında ortalama araç yaşları bakımından çok keskin farklılıklar olduğu görülmektedir. Türkiye'deki en yaşlı araç stoku Kastamonu'da bulunmaktadır. Kastamonu'yu sırasıyla Kütahya, Burdur, Çorum ve Yozgat izlemektedir. Türkiye'nin en genç araç stoku ise İstanbul'da bulunmakta olup araçlar ortalama 9,6 yaşındadır. Siirt, Bingöl, Batman ve Tunceli de sırasıyla genç araçlara sahip şehirlerin bazılarıdır. Yaşlı araçların sürdürülebilir ulaşım ekosistemi ve çevreye verdiği zararlar göz önüne alındığında yaşlı araç stoku olan şehirler için araç stokunu gençleştirmek için çalışmalar yapılması gerektiği açıktır.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Türkiye'de 2015–2024 döneminde trafiğe kayıtlı araç sayılarında kayda değer bir artış yaşanmış, yaklaşık 20 milyon olan araç sayısı 2024 yılı itibariyle 31,3 milyona ulaşmıştır. Bu artış, ülke genelinde motorlu taşıt sahipliğinin hızla yaygınlaştığını gösterse de, mevcut araç stokunun yaş ortalaması incelendiğinde bir yaşlanma eğilimi gözlenmektedir. TÜİK verileri, 2024 yılı itibariyle trafiğe kayıtlı araçların ortalama yaşının 15,5 olduğunu ortaya koymakta ve bu durum, Türkiye'deki araçların büyük ölçüde yaşlı araçlardan oluştuğunu göstermektedir. Özellikle kamyon, minibüs, otobüs ve kamyonet gibi ticari araç gruplarında yaşlanma eğiliminin belirgin olduğu, buna karşılık motosikletlerde gençleşme eğiliminin öne çıktığı tespit edilmiştir.

Araç stokundaki yaşlanmanın ekonomik, çevresel ve güvenlik boyutları bulunmaktadır. Ekonomik olarak, yaşlı araçların bakım-onarım ve yakıt maliyetleri artmakta, enerji verimlilikleri azalmaktadır. Çevresel açıdan bakıldığında, yaşlı araçlarda emisyon kontrol sistemlerinin yetersizliği ve motor verimliliğinin düşüklüğü sebebiyle özellikle CO, NOx ve PM

salımlarının arttığı ve bu durumun da kentsel hava kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yarattığı görülmektedir. Güvenlik yönünden ise araç yaşı arttıkça, aktif ve pasif güvenlik sistemlerinin yıpranması sonucu ölüm ve yaralanma riskinin yükseldiği bilimsel olarak kanıtlanmıştır. Araç yaşı ile bölgesel gelir düzeyi arasında güçlü bir korelasyon bulunduğunu da literatürdeki tespitlerden biridir. Benzer şekilde Türkiye’de yüksek gelir ve sanayileşmenin olduğu şehirlerde (ör. İstanbul, Kocaeli) araç stokunun görece genç olduğu ancak düşük gelir ve sanayileşme seviyesindeki şehirlerde (ör. Kastamonu, Kütahya, Çorum, Yozgat) ise yaşlı araçların yaygın olduğu saptanmıştır. Bu durum, ekonomik kapasitenin araç yenileme davranışlarını doğrudan etkilediğini göstermektedir. Genel olarak 2020–2022 döneminde pandemi, çip krizi ve ekonomik dalgalanmalar sebebiyle araç yaşlarının arttığı, 2022 sonrası dönemde ise başta çip krizinin aşılması, yerli üretim TOGG’un piyasaya arzı ve satış teşvikleriyle gençleşme eğiliminin başladığı gözlenmiştir. Ancak bu eğilim sınırlı kalmış ve ülke genelinde yaşlı araç oranı halen yüksek seviyededir.

Araç stokunu gençleştirmenin yanı sıra daha güvenli ve sürdürülebilir ulaşım altyapısının teşkili için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Araç yenileme programları ile hurda teşviklerinin kapsamı genişletilerek eski araçların trafikten çekilmesi desteklenmelidir. Bu teşviklerin yalnızca bireysel araçlara değil, özellikle ticari araç filolarına da yöneltilmesi çevresel kazanımı artıracaktır.
- Ekonomik teşvik ve vergi düzenlemeleri ile yeni ve çevre dostu araçların (hibrit, elektrikli) erişilebilirliğini artırmak amacıyla ÖTV ve KDV oranlarında kademeli indirimler yapılabilir. Düşük gelirli bölgelerde araç yenileme kredileri ve faiz

desteği sağlanması da sosyal adalet açısından önemlidir.

- Araç muayene sistemleri, sadece mekanik uygunluğu değil, emisyon standartlarını da daha sıkı biçimde kontrol edecek şekilde yeniden yapılandırılmalıdır. Yaşlı araçların emisyon ölçüm aralıkları kısaltılmalı ve yüksek salım yapan araçlara kademeli kullanım kısıtlamaları getirilmelidir.
- Yaşlı araç stokuna sahip illerde toplu taşıma altyapısının güçlendirilmesi, bireysel araç kullanımına olan bağımlılığı azaltacaktır. Bu strateji, hem çevresel hem de trafik güvenliği açısından olumlu sonuçlar doğuracaktır.
- Elektrikli ve Hibrit Araçların Yaygınlaştırılması başlıca politikalardan biri olmalıdır. Şuan sorun olarak görülen başlıca faktör şarja erişilebilirliktir. Şarj altyapısının ülke geneline yaygınlaştırılması ve elektrikli araçlar için uzun vadeli kullanım teşvikleri (örneğin ücretsiz otopark, düşük otoyol ücreti gibi) sağlanmalıdır. Böylece araç parkı yenilenirken çevresel sürdürülebilirlik de desteklenebilir.

Belirtilen önerilerin hayata geçirilmesi doğrultusunda 2024 yılı itibari ile mevcut araç yaş ortalamalarının kayda değer şekilde düşürülebileceği düşünülmektedir. Bu amaçla hurda teşviki ve vergi avantajları ortalama araç yaşlarını düşürme vizyonuna hızlı katkılar sunabilecektir.

KAYNAKLAR

- Anderson, R. W. G. & Searson, D. J. (2015). Use of age–period–cohort models to estimate effects of vehicle age, year of crash and year of vehicle manufacture on driver injury and fatality rates in single vehicle crashes in New South Wales, 2003–2010. *Accident Analysis & Prevention*, 75, 202-210.
- Anilovich, I. & Hakkert, A. S. (1996). Survey of vehicle emissions in Israel related to vehicle age and periodic inspection. *Science of the total environment*, 189, 197-203.
- Aras, İ. K. & Acar, Y. (2022). Türkiye’de Otomotiv Sektörüne Verilen Vergi Teşvikleri Etkin Mi? Ekonometrik Bir Analiz. *International Journal of Public Finance*, 7(1), 51-72.
- Blows, S., Ivers, R. Q., Woodward, M., Connor, J., Ameratunga, S. & Norton, R. (2003). Vehicle year and the risk of car crash injury. *Injury Prevention*, 9(4), 353-356.
- Buhur, S. (2017). ÖTV ve KDV İndirimlerinin Girişimcilerin Satışları Üzerindeki Etkisi: Türkiye Örneği. *Uluslararası Girişimcilik Kongresi*, 922-929.
- Büyükdağ, N. (2021). Otomobil fiyatlarını etkileyen faktörlerin belirlenmesi: Covid-19 döneminde bir araştırma. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 18(3), 1887-1902.
- Çetin, A. C. (2020). Türkiye’deki İthal Otomobil Ve Hafif Ticari Araç Perakende Satışlarının Döviz Kuru İle İlişkisi. *Sinop Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 4(2), 401-432.

- Dağlı, E., Aydın, M. M. & Çoruh, E. (2021). Şehir İçi Ana Arterlerde COVID-19 Kısıtlamalarından Dolayı Trafik Akımlarında Meydana Gelen Değişimlerin İncelenmesi: Antalya Örneği. *İdealkent*, 12(34), 1199-1225.
- Faiz, A., Weaver, C. S. & Walsh, M. P. (1996). Air pollution from motor vehicles: standards and technologies for controlling emissions. World Bank Publications.
- Miller, T. L., Davis, W. T., Reed, G. D., Doraiswamy, P. & Tang, A. (2002). Effect of county-level income on vehicle age distribution and emissions. *Transportation research record*, 1815(1), 47-53.
- Şahin, M. (2021). Tam Elektrikli ve Hibrit Otomobillerde Vergi ve Vergi Dışı Kamusal Teşvikler. *Vergi Sorunları Dergisi*, 388, 0-2.
- Tabar, Ç. & Tokatlıoğlu, M. (2018). Küresel ekonomik kriz döneminde Türkiye'de uygulanan vergi politikalarının değerlendirilmesi. *International Journal of Public Finance*, 3(1), 27-46.
- Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK] (2025a). Motorlu Kara Taşıtları Bülteni Ocak 2025. [Çevrimiçi: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ocak-2025-54048>], [7.9.2025]
- Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK] (2025b). Biruni Merkezi Dağılım Sistemi. (Çevrimiçi) <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=95&locale=tr> [9.9.2025].
- Zhang, F., Rundus, C. R., Alshaikh, E., Peek-Asa, C. & Yang, J. (2025). Vehicle age and driver assistance technologies in fatal crashes involving teen and middle-aged drivers. *JAMA Network Open*, 8(5), e258942-e258942.

BETONARME YAPILARDA FRP KOMPOZİT MALZEMELERİN KULLANIMI

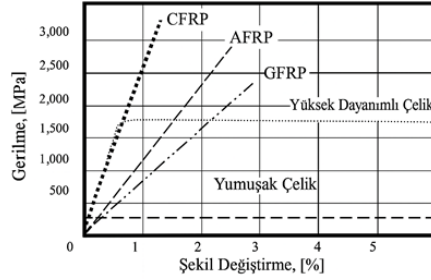
Yasin DUYSAK¹

1. GİRİŞ

Betonarme yapılar, yapım aşamasındaki hatalar ile hizmet ömürleri boyunca maruz kaldıkları çevresel ve yapısal etkiler nedeniyle zamanla taşıyıcı sistemlerinde zayıflamalar meydana gelmektedir. Donatılarda korozyon oluşması, zamana bağlı deformasyonlar, kullanım amacındaki değişiklikler, malzeme deformasyonları ve işçilik hataları gibi faktörler yapı performansını olumsuz etkilerken tasarım hataları ve yapısal düzensizlikler de özellikle deprem gibi sismik yükler altında yapı davranışını olumsuz etkilemektedir. Bu tarz durumlar yapı sünekliğini azaltarak göçme riskini artırmakta ve bu durum yapı güvenliğini tehlikeye sokmaktadır. Bu bağlamda mevcut betonarme yapıların sünek davranış kapasitesini artırmak ve güvenliğini sağlamak amacıyla güçlendirme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ülkemizde de son yıllarda mevcut yapıların güçlendirme çalışmalarında FRP kompozit malzemeleri kullanılmaya başlanmıştır (İlki ve vd., 2011). FRP kompozit malzemeleri hafif olmasından dolayı yapıya ek yükler ilave etmemesi, korozyona karşı dirençli bir malzeme olması ile donatıları korozyona karşı uzun yıllar koruyabilmesi ve uygulama kolaylığı sayesinde daha hızlı ve daha az işçilik gereksinimleri sunmasından dolayı geleneksel güçlendirme yöntemlerine kıyasla daha avantajlı bir seçenek haline gelmektedir.

¹ Arş. Gör. Dr., Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, yasinduysak@klu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1764-7455.

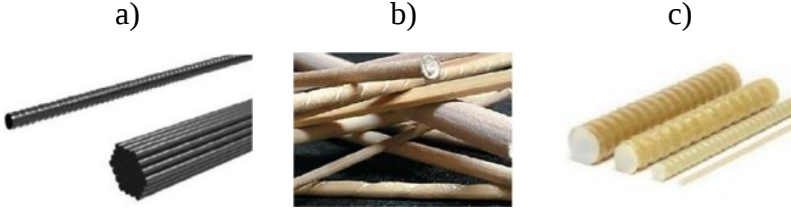
Fiber takviyeli polimer kompozit (FRP) malzemeler genellikle cam (GFRP), karbon (CFRP) ve aramid (AFRP) elyaflarından üretilmektedir (Hollaway, 2010). FRP kompozit malzemeleri Şekil 1’de gösterildiği gibi yüksek mukavemete sahiplerdir. Yüksek mukavemete sahip olmalarına rağmen betonarme elemanlarda kullanılan donatılar kadar sünek bir malzeme değildir.



Şekil 1. FRP ve donatılara ait Gerilme-Şekil Değiştirmelerinin karşılaştırılması (Oprisan vd., 2010)

Betonarme elemanların güçlendirilmesinde FRP kompozit malzemeler iki farklı yöntemle kullanılmaktadır. İlk olarak FRP kompozit malzemeler güçlendirme çalışmalarında Şekil 2’de gösterilen çubuk şeklinde betonarme elemanlara yüzeye yakın monte edilmiş içten takviye şeklinde uygulanabilmektedir. Yüzeye yakın monte edilmiş FRP donatılar veya şeritler beton yüzeyinde açılan oluklara yerleştirdikten sonra epoksi veya harç ile doldurulması şeklinde uygulanmaktadır (Sharifianjaze vd., 2022). Beton içerisine gömülü kalan FRP çubuklar beton tabakasından dolayı sıcaklık ve yangın riskinden korunmuş olmaktadır. FRP donatılı elemanlar çelik donatılı elemanlara kıyasla daha gevrek davranış sergilemekte ve servis yükleri altında büyük sehimler ve geniş çatlaklar meydana gelmektedir (Yavuz, 2011). Bu bağlamda tasarımlarında genellikle kullanılabilirlik sınır durumu belirleyici parametre olmaktadır. Başka bir yöntem olarak Şekil 3’de gösterildiği gibi katman şeklinde beton yüzeyine epoksi reçinesi ile yapıştırılarak

kullanılmaktadır. Dıştan yapıştırılan FRP kaplama basit ve uygulanabilir olması sebebiyle güçlendirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Sharifianjazi ve vd., 2022). Katman şeklinde uygulama genellikle kirişlerde çekme bölgesine veya kiriş uç bölgelerine uygulanarak kirişin eğilme ve kesme dayanımlarını arttırmak için, kolonlarda ise kolon alt ve üst uçlarına uygulanarak kesme dayanımlarını arttırmak için yapılmaktadır. Dıştan yapıştırılan FRP kaplamaların en büyük dezavantajı yapıştırmada kullanılan epoksi reçinesinin yüksek sıcaklıklara hassas olması ve FRP kaplama ile beton arasındaki aderansın yüksek sıcaklıklarda azalmasıdır (Haris ve vd., 2024).



Şekil 2. FRP donatı örnekleri a) CFRP b) AFRP c) GFRP

FRP kompozit malzemeler ile betonarme kirişler, betonarme kolonlar, betonarme döşemeler, ahşap kirişler, kâgir (yığma) yapılar ve prekast betonarme elemanlar üzerinde güçlendirme uygulamaları yapılabilmektedir.



Şekil 3. Betonarme yapılarda FRP kaplama uygulamaları
(Ahmed, 2025)

1.1. CFRP Kompozit Malzemeler

CFRP kompozit malzemeler yüksek mukavemeti ve üstün mukavemet-ağırlık oranı sayesinde hem güçlü hem de hafif bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. CFRP malzemeler yüksek çekme mukavemetine sahip olması nedeniyle güçlendirme çalışmalarında geniş bir kullanıma sahiptir ve gerilme dayanımı geleneksel çeliğe kıyasla 8 ila 10 kat daha fazla olabilmektedir (Maraş, 2021). Ayrıca CFRP kompozit malzemeleri yüksek yorulma direncine sahiptir. CFRP (Karbon Fiber Takviyeli Polimerler) bu özellikleri sayesinde inşaat mühendisliği alanı dışında otomotiv ve havacılık gibi çeşitli endüstriyel alanlarında da kullanılmaktadır CFRP kompozitlerin Young Modülü diğer kompozit malzemelere göre daha yüksektir. (Yu ve vd., 2019).

1.2. AFRP Kompozit Malzemeler

AFRP kompozit malzemeler yüksek sıcaklıklarda dahi korunan yüksek tokluk değerleri, aşınma dirençleri ve mükemmel su geçirimsizlik performansları gibi özellikleri sayesinde güçlendirme çalışmalarında kullanımı için oldukça uygun malzemelerdir. AFRP kompozit malzemeler alkali ortamlara karşı yüksek sülfat direnci nedeniyle tercih edilmektedir. Ayrıca CFRP kompozit malzemeler ile benzer performans sergilemelerine rağmen AFRP malzemelerin maliyetinin daha düşük olması ekonomik açıdan önemli bir avantaj sağlamaktadır (Mohanraj ve vd., 2022).

1.3. GFRP Kompozit Malzemeler

GFRP kompozit malzemeler inşaat sektöründe yapı elemanlarına içten takviyeli olarak kullanımı yaygın bir malzemedir. GFRP kompozit malzemeler, düşük ısı iletkenliği, yüksek mukavemet, iyi elektrik yalıtımı, yanmazlık, sertlik ve kimyasal etkilere karşı dayanıklılık gibi özellikleriyle öne çıkar.

GFRP kompozit malzemeler diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında maliyet açısından en uygun olanıdır (Maraş, 2021).

2. MEKANİK ÖZELLİKLERİ

FRP kompozit malzemeler betonarme yapısal elemanlara uygulanarak yük taşıma kapasitesini, sünekliğini ve dayanımını artırarak yapısal performansı arttırmaktadır. FRP kompozitleri kullanılarak güçlendirilen yapı elemanları, deprem sırasında yüksek enerji yutma kapasitesi göstererek sünek davranış sergilemektedir (Maraş, 2021; Akbaş ve Çalışkan, 2024). FRP çubuklarının α_1 boyuna ve α_2 enine yönlerdeki ısı genleşme katsayıları Tablo 1’de gösterilmiştir. FRP kompozit malzemelerin ısı genleşme katsayıları reçine matrisine bağlı olarak değişim göstermektedir.

Tablo 1. Fiber türüne göre ısı genleşme katsayıları

Çubuk Tipi	α_1 ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	α_2 ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
CFRP	-2.0~0.0	23.0~32.0
AFRP	-6.0~2.0	60.0~80.0
GFRP	6.0~10.0	21.0~23.0

Son yıllarda yapılan laboratuvar testleri FRP çubuklarının betonarme yapılarda donatı olarak etkili ve pratik bir şekilde uygulanabileceğini göstermiştir (Ashour, 2006). Betonarme yapılarda kullanılan çelik donatı çubuğu ve FRP kompozit çubuklarının mekanik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Takviye donatı çubuklarına ait mekanik özellikler

	Çelik	CFRP	AFRP	GFRP
Nominal akma gerilmesi, MPa	276-517	-	-	-
Çekme dayanımı, MPa	483-690	600-3690	1720-2540	483-1600
Elastisite modülü, MPa	200	120-580	41-125	35-51
Akma şekil değiştirmesi, %	0.14-0.25	-	-	-
Kopma şekil değiştirmesi, %	6.0-12.0	0.5-1.7	1.9-4.4	1.2-3.1

FRP kompozit malzemelerin basınç ve çekme altında dayanımlarında farklılık bulunmaktadır. FRP çubukların basınç dayanımı çekme dayanımının yaklaşık %55'i kadar olup elastisite modülünde basınç altında %20 daha azdır (Aydın ve Bayrak, 2021).

3. AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

FRP kompozit malzemeleri betonarme sistemlerde veya elemanlarda güçlendirme çalışmalarında çeşitli avantajlarından dolayı tercih edilmektedir ancak bazı dezavantajları da bulunmaktadır (Aydın ve Bayrak, 2021). Bu avantaj ve dezavantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir,

Avantajlar;

- Boyuna doğrultuda yüksek çekme dayanımına sahip olmak
- Yüksek yorulma dirençlerine sahip olmak
- Yüksek düktiliteye sahip olmak
- Korozyona karşı direnç
- Çeliğe oranla yoğunluğunun düşük olması
- Manyetik olması

- Elektrik iletkenliğini düşük olması
- Kolay uygulanabilirlik

Dezavantajları;

- Kopmadan önce akma meydana gelmemesi
- Enine doğrultuda düşük dayanıma sahip olmak
- Düşük elastisite modülüne sahip olmak
- Nemli ortamlarda düşük durabiliteye sahip olmak
- Betona göre liflere dik yüksek ısı genleşme katsayısı
- Anizotropik bir yapıya sahip olması
- FRP çubuklarında düşük aderans olması

4. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Söğüt (2025) yapmış olduğu nümerik çalışmada yüzeye yakın yerleştirilmiş CFRP ve GFRP çubuklar kullanarak kirişlerin eğilme momenti kapasitesindeki artışı incelemişler ve %32.9 ile %106 arasında değişen artış meydana gelmiştir. Güçlendirme için kullanılan kompozit çubukların çapındaki artış eğilme momenti kapasitesindeki artışı etkilemektedir. Maraş (2021) yapmış olduğu laboratuvar çalışmasında betonarme kirişlerin dış yüzeylerine U şeklinde CFRP veya GFRP plakalar yapıştırarak güçlendirilmiş ve betonarme kirişlerin eğilme dayanımlarını incelemişlerdir. Kirişlerde eğilme moment kapasitesinde %41 ile %125 arasında artış meydana gelmiştir. Ayrıca kirişlerin karşılayabileceği kesme kuvveti kapasitelerinde de %31 ile %74 arasında artış gözlenmiştir. Topçu ve Uygunoğlu (2020) yapmış oldukları deneysel çalışmada, GFRP kompozit malzemelerin donatılara kıyasla 10 kata kadar daha az deformasyon yaptıklarını ve kopma anına kadar doğrusal deformasyon yaptıklarını göstermişlerdir. Ayrıca FRP kompozit

donatıların çelik donatılara kıyasla %40 a kadar daha az aderansa sahip olduklarına ve asit ve korozyon etkisi altında çelik donatılara kıyasla daha az etkilendikleri sonuçlarına ulaşmışlardır. Gemi ve ark. (2020) yapmış oldukları deneysel çalışmada GFRP donatılı kirişin süneklik değerinin çelik donatılı kirişlere göre daha fazla olduğu sonucuna ulaşmışlardır. GFRP donatılı kirişlerin enerji tüketme kapasitesinin çelik donatılı kirişlere oranla 2 kat fazla olduğunu deneysel çalışma sonucunda göstermişlerdir.



Şekil 4. 4 noktalı eğilme test düzeneği (Li ve ark. 2025)

Li ve ark. (2025) sandviç kompozit boru kirişinin tamamını CFRP kompozit malzeme ile sargıladıktan sonra 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutmuşlardır. FRP kompozit malzeme ile kaplanmış kirişin yük taşıma kapasitesinde %21.19 ve eğilme rijitliğinde %22.08 artış meydana geldiği sonucuna ulaşmışlardır.

5. SONUÇLAR

FRP donatılı betonarme elemanların tasarımında geleneksel betonarme tasarım kuralları esas alınmakla birlikte FRP'nin sünek olmayan ve anizotropik yapısı nedeniyle ACI 440.2R-17 (2017), CNR-DT 293/R1/2025 (2025) ve EN 1992-1-1:2023 (2023) gibi özel yönetmeliklere ihtiyaç duyulmaktadır.

Mühendislik açısından FRP kullanımı hasar görmüş veya yetersiz kalmış yapı elemanlarının (kiriş, kolon, perde duvar) taşıma kapasitesini ve sünekliğini artırmak amacıyla veya deniz suyu ve kimyasal etkilere maruz kalan altyapı elemanlarında korozyon hasarını önleyerek yapının servis ömrünü uzatmak amacıyla kullanılabilmektedir. Sonuç olarak FRP kompozitler, betonarme yapıların deprem etkisine karşı daha güvenli, uzun ömürlü ve verimli hale getirilmesinde hayati bir rol oynamaktadır. Süneklik sorununa çözüm olarak, çelik ve FRP donatılarının birlikte kullanıldığı hibrit betonarme kirişlerin, tamamen FRP donatılı elemanlara kıyasla daha sünek bir davranış sergilediği görülmüştür (Lau ve Pam, 2010).

KAYNAKLAR

ACI Committee 440 (2017). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. ACI 440.2R-17, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.

Ahmed, A., (2025). A review on the effectiveness of FRP and hybrid wrappings for strengthening concrete columns. *Results in Engineering*, 27, 106023.

Akbaş, A. & Çalışkan, Ö. (2024). Yapıların Deprem Performansını Artırmak Amacıyla Kullanılan Malzemeler ve Güçlendirme Teknikleri. *6th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*, Konya, Turkey.

Ashour, A. (2006). Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Construction and Building Materials*, 20 (10), 1005-1015.

Aydın, A.C. & Bayrak, B. (2021). Betonarme perde duvarların farklı yapı malzemeleri açısından değerlendirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 217-240.

Bhatt, P. & Goe, A. (2017). Carbon fibres: production, properties and potential use. *Material Science Research India*, 14 (1), 52-57.

European Committee for Standardization. (2023). Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures (EN 1992-1-1:2023 E). Brussels, Belgium: CEN-CENELEC.

Gemi, L., Madenci, E. & Özkılıç, Y. O., (2020). Çelik, Cam FRP ve Hibrit Donatılı Betonarme Kirişlerin Eğilme Performansının İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 1470-1483.

Haris, M., Xiong, E., Gao, W., Samuel, M. A., Sahar, N. U. & Saleem, A. (2025). Strengthening Reinforced Concrete Members Using FRP—Evaluating Fire Performance, Challenges, and Future Research Directions: A State-of-the-Art Review. *Polymers*, 17(1), 13.

Hollaway, L. (2010). A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2419–2445.

Ilki, A., Bedirhanoglu, I. & Kumbasar, N. (2011). Behavior of FRP-Retrofitted Joints Built with Plain Bars and Low Strength Concrete. *Journal of Composites for Construction*, 15(3), 312–326.

Lau, D., & Pam., H.J. (2010). Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 32(12). 3857-3865.

Li, Y., Fang, H., Shi, H., Cao, Y. & Wang, Y. (2025). Bending performance of GFRP pultruded profile core sandwich structure reinforced by CFRP sheets. *Case Studies in Construction Materials*, 22. e04858.

Maraş, M.M. (2021). Betonarme Yapıların Güçlendirilmesinde Kullanılan FRP Kompozitin Yapısal Performansa Etkisi, *European Journal of Science and Technology*, 23, 108-119.

Mohanraj, R., Senthilkumar, S. & Padmapoorani, P. (2022). Mechanical Properties of RC Beams with AFRP Sheets under a Sustained Load. *Materials and Technology*, 56(4), 365-372.

National Research Council. (2025). Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars (CNR-DT 203/R1/2025). Rome, Italy: CNR.

Oprisan, G., Taranu, N., Munteanu, V. & Entuc, I. (2010). Application of modern polymeric composite materials in industrial construction. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Constructions Architecture Section*, 3(3), 121-130.

Sharifianjazi, F., Zeydi, P., Bazli, M., Esmailkhanian, A., Rahmani, R., Bazli, L. & Khaksar, S. (2022). Fibre-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Members under Elevated Temperatures: A Review on Structural Performance. *Polymers*, 14(3). 472.

Söğüt, K. (2025). Betonarme kirişlerin eğilmeye karşı güçlendirilmesi, E.TOPÇU, Akademik Perspektiften İnşaat Mühendisliği (1-14) YAZ Yayınları.

Topçu, İ. B. & Uygunoğlu, T. (2020). GFRP Çubukların Özellikleri ve Prefabrik Altyapı Elemanlarında Kullanımı. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 7(1), 169-178.

Yavuz, G. (2011). Lif takviyeli polimerlerin betonarme kirişlerde donatı olarak kullanımı. *e-Journal of New World Sciences Academy*, 6(4). 1001-1015.

Yu, T., Zhang, Z., Song, S., Bai, Y. & Wu, D. (2019). Tensile and flexural behaviors of additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced polymer composites. *Composite Structures*, 225, 1111.

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ DEĞERLENDİRMELERİ

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com