

İnşaat Mühendisliğinde Tasarım, Analiz ve Sürdürülebilirlik Perspektifleri



Editör
ONUR SARAN



BİDGE Yayınları

**İnşaat Mühendisliğinde Tasarım, Analiz ve Sürdürülebilirlik
Perspektifleri**

Editör: ONUR SARAN

ISBN: 978-625-8567-22-9

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

İnşaat mühendisliği, değişen çevresel koşullar, artan afet riskleri ve teknolojik gelişmeler doğrultusunda sürekli dönüşüm geçiren bir disiplindir. Günümüzde mühendislik çözümlerinin yalnızca güvenli ve ekonomik olması değil, aynı zamanda sürdürülebilir, çevreyle uyumlu ve uzun vadede toplumsal fayda sağlayan nitelikte olması beklenmektedir.

Bu kitap, “İnşaat Mühendisliğinde Tasarım, Analiz ve Sürdürülebilirlik Perspektifleri” başlığı altında, inşaat mühendisliğinin farklı alt alanlarında yürütülen güncel çalışmaları bir araya getirmektedir. Kitapta; yapı ve geoteknik mühendisliğine ilişkin tasarım ve analiz yaklaşımlarının yanı sıra, deprem sonrası yapı kullanımı, iklim ve kuraklık temelli değerlendirmeler, ulaştırmada sürdürülebilirlik, enerji verimliliği, yeşil bina farkındalığı ve veri temelli mühendislik uygulamaları ele alınmaktadır. Bölümler, hem kuramsal altyapıyı hem de mühendislik pratiğinde karşılaşılan problemlere yönelik çözüm önerilerini içerecek şekilde hazırlanmıştır. Bu yönüyle eser, akademik çalışmalar yürüten araştırmacılar kadar uygulamada görev alan mühendisler için de yol gösterici bir kaynak olmayı amaçlamaktadır.

Bu kitabın, inşaat mühendisliği alanında güncel yaklaşımların tartışılmasına katkı sağlaması ve gelecekte yapılacak çalışmalara zemin oluşturması temennisiyle hazırlanmıştır.

Dr. Öğr. Üyesi ONUR SARAN

VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇİMENTO TEKNOLOJİLERİ:
ÜRETİM, PERFORMANS VE ÇEVRESEL ETKİLER
ÜZERİNE GÜNCEL BİR AKADEMİK DEĞERLENDİRME 1

ERSİN AYHAN

ÇELİK TAŞIYICI SİSTEMLERDE ÇAPRAZ DÜZENİNİN
YANAL İTKİ KAPASİTESİ VE DOĞRUSAL OLMAYAN
DAVRANIŞ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ18

MEHMET FETHİ ERTENLİ

DEĞİŞEN BANT PENCERE BOŞLUK MESAFELERİNDE
KISA KOLON DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ39

ALPER ÖZMEN

YALITIMLI MALZEME KULLANIMI VE TASARRUF
ÜZERİNE ANALİTİK DEĞERLENDİRME, İKİZ DÖNÜŞÜM 55

ARİF HİKMET ÇAKOĞLU

YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİNDE PERİYOT UZAMASININ
HESABI71

KANAT BURAK BOZDOĞAN, ERDİNÇ KESKİN

ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ VE GEOTEKNİK
MÜHENDİSLİĞİNDE ÖNEMİ90

ONUR YAVAN, ERDİNÇ KESKİN

GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE DİSİPLİNLERARASI
YENİLİKÇİ UYGULAMALAR VE YAKLAŞIMLAR107

PELİN YÜKSEL KÖKEN, ATİLA DEMİRÖZ

BİTİŞİK NİZAM YAPILARDA ANKRAJLI FORE KAZIK
UYGULAMASI197

MERTCAN YAKUT, MUSTAFA VEKLİ

FARKLI PÜRÜZLÜLÜKTEKİ İSTİNAT DUVARI
TABANLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ215

BESTAMİ MİRAC SERT, BAHADIR OK, SAMİ DÖNER

AFFEDEN YOL UYGULAMALARINDA KURTARMA ALANLARI ÜZERİNE GENEL BİR BAKIŞ	235
--	-----

ABDULLAH MALTAŞ

ULAŞTIRMADA SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMI	251
---	-----

ÖZLEM BATTAL ŞAL

DERİN ÖĞRENME İLE ASFALT ÇATLAKLARININ TESPİTİ	282
---	-----

MUZAFFER ASLAN, İHSAN GÜZEL

KARAYOLLARINDA ÜSTYAPI YÖNETİM SİSTEMİ: TÜRKİYE UYGULAMALARI, MEVCUT DURUM VE DEĞERLENDİRMELER	309
--	-----

MUHAMMED ERTUĞRUL ÇELOĞLU, MUSTAFA AKPOLAT, İHSAN GÜZEL

Kuraklık analizinde yağış, etkili yağış ve evapotranspirasyon verilerine dayalı kuraklık indislerinin kullanımı	334
--	-----

FEVZİYE AYÇA SARAÇOĞLU

DEPREM SONRASI KAMU BİNALARININ TOPLU BARINMA VE KOORDİNASYON MERKEZİ OLARAK KULLANIMINA DAİR DEĞERLENDİRMELER	362
--	-----

HAKAN AKBABA, HALİL NOHUTCU

İNŞAAT SEKTÖRÜNDE ÇALIŞAN İNŞAAT TEKNİKERİ VE İNŞAAT MÜHENDİSLERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇEVRE VE YEŞİL BİNA SERTİFİKASYON SİSTEMİ FARKINDALIKLARI	379
--	-----

MEHMET ANIL KIZILASLAN

YÜKLENİCİLERİ ETKİLEYEN RİSK FAKTÖRLERİNİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK BİR LİTERATÜR DEĞERLENDİRME YAKLAŞIMI	397
---	-----

GİZEM GÖKKAYA, ABDULKADİR BUDAK

BÖLÜM 1

SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇİMENTO TEKNOLOJİLERİ: ÜRETİM, PERFORMANS VE ÇEVRESEL ETKİLER ÜZERİNE GÜNCEL BİR AKADEMİK DEĞERLENDİRME

1. ERSİN AYHAN¹

Giriş

Çimento, dünya çapında kütle olarak en çok üretilen madde olup, su ve mineral agregalar ile birleşerek beton gibi malzemeleri oluşturmaktadır. İnşaat sektöründe köprüler, gökdelenler ve yollar gibi yapılar için temel bir bileşen olan çimento, inşa edilmiş çevrenin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Sürdürülebilir dünya hedefleri doğrultusunda çimento esaslı malzemelere olan talep giderek artmaktadır (Scrivener, John ve Gartner, 2018). Dünyanın en önemli yapı malzemesi olan beton, yılda 4,5 milyar ton üretilen Portland çimentosundan (PÇ) oluşmaktadır. Bu önemli çimento üretimi, 2023'te 1,57 milyar ton CO₂ emisyonu yapması öngörülen büyük bir karbon ayak izine katkıda bulunmakta ve bir ülke olarak ele alınsaydı bu üretim, Çin, ABD ve Hindistan'ın ardından küresel olarak dördüncü en büyük CO₂ emisyonu yapan ülke konumuna getirmiş olurdu (Volaity ve ark., 2025). Çimento endüstrisi, fabrikalar tarafından kullanılan tüm enerjinin yaklaşık %12-15'ini kullanmaktadır. Sonuç olarak, bu alt sektör çimento üretmek amacıyla fosil yakıtları yaktığı için havaya CO₂ salmaktadır. Tüm CO₂ emisyonlarının yaklaşık %7'si çimento endüstrisinden

¹ Dr.Öğr.Üyesi, Siirt Üniversitesi, İnşaat Teknolojisi, Orcid: 0000-0002-2108-0199

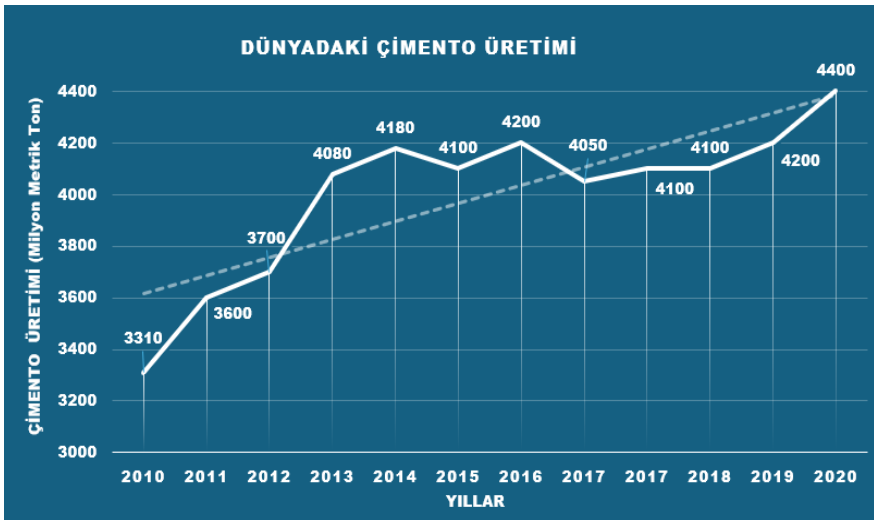
kaynaklanmaktadır (Ali, Saidur ve Hossain, 2011). Çimento ve beton için beklenen talebi aynı anda karşılayarak CO₂ emisyonlarını azaltmak çok zor bir durumdur. Bunun nedeni, endüstrinin çıktısının doğrudan ekonomik büyüme ile bağlantılı olmasıdır. Büyüyen talebi karşılamaya devam ederken betonu daha çevre dostu hale getirmenin bir yolunu bulmak oldukça önemlidir. Karbon ayak izini azaltmak ve beton üretim süreçlerinin verimliliğini artırmak için yenilikçi stratejilerin uygulanmasını gerekmektedir (Althoey, Ansari, Sufian ve Deifalla, 2023). Son yıllarda geliştirilen kompozit çimentolara ilgi giderek artmaktadır. Endüstriyel araştırmalar, toz malzemeler, agregalar ve lifler içeren yüksek performanslı çimentolu kompozitlere odaklanmıştır. Bu çalışmalar, sürdürülebilir ek çimentolu malzemeler, agregalar ve liflerin dahil edilmesi yoluyla mekanik özellikleri artırmayı ve aynı zamanda karbon ayak izini azaltmayı amaçlamaktadır. Bu odaklanma, düşük karbonlu, yüksek performanslı çimentolu kompozitlerin geliştirilmesini ve kullanımını teşvik etmektedir (Yang ve ark., 2024). Hükümetler Arası İklim Değişikliği Panelinde, 1,5°C hedefine ulaşmak için küresel CO₂ emisyonlarının 2050 yılına kadar %65-90 oranında azaltılması gerektiği, bunun da çimento ve beton endüstrisinin sera gazı emisyonlarında önemli azalmalar gerektirdiği belirtilmiştir. Alternatif çimentolu malzemelerin kullanılması ve iyileştirilmiş beton karışımı tasarımları, potansiyel olarak emisyonları %4 ila %12 oranında azaltabilmektedir. Karbon yakalama gibi yenilikçi çözümler ve çimentoya alternatifler daha gelişmiş çalışmalar gerektirmektedir. Beton esaslı yapıların ömrünü uzatmak çevre dostluğunu ön plana koyarak üretimden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını yaklaşık %14 civarında azaltabilmektedir (C. Li, Li, Ren, Zheng ve Jiang, 2023).

Çimento Üretim Teknolojileri ve Klinkerleşme Sürecinin Bilimsel Temelleri

Çimento, kil ve kireçtaşı karışımının öğütülerek 1450°C'ye kadar ısıtılmasıyla oluşturulan bir malzemedir. Bu işlem sırasında fırında kimyasal bir dönüşüm gerçekleşir ve klinker olarak bilinen yeni bir bileşik üretilmektedir (Scrivener, John ve Gartner, 2018).

Çimento fabrikasındaki kalsinasyon süreci çevreyi önemli ölçüde etkilemektedir. Kireçtaşının termal ayrışması sırasında CO₂'nin yaklaşık %50-60'ı doğrudan salınmaktadır. Çimento fırınlarında fosil yakıtların yanması, karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %40'ını oluştururken, CO₂ emisyonlarının %10'u, öncelikle çimento ve ham maddelerin öğütülmesi sırasında olmak üzere, elektrik tüketimiyle ilgili dolaylı kaynaklardan kaynaklanmaktadır (Wojtacha-Rychter, Kucharski ve Smolinski, 2021).

Şekil 1 Dünyadaki Çimento Üretimi

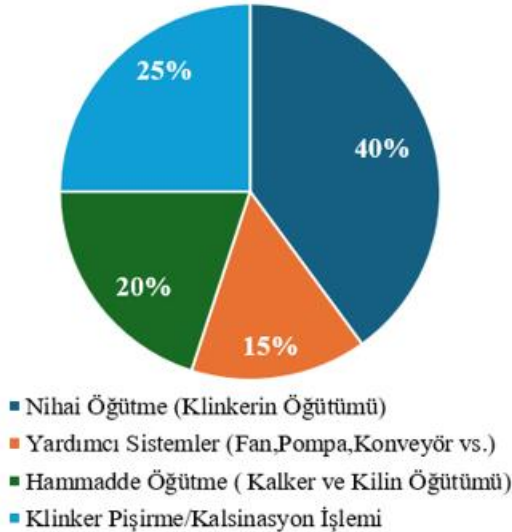


Kaynak: (Sahoo, Kumar ve Samsher, 2022)

Dünyada çimento üretimindeki artışın 2010 yılından 2014 yılına kadar devamlı bir artış eğiliminde olduğu ancak 2014 yılından sonra bir düşüş eğiliminin yaşandığı, düşüş eğiliminin de 2017 yılı itibari ile yükselişe geçtiği ve tüm yıllar içerisinde en çok üretimin 2020 yılı itibari ile 4400 milyon ton üretime ulaştığı görülmektedir. 2021 yılında ise Dünyada çimento üretimindeki liderlik 2500 milyon ton ile Çin'de iken onu takip eden Hindistan ikinci sıra ile 330 milyon ton üretime ulaşmıştır (Sahoo, Kumar ve Samsher, 2022). Çimento üretim sürecinde ince ve kaba olmak üzere genel

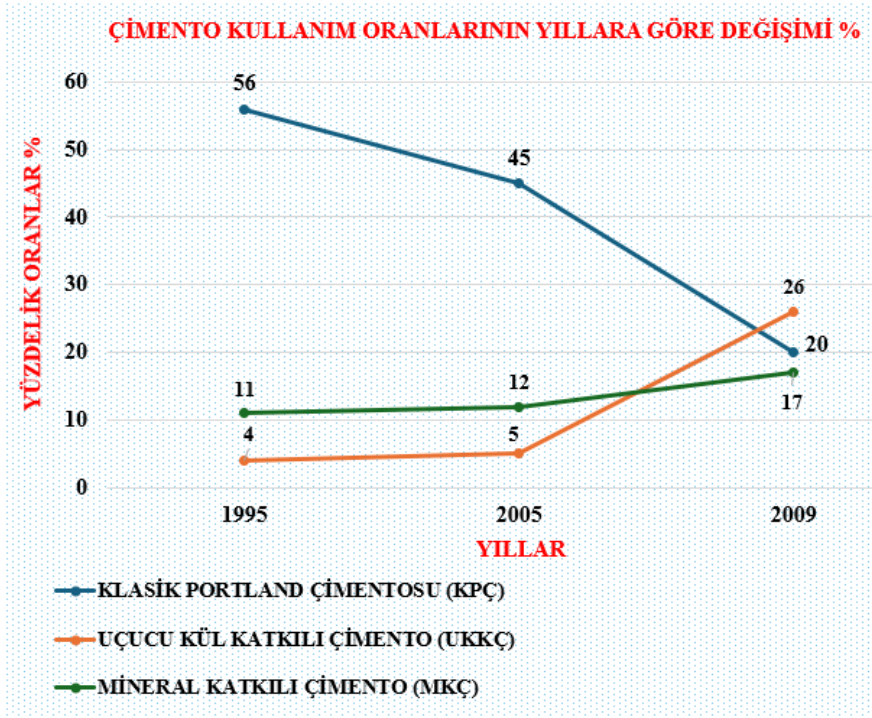
öğütmenin toplam harcanan enerjinin yaklaşık %60'ını oluşturduğu söylenebilir. Bu oranın yüksek bir oran olduğu göz önüne alındığında teknolojik olarak daha gelişmiş birtakım önlemler ile daha ekonomik, enerji verimliliğini esas alan yenilikçi uygulamalara ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır. Bu bakımdan çimento üretiminin yüksek enerji tüketimi sebebi ile bu tüketimi azaltacak yeni teknolojilerin geliştirilmesi ekonomik ve çevreci bir anlayışa hizmet edecektir (Madlool, Saidur, Hossain ve Rahim, 2011). Klinker üretiminde enerji verimliliği çerçevesinde çimento klinkeri üretimi için ihtiyaç olunan enerji talebi son birkaç on yıllık süreç içerisinde hissedilir derecede azalmıştır. Yeni tesislerde kullanılan yeni teknikler ile çok aşamalı ön ısıtıcılar ve aynı zamanda ön kalsinasyon fırınlarına sahip kuru proses fırınları sayesinde klinker üretiminde ton başına 2900 ile 3300 megajoule enerji harcanmaktadır. Tüm tesisler için geçerli olmasa da enerji tüketimini azaltmanın ana faktörlerinden biri diğeri de fırın boyutudur (Schneider, Romer, Tschudin ve Bolio, 2011).

Şekil 2 Çimento Üretim Ekipmanları Arasındaki Enerji Dağılımı Grafiği



Kaynak : (Madlool, Saidur, Hossain ve Rahim, 2011)

Şekil 3 Çimentoda Kullanım Oranlarının Yıllara Göre Değişimi %



Kaynak : (Schneider, Romer, Tschudin ve Bolio, 2011)

Küresel iklim değişikliği konusunda artan endişeler enerji verimliliği konusunda çimento üretimine artan bir odaklanma oluşmaktadır. En önemli hedefler arasında enerji tüketimini azaltmak, üretim yöntemlerini yenilemek, enerji verimliliğini artırmak, atık ısıyı geri kazanmak, klinker/çimento oranını düşürmek, alternatif hammaddeler kullanmak ve fosil yakıtlardan alternatif enerji kaynaklarına geçmek yer almaktadır. Doğrudan sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeli neredeyse tükendiğinde, CO₂ yakalama ve depolama gibi alternatif azaltma stratejilerini keşfetmek zorunlu hale gelmektedir (Mikulčić, Klemeš, Vujanović, Urbaniec ve Duić, 2016).

Klasik Portland Çimentosunun (KPÇ) çimentonun geliştirilmesi ve CO₂ emisyonlarının azaltılması bağlamında yapılan alternatif çimentoların geliştirilmesi sonucunda geliştirilen yeni karışım yöntemleri sayesinde katkılı çimentolar geliştirilmiştir. Yapılan bir araştırmada çimento üretiminde yenilikçi anlayışın bir parçası olarak geliştirilen yöntemlerin zamana bağlı etkisinin ortaya çıktığı anlaşılmıştır. Çalışmadaki tespitlerde 1995, 2005 ve 2009 yıllarına ilişkin yapılan değerlendirmede KPÇ'nin yüzdelik diliminin 1995 ten 2009'a doğru %56 dan %20 ye düştüğü, tam aksine Uçucu Kül Katkılı Çimentonun (UKKÇ) kullanımının %4 ten %26 ya çıktığı, Mineral Katkılı Çimentonun (MKÇ) da %11 den %17 ye çıktığı tespit edilmiştir. Bu durum UKKÇ ve MKÇ kullanımının artmasının yenilikçi fikirlerin işe yaradığını ve sürdürülebilirlik ilkesi kapsamında umut verici olduğunu göstermiştir (Schneider ve ark., 2011).

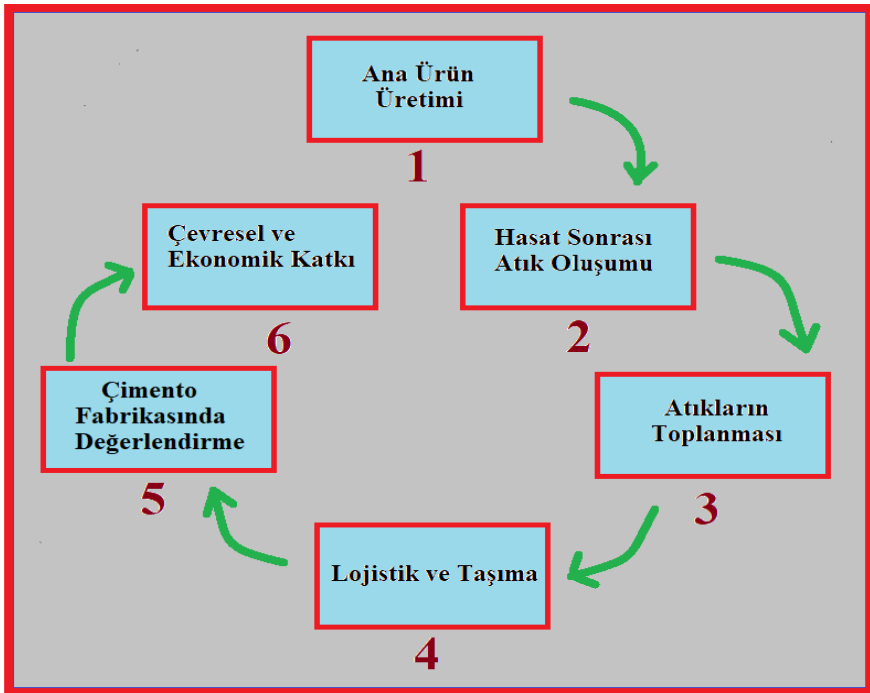
Çimento katkıları, beton üretiminde çimento veya klinkerin bir bölümünü ikame ederek hem maliyeti hem çevresel etkiyi azaltır; dayanımı ve dayanıklılığı artırır. Geleneksel olarak uçucu kül ve cüruf en sık kullanılan çimento katkılarıdır; ancak tedarik sorunları nedeniyle yeni atık bazlı ve doğal çimento katkı türleri üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır. Bu malzemelerin temel avantajı, kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek betonun dayanımını oluşturan C–S–H jelini üretmeleridir (Juenger ve Siddique, 2015).

Silika dumanı, metakaolin ve yüksek fırın cürufu gibi katkılar, uygun ikame oranlarında basınç dayanımını, klorür penetrasyon direncini ve mikro yapısal yoğunluğu belirgin biçimde artırırken; uçucu kül uzun vadeli dayanım gelişimini desteklemektedir. Pirinç kabuğu külü ve palm yağı külü gibi tarımsal yan ürünler ise dikkatli kullanıldığında dayanıklılığı iyileştirebilmektedir. Ayrıca, geri dönüştürülmüş cam, kalsine kil, yumurta kabuğu tozu gibi alternatif ek katkılı çimentolar hem çevresel sürdürülebilirliği artırmak hem de atık malzemeleri yeniden değerlendirmek açısından umut verici sonuçlar sunmaktadır. Mikroyapısal analizler (SEM) ise bu katkıların gözenekliliğini azalttığını ve C–S–H jel oluşumunu teşvik ederek betonun mekanik

özelliklerini güçlendirdiğini ortaya koymaktadır (Ahmed, 2024). Uçucu külün katkı olarak ek bir çimento karışım malzemesi olarak dahil edilmesi malzeme özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir ve çevresel bakımdan ekolojik avantajlar sunmaktadır; ancak, uçucu külün çimento kompozitinin performansını olumsuz etkilediği optimum seviye yaklaşık %20 civarındır (G. Li ve ark., 2022).

Alit, belit, alüminat ve ferrit çimentonun birincil bileşikleridir ve çimento hidrasyonunda yer alan temel bileşenlerdir. Hidratasyon ısısı açığa çıkış hızı ve nihai beton dayanımı öncelikle bileşimlerine bağlı olduğundan, miktarlarının tahmini çok önemlidir (Shim, Lee, Yang, Noor ve Kim, 2021).

Şekil 4 Tarımsal Atıkların Çimento Üretimindeki Döngüsel Süreçleri



Kaynak : (Uddin, Ali, Sabir, Petrillo ve De Felice, 2023)

Fosil yakıtların meydana getirdiği çevresel olumsuz etkileri azaltmak konusunda gelişmiş ülkeler çimento endüstrisinde döngüsel süreçleri daha çok benimseye başlamıştır. Önemli bir yaklaşım, çimento üretiminde tarımsal atıklar gibi atık ürünlerin fosil yakıtların yerine kullanılmasıdır. Bu uygulama sadece karbon emisyonlarını azaltmakla kalmıyor, aynı zamanda çimento endüstrisinin ekonomik uygulanabilirliğini de artırmakta ve gelişmiş ülkeler tarafından yürütülen sürdürülebilir bir döngüsel ekonomi girişimini temsil etmektedir (Uddin, Ali, Sabir, Petrillo ve De Felice, 2023).

Hidratasyon Mekanizması, Mikro Yapı Gelişimi ve Performans Parametreleri

Çimentolu malzemelerde hidratasyon, sıvı haldeki süspansiyonu ortam sıcaklığında katı forma dönüştürmek için bir ihtiyaçtır. Bu süreç, çimento fazlarının yeni hidrat bileşikleri oluşturmak için suyla etkileşimini içermekte ve bu da mikro yapısal gelişimi etkilemektedir. Hidrasyonu yöneten termodinamik ve kinetik ilkelerin kapsamlı bir şekilde anlaşılması, sürdürülebilirlik için esas olmak ile beraber yeni bağlayıcı sistemlerin yenilikçiliğini yönlendirmekte, ilave malzemelerin daha iyi bir şekilde entegre olmasını ve mikro yapısal düzenleme yoluyla performansı optimize ederek malzeme mukavemetini, porozitesini artırmaktadır (Scrivener ve Nonat, 2011).

Çimentolu malzemelerin performansı, laboratuvarlarda test edilen doğal özelliklerinden ve şantiyedeki yapım tekniklerinden ve kürleme koşullarından etkilenmektedir. Sadece mukavemete dayalı kalite kontrolü genellikle işe yaramaz; kötü saha prosedürleri malzemeyi daha gözenekli hale getirebilir ve ömrünü kısaltabilmektedir. Mikroyapısal koşulları iyileştirmek ve mineral katkı maddelerinden en iyi sonucu almak için şantiyedeki inşaat uygulamalarının da doğru yapılması gerekmektedir. Modern malzeme teknolojilerinden en iyi şekilde yararlanmak için, malzemeleri sıkı kalite kontrolü ve performans ölçütleriyle

birleştiren entegre bir yaklaşımın kullanılması gerekmektedir (Bentur ve Mitchell, 2007).

Mikroyapısal gelişimin anlaşılmasında, kristal fazların tanımlanması için X-ışını kırınımı (XRD), morfolojik ve faz analizi için taramalı elektron mikroskobu (SEM), gözenek dağılımı ve porozite ölçümü için cıva porozimetresi (MIP) ve hidrasyon ürünlerinin termal ayrışımını belirlemek üzere termogravimetrik analiz (TGA) gibi analitik teknikler yaygın olarak kullanılmaktadır (Choi, 2024). Bu bakımdan Mikroyapısal gelişimin anlaşılmasında, porozite dağılımı, hidrasyon ürünlerinin kristalografik yapısı ve geçirimsilik ilişkisi gibi parametreler, XRD, SEM, MIP ve TGA gibi ileri analitik yöntemlerin kullanımıyla net biçimde ortaya konulabilmektedir. Ayrıca, çimentolu sistemlere mineral katkılar eklendiğinde gerçekteşen puzolanik reaksiyonlar, C–S–H oluşumunu artırarak kapiler boşlukları küçültmekte ve böylece toplam poroziteyi azaltarak betonun dayanıklılık performansını yükseltmektedir. Bu mikroyapısal iyileşmeler, betonun su emme ve klorür difüzyonuna karşı direncini artırmakta ve uzun vadeli performansını olumlu yönde etkilemektedir (Vigor, Prentice, Xiao, Bernal ve Provis, 2024). Performans parametreleri açısından erken ve geç dayanım, rötre özellikleri, ısı gelişimi ve dayanıklılık bileşenleri (sülfat etkisi, alkali-agrega reaksiyonu, karbonatlaşma vb.) çimentonun mühendislik değerini belirleyen kritik göstergelerdir (Neville, 2011). Nitekim düşük hidrasyon ısısına sahip çimentolar büyük hacimli dökümlerde çatlama riskini düşürürken; yüksek reaktiviteye sahip puzolanik katkılar betonun uzun dönem performansını artırmaktadır (Mehta ve Monteiro, 2014).

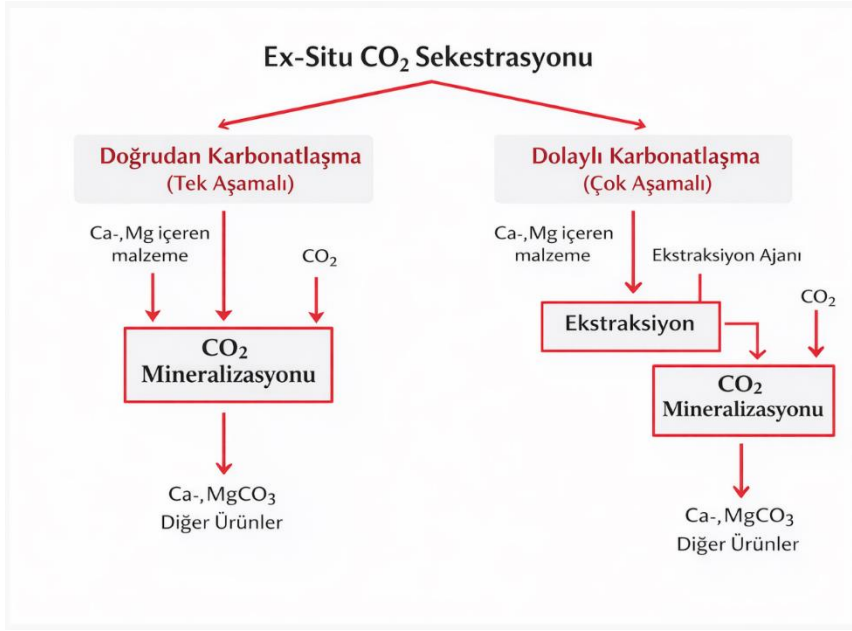
Sürdürülebilir Çimentolar ve Düşük Karbonlu Bağlayıcı Teknolojileri

Küresel iklim hedefleri doğrultusunda çimento sektöründe düşük karbonlu bağlayıcıların geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Geniş ölçekli çalışmalar, klinker oranının azaltılması, endüstriyel atık katkılarının kullanılması ve yeni nesil bağlayıcı sistemlerinin

geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır (Scrivener, John ve Gartner, 2018). Uçucu kül, cüruf ve silis dumanı gibi endüstriyel yan ürünlerin takviye çimentolu malzeme olarak dahil edilmesi, sadece çimento üretiminin çevresel etkisini azaltmakla kalmıyor, aynı zamanda betonun dayanıklılık performansını da artırmaktadır (Del Bosque, De Rojas, Medine, Barcala ve Medine, 2021).

Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcı sistemler, son yıllarda sürdürülebilir yapı malzemeleri alanında Portland çimentosuna önemli bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bu malzemeler, küresel iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynamaktadır çünkü fazla karbon salmamak ile beraber yüksek erken mukavemete sahiptirler ve sert kimyasal koşullara karşı oldukça dayanıklı bir yapıya sahiptirler. Çeşitli endüstriyel yan ürünlerden alkali aktivasyonlu bağlayıcılar üretme potansiyeli ile mekanik ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirdiğinin gösterilmiş olması, onları gelecekteki beton yeniliklerinin ön saflarına yerleştirmektedir (Provis, 2018). Alkali ile aktive edilmiş malzemelerin, uygun tasarım koşulları altında zararlı çevre etkilerine karşı güçlü bir dayanıklılığa sahip olduğunu gösteren son araştırmalar bu malzemelerin, özellikle klorür ve sülfat iyonu geçişine karşı dayanıklılıkları, karbonatlaşma davranışlarının bağlayıcı sistemine bağlı olarak kontrol edilebilmeleri ve donma-çözülme döngülerine karşı dayanıklılıkları, altyapı ve zorlu çevre uygulamaları için umut verici alternatifler olduğunu göstermektedir. Ek olarak, uygun bileşen seçimi mikroyapısal geçirgenlik ve kararlılığı önemli ölçüde artırmaktadır (Zhang, Shi, Zhang ve Ou, 2017). Elde edilen bütün dayanıklılık avantajlarına ilave olarak, alkali ile aktive edilmiş malzemelerin çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli fırsatlar sunduğu görülmektedir. Bu kapsamda, CO₂ mineral dönüşümü gibi yenilikçi teknolojilerle birleştirildiğinde hem mukavemet özellikleri hem de karbon ayak izinin azaltılması bakımından sektöre iki yandan katkı sağlayabilecektir.

Şekil 5 Ex-Situ CO₂ Sekestrasyonu



Kaynak : (Zajac, Skocek, Haha ve Deja, 2022)

CO₂'in uzaklaştırılıp tutularak izole edilme süreci olan sekestrasyon işlemi CO₂ mineral dönüşümü, CO₂'i kararlı karbonatlara dönüştürerek proses emisyonlarını azaltmak için kullanılan bir teknolojidir ve karbon yakalama ve depolamaya alternatif veya ek bir teknik olarak hizmet etmektedir. CO₂ mineral dönüşümü, çimento üretiminden kaynaklanan baca gazı CO₂'i doğrudan kararlı karbonatlara dönüştürerek, işlemle ilgili CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilmektedir (Zajac, Skocek, Haha ve Deja, 2022). Bu bağlamda, mineralleşme işlemleri hem CO₂'i doğrudan bağlayarak hem de CO₂ ile magnezyum ve kalsiyum açısından zengin mineraller arasındaki reaksiyonları hızlandırarak ikili bir rol üstlenmektedir. Bu sadece çevresel avantajları artırmakla kalmamakta, aynı zamanda ortaya çıkan karbonat ürünlerinin ek çimentolu malzemelere dönüştürülmesini de kolaylaştırmaktadır.

Ayrıca, oluşan kararlı karbonat fazları çimento ve beton gibi yapı malzemelerinde hammadde veya katkı maddesi olarak kullanılabilmektedir (Ostovari, Sternberg ve Bardow, 2020).

Çimento Endüstrisinde Gelecek Eğilimler, Dijitalleşme ve Sonuç

Yapay zeka, özellikle de derin öğrenme alanındaki son gelişmeler, çimento üretimi gibi birçok alana, insanlara dayalı geleneksel manuel üretim yöntemlerinden uzaklaşarak "akıllılaşma"nın yeni bir modeline geçme konusunda yeni fırsatlar sunmaktadır (Lyu ve ark., 2024). Bu teknolojiler sayesinde, üretim süreçlerinde enerji tüketiminin azaltılması, proses verimliliğinin artırılması ve ürün kalitesinin standartlaştırılması mümkün hale gelmektedir. Yaşam döngüsü analizi ve karbon ayak izi hesaplama yöntemleri, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda çimento ürünlerinin çevresel performansını değerlendirmek için giderek daha önemli araçlar haline gelmiştir. Yakın tarihli bir çalışmada vurgulandığı gibi, yapay zekâ destekli sistemler hem çimento endüstrisindeki operasyonel süreçleri optimize etmede hem de çevresel etkileri analiz etmede kritik bir rol oynamaktadır. Yapay zeka destekli metodolojiler, enerji verimliliğini artırmada, süreç parametrelerini optimize etmede ve çimento üretiminin genel sürdürülebilirliğini teşvik etmede önemli bir potansiyel göstermiştir. Eş zamanlı olarak, bu süreçlerin çevresel etkilerini değerlendirmek ve azaltmak için yaşam döngüsü değerlendirmesi ve karbon ayak izi analizleri giderek daha fazla kullanılmaktadır (Generowicz-Caba ve Kulczycka, 2025). Bu yöntemler, operasyonel verimliliği artırmayı ve karbon yoğunluğunu düşürmek için üretim süreçlerini değiştirmeyi kolaylaştırmaktadır. Yapay zekâ ve veri odaklı karar destek sistemlerini kullanarak alternatif bağlayıcılar ve düşük klinkerli çimentolar oluşturmak, çevre üzerindeki etkileri dikkate alarak ham madde seçimi ve işleme koşullarının optimizasyonuna yardımcı olmaktadır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi ve karbon ayak izi çalışmaları, farklı üretim durumlarına bakmak ve çevre

zerinde en az etkiye sahip olanları ortaya çıkarmak için önemli araçlar haline gelmiştir. Bu kapsamlı plan, imento endüstrisinin düşük karbonlu üretime uzun vadeli geçişine yardımcı olan stratejik bir ereve oluşturmak için dijitalleşmeyi çevresel hedeflerle birleştirmektedir (Marandi ve Shirzad, 2025).

Literatür bulguları, imento sektörünün hem teknolojik hem çevresel açıdan köklü bir dönüşüm sürecinde olduğunu göstermekte; düşük karbonlu sistemlerin geliştirilmesi ve performans odaklı tasarım yaklaşımlarının yaygınlaştırılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kaynakça

Ahmed, A. (2024). Assessing the effects of supplementary cementitious materials on concrete properties: A review. *Discover Civil Engineering*, 1(1). doi:10.1007/s44290-024-00154-z

Ali, M., Saidur, R., & Hossain, M. S. (2011). A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2252–2261. doi:10.1016/j.rser.2011.02.014

Althoey, F., Ansari, W. S., Sufian, M., & Deifalla, A. F. (2023). Advancements in low-carbon concrete as a construction material for the sustainable built environment. *Developments in the Built Environment*, 16, 100284. doi:10.1016/j.dibe.2023.100284

Bentur, A., & Mitchell, D. (2007). Material performance lessons. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 259–272. doi:10.1016/j.cemconres.2007.09.009

Choi, Y. (2024). Degree of hydration, microstructure, and mechanical properties of cement-modified TiO₂ nanoparticles. *Materials*, 17(18), 4541. doi:10.3390/ma17184541

Del Bosque, I. F. S., De Rojas, M. I. S., Medina, G., Barcala, S., & Medina, C. (2021). Durability of ternary cements based on new supplementary cementitious materials from industrial waste. *Applied Sciences*, 11(13), 5977. doi:10.3390/app11135977

Generowicz-Caba, N., & Kulczycka, J. (2025). LCA of cement with alternative additives: Pathways to sustainable production. *Materials*, 18(13), 3057. doi:10.3390/ma18133057

Juenger, M. C. G., & Siddique, R. (2015). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, 78, 71–80. doi:10.1016/j.cemconres.2015.03.018

Li, C., Li, J., Ren, Q., Zheng, Q., & Jiang, Z. (2023). Durability of concrete coupled with life cycle assessment: Review and perspective. *Cement and Concrete Composites*, 139, 105041. doi:10.1016/j.cemconcomp.2023.105041

Li, G., Zhou, C., Ahmad, W., Usanova, K. I., Karelina, M., Mohamed, A. M., & Khallaf, R. (2022). Fly ash application as supplementary cementitious material: A review. *Materials*, 15(7), 2664. doi:10.3390/ma15072664

Lyu, X., Chu, D., Lu, X., Mu, J., Zhang, Z., & Yun, D. (2024). Quality control of cement clinker through operating condition classification and free calcium oxide content prediction. *Applied Sciences*, 14(3), 1119. doi:10.3390/app14031119

Madlool, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., & Rahim, N. A. (2011). A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2042–2060. doi:10.1016/j.rser.2011.01.005

Marandi, N., & Shirzad, S. (2025). Sustainable cement and concrete technologies: A review of materials and processes for carbon reduction. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(9). doi:10.1007/s41062-025-02213-5

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.

Mikulčić, H., Klemeš, J. J., Vujanović, M., Urbaniec, K., & Duić, N. (2016). Reducing greenhouse gases emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process. *Journal of Cleaner Production*, 136, 119–132. doi:10.1016/j.jclepro.2016.04.145

Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). London, UK: Pitman Publishing.

Ostovari, H., Sternberg, A., & Bardow, A. (2020). Rock ‘n’ use of CO₂: Carbon footprint of carbon capture and utilization by mineralization. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(10), 4850–4861. doi:10.1039/D0SE00190B

Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 114, 40–48. doi:10.1016/j.cemconres.2017.02.009

Sahoo, N., Kumar, A., & Samsher. (2022). Review on energy conservation and emission reduction approaches for cement industry. *Environmental Development*, 44, 100767. doi:10.1016/j.envdev.2022.100767

Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production—Present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 642–650. doi:10.1016/j.cemconres.2011.03.019

Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. doi:10.1016/j.cemconres.2018.03.015

Scrivener, K. L., & Nonat, A. (2011). Hydration of cementitious materials, present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 651–665. doi:10.1016/j.cemconres.2011.03.026

Shim, S., Lee, T., Yang, S., Noor, N. B. M., & Kim, J. (2021). Calculation of cement composition using a new model compared to the Bogue model. *Materials*, 14(16), 4663. doi:10.3390/ma14164663

Uddin, A., Ali, Y., Sabir, M., Petrillo, A., & De Felice, F. (2023). Circular economy and its implementation in cement industry: A case point in Pakistan. *Science of the Total Environment*, 898, 165605. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.165605

Vigor, J. E., Prentice, D. P., Xiao, X., Bernal, S. A., & Provis, J. L. (2024). The pore structure and water absorption in Portland/slag blended hardened cement paste determined by synchrotron X-ray microtomography and neutron radiography. *RSC Advances*, 14(7), 4389–4405. doi:10.1039/D3RA06489A

Volaity, S. S., Aylas-Paredes, B. K., Han, T., Huang, J., Sridhar, S., Sant, G., Kumar, A., & Neithalath, N. (2025). Towards decarbonization of cement industry: A critical review of electrification technologies for sustainable cement production. *NPJ Materials Sustainability*, 3(1). doi:10.1038/s44296-025-00068-6

Wojtacha-Rychter, K., Kucharski, P., & Smolinski, A. (2021). Conventional and alternative sources of thermal energy in the production of cement—An impact on CO₂ emission. *Energies*, 14(6), 1539. doi:10.3390/en14061539

Yang, M., Chen, L., Lai, J., Osman, A. I., Farghali, M., Rooney, D. W., & Yap, P. (2024). Advancing environmental sustainability in construction through innovative low-carbon, high-performance cement-based composites: A review. *Materials Today Sustainability*, 26, 100712. doi:10.1016/j.mtsust.2024.100712

Zajac, M., Skocek, J., Haha, M. B., & Deja, J. (2022). CO₂ mineralization methods in cement and concrete industry. *Energies*, 15(10), 3597. doi:10.3390/en15103597

Zhang, J., Shi, C., Zhang, Z., & Ou, Z. (2017). Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies. *Construction and Building Materials*, 152, 598–613. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.027>

BÖLÜM 2

ÇELİK TAŞIYICI SİSTEMLERDE ÇAPRAZ DÜZENİNİN YANAL İTKİ KAPASİTESİ VE DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Mehmet Fethi ERTENLİ¹

Giriş

Çelik çerçeve sistemler; yüksek dayanım/ağırlık oranı, endüstriyel üretime uygunluk, hızlı montaj ve deprem etkileri altında beklenen sünek davranış potansiyeli nedeniyle modern yapı mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle çok katlı ve geniş açıklıklı yapılarda çelik taşıyıcı sistemler, mimari esneklik sağlarken yapısal güvenliği hedef performans seviyelerine taşımada önemli avantajlar sunar. Bununla birlikte, çelik çerçevelerin deprem ve rüzgâr gibi yatay yükler altındaki davranışı, yalnızca malzeme dayanımı ile değil; sistem geometrisi, birleşim detayları, yanal rijitlik düzeyi ve enerji yutma mekanizmaları ile doğrudan ilişkilidir.

Yatay yükler altında bir çerçevenin temel performans göstergeleri; (i) başlangıç rijitliği, (ii) tepe yük taşıma kapasitesi, (iii)

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Karabük Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-7310-8720, m.fethiartenli@karabuk.edu.tr

süneklik (deplasman kapasitesi) ve (iv) hasar mekanizması (plastikleşmenin nerede ve nasıl yayıldığı) şeklinde özetlenebilir. Moment aktaran çerçeveler, genellikle yüksek süneklik sergilemelerine karşın, yetersiz yanal rijitlik nedeniyle kat öteleme taleplerini büyütebilir ve servis/verimlilik limitlerini zorlayabilir. Bu nedenle tasarım uygulamalarında, yanal rijitlik ve dayanım ihtiyacının karşılanması amacıyla farklı yanal taşıyıcı sistem çözümleri geliştirilmiştir (Dicleli ve Mehta, 2006; Yılmaz, 2019).

Çapraz elemanlar, çerçevenin yatay yükleri ağırlıklı olarak eksenel kuvvetler aracılığıyla taşımalarını sağlayarak, eğilme ağırlıklı davranışı büyük ölçüde azaltır ve global rijitliği artırır. Bu yaklaşımın temel avantajı, görece küçük kesitlerle yüksek yanal rijitlik ve dayanım elde edilebilmesidir. Öte yandan, çapraz sistemin tipi (örneğin tek diyagonal, ters V/Chevron, X, K, V, eksantrik çaprazlı sistemler vb.) sistemin enerji tüketim mekanizmasını, hasar dağılımını ve göçme biçimini belirgin biçimde değiştirebilir (Marino ve Nakashima, 2005).

Deprem yönetmelikleri ve çelik tasarım standartları, farklı çelik taşıyıcı sistemlerin tasarım felsefesini; hedeflenen süneklik düzeyi, dayanım fazlalığı, düğüm noktası davranışı ve eleman burkulması gibi performans belirleyicileri üzerinden tanımlar. Uygulamada, sünek davranışın sağlanması için 'kapasite tasarımı' ilkeleri esas alınır; belirli elemanların kontrollü olarak akması/burkulması hedeflenirken, kritik birleşim ve kolon elemanlarının gevrek göçmesine izin verilmez. Bu bağlamda çaprazlı sistemlerin tasarımında, çapraz elemanların çekme altında akması ve basınç altında burkulması gibi asimetric davranışlar ile tersinir yükleme koşullarının etkileri mutlaka dikkate alınmalıdır.

Bu kitap bölümünün amacı, aynı geometrik ve malzeme özelliklerine sahip bir portal çerçeve üzerinde, çapraz eleman tipinin yanal itki kapasitesi üzerindeki etkisini sayısal olarak ortaya koymak ve davranış farklılıklarını pushover eğrileri üzerinden

yorumlamaktır. Bu kapsamda, aprazsız portal ereve referans alınmış; ters V ve X aprazlı iki farklı konfigürasyon Abaqus ortamında kabuk elemanlarla modellenerek doğrusal olmayan statik itme analizi yapılmıştır. Elde edilen bulgular, özellikle rijitlik–dayanım–deplasman kapasitesi dengesi açısından değerlendirilmiş ve pratik tasarım çıkarımları sunulmuştur.

elik erevelerde Yanal Taşıyıcı Sistem Seçimi

elik yapılarda yanal taşıyıcı sistem seçimi, çoğu durumda "taşıma gücü" kadar "deformasyon sınırları" ve "hasar kontrolü" açısından da belirleyicidir (Dicleli ve Mehta, 2006). Deprem yönetmeliklerinde yer alan performans hedefleri; can güvenliği, göçmenin önlenmesi ve kesintisiz kullanım gibi düzeyler üzerinden ifade edilir. Bu hedefler, yapı sisteminin sneklığini ve enerji yutma kapasitesini öngören bir tasarım yaklaşımı gerektirir. Bu amaçla modern yönetmeliklerde, sünek çerçeveler, merkezi aprazlı çerçeveler ve eksantrik aprazlı çerçeveler gibi sistemler, farklı davranış katsayıları ve detaylandırma koşulları ile tanımlanır.

Merkezi aprazlı elik çerçeveler, yatay yüklerin büyük kısmını çapraz elemanlarda eksenel kuvvet olarak taşır. Bu sistemler yüksek rijitlikleri nedeniyle kat ötelemelerini sınırlamada etkilidir; ancak sistem sneklığinin sağlanması çoğu zaman çapraz elemanların beklenen burkulma/akma davranışına ve birleşim detaylarına bağlıdır (Tunvar vd., 2022). Örneğin, ters V aprazlı sistemlerde, basınçtaki çaprazın burkulması sonrasında kirişte ilave düşey kuvvet etkileri doğabilir ve bu durum kirişin plastikleşme düzenini değiştirebilir. X aprazlı sistemlerde ise iki diyagonalin birlikte çalışması, rijitliği artırırken, deplasman kapasitesini sınırlayabilir (Senghani vd., 2024). Dolayısıyla yönetmeliklerin öngördüğü sünek davranışın sağlanabilmesi için, çapraz türüne özgü göçme mekanizmalarının önceden öngörülmesi gerekir.

Çelik yapılarda yaygın çapraz tipleri; tek diyagonal, V ve ters V (Chevron), X çapraz, K çapraz ve eksantrik çaprazlı çerçeveler olarak sınıflandırılabilir. Tek diyagonal ve X çaprazlı sistemler, yük aktarımını doğrudan kolon-kiriş düğümlerine taşırken; ters V çaprazlı sistemlerde yükler orta noktada birleşerek kiriş üzerinde ek iç kuvvetler oluşturabilir. Eksantrik çaprazlı çerçeve sistemler ise, bağlantı bölgesinde tanımlanan 'link' elemanının kontrollü plastikleşmesini hedefleyerek enerji tüketimini artırır. Bu çalışmada merkezi çaprazlı iki temel konfigürasyon olan ters V ve X çapraz sistemler seçilmiştir. Bu seçimin gerekçesi, her iki sistemin de pratikte yaygın olması ve rijitlik–dayanım–süneklik dengesinin belirgin biçimde farklılaşmasıdır.

Portal Çerçeveler

Portal çerçeveler, yatay yükleri temel olarak kolon ve kirişlerin eğilme rijitliği ile taşır. Bu sistemlerde yanal rijitlik, kolonların eğilme deformasyonları ve birleşim bölgelerinin dönme rijitliği ile belirlenir. Moment aktaran çerçeveler, yüksek deplasman kapasitesi ve enerji tüketimi açısından avantajlıdır; ancak yanal rijitliğin düşük olması, büyük yatay deplasmanlara yol açabilir. Bu durum hem servis limit durumları hem de deprem etkileri altında kat ötelemesi sınırları açısından tasarımı zorlayabilir.

Portal çerçevenin doğrusal olmayan davranışı, genellikle kolon-kiriş birleşim bölgelerinde ve kolon ayaklarında plastikleşme ile başlar. Plastikleşmenin kontrollü bir biçimde gelişmesi, sistem sünekliğinin temel kaynağıdır. Bununla birlikte, yanal yüklerin büyümesi ile $P-\Delta$ (ikinci mertebe) etkileri belirginleşebilir ve global stabilite kaybı riskini artırabilir. Bu nedenle portal çerçevelerin, deprem bölgelerinde çoğu zaman perde/çapraz gibi ilave yanal taşıyıcı elemanlarla birlikte kullanılması tercih edilir.



Şekil 1. Çaprazsız tek katlı–tek açıklıklı portal çerçeve Abaqus modeli (HEB240 kolon, IPE300 kiriş).

Şekil 1’de sunulan referans portal çerçeve modeli, bu çalışmada çapraz elemanların etkisini ayırıştırabilmek amacıyla temel karşılaştırma sistemi olarak kullanılmıştır. Geometri ve kesitler sabit tutulmuş; sadece çapraz elemanların eklenmesi ile yanal davranışın nasıl değiştiği incelenmiştir.

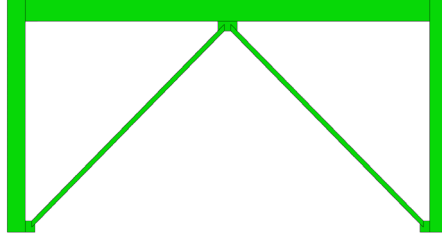
Çapraz ile Desteklenmiş Çerçeveler

Çaprazlı çerçeveler, yatay yüklerin önemli bir kısmını diyagonal elemanlarda eksenel kuvvetler olarak taşır. Böylece çerçevenin global rijitliği artar, kat ötelemeleri azalır ve elemanlarda oluşan eğilme momentleri göreceli olarak düşer (Dehghan vd., 2018). Merkezi çaprazlı sistemlerde enerji tüketimi çoğu zaman çapraz elemanların çekme altında akması ve basınç altında burkulması ile sağlanır. Bu davranışın tekrarlı yükleme altında stabil kalması, eleman narinliği, bağlantı detayları ve yerel burkulma duyarlılığı gibi faktörlerle ilişkilidir.

- **Ters V (Chevron) Çaprazlı Sistem**

Ters V çapraz düzeninde iki diyagonal eleman, kirişin orta noktasında birleşerek kolon tabanlarına mesnetlenir. Bu düzen, simetrik yük aktarımı açısından avantajlı görünmekle birlikte, basınçtaki çaprazın burkulması sonrasında kiriş üzerinde ek düşey iç

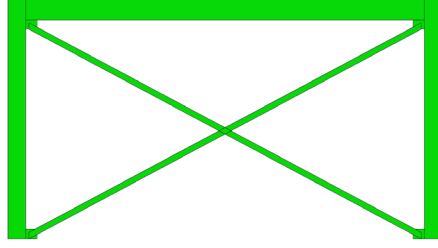
kuvvet bileşenleri oluşturabilir. Bu durum, kirişte beklenmeyen eğilme taleplerine ve plastikleşmenin kiriş üzerinde yoğunlaşmasına yol açabilir. Bu nedenle ters V çaprazlı sistemlerde kirişin kapasite tasarımı yaklaşımıyla, çapraz burkulması sonrası oluşabilecek dengesiz kuvvet etkilerine göre boyutlandırılması önemlidir.



Şekil 2. Ters V çaprazlı çerçeve Abaqus modeli (çaprazlar SHS80×80×5).

- X Çaprazlı Sistem

X çapraz düzeninde iki diyagonal eleman açıklık boyunca birbirini keserek karşı köşelere bağlanır. Yanal yük etkisi altında bir diyagonal genellikle çekmede etkin çalışırken diğeri basınca geçer; yük yönü değiştiğinde roller tersine döner. X düzeninin temel avantajı, yük aktarım yolunun doğrudan olması ve global rijitliğin yüksek olmasıdır. Bununla birlikte, çok yüksek rijitlik, sistemin elastik ötelemelerini azaltırken; plastikleşmenin daha sınırlı deplasman aralığında yoğunlaşmasına ve deplasman kapasitesinin kısıtlanmasına neden olabilir. Bu nedenle X çaprazlı sistemler, performans hedefi ve istenen süneklik düzeyine göre dikkatle değerlendirilmelidir.



Şekil 3. X çaprazlı çerçeve Abaqus modeli (çaprazlar SHS80×80×5).

Sonlu Elemanlar Modeli ve Analiz Prosedürü

İnşaat mühendisliği alanında bilgisayar teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmeler, yapıların tasarım, analiz ve uygulama süreçlerinde köklü bir dönüşümü beraberinde getirmiştir. Özellikle sonlu elemanlar yöntemi, sayısal modelleme ve ileri analiz tekniklerinin yaygınlaşması, mühendislerin ve araştırmacıların karmaşık yapısal sistemleri daha ayrıntılı, güvenilir ve gerçekçi bir biçimde değerlendirebilmelerine olanak sağlamıştır. Bu teknolojik ilerlemeler, yalnızca hesaplama hızını artırmakla kalmamış; aynı zamanda yapısal güvenliğin yükseltilmesi, malzeme kullanımının optimize edilmesi ve maliyet etkin tasarım çözümlerinin geliştirilmesi açısından da önemli katkılar sunmuştur.

Güncel akademik çalışmalarda, bilgisayar destekli analiz ve simülasyon tekniklerinin inşaat mühendisliğinin hemen her alt disiplinde yaygın biçimde kullanıldığı görülmektedir. Özellikle doğrusal olmayan analizler, performans esaslı tasarım yaklaşımları ve parametrik çalışmalar, gelişmiş yazılımlar sayesinde daha erişilebilir hale gelmiştir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde (Battal Şal, 2025; ÖB Şal vd., 2025; Kısa vd., 2024; Olabi vd., 2021), bilgisayar teknolojilerinin inşaat mühendisliği uygulamalarına entegrasyonunun hem teorik modelleme kabiliyetlerini geliştirdiği hem de gerçek mühendislik

problemlerinin çözümünde pratik ve yenilikçi yaklaşımların önünü açtığı açıkça görülmektedir.

Bu bağlamda, bilgisayar destekli yöntemler yalnızca bir analiz aracı olmanın ötesine geçerek, inşaat mühendisliğinde karar verme süreçlerini yönlendiren ve tasarım felsefesini şekillendiren temel bileşenlerden biri haline gelmiştir. Özellikle deprem mühendisliği ve çelik yapı tasarımı gibi yüksek belirsizlik ve karmaşıklık içeren alanlarda, sayısal analizlerin sunduğu öngörü kabiliyeti hem akademik araştırmalar hem de mühendislik uygulamaları açısından vazgeçilmez bir rol üstlenmektedir.

İnşaat mühendisliği problemlerinin çözümünde yaygın olarak başvurulanan Sonlu Elemanlar Metodu (SEM), karmaşık mühendislik sistemlerinin analitik yöntemlerle çözümünde karşılaşılan sınırlamaları aşmak amacıyla geliştirilmiş bir sayısal analiz yaklaşımıdır. Bu yöntem, sürekli ortamların sonlu sayıda alt bölgeye (elemanlara) ayrılması esasına dayanmakta olup, her bir elemanın davranışı matematiksel olarak tanımlanarak sistemin genel tepkisi elde edilmektedir. Sonlu elemanlar analizleri, günümüzde; yapısal analiz, stabilite problemleri, ısı transferi, dinamik yük etkileri ve çok fiziksel etkileşimlerin incelenmesi gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir.

SEM'in temel avantajı, karmaşık geometrilere, değişken kesit özelliklerine, doğrusal olmayan malzeme davranışlarına ve karmaşık sınır koşullarına sahip mühendislik problemlerini, daha küçük ve yönetilebilir alt bileşenlere ayırarak yüksek doğrulukta çözüm sunabilmesidir. Bu özellik, özellikle inşaat mühendisliği uygulamalarında, yapı sistemlerinin taşıma kapasitesinin, kararlılığının ve servis performansının gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Nitekim, sonlu elemanlar yöntemi, deneysel çalışmaların maliyetli veya uygulanması güç olduğu durumlarda, güvenilir bir alternatif veya tamamlayıcı analiz aracı olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, mevcut çalışmada çelik

çerçeve sistemlerin yanal itki kapasiteleri, Abaqus sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak sayısal olarak belirlenmiştir.

Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması sürecinde, çözümün doğruluğunu doğrudan etkileyen bir dizi temel adım bulunmaktadır. Öncelikle, yapının geometrisinin gerçek durumu doğru şekilde temsil edecek biçimde tanımlanması gerekmektedir. Bunu takiben, malzeme özelliklerinin (elastisite modülü, Poisson oranı, akma dayanımı vb.) analiz amacına uygun olarak tanımlanması, özellikle doğrusal olmayan analizlerde kritik önem taşımaktadır. Ayrıca, eleman tipinin seçimi (çubuk, kabuk veya katı elemanlar) incelenen problem türüyle uyumlu olmalı; bu seçim hem hesaplama maliyetini hem de sonuçların güvenilirliğini belirleyici bir rol oynamaktadır.

Sonlu eleman ağı (mesh) yapısının oluşturulması, sonlu eleman analizinde çözüm kalitesini etkileyen bir diğer önemli aşamadır. Çözüm doğruluğu ile hesaplama süresi arasında dengeli bir yaklaşım benimsenmeli; özellikle yüksek gerilme gradyanlarının veya büyük şekil değiştirmelerin beklendiği bölgelerde daha sıkı ağ yapıları tercih edilmelidir. Bununla birlikte, aşırı ince ağ kullanımı gereksiz hesaplama yüküne yol açabileceğinden, ağ yakınsama çalışmaları ile uygun ağ yoğunluğunun belirlenmesi önerilmektedir.

Analiz sonuçlarının güvenilirliği açısından, sınır koşullarının ve yükleme durumlarının fiziksel gerçekliği doğru biçimde yansıtması büyük önem taşır. Gerçek yapı davranışı ile uyumsuz tanımlanan mesnet koşulları veya yükleme şemaları, sayısal sonuçların mühendislik açısından anlamını zayıflatabilir. Bu nedenle, sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçların, mümkün olduğunda analitik çözümler, deneysel veriler veya literatürde rapor edilen sonuçlarla doğrulanması, modelin geçerliliğini artıran temel bir adımdır. Sonuç olarak, çözüm parametrelerinin ve analiz yöntemlerinin bilinçli seçimi ile elde edilen bulguların mühendislik ilkeleri çerçevesinde değerlendirilmesi, sonlu elemanlar analizinin

güvenilir ve bilimsel açıdan geçerli sonuçlar üretmesini sağlamaktadır.

Çalışmada kullanılan yapısal çelik malzeme, elastik-plastik davranışı temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Bu kapsamda, çeliğin akma dayanımı 235 MPa, elastisite modülü 200 GPa ve Poisson oranı 0,30 olarak programın malzeme tanım ekranında girilmiştir. Malzemenin plastik davranışının ve göçme sürecinin sayısal olarak izlenebilmesi amacıyla, nihai çekme dayanımı 360 MPa ve kopma anındaki birim şekil değiştirme değeri 0,19 olarak modele dahil edilmiştir. Bu tanımlama, kiriş elemanının doğrusal olmayan davranışının ve akma sonrası deformasyon kapasitesinin gerçekçi biçimde temsil edilmesini amaçlamaktadır.

Sayısal analizlerde, Abaqus sonlu elemanlar yazılımıyla HEB240 kesitli kolon ve IPE300 kesitli kiriş kullanılarak 3,0 m yükseklikli ve 5,0 m açıklıklı çelik çerçeve modelleri oluşturulmuştur. Abaqus ortamında oluşturulan modeller Şekil 1-3'te verilmiştir. Tüm taşıyıcı elemanlar kabuk (shell) elemanlar ile modellenmiştir. Çubuk (beam) elemanlar, global çerçeve davranışını yakalamada verimli olmakla birlikte; birleşim bölgelerindeki gerilme yoğunlaşmalarını, kesit içi gerilme dağılımlarını ve yerel plastikleşme yayılımını sınırlı ölçüde temsil edebilir. Kabuk elemanlar ise kesit yüzeyi boyunca gerilme-şekil değiştirme alanlarının daha ayrıntılı elde edilmesine ve plastikleşmenin nerede yoğunlaştığının izlenmesine imkân verir. Özellikle çaprazlı sistemlerde, çapraz uç bağlantılarının bulunduğu bölgelerde oluşabilecek yerel etkiler ve eleman etkileşimleri açısından kabuk modelleme daha temsil edici bir yaklaşımdır.

S4R elemanı, indirgenmiş integrasyon kullanması nedeniyle analizde sayısal açıdan verimlilik sağlarken; uygun mesh yoğunluğu ve kontrol parametreleri ile kesme kilitlenmesi gibi istenmeyen sayısal etkiler azaltılabilir. Bu nedenle S4R, ince cidarlı çelik

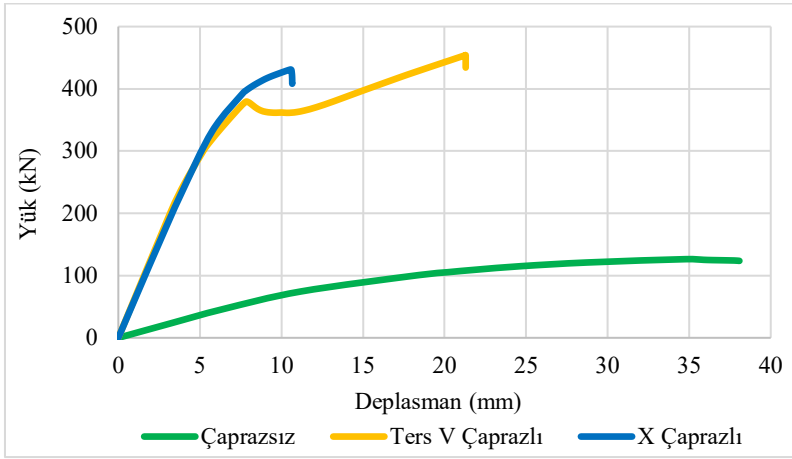
elemanların doğrusal olmayan analizlerinde yaygın olarak tercih edilen bir kabuk eleman tipidir.

Sonlu elmanlar ağı (mesh) boyutu 20 mm olarak seçilmiştir. Bu değer, hem plastikleşme bölgelerinin yeterli çözünürlükte yakalanmasını hem de hesaplama maliyetinin kontrol altında tutulmasını hedefleyen pratik bir seçimdir. Pushover analizlerinde, yük–deplasman eğrisinin şekli özellikle plastikleşmenin başladığı bölgelerde mesh hassasiyetine duyarlı olabildiğinden, seçilen ağ boyutu ile global tepkinin kararlı elde edilmesi amaçlanmıştır.

Sınır koşulları olarak kolon alt uçları ankastre olarak tanımlanmış ve zemin–üst yapı etkileşimi göz ardı edilmiştir. Doğrusal olmayan statik itme analizi (pushover), kademeli artan yatay yük uygulanması ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sırasında her bir artımda yapıdan elde edilen taban kesme kuvveti ve kontrol noktasındaki (kiriş seviyesi) yatay deplasman kaydedilmiş; böylece kuvvet–deplasman ilişkileri elde edilmiştir.

Analiz Sonuçları

Çalışma kapsamında ele alınan çerçeve konfigürasyonları için elde edilen pushover (taban kesme kuvveti–deplasman) eğrileri Şekil 4’te verilmiştir. Eğrilerden görüleceği üzere, çapraz elemanların eklenmesi yanal taşıma kapasitesi ve rijitlik üzerinde belirleyici bir artış sağlamıştır. Bununla birlikte çapraz tipi, yalnızca tepe dayanımı değil; kapasiteye erişim deplasmanı ve dayanım kaybının karakteri üzerinde de etkilidir.



Şekil 4. Çaprazsız, ters V çaprazlı ve X çaprazlı çerçeveler için pushover eğrilerinin karşılaştırılması.

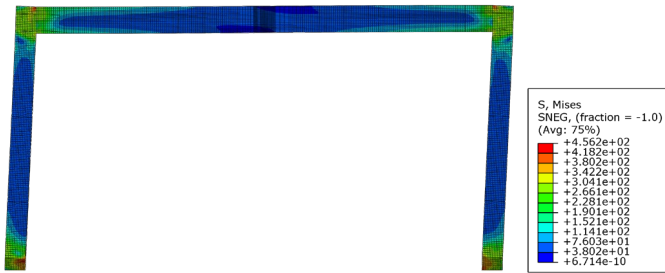
Çaprazsız portal çerçevenin pushover eğrisi, düşük başlangıç rijitliği ile başlayan ve deplasman arttıkça kademeli olarak artan bir taban kesme kuvvetine işaret etmektedir. Eğri, yaklaşık 35 mm deplasmanda 125 kN mertebesinde tepe kapasiteye ulaşmakta ve sonrasında sınırlı bir dayanım kaybı göstermektedir. Bu davranış, yanal yüklerin kolon eğilmesi ve moment aktaran çerçeve etkisiyle taşındığını; dolayısıyla sistemin görece sünek olmakla birlikte rijitlik ve dayanım açısından sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır.

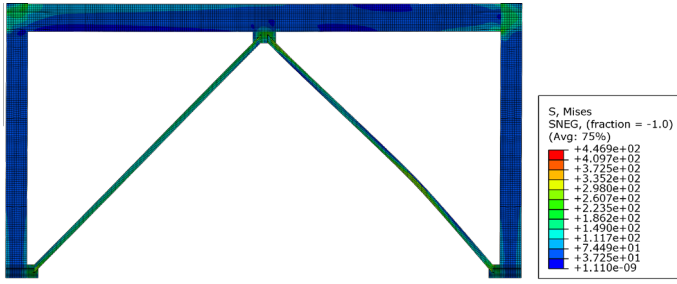
Ters V çaprazlı çerçeve, yaklaşık 7,5 mm deplasman seviyelerinde 380 kN mertebelerine hızla erişerek yüksek başlangıç rijitliği sergilemiştir. Bu aşamadan sonra yükte kısa bir düşüş gözlenmekte; ardından yük artışı devam ederek yaklaşık 20–21 mm deplasmanda 450–460 kN tepe kapasiteye ulaşmaktadır. Bu eğri formu, ters V çaprazlı sistemlerde basınç çaprazının burkulması sonrası yük aktarım mekanizmasının yeniden düzenlendiğini ve sistemin ikincil rijitliğinin devreye girdiğini göstermektedir. Sonuçlar, ters V düzeninin yüksek dayanım sağlarken belirli bir deplasman kapasitesini de koruyabildiğini göstermektedir.

X çaprazlı çerçeve, tüm konfigürasyonlar arasında en yüksek başlangıç rijitliğini göstermiştir. Eğri, 11 mm deplasman seviyesinde 435 kN tepe kapasiteye erişmekte ve bu noktada belirgin bir dayanım düşümü ortaya çıkmaktadır. Bu durum, sistemin oldukça rijit davranması nedeniyle plastikleşmenin daha dar bir deplasman aralığında yoğunlaştığını ve kapasiteye erişimin daha erken gerçekleştiğini düşündürmektedir. X çapraz düzeni, yüksek rijitlik ve dayanım sağlamakla birlikte, ters V'ye kıyasla deplasman kapasitesinin daha sınırlı olabileceğine işaret etmektedir.

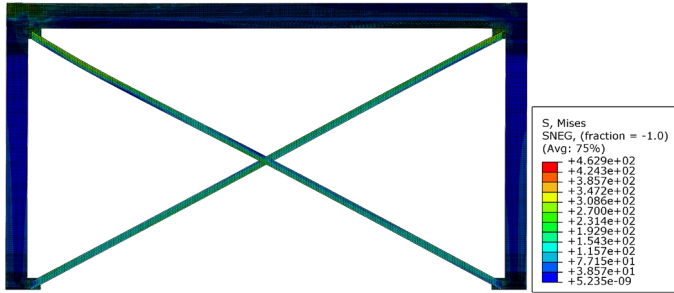
Şekil 4'teki eğrilerden, üç sistem arasındaki performans farkları görülmektedir. Çaprazsız portal çerçeve, yüksek deplasmanlara izin verse de yük taşıması bakımından zayıftır. Ters V ve X çapraz sistemleri ise dayanımı yaklaşık 3–4 kat artırmaktadır. X çapraz, en yüksek rijitliği sağlarken; ters V düzeni, daha dengeli bir elastik ötesi davranış ve daha geniş deplasman aralığında kapasite koruma potansiyeli göstermektedir.

Şekil 5(a-c)'de her bir modelin pushover analizi sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri gösterilmiştir.





(b)



(c)

Şekil 5. Doğrusal olmayan itme analizi sonucu gerilme dağılımı;
(a) Çaprazsız, (b) ters V (Chevron) çaprazlı, (c) X çaprazlı

Şekil 5(a)'da çaprazsız portal çerçevenin doğrusal olmayan pushover analizi altında oluşan eşdeğer (von Mises) gerilme dağılımı görülmektedir. Şekil incelendiğinde, maksimum gerilme değerlerinin ağırlıklı olarak kolon taban bölgelerinde ve kiriş-kolon birleşimlerine yakın kesitlerde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, çaprazsız moment aktaran çerçevelerde yatay yüklerin büyük ölçüde eğilme etkileri yoluyla taşındığını ve plastikleşmenin öncelikle bu kritik bölgelerde başladığını göstermektedir.

Kolon tabanlarında gözlenen yüksek gerilme seviyeleri, ankastre mesnet koşulları altında kolonların önemli eğilme momentlerine maruz kaldığını ve plastik mafsall oluşumunun bu bölgelerde tetiklendiğini işaret etmektedir. Benzer şekilde, kiriş

uçlarında ve kolon–kiriş birleşim bölgelerinde artan gerilmeler, moment aktaran çerçeve davranışının karakteristik bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Buna karşılık, kiriş açıklık orta bölgelerinde gerilme seviyelerinin görece daha düşük kaldığı ve dağılımın daha homojen olduğu dikkat çekmektedir.

Gerilme dağılımının genel karakteri, çaprazsız portal çerçevenin yanal yükler altında ötelenme kontrollü bir davranış sergilediğini ve enerji tüketiminin büyük ölçüde birleşim bölgelerinde ve kolon tabanlarında gelişen plastik şekil değiştirmeler yoluyla sağlandığını ortaya koymaktadır. Bu durum, pushover eğrisinde gözlenen düşük başlangıç rijitliği ve sınırlı maksimum taban kesme kuvveti ile uyumlu bir mekanizmaya işaret etmektedir. Başka bir ifadeyle, sistem sünek bir davranış potansiyeline sahip olmakla birlikte, yanal rijitliğin yetersizliği nedeniyle büyük deplasmanlara ihtiyaç duymaktadır.

Şekil 5(b)'de ters V çaprazlı çelik çerçevenin doğrusal olmayan pushover analizi altında oluşan eşdeğer (von Mises) gerilme dağılımı sunulmaktadır. Şekil incelendiğinde, gerilme yoğunlaşmasının çaprazsız portal çerçeveye kıyasla daha yayılı bir biçimde çerçeve elemanlarına dağıldığı açıkça görülmektedir. Bu durum, yanal yüklerin yalnızca kolon ve kiriş eğilmesiyle değil, aynı zamanda çapraz elemanlarda gelişen eksenel kuvvetler aracılığıyla da taşındığını göstermektedir.

Ters V düzenine sahip çapraz elemanlarda, özellikle basınç etkisi altındaki diyagonal boyunca artan gerilme seviyeleri dikkat çekmektedir. Bu bölgelerde gözlenen gerilme yoğunlaşması, pushover analizinin ilerleyen aşamalarında basınçtaki çaprazın burkulmaya yaklaşan davranışı ile ilişkilendirilebilir. Buna karşılık, çekme etkisi altındaki çapraz elemanın gerilme dağılımı daha düzgün ve sürekli; bu durum, ters V çaprazlı sistemlerin karakteristik asimetrik çekme–basınç davranışını yansıtmaktadır.

Gerilme dağılımı ayrıca, kirişin orta noktasında, çapraz elemanların birleştiği bölgede belirgin bir artış olduğunu göstermektedir. Bu gözlem, ters V çaprazlı sistemlerde literatürde sıklıkla vurgulanan, basınç çaprazının burkulması sonrasında kiriş üzerinde oluşan ilave düşey iç kuvvet bileşenleri ile uyumludur. Kirişteki bu gerilme artışı, plastikleşmenin yalnızca kolon tabanlarıyla sınırlı kalmadığını; sistem davranışının, çapraz–kiriş etkileşimi ile daha karmaşık bir hale geldiğini ortaya koymaktadır.

Kolon tabanlarında ve kiriş–kolon birleşimlerinde gözlenen gerilme seviyeleri, çaprazsız portal çerçeveye kıyasla görece daha düşük kalmıştır. Bu durum, ters V çaprazlı sistemin yanal yüklerin önemli bir kısmını çapraz elemanlara aktararak, kolon ve kirişlerdeki eğilme taleplerini azalttığını göstermektedir. Sonuç olarak, plastikleşmenin daha fazla sayıda eleman arasında paylaşıldığı ve hasarın tekil kritik kesitlerde yoğunlaşmak yerine daha dengeli bir biçimde yayıldığı söylenebilir.

Şekil 5(c)'de X çaprazlı çelik çerçevenin doğrusal olmayan pushover analizi altında oluşan eşdeğer (von Mises) gerilme dağılımı sunulmaktadır. Şekil incelendiğinde, yanal yüklerin büyük ölçüde çapraz elemanlar boyunca eksenel kuvvetler aracılığıyla taşındığı açıkça görülmektedir. Bu durum, X çaprazlı sistemlerin karakteristik özelliği olan yük aktarımının doğrudan ve rijit bir mekanizma üzerinden gerçekleştiğini göstermektedir.

X düzenine sahip çapraz elemanlarda, her iki diyagonal boyunca da belirgin gerilme seviyelerinin oluştuğu gözlenmektedir. Yük yönüne bağlı olarak bir diyagonal çekme etkisi altında çalışırken, diğer diyagonal basınç etkisine maruz kalmaktadır. Görselde, özellikle çekme etkisi altında çalışan çapraz boyunca daha homojen ve sürekli bir gerilme dağılımı oluştuğu, basınç etkisi altındaki çaprazda ise yer yer daha yüksek gerilme gradyanlarının ortaya çıktığı dikkat çekmektedir. Bu durum, X çaprazlı sistemlerde

çekme–basınç asimetrisinin belirgin ancak sistem genelinde dengeli bir yük paylaşımı ile telafi edildiğini göstermektedir.

Kolon ve kiriş elemanları incelendiğinde, gerilme seviyelerinin çaprazsız ve ters V çaprazlı sistemlere kıyasla daha düşük kaldığı görülmektedir. Bu gözlem, yanal yüklerin büyük bölümünün çapraz elemanlar tarafından taşınması sonucunda, kolon ve kirişlerdeki eğilme taleplerinin önemli ölçüde azaldığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, gerilme dağılımının çapraz elemanlar üzerinde yoğunlaşması, plastikleşmenin ve hasar birikiminin daha dar bir deplasman aralığında gelişmesine neden olmaktadır. Bu durum, pushover eğrisinde gözlenen yüksek başlangıç rijitliği ve erken kapasiteye erişim ile doğrudan ilişkilidir. Başka bir ifadeyle, X çaprazlı çerçeve yüksek yanal dayanım sağlamakta; ancak plastik şekil değiştirmelerin sınırlı bir deformasyon aralığında yoğunlaşması nedeniyle deplasman kapasitesi ters V çaprazlı sisteme kıyasla daha sınırlı kalabilmektedir.

Değerlendirme ve Sonuç

Analizler sonucunda elde edilen bulgular, çapraz eleman tipinin çerçevenin yanal itki kapasitesini ve deformasyon karakteristiğini nasıl biçimlendirdiği üzerinden tartışılmaktadır. Çapraz elemanların temel katkısı, yatay yüklerin eksenel kuvvet bileşenleri ile taşınmasına imkân vererek, sistemin global rijitliğini artırmasıdır. Bunun sonucu olarak, çaprazlı sistemler hem daha yüksek taban kesme kuvvetlerine ulaşmakta hem de elastik deplasman taleplerini sınırlamaktadır. Ancak yüksek rijitlik, her zaman ‘daha iyi’ bir deprem performansı anlamına gelmez; çünkü sistemin hasarı hangi elemanlarda yoğunlaştırdığı ve göçme mekanizmasının ne kadar dengeli geliştiği de önemlidir.

Çaprazsız portal çerçeve, en düşük rijitlik ve dayanım değerlerine sahip olmakla birlikte, daha geniş bir deplasman

aralığında kapasite artışı göstermiştir. Bu davranış, moment aktaran çerçevelerin süneklik potansiyeli ile uyumludur. Buna karşın, tepe dayanımının sınırlı kalması ve büyük deplasmanların oluşması, özellikle servis sınırları ve ikinci mertebe etkileri bakımından olumsuz bir durum oluşturabilir.

Ters V çaprazlı çerçeve, yüksek dayanım artışı sağlamakla birlikte, pushover eğrisinden bir miktar düşüş sonrası yeniden kapasite kazanımı olduğu görülmüştür. Bu sonuç, ters V çaprazlı sistemlerin uygun detaylandırma ile daha dengeli bir post-elastik davranış sergileyebileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte, basınç çaprazının burkulması sonrasında kiriş üzerinde oluşabilecek düşey etkiler ve birleşim bölgesi talepleri tasarım açısından dikkate alınmalıdır. Pratikte, ters V çaprazlı sistemlerde kiriş kapasitesinin, dengesiz kuvvetler ve olası plastikleşme düzeni göz önüne alınarak belirlenmesi önerilir.

X çaprazlı çerçeve, en yüksek başlangıç rijitliğine sahip olup, daha küçük deplasmanlarda yüksek dayanım seviyelerine ulaşmıştır. Bu durum, kat ötelemesi sınırlarının kritik olduğu durumlarda önemli bir avantaj sağlayabilir. Ancak kapasiteye erişimin erken gerçekleşmesi ve ardından belirgin dayanım kaybının görülmesi, deplasman kapasitesinin ters V sistemine kıyasla daha sınırlı olabileceğine işaret etmektedir. Bu nedenle X çapraz düzeni, hedef performans düzeyine göre dikkatle seçilmeli; beklenen yer değiştirme talepleri ve eleman burkulması sonrası davranış göz önüne alınmalıdır.

Genel olarak, bu çalışmanın sonuçları, çapraz eleman tipinin seçiminde tek ölçütün maksimum taban kesme kuvveti olmaması gerektiğini vurgulamaktadır. Tasarımcı açısından önemli olan, sistemin rijitlik–dayanım–süneklik dengesini hedef performans ile uyumlu şekilde kurabilmektir. Bu çerçevede; deplasman taleplerinin sınırlandırılmasının öncelikli olduğu yapılarda X çapraz düzeni avantajlı olabilirken, daha dengeli hasar yayılımı ve post-elastik kapasite

korunumu istenen yapılarda ters V düzeni uygun bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

Doğrusal olmayan statik itme (pushover) analizleri sonucunda elde edilen eşdeğer (von Mises) gerilme dağılımları, üç farklı çerçeve konfigürasyonunun yanal yükler altındaki yük aktarım mekanizmalarını ve hasar gelişim biçimlerini açık biçimde ortaya koymaktadır. Şekil 5(a-c)'de sunulan sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, çapraz eleman tipinin yalnızca global dayanım ve rijitlik üzerinde değil, aynı zamanda gerilme yoğunlaşmasının yeri, plastikleşmenin yayılımı ve göçme mekanizmasının karakteri üzerinde de belirleyici olduğu görülmektedir.

Üç sistem birlikte değerlendirildiğinde, çaprazsız portal çerçevelerin sünek ancak rijitliği ve dayanımı sınırlı; X çaprazlı sistemlerin ise son derece rijit ve yüksek dayanımlı fakat görece düşük deplasman kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Ters V çaprazlı çerçeveler ise bu iki uç davranış arasında, daha dengeleyici bir rijitlik–dayanım–süneklik ilişkisi sunmaktadır. Dolayısıyla, gerilme dağılımı sonuçları, pushover eğrilerinden elde edilen performans göstergelerini mikromekanik düzeyde desteklemekte ve çapraz eleman tipinin seçiminde hedeflenen performans düzeyinin belirleyici olması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kaynakça

Battal Şal, Ö. (2025). Performance and efficiency measurement in urban transportation: an empirical assessment with Entropy and data envelopment analysis. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 15(4), 1133-1149. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1753913>

Kisa, M. H., Yuksel, S. B., & Özmen, R. (2024). Experimentally validated numerical investigation on the behavior of

composite shear walls subjected to cyclic loading. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 59, 101884. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101884>

Olabi, M. N., Caglar, N., Kisa, M. H., & Yuksel, S. B. (2021). Numerical study on the response of composite shear walls with steel sheets under cyclic loading. *Journal of Building Engineering*, 34, 102069. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102069>

Şal, Ö. B., Çubuk, M. K., & Şimşir, F. (2025). Assessment of transportation investments feasibility studies with fuzzy multi-criteria decision-making techniques. *Research in Transportation Business & Management*, 62, 101472. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2025.101472>

Dehghan, S. M., Najafgholipour, M. A., & Hooshangi, H. (2020). Seismic behavior of chevron concentrically braced frames with weak beam. *Scientia Iranica*, 27(1), 41-56. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.20494>

Dicleli, M. and Mehta, A. (2006). Effect of near-fault ground motion and damper characteristics on the seismic performance of chevron braced steel frames. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(7), 927-948. <https://doi.org/10.1002/eqe.662>

Marino, E. and Nakashima, M. (2005). Seismic performance and new design procedure for chevron-braced frames. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(4), 433-452. <https://doi.org/10.1002/eqe.539>

Senghani, H., Mehta, N., Butala, A., & Solanki, J. (2024). Seismic Behaviour of Steel Building with And Without Bracing System by Performance Point. *Int Res J Adv Engg Mgt*, 2(08), 2474-2479. <https://doi.org/10.47392/irjaem.2024.0356>

Tunvar, A., Bhaiya, V., Chaudhary, R., Gondaliya, K., & Gajbhiye, P. (2022). Performance Assessment of Different

Retrofitting Techniques for Steel-Framed Buildings. Asps
Conference Proceedings, 1(1), 961-968.
<https://doi.org/10.38208/acp.v1.607>

Yılmaz, M. (2019). The Effect of Different Braced
Configurations on the Nonlinear Seismic Behavior of Steel
Structure. CEBEL, 1(1), 22-28.
<https://doi.org/10.36937/cebel.2020.001.005>

BÖLÜM 3

DEĞİŞEN BANT PENCERE BOŞLUK MESAFELERİNDE KISA KOLON DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

1. ALPER ÖZMEN ¹

Giriş

Dünyada ve ülkemizde yaşanan büyük depremler sonrası yapılan saha gözlemlerinde birçok yapıda toptan göçme modu ortaya çıkmadan lokal olarak bazı kolon kiriş birleşimlerinde hasar oluşumları gözlemlenmiş ve raporlanmıştır. Bu hasarlar genellikle kesme hasarlarıdır ve gevrek bir göçme moduna sebep olmaktadır. Bu hasarların temel sebebi incelendiğinde hasar gören kolonun mimari unsurlarla serbest boyunun kısıtlandığı ve kolonun hareket edebilmesini sağlayan küçük bir mesafesinin serbest bırakıldığı görülmüştür. Bu durum inşaat mühendisliğinde kısa kolon oluşumu olarak adlandırılmaktadır. Bir kolonunu serbest boyunun kısıtlanmasıyla kolonun olduğundan daha rijit davranış göstererek üzerine daha fazla yanal kuvvet almasına sebep olmaktadır. Olduğundan daha rijit davranan bu kolon kesme kuvvetlerine maruz kalır ve kesme hasarları ortaya çıkar. Kısa kolon oluşumuna sebep

¹ Dr. Öğr. Üyesi, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye. ORCID: 0000-0003-1335-3780

olan en büyük etken özellikle bodrum katlara ışık sağlamak amacıyla bırakılan bant pencere boşluklarıdır. Bu boşluklar kolonların serbest boyunu kısıtlayarak boşluk olan kısımda daha fazla kesme kuvveti meydana gelmesine sebep olmaktadır. Kısa kolon oluşumunu açıklayan ve geçmiş depremlerde hasar görmüş bir yapıya ait görsel Şekil 1’de verilmiştir.

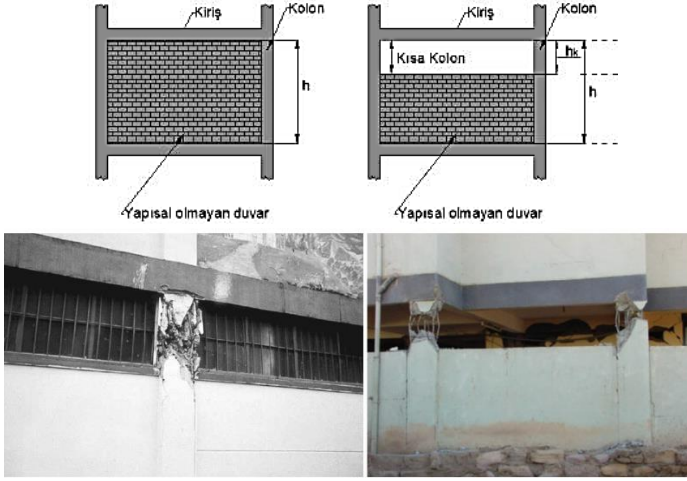
Literatürde kısa kolon oluşumunun önlenmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır (Cagatay, Beklen & Mosalam, 2010:523–532; Demir ve ark., 2013). Ayrıca dolgu duvarların kısa kolon oluşumu üzerine etkilerine deneysel olarak inceleyen birçok çalışma mevcuttur. Moretti ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada 8 adet çerçeve sistemin tekrarlı yükler altında analizini yapmıştır. Analizler sonucunda düşük kesme kapasitesine sahip çerçeveler için önerilerde bulunmuşlardır. Seki ve ark. (2018) çalışmalarında, betonarme çerçeveler için düşük maliyetli ve uygulanması kolay güçlendirme yöntemlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Beş farklı örnek (boş çerçeve, dolgu duvarlı, ahşap çerçeveli dolgu duvarlı ve çelik tel örgü ile kaplı dolgu duvarlı) tersinir tekrarlı yük altında test edilmiş ve sonuçlar, özellikle tel örgü ile güçlendirilmiş dolgu duvarın taşıma gücünü dört kat artırdığını; ahşap çerçeveli dolgunun ise sünekliği belirgin biçimde iyileştirdiğini göstermiştir. Arslan (2013), çalışmasında, tuğla ve gaz beton dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin tekrarlı yatay yük altındaki davranışını deneysel olarak incelemiş ve bu duvarların cam lifli polimer esaslı “deprem kumaşı” ile güçlendirilmesinin etkilerini araştırmıştır. Balık ve Bahadır (2019) çalışmalarında, 1/5 ölçekli betonarme çerçevelerde farklı güçlendirme yöntemlerinin kısa kolon davranışı üzerindeki etkisini incelemektedir. Yedi numunenin tersinir çevrimsel yük altında test edilmesi sonucunda, RC dolgulu ve özellikle dıştan perde + kolon mantolaması yapılan numunelerde dayanım, rijitlik ve enerji tüketiminin büyük ölçüde arttığı; ayrıca bu yöntemlerin kısa kolon oluşumunu etkin biçimde önlediği görülmüştür. Soltanzadeh ve ark.

(2018), dolgu duvarlı betonarme çerçevelerde dıştan öngerme tekniğinin deprem performansını iyileştirme etkisini incelemiştir. Deney sonuçları, güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçevelerin başlangıç rijitliği, yatay taşıma kapasitesi ve sünekliğinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Anıl ve Altın (2007) betonarme çerçevelerin dökme betonarme dolgu duvarlarla ve bu duvarlarda kısmi (pencere/kapı açıklıklı) dolgu ile güçlendirilmesi durumunda sismik davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, kısmi dolgulu çerçevelerin boş çerçeveye göre başlangıç rijitliği ve nihai yatay taşıma kapasitesinin belirgin şekilde arttığını, en iyi performansın da hem kirişe hem kolona ankrajlı kısmi dolgu duvarlarda elde edildiğini göstermiştir. Tunaboyu (2017), boşluksuz dolgu duvarlı betonarme çerçevelerde kısa kolon davranışını deneysel ve analitik yöntemlerle incelemiştir. Sonuçlar, dolgu duvar malzemesi ve çerçeve geometrisine bağlı olarak kolonlarda ani kesme kırılmasının meydana gelebildiğini göstermiştir. Işık ve ark. (2023) eğimli arazi, bant pencere ve asma kat gibi mimari/topoğrafik etkenlerle oluşan kısa kolonların, betonarme binaların deprem performansı üzerindeki etkilerini TBEC-2018 kapsamında incelemektedir. Analizler, kısa kolon oluşumunun özellikle ilk iki katta görelî kat ötelemelerini ve kesme kuvvetlerini artırdığını, plastik dönme taleplerini yükselttiğini ve bazı durumlarda üst katların yumuşak kat düzensizliğine girmesine neden olduğunu göstermektedir.

Yapılan çalışmalarda deneysel ve sayısal olarak kısa kolon davranışının oluşumuna neden olan etkenler ve bunlar için iyileştirme önerileri incelenmiştir. Ancak bant pencere boşluğunun boyutlarının tuğla dolgu duvarlı çerçeveler için etkisi hala yeterince ortaya koyulmamıştır. Bu çalışma kapsamında farklı bant pencere boşluklarına sahip betonarme çerçeve örnekleri üzerinde tekrarlı yükler uygulanarak kısa kolon davranışına olan etkileri sayısal olarak araştırılacaktır. Çalışmada Abaqus Cae sonlu elemanlar

yazılımı kullanılarak doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelin doğrulanması amacıyla deneysel olarak oluşturulmuş betonarme çerçeve modellenmiş ve sayısal model doğrulanmıştır.

Şekil 1 Kısa kolon oluşum mekanizması ve kısa kolon hasarları

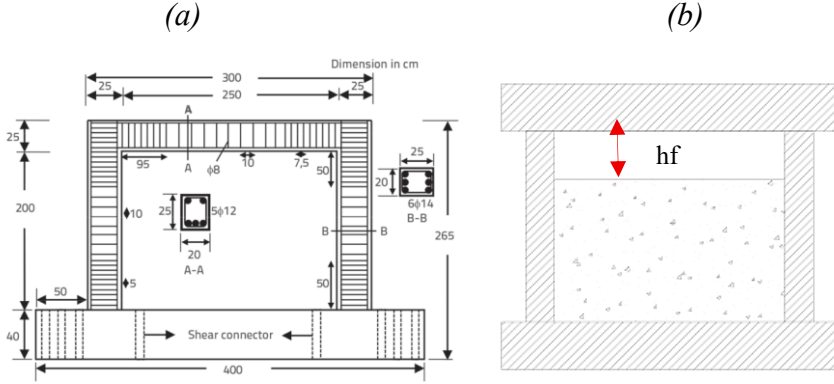


Kaynak: Education and Job, 2014; Jayaguru & Subramanian, 2012:82–91

Sonlu Elemanlar Modeli

Analizlerde kullanılacak çerçevenin sonlu elemanlar modeli Abaqus Cae yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Sonlu eleman modelinde Kolon, kiriş ve duvarlar katı eleman ve donatılar truss eleman olarak modellenmiştir. Çerçevenin ölçüleri ve donatı detayları Şekil 2’de verilmiştir. Sayısal modelin doğrulanması amacıyla Arslan, 2013’ yaptığı deneysel çalışmadaki çerçeve özellikleri kullanılmıştır.

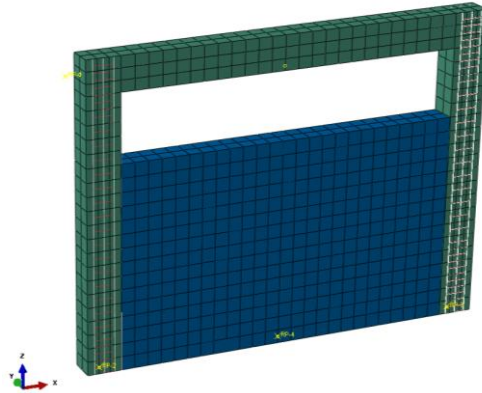
Şekil 2 (a) Betonarme çerçeveye ait ölçüler ve donatı detayları (b) Boşluk konfigürasyonu



Kaynak: Arslan, 2013

Analizlerde h_f boşluk miktarı, 0.5 m, 0.75 m, tam dolgu duvar ve boş çerçeve olacak şekilde ayarlanmıştır. Sonlu elemanlar modeli Şekil 3’de verilmiştir.

Şekil 3 Analizlerde kullanılan sonlu elemanlar modeli (0.5 m boşluklu)



Model tabandan ankastre mesnetlidir. Duvar ve çerçeve arasında temas özelliği kullanılmıştır. Friction katsayısı 0.7 olarak alınmıştır. Donatı beton içerisine tam gömülü (embedded) olarak

modellenmiştir. Sistemin ölü yükleri sisteme düşey yönde gerilme olarak uygulanmıştır.

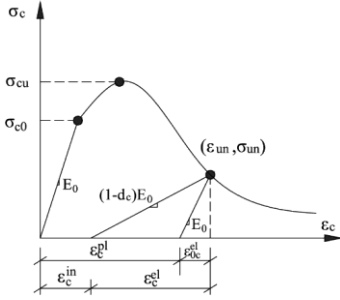
Beton ve dolgu duvarların davranışını modellemek amacıyla Concrete Damage Plasticity (CDP) malzeme modeli kullanılmıştır. Betonun ve tuğla duvarın basınç ve çekme altında davranışları Şekil 4’ de verilmiştir. Yığma duvarın modellenmesinde harç ve taşları tek bir malzeme gibi dikkate alan makro modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Homojen malzeme özelliklerinin elde edilmesinde aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$f_{c,m\alpha s} = 0.6f_{c,sto}^{0.60}f_{c,mor}^{0.20}$$

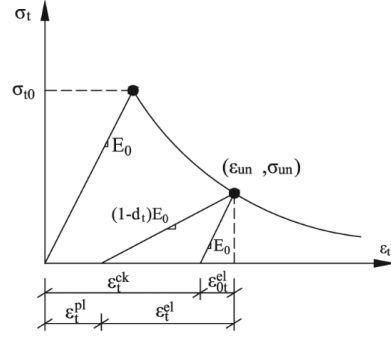
Denklemdede $f_{c,m\alpha s}$ yığma birimin basınç dayanımı, $f_{c,sto}$ yığma birimin basınç dayanımı ve $f_{c,mor}$ harcın basınç dayanımıdır. Literatürdeki çalışmalardan elde edilen genel kanıya göre harcın basınç dayanımı 1 Mpa olarak dikkate alınmıştır. Tuğla için mekanik değerler ise Çelik, Özgür & Mercimek, (2025)’den alınmıştır. Çekme dayanımı için basınç dayanımını 1/20’ si dikkate alınmıştır. Elastisite modülünün hesabında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018)’ de verilen $750f_c$ formülü dikkate alınmıştır.

Şekil 4 CDP modelinde gerilme şekil değiştirme eğrisi

a) Basınç altında davranış



b) Çekme altında davranış



Kaynak: Dassault Systèmes, 2013

Sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1’de sunulmuştur. Betonun gerilme-şekil değiştirme davranışının elde edilmesinde Hafezolghorani & ark., (2017:68–78)’ den yararlanılmıştır.

Tablo 1 Sonlu eleman modeli malzeme özellikleri

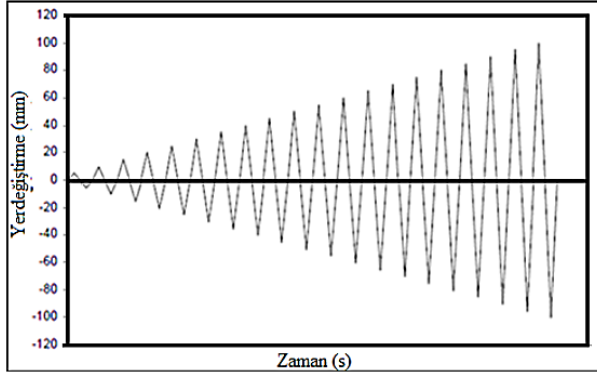
Eleman	E (MPa)	γ (N/mm3)	ν		
Beton	24000	2.4e-9	0.20		
Duvar (Tuğla)	1500	1.6e-9	0.21		
Donatı	210000	7.85e-9	0.3		
Plastik Özellikler (CDP)					
	Dilatasyon açısı	Ekzantiriste	fb0/fc0	K	Viskozite
Beton	20	0.1	1.16	0.667	0.0005
Duvar (Tuğla)	10	0.1	1.16	0.667	0.004

Sayısal Modelin Doğrulanması

Sayısal modelin doğrulanması amacıyla, Arslan, 2013 tarafından oluşturulan deneysel çerçeve sistemi dikkate alınmıştır. Deneysel sisteme ait kısa özet aşağıda sunulmuştur. Deney testleri kapsamında bir dolgu duvarsız çerçeve ve iki dolgulu betonarme

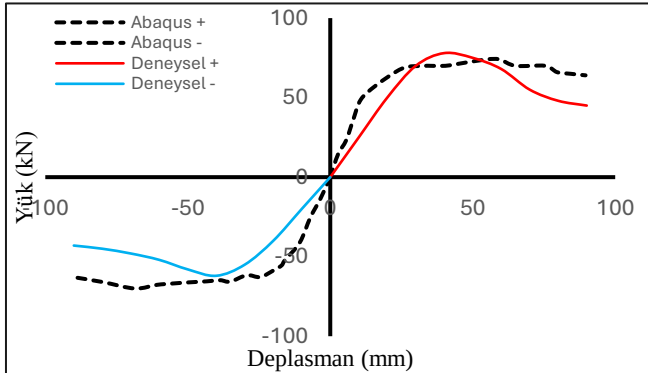
çerçeve numunesi analiz edildi. Dolgu duvarların yükseklik/uzunluk (h/l) oranı 1/1,25 olarak seçilmiştir. Donatı, Türkiye'deki mevcut binalar için normal uygulamalara uygun olarak tasarlanmıştır. Test numuneleri, Türkiye'deki mevcut yapıları yansıtan 1/1 ölçekte seçilmiştir. Deney sistemi Şekil 1a'da gösterilmiştir. Sisteme Şekil 5' de gösterilen tekrarlı yük uygulanmıştır.

Şekil 5 Deneylerde uygulanan yer değiştirme



Deney sonucunda dolgu duvarsız çerçeveye ait yük-deplasman eğrisi elde edilmiştir. Sonlu elemanlar modelinden elde edilen eğri ile deneysel eğri Şekil 6' de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Karşılaştırmada zarf eğrileri kullanılmıştır.

Şekil 6 Yük- yer değiştirme eğrisinin karşılaştırması

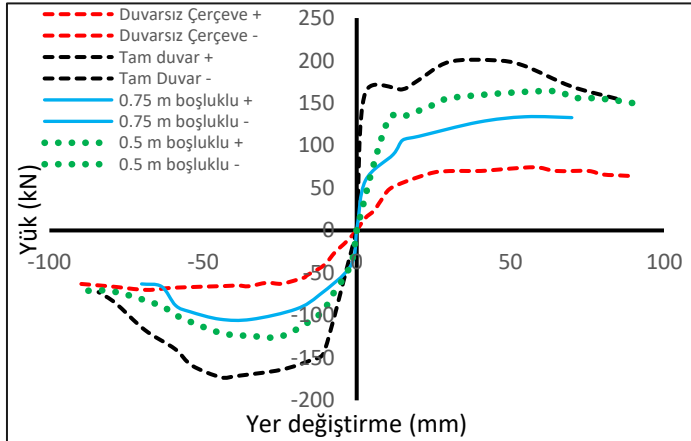


Şekil 6 incelendiğinde sayısal modelden elde edilen eğrilerin, deneysel sonuca genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca maksimum yükler arasındaki fark pozitif itmede %5 iken, negatif itmede %1 olarak birbirine oldukça yakın elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre sayısal model deneysel sistemi doğru bir şekilde temsil etmektedir.

Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında farklı bant pencere boşluklarının kısa kolon davranışına etkisini gözlemlemek amacıyla, 0.5 m boşluklu, 0.75 m boşluklu, tam dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız boş çerçeve olmak üzere 4 farklı model analiz edilmiştir. Analizlerde deneysel sistemde uygulanan yükleme uygulanmıştır. Analiz sonucunda tüm modellere ait yük- yer değiştirme eğrisi elde edilmiştir. Eğrilerin zarfı oluşturularak karşılaştırmalar zarf eğrileri üzerinden yapılmıştır. Yük- yer değiştirme eğrisi Şekil 7’ da sunulmuştur.

Şekil 7 Farklı duvar konfigürasyonlarına ait yük-yer değiştirme eğrileri



Grafik incelendiğinde, boşluksuz çerçevenin daha düşük bir kapasitede daha sünek bir davranış gösterdiğini ve göçme modunun eğilme kaynaklı olduğunu göstermektedir. Ancak, dolgu duvarların

sisteme dahil edilmesiyle taşıma kapasitesi dolgu duvar yüksekliğiyle orantılı olarak artmıştır. Fakat sünek davranışın azalmasına sebep olmuştur. Özellikle tam dolgu duvar durumunda sistem hızlı bir şekilde yük almış ancak daha düşük ötelemelerde yük kaybı yaşamış yani kesme kaynaklı hasarlar ortaya çıkmıştır. 0.75 m boşluklu duvarda 70 mm öteleme mertebesinde göçme meydana gelmiştir. Bu durum bu boşluk mesafesinin kritik bir ölçü olabileceğini göstermektedir. Sistemin global davranışına ait bazı sonuçlar Tablo 2’ de özetlenmiştir.

Tablo 2 Global davranış özellikleri

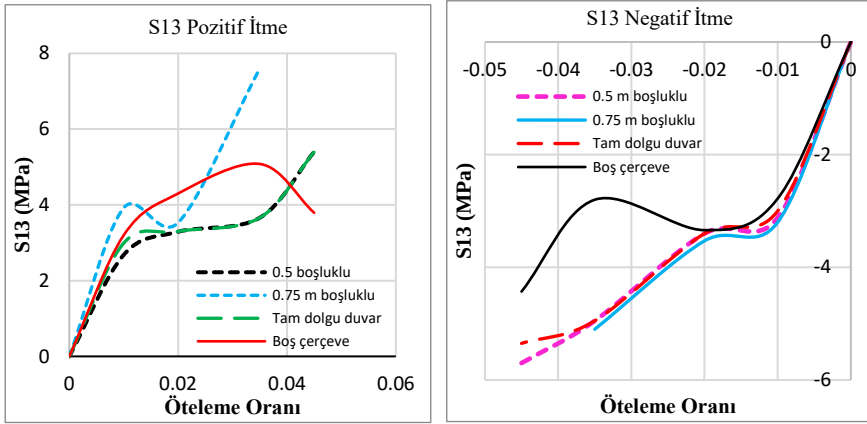
Sistem	V _{max} (kN)	Δy (mm)	Δu (mm)	$\mu = \Delta u / \Delta y$	K _o (kN/mm)	Enerji E (kN·mm)
Boş çerçeve	74	9.81	89.6	9.14	5.26	5 624
0.75 m boşluk	133.8	9.2	70	7.61	20.9	7947
0.5 m boşluk	163.8	7.43	89.7	12.07	14.0	12 964
Tam dolgu	200.3	2.05	79.29	38.77	58.76	14 167

Süneklik oranı ($\mu = \Delta u / \Delta y$) incelendiğinde 0.75 m boşluklu sistemin sünekliğinin boş çerçeveye göre düştüğü, 0.5 m boşluklu sistemde ise rijitlik ve kapasite artışına rağmen sünekliğin tekrar arttığı görülmektedir. Ancak tam dolgu durumunda süneklik değeri 38.77 olup oldukça yüksek görünmesine rağmen bu değer, ani yorulma sonrası büyük yer değiştirmede pik yük korunamadığı için “gerçek süneklik kapasitesini” yansıtmaz; sistem kesme kontrollü olduğundan kırılğan davranmıştır. Bu durum, tam dolgulu sistemin çok düşük akma deplasmanında (2.05 mm) kapasiteye ulaşmasıyla da doğrulanmaktadır. Yani tam dolguda enerji tüketimi yüksek olsa da bu enerji yüksek rijitlik + düşük deformasyon kapasitesi kombinasyonu ile gerçekleşmiş, kısa kolon mekanizması baskın hâle gelmiştir. Enerji tüketimi incelendiğinde boş çerçevenin 5.6 kN·mm olan enerji kapasitesinin tam dolguda 14.2 kN·mm’ye çıktığı görülmektedir. Ancak 0.5 m boşluklu sistemin 12.9 kN·mm’lik değeri, kısa kolon etkisinin ortaya çıktığı durumu göstermektedir.

Rijitlik artmış, kapasite yükselmiş fakat deformasyon talebi kolonun kısa segmentine toplandığı için hasar yerel olarak yoğunlaşmıştır.

Her bir kolonda meydana gelen kesme gerilmesi değerlerinin farklı öteleme oranları için karşılaştırması Şekil 8’de verilmiştir. Sağ tarafta yer alan kolon kiriş bölgesinde yer alan eleman üzerinden değerler elde edilmiştir. Pozitif ve negatif itme yönleri için ayrı ayrı sunulmuştur.

Şekil 8 Kolon- kiriş birleşim bölgesinde meydana gelen maksimum kesme gerilmesi



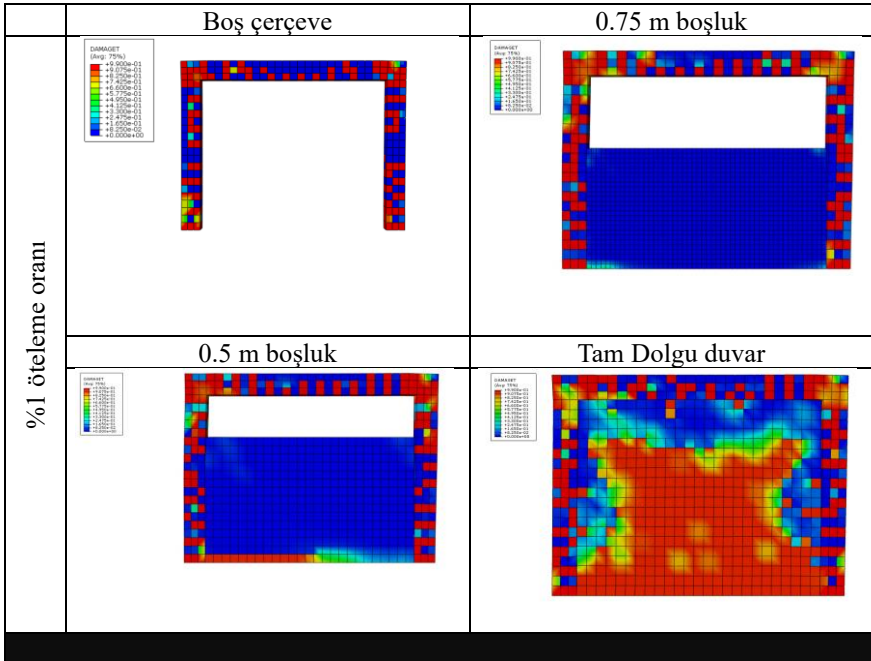
Boş çerçeve durumu referans alındığında, global davranışı bakıldığında en yüksek gerilme değerlerinin tam dolgu duvarda olması beklenirken, kısa kolon mekanizmasının tetiklenmesiyle, 0.75 m ve 0.5 m boşluk durumunda daha büyük gerilmeler ortaya çıkmıştır. Sonuçta 0.5 m ve tam dolgu duvarda da kesme gerilmeleri artmış olsa da Şekil 7’ dan anlaşılabacağı üzere gerilmeleri sistemin tümüne daha fazla yayılım göstermiş ancak 0.75 m boşluk durumunda kolonun lokal bölgelerinde yığılmalar daha fazla görülmüştür.

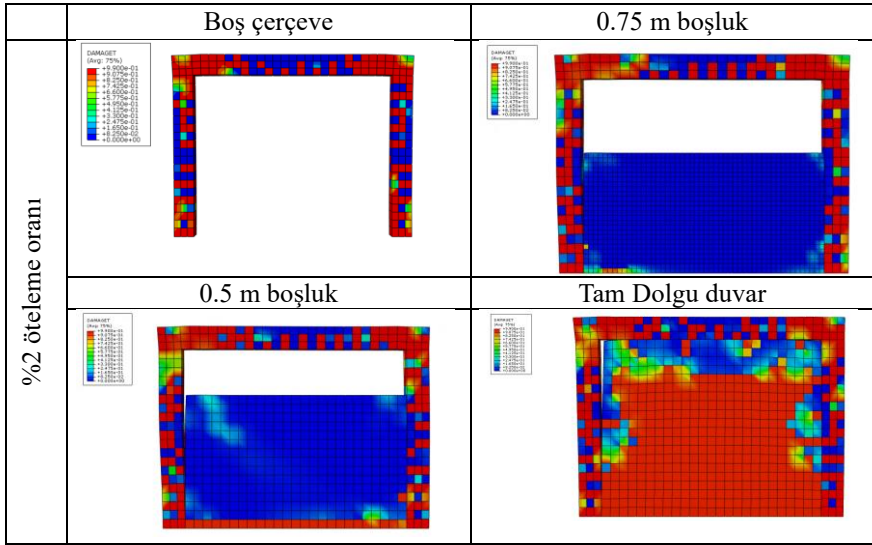
%1 ve %2 itme oranları için yapıda meydana gelen çekme hasarlarının dağılımı Şekil 9’da verilmiştir. Tüm konfigürasyonlar için görsel olarak karşılaştırma yapılmıştır.

%1 öteleme oranında, boş çerçeve durumu referans alındığında, 0.5 m ve 0.75 m boşluk durumlarında özellikle kolon kiriş birleşim bölgesinde hasarlar yoğunlaşmıştır. 0.75 m boşluk durumunda, 0.5 m boşluk durumuna göre kıyaslama yapıldığında 0.75 m boşluk durumunda duvar daha az hasar görmüş ancak kolon ve kirişler üzerinde yayılmış şekilde daha fazla çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Tam dolgu duvar durumunda ise kolon kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar daha sınırlı ancak duvarda oldukça fazla hasar oluşumu gözlemlenmiştir.

%2 öteleme durumunda ise 0.5 m boşluk ve 0.75 m boşluk durumunda çatlak ilerlemesinin devam ettiği ve duvarında hasar görmeye başladığı görülmüştür. Tam dolgu durumunda ise duvar taşıyıcılığını kaybetmiş ve hasarlar kolon ve kirişler üzerinde yoğunlaşmaya başlamıştır.

Şekil 9 %1 ve %2 öteleme oranlarında meydana gelen çekme hasarları





Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı bant pencere boşluğu yüksekliklerinin betonarme çerçevelerde kısa kolon davranışına etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Doğrulama amacıyla oluşturulan sonlu elemanlar modeli, deneysel referans sistemle yüksek uyum göstermiştir. Elde edilen bulgular, bant pencere yüksekliğinin hem global kapasite hem de yerel kesme talepleri üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma kapsamında ulaşılan temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Dolgu duvarın sisteme eklenmesiyle yatay taşıma kapasitesi belirgin şekilde artmıştır. Boş çerçevede 74 kN olan maksimum yük, 0.75 m boşluklu durumda 133.8 kN'a, 0.5 m boşlukta 163.8 kN'a ve tam dolguda 200.3 kN'a yükselmiştir. Taşıma kapasitesindeki bu artış, kolon serbest yüksekliğinin azalmasına bağlı olarak sistem rijitliğinin artmasıyla doğrudan ilişkilidir.

Başlangıç rijitliği (K_0), boş çerçevede 5.26 kN/mm iken 0.75 m boşlukta 20.9 kN/mm'e, tam dolguda ise 58.76 kN/mm'e yükselmiştir. Akma deplasmanı özellikle tam dolguda 2.05 mm gibi

çok düşük bir değere gerilemiş ve sistemin hızlı şekilde kapasiteye ulaşarak kesme kontrollü bir rejime girdiğini göstermiştir. En kritik boşluk mesafesi 0.75 m olarak belirlenmiştir. Bu durumda sistem yüksek rijitlik kazanmasına rağmen nihai deplasman kapasitesi yalnızca 70 mm olarak ölçülmüş ve diğer tüm konfigürasyonlardan daha erken göçme gözlenmiştir. Ayrıca S13 kesme gerilmesi eğrilerinde 0.75 m boşluklu sistemin birleşim bölgesinde en yüksek kesme taleplerini ürettiği belirlenmiştir. Bu sonuç, kısa kolon mekanizmasının en keskin şekilde bu boşluk yüksekliğinde oluştuğunu göstermektedir.

0.5 m boşluklu sistemde kısa kolon etkisi devam etmekle birlikte kesme talepleri daha geniş alana yayılmıştır. Bu sistemde maksimum yük ve enerji tüketimi yüksek olmasına rağmen hasarın belirli bir bantta yoğunlaşmadığı, duvar ve kolon üzerinde daha dağıtılmış bir hasar şekli olduğu görülmüştür. Tam dolgulu duvar sisteminde davranış çok rijit ve kırılğan bir karakter sergilemiştir. Yük kapasitesi en yüksek olmasına rağmen düşük deplasmanlarda kesme etkisi hâkim olmuş, duvar gövdesi yüksek hasar almış ve kısa kolon davranışı duvar–kolon etkileşim bölgesinde yoğunlaşmıştır.

Genel olarak, analiz sonuçları bant pencere boşluğunun konumu ve yüksekliğinin betonarme çerçevelerde kısa kolon mekanizmasını kuvvetle etkilediğini göstermiştir. Özellikle 0.75 m boşluk yüksekliği (yükseklik oranı: $h_f/h = 0.375$), hem yerel kesme taleplerinin maksimuma çıktığı hem de sistemin göçme deplasmanının minimuma indiği kritik bir konfigürasyon olarak belirlenmiştir. Bu nedenle bant pencere uygulamalarında boşluk yüksekliği, kolon serbest boyunu kısıtlamayacak şekilde dikkatle tasarlanmalı ve gerekli durumlarda güçlendirme önlemleri değerlendirilmelidir.

Kaynakça

Anil, Ö., & Altın, S. (2007). An experimental study on reinforced concrete partially infilled frames. *Engineering Structures*, 29(3), 449–460.

Arslan, M. E. (2013). *Dolgu duvarlı ve deprem kumaşlı betonarme çerçevelerin deneysel incelenmesi*. (Doktora tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Balık, F. S., & Bahadır, F. (2019). Farklı güçlendirme yöntemleri kullanılarak 1/5 ölçekli betonarme çerçevelerde kısa kolon davranışlarının incelenmesi. *Journal of the Institute of Science & Technology*, 9(1), 433–445.

Cagatay, I. H., Beklen, C., & Mosalam, K. M. (2010). Investigation of short column effect of RC buildings: Failure and prevention. *Computers and Concrete*, 7(6), 523–532. <https://doi.org/10.12989/CAC.2010.7.6.523>

Çelik, A., Özgür, A., & Mercimek, Ö. (2025). Numerical analysis of failure performance in novel hollow brick designs. *Engineering Failure Analysis*, 109995.

Dassault Systèmes. (2013). *ABAQUS Documentation*. Providence, RI: Dassault Systèmes.

Demir, S., Hüsem, M., Altın, S., Pul, S., Bikçe, M., & Emsen, E. (2013). Mevcut betonarme yapılarda kısa kolon davranışlarının iyileştirilmesi. 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay.

Education and Job. (2014). Education and Job Archive. http://educationandjob1.blogspot.com.tr/2014_05_01_archive.html

Hafezolghorani, M., Hejazi, F., Vaghei, R., Jaafar, M. S. B., & Karimzade, K. (2017). Simplified damage plasticity model for concrete. *Structural Engineering International*, 27(1), 68–78.

Işık, E., Ulutaş, H., Harirchian, E., Avcil, F., Aksoylu, C., & Arslan, M. H. (2023). Performance-based assessment of RC building with short columns due to the different design principles. *Buildings*, 13(3), 750. <https://doi.org/10.3390/buildings13030750>

Jayaguru, C., & Subramanian, K. (2012). Seismic behaviour of partially infilled RC frames retrofitted using GFRP laminates. *Experimental Techniques*, 36, 82–91.

Moretti, M., & Tassios, T. P. (2007). Behaviour of short columns subjected to cyclic shear displacements: Experimental results. *Engineering Structures*, 29(8), 2018–2029.

Seki, M., Popa, V., Lozinc, E., Dutu, A., & Papurcu, A. (2018). Experimental study on retrofit technologies for RC frames with infilled brick masonry walls in developing countries. 16th European Conference on Earthquake Engineering, Greece.

Soltanzadeh, G., Osman, H. B., Vafaei, M., & Vahed, Y. K. (2018). Seismic retrofit of masonry wall infilled RC frames through external post-tensioning. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(3), 1487–1510.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBY 2018)*. Resmî Gazete, Sayı 30364 (Mükerrer).

Tunaboyu, O. (2017). *Kısa kolon oluşumuna neden olabilecek boşluksuz dolgu duvarlı betonarme çerçeve davranışının analitik ve deneysel yöntemlerle irdelenmesi*. (Doktora tezi). Anadolu Üniversitesi.

BÖLÜM 4

YALITIMLI MALZEME KULLANIMI VE TASARRUF ÜZERİNE ANALİTİK DEĞERLENDİRME, İKİZ DÖNÜŞÜM

ARİF HİKMET ÇAKOĞLU¹

Giriş

Dünyamız genelinde hissedilen küresel ısınmaya karşı ülkeler tedbirler almaya çalışmaktadır. Hava kirliliği, karbonmonoksit salınımı, çevre kirliliği, geri dönüşüm, sıfır atık projesi vb. kullanılan ifadelerin ortak yanı tamamının insan kaynaklı tüketimden kaynaklanıyor olması ve gelecek nesilleri de düşünerek “sürdürülebilir yaşamı” öncelikli ele almasıdır. Paris İklim Antlaşması, Kyoto Sözleşmesi gibi imzalanan uluslararası sözleşmeler ile ülkeler tarafından sera gazı salınımını düşürmek için belirli bir tarih hedeflenmektedir. Fosil yakıt tüketiminin azaltılması, geri dönüşüm projeleri ile doğal kaynakların korunmaya çalışılmasına yönelik atılan adımlar, gelecek nesillere yaşanabilir bir gezegen bırakmayı amaçlamaktadır. Elektrikli otomobil kullanımının teşvik edilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgar gülü, güneş enerji panelleri vb.) üretimdeki payının artırılmaya çalışılması önemli girişimlerdir. Ülkemizin, ayrıca petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtları yoğun miktarda dış ülkelere tedarik etmesi nedeniyle ve bu ürünlerin ithalat

¹ Dr.Öğr.Üyesi, Sinop Üniversitesi, GGY Bölümü, Orcid: 0000-0002-8055-7858

içindeki payının yüksek olması da enerji kullanımında tasarruf yapılmasının nedenlerinden biridir. Söz konusu bu yakıtların kullanımının azaltılması hem ülke olarak iklim değişikliğine karşı verilen mücadelede hem de dış ticaret açığının düşürülmesine katkıda bulunacaktır.

Nüfusun 8 milyardan fazla olduğu gezegenimizde toplam arazi miktarının sabit olmasına karşın artan nüfusun ihtiyaçlarının karşılanabilmesi de enerji başta olmak üzere sürdürülebilir yaşam için kaynakları doğru ve verimli kullanmayı gerektirmektedir. Dünya genelinde ve ülkemizde enerji kaynaklarının azalması, ülkeleri bir yandan alternatif enerji kaynakları bulmaya yönlendirirken diğer taraftan tüketilen enerji miktarının da düşürülebilmesi için kullanılan malzeme tercihlerinde değişiklik yapılması ihtiyacı oluşmaktadır. Bu bağlamda, ilgili kurumlar nezdinde enerji ve doğal kaynaklarımızın kullanımında tüketimi düşürmeye yönelik düzenlemeler de yapılmaktadır.

“Dünyayı atalarımızdan miras değil, torunlarımızdan emanet aldık.” Yabancı atasözünde de ifade edildiği gibi sürdürülebilir bir yaşam için, doğanın verdiği kaynakları israf etmeden yeteri kadar ve planlı bir şekilde tüketilmesi yönünde adımlar atılmalıdır. Enerjinin yanı sıra, insan yaşamının devamı için elzem olan gıda üretimi ve dolayısıyla su kaynaklarının da doğru planlama ile tüketime sunulmasını gerektirmektedir. Sanayi devriminden bilişim çağına girilen dönemde olmamız nedeniyle de “yapay zeka çağı” olarak adlandırılan bulunduğumuz yüzyılda kullanılan tüm alet ve cihazların daha çok enerji gerektireceği de bilinmektedir. Enerjinin doğayla dost, yenilenebilir kaynaklardan temin edilmesi amaçlanırken diğer taraftan mevcut doğal kaynakların tüketiminin de düşürülmesi hedeflenmektedir.

Yalıtım Malzemeleri Tercihi

Ülkemizde bina özellikle konut inşaatlarında en çok tercih edilen dış cephe yalıtım malzemeleri XPS, EPS, taş yünü, cam yünü, polistren köpük vb. olmakla birlikte ısı yalıtımlı tuğlalar da bulunmaktadır. Bu malzemelerin her biri için ısı yalıtım konusundaki teknik özellikleri önceden belirlenmiş olup bunlardan biri de λ 'dır. λ ısı iletkenlik katsayısı olarak bilinmekle birlikte, bu katsayı değeri ne kadar “sıfıra” yakın ise ısı yalıtımı yönünden o kadar kaliteli olduğunu gösterir. Yine bu malzemelerin yangına karşı dayanımını ifade eden sınıflama ise; en iyi özelliği A olmak üzere B ve C diye tanımlanmıştır. En çok tercih edilenler olan XPS ve EPS, λ ısı iletkenlik katsayısı yönünden istenilen özellikte olsa da yangın sınıfı B'dir ve yangında sönmülenip küçülür ve buharlaşırken havaya karbonmonoksit (CO) gazı saldığı ve bunun atmosferde biriken zehirli gazlardan biri olduğu da bilinmektedir. Bu malzemelerin tercih edilmesinin, fiyatının diğerklerine göre uygun olmasından kaynaklandığı düşünölmektedir. Daha gelişmiş ve ısı iletkenliği düşük olanlar ise, fiyatının yüksek olmasının yanı sıra montaj zorluğu konusundaki dezavantajlı olmaları kullanımında menfi yönde tesir etmektedir (Arslan M.A ve Aktaş M., 2018).

Yalıtımlı malzemelerde aranılan genel özellikler şu başlıklarda özetlenebilir.

Fiziksel Özellikler: Yüksek ısı tutma kapasitesi, birim (özüöl) ağırlılığının düşük yani hafif olması, yeterli buhar geçirgenliği, yeterli basınç dayanımı, yeterli çekme dayanımı, ısı iletim katsayısının (λ) düşük olması

Dayanıklılık : Su ve neme, kimyasal etmenlere, biyolojik etkilere, yüksek sıcaklığa, parazitlere dayanıklı olması, yanmaz ve alev almaz olması, buhar difüzyon direnci olması

Ekolojik Bakımdan: Doğa ve ekosisteme karşı zararsız olması, insan sağlığına zararsız olması, kokusuz olması, az enerji tüketimli olması

Uygulama Kolaylığı: Kolay işlenebilir, sıva tutucu ve üzerine katman uygulamasına imkan tanınması

Ekonomik yönden: Ucuz ve kolay temin edilebilir olması.

Sözü edilen yapı malzemelerine ait teknik özelliklerden bazıları aşağıda sıralanmıştır.

Klasik tuğla: Duvar malzemesi olarak en çok kullanılanı 19*19*9,5 cm olanıdır. Bir tanesi 3 kg civarında ağırlıkta olup, killi topraktan 900-1000 0C sıcaklıkta imal edilir, ucuzdur. Isı yalıtım özelliği olmaması, kullanılırken zayıf yani moloz atığına sebep olması ve ağırlığı dezavantaj teşkil etmektedir. Yalıtımlı dış cephe elde edebilmek için bu tuğla kullanımından sonra mantolama yani ısı yalıtım levhaları ile kaplama yapılması zorunludur. Ülkemizde bu tür tuğla üretimi yapan fabrikalar fazla olması nedeniyle -özellikle niteliksiz işgücü istihdamı sağladığından- ekonomiye faydası olmaktadır.

Şekil 1. Klasik tuğla



Şekil 2. Gaz beton



Gaz beton tuğlalar: Silis ve kirecin gayet ince öğütölüp su ve alüminyum tozu ile karıştırılması sonucu, genleşerek oluşın kütle, istenilen ölçülerde kesilerek elde edilir. A sınıfı yanmaz özelliğe sahiptir. Hafiftir ve kolaylıkla istenilen boyutta kesilebilir, zayıat oluşmaz. Aynı hacimdeki klasik tuğlanın 1/3'ü ağırlığındadır. Ülkemizde bilinen dokuz gaz beton markasının üretimlerinin bir bölümü yurt dışına ihraç edilerek ekonomik katkı da sağlanmaktadır.

Silis ve kirecin gayet ince öğütölüp su ve alüminyum tozu ile karıştırılması sonucu, genleşerek oluşın kütle, istenilen ölçülerde kesilir.

Ülkemizde bina inşaatlarında mantolama yöntemi ile dış cephe ısı yalıtımı yapılması tercih edilmekteyken daha çok XPS (haddelenmiş sert polistren köpük) ile EPS'nin (genleştirilmiş sert polistren köpük) yanı sıra taş yünü gibi mineral yünler de kullanılmaktadır (İzoder, 2003).

EPS; hafif, ısı iletkenlik katsayısı (0,035-0,040 W/mK), yoğunluğu (8 kg/m³)düşük, mekanik (basınç) dayanımı 50-150 kPA, su emme oranı %0-5 aralığındadır.

XPS ise; hafif, ısı iletkenlik katsayısı (0,028-0,032 W/mK), yoğunluğu 25 kg/m³, mekanik (basınç) dayanımı 100-500 kPA, su emme oranı neredeyse %0 düzeyindedir.

Bu iki malzeme kıyaslandığında yoğunluk dışındaki kriterlerde XPS daha iyi özelliklere sahiptir ancak her iki malzeme de yangına karşı zaafıları vardır. Ayrıca XPS ve EPS'nin yanması halinde yoğun CO ve CO₂ salınımı nedeniyle insan sağlığı ve ekosisteme karşı menfi yönde etkisi bulunmaktadır (Woolley, T. vd, 2005).

Taş yünü ise bazalt ve granit gibi kayaların yüksek sıcaklıkta eritilmesiyle elde edilen A sınıfı yanmazlığa sahip ve kaliteli bir

yalıtım malzemesi olmakla birlikte çoğunlukla kompozit levha ya da alüminyum/cam kaplı cephelerde tercih edilmektedir (Kırıcı, 2012).

Şekil 3. EPS Yalıtım malzemesi



Şekil 4. XPS Yalıtım malzemesi



Bu yalıtım levhaları ne kadar kalın olursa ısı geçirgenliği o kadar düşer. Isı geçirgenliği konusunda en önemli parametre olarak ısı iletkenlik katsayısı (λ)'dır. Ayrıca yangın dayanımı, birim hacim ağırlığının düşük olması ve su emme oranları da önemli kriterler arasındadır. Levha kalınlığı arttıkça, ısı direnç artarak ısıtma veya soğutma için kullanılan enerji miktarının azalmasına ve enerjinin daha verimli kullanılmasına yol açar. 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).

Yapı malzemelerinin hafif olanlarının tercih edilmesi ayrıca binaların sabit ağırlığının da düşük olması ve dolayısıyla deprem performansına olumlu yönde katkı yapmasına neden olmaktadır.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından 19 Şubat 2022 tarihinde Resmi Gazete'de yayınlanan Binalarda

Enerji Performansı Yönetmeliğinde değişiklik yapılarak, yeni yapılacak binalarda daha önce en az C sınıfı olması istenen enerji sınıfının kapalı kullanım alanı 5000 m² ve üzeri olan binalarda B sınıfına yükseltilmiş ayrıca kullanılacak enerjinin en az %5’inin de yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması zorunlu hale getirilmiştir. Söz konusu yönetmelik değişikliği 1 Ocak 2023 tarihinden itibaren yürürlüktedir (Resmi Gazete). Bu sınırlamalar, 1 Ocak 2025’den itibaren kapalı kullanım alanı 2000 m² ve yenilenebilir enerji tesis edilmesi de %10 olacak şekilde artırılmıştır. Bir başka ifadeyle “Neredeyse Sıfır Enerjili Bina” (nSEB) olarak da tabir edilen bu düzenlemelere ilave olarak, 20 Şubat 2025 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan TS 825’de yapılan yönetmelik değişikliği ile; ülkemizin fiziki coğrafyasından bağımsız olarak daha önce 4(dört) olan ısı bölgesi sayısı 6(altı) ya çıkarılmıştır. Bu son düzenlemelerle birlikte ısı yalıtımında kullanılan malzeme kalınlıkları her yerleşim birimi için -bulunduğu sınıfa bağlı olarak- en az 3 cm artmıştır. Örneğin; yürürlükten kalkan (eski) ısı bölgeleri 4 olduğunda Sinop İlinin tamamı 2. Isı bölgesinde bulunuyorken artık Boyabat İlçesi 4., diğer ilçe merkezleri ise 3. Isı bölgesinde yer almaktadır. Karadeniz kıyı bölgesinin tamamı önceden 2. Isı bölgesindeyken artık 3. Isı bölgesinde görölmektedir. Buna göre de, ısı yalıtım malzemesi kalınlıkları yeni düzenleme ile artırılmıştır. Ülke genelinde, yeni yönetmeliklere göre yalıtım yapıldığı takdirde konutlarda %25’e varan enerji tasarrufu olması beklenmektedir (İzoder, 2025).

Ülkemizde halen binalarda çatı yapılmasının zorunlu olmadığı yerleşim yerleri bulunmaktadır. Özellikle yaz aylarının sıcak olduğu Ege, Akdeniz kıyılarındaki villa, yazlık vb. binalar ile G. Doğu Anadolu Bölgesi kırsalında halk arasında dam olarak tabir edilen teraslarda çatı yapmayanlar olduğu gibi klima kullanımı da önemli sayılara erişmiştir. Halbuki çatılardan soğuk aylarda ısı

kaybının %30 civarlarında olduğu üstelik yaz aylarında da klima kullanımı süresini düşüreceği nedeniyle elektrik tüketiminde tasarruf edilebileceği dikkatlerden kaçmaktadır. Çatı yapılmasını ülke genelinde zorunluluk arz etmesi “kamu menfaati” olarak değerlendirilmelidir.

Yeni yönetmelik, sıcak iklime haiz yerleşim yerlerinde de dış cephe ısı yalıtımı yapılmasını zorunlu hale getirerek soğutma amaçlı klima vb. cihaz kullanımını düşürölerek enerji tasarrufunu amaçlamıştır.

Yine Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Başkanlığı tarafından düzenlemeler ile yeni yapılaşmada doğayla dost, düşük enerji tüketimi ve enerjinin bir bölümünü kendi üreten tesisatların kullanılması zorunlu hale gelmiştir.

11 Mart 2025 tarih ve 32838 sayılı Resmi Gazete’de yayınlanan Planlı Alanlar İmar Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik ile; yapılacak binaların inşaat alanı büyüklüğüne bağlı olarak; gri su teknolojisi kurulması, yağmur suyu depolama alanı bulunması, yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılması, kapalı alanı 10.000 m² ve üzeri olan binalar için yeşil sertifika alınması zorunluluğu, elektrikli araçlar için site ve apartman otoparklarında şarj ünitelerinin kurulumu için zorunlu olan elektrik tesisatı ruhsata tabi olmaktan çıkarılarak, çevre etiketli, kimyasal ve radyasyon salınımı az malzeme kullanımıyla da daha konforlu ve sağlıklı yapılar inşa edilmesi hedeflenmektedir.

Ekonomik Yönden Etkisi: Dış Ticaret Açığı- Yakıt İthalatı İlişkisi

Dünya genelinde ve ülkemizde fosil yakıt tüketiminden vazgeçebilme yöntemleri ve alternatif enerji kaynaklarına yönelim artmaktadır. Fosil yakıtların hava kirliliğine menfi etkisi

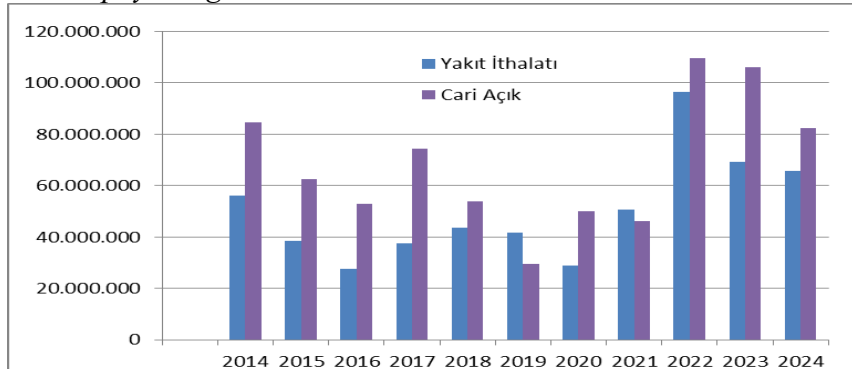
olduğu gibi ülkemizin ekonomik anlamda dışa bağımlılığı konusunda önemli bir bileşendir. Aşağıdaki tablodan da görüleceği üzere 2019 ve 2021 yıllarında yakıt ithalatı için ödediğimiz meblağ, o yıllara ait dış ticaret açığımızdan fazladır. Diğer yıllarda da ortalama %70'ler düzeyindedir. Ülkemizin enerji konusunda dışa bağımlılığını ve ithalat/ihracat oranındaki olumsuz görünüme katkısını gösteren veriler aşağıdaki Tablo 1 ve Şekil 5' de verilmiştir.

Tablo 1. Ülkemizin yakıt ithalatı ve cari açık rakamları (1000 Dolar)

Yıllar	Yakıt İthalatı	Cari Açık	İhracat/İthalat(%)	Yakıt İthalatı/Cari Açık
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

(Kaynak: TÜİK)

Şekil 5. Yakıt ithalatının son 11 yılda dış ticaret açığımız içindeki payının görünümü



Tablo ve şekilden yakıt ithalatına ödediğimiz rakamların dış ticaret yani cari açığımıza etkisi net olarak görülmektedir ki, ülke olarak bu fosil yakıt tüketimin düşürülmesi ile hem havaya salınan zehirli sera gazı miktarında hedeflediğimiz “2053 yılı sıfır emisyon” amacına hizmet edilir hem de cari açığımızın azaltılması ile ekonomik büyümemize katkıda bulunulacaktır.

Dışişleri Bakanlığı’nın web sitesinde de ülkemizin uluslararası enerji stratejisinden bahsettiği sayfasında %67,8 oranında dışa bağımlı olduğumuz ifade edilmiştir (T.C. Dışişleri Bakanlığı, 2025).

Konut ihtiyacının da artmakta olduğu Türkiye’de konuyla ilgili olarak kredi kullanmak isteyen şahısların ısı yalıtım özelliği yüksek olan konutları tercih etmesini özendirmek amacıyla da Bankacılık Düzenleme ve Denetleme Kurumu tarafından düzenleme yapılmıştır. Buna göre;

Kurulun 23.06.2022 tarihli toplantısında 21.06.2022 tarih ve E-24049440-045.01[4/5]-53930 sayılı yazı ve eklerinin incelenmesi sonucunda;

Bankaların Kredi İşlemlerine İlişkin Yönetmeliğin (Yönetmelik) “Konut, taşıt ve tüketici kredilerine ilişkin sınırlamalar” başlıklı 12/A maddesinin altıncı fıkrası uyarınca, Yönetmeliğin 12/A maddesinin birinci fıkrasında düzenlenen, tüketicilere, konut edinmeleri amacıyla kullanılacak kredilerde ve taşıt kredileri hariç konut teminatlı kredilerde, kredi tutarının teminat olarak alınan konutun değerine oranının aşağıdaki tabloda yer aldığı şekilde belirlenmesine, karar verilmiştir.

Bankaların Kredi İşlemlerine İlişkin Yönetmeliğin (Yönetmelik) 23.06.2022 tarihli kararında “Konut, taşıt ve tüketici kredilerine ilişkin sınırlamalar” başlıklı Madde 12/A’da

“(1) (Değişik:RG-25/1/2019-30666) Tüketicilere, konut edinmeleri amacıyla kullanılacak kredilerde ve taşıt kredileri hariç konut teminatlı kredilerde, kredi tutarının teminat olarak alınan konutun değerine oranı yüzde sekseni aşamaz. Bu oran, 18/4/2007 tarihli ve 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ile alt

düzenlemelerine istinaden düzenlenen Enerji Kimlik Belgesi bulunan; enerji performansı A sınıfı olan konutlar için yüzde doksanı, enerji performansı B sınıfı olan konutlar için yüzde seksen beşi aşamaz. Sınırlamaya konu krediler için teminat olarak alınan gayrimenkullerin değerlemesinin Kurul veya Sermaye Piyasası Kurulu tarafından yetkilendirilmiş değerlendirme şirketlerine yaptırılması ve sınırlamada bu değerlerin kullanılması zorunludur.” İfadesi yer almaktadır.

Tablo 2. BDDK Kararına göre konut kredilerinde kullanılabilecek oranlar

1. EL KONUT ALIMINDA KULLANDIRILABİLECEK AZAMI KREDİ TUTARI			
KONUT DEĞERİ	Enerji Sınıfı ¹		
	A	B	DiĞER
DEĞER <= 2 MİLYON TL	DEĞER x 90%	DEĞER x 85%	DEĞER x 80%
2 MİLYON TL < DEĞER <= 5 MİLYON TL	DEĞER x 70%	DEĞER x 65%	DEĞER x 60%
5 MİLYON TL < DEĞER <= 10 MİLYON TL	Azami 3,5 MİLYON TL	Azami 3,25 MİLYON TL	Azami 3 MİLYON TL
10 MİLYON TL < DEĞER	DEĞER x 0%	DEĞER x 0%	DEĞER x 0%

2. EL KONUT ALIMINDA VE KONUT TEMİNATLI KREDİLERDE KULLANDIRILABİLECEK AZAMI KREDİ TUTARI			
KONUT DEĞERİ	Enerji Sınıfı		
	A	B	DiĞER
DEĞER <= 500 BİN TL	DEĞER x 90%	DEĞER x 90%	DEĞER x 90%
500 BİN TL < DEĞER <= 2 MİLYON TL	DEĞER x 70%	DEĞER x 65%	DEĞER x 60%
2 MİLYON TL < DEĞER <= 5 MİLYON TL	DEĞER x 50%	DEĞER x 45%	DEĞER x 40%
5 MİLYON TL < DEĞER <= 10 MİLYON TL	Azami 2,5 MİLYON TL	Azami 2,25 MİLYON TL	Azami 2 MİLYON TL
10 MİLYON TL < DEĞER	DEĞER x 0%	DEĞER x 0%	DEĞER x 0%

Türkiye’de yapı sektöründe dönemsel olarak iniş-çıkışlı zaman dilimleri olsa da genel olarak inşaat alanında yapılan imalat miktarı yüksek seviyelerde olmuştur. Son 3 yıla ait yapı ruhsatı ile yapı kullanma izin belgelerine ilişkin bilgiler Tablo 2’de verilmiştir. 2023-2024 arasında küçülme görülse de 2025 yılında daha yüksek oranda büyüme görülmüştür. Elbet burada ekonomik göstergelerin de etkisi olmaktadır ancak genç nüfus ve artan işgücü arz ve talebi sektörün canlı kalmasına neden olmaktadır.

Tablo 3’de verilen yapı ruhsatı ve yapı kullanma izinlerine ait rakamlar arasında 2. el olanları da düşündüğümüzde yeni

yapılardaki ısı yalıtımı uygulaması ve şartları sağlaması halinde yenilenebilir enerji, su deposu, gri su tesis edilmesi gibi ilaveler konfor artışı sağlayacağı gibi önemli miktarda enerji ve doğal kaynak tasarrufu da sağlayacaktır.

Tablo 3. Yapı ruhsatı ve yapı kullanma izin belgelerindeki değişimler

YAPI RUHSATI VE YAPI KULLANMA İZİNİ					
Yapı Ruhsatı ve Yapı Kullanma İzin Belgesi Değişimleri [%]					
2023-2025					
YAPI RUHSATI					
Göstergeler	2025/2.Ç.	2024/2.Ç.	2023/12.Ç.	Önceki Yıla Göre Değişim Oranı [%]	
				2025-2024	2024-2023
Bina Sayısı	40.760	27.645	34.179	%47,4	-%19,1
Yüz ölçümü [m ²]	54.356.167	33.595.485	45.179.358	%61,8	-%25,6
Daire Sayısı	292.433	153.638	204.388	%90,3	-%24,8
YAPI KULLANMA İZİN BELGESİ					
Göstergeler	2025/2.Ç.	2024/2.Ç.	2023/2.Ç.	Önceki Yıla Göre Değişim Oranı [%]	
				2025-2024	2024-2023
Bina Sayısı	20.135	17.055	19.300	%18,1	-%11,6
Yüz ölçümü [m ²]	27.199.024	20.896.818	23.537.451	%30,2	-%11,2
Daire Sayısı	130.152	90.209	110.679	%44,3	-%18,5

Kaynak: TUİK

Su Gereksinimi ve Tasarrufu

Küresel ısınma neticesinde beliren küresel iklim değişikliği, hidrolojik çevrimdeki mevcut dengeyi menfi yönde etkilemektedir. Hidrolojik çevrimin en önemli bileşeni olan atmosfer olması nedeniyle iklim değişikliğinin atmosferik koşullarda sebep olacağı değişikliklerin havzaların yağış, evapotranspirasyon ve akış gibi hidrolojik döngü üzerinde, hem alan hem de zaman ölçeğinde önemli değişimlere yol açacağı artık her kesim tarafından kabul edilmektedir. Bu değişimler yalnızca mevcut uzun dönem ortalamalarından bağımsız, olağan dışı olayların periyodik dağılımlarında da görülecektir. Genel itibariyle, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerinde yaratacağı önemli etkiler havzaların bulunduğu bölgelere bağlı olarak; yüzeysel su potansiyellerinde azalma ya da artış, yeraltı suyu

beslenmelerinde dolayısıyla boşalımlarında değişim, taşkın ve kuraklıkların beklene periyodik görünümünde düzensiz şekilde sıklık ve büyüklüklerinde değişim, değişen yağış rejimi, bitki örtüsü ve arazi kullanımlarının neden olduğu erozyon sorunları, kar suları ile beslenen akarsuların debilerinde değişiklik, tarımsal su gereksinimlerinde artış şeklinde özetlenebilir (Fıstıkoğlu). Çeşitli iklim modellerine göre, 2030'lu yıllar itibarı ile karmaşık iklim yapısı içinde olan Türkiye'nin, özellikle küresel ısınmaya bağlı olarak gerçekleşecek bir iklim değişikliğinden, büyük oranda etkileneyeği, büyük bir kısmının kuru ve sıcak bir iklimin etkisine gireceği, su kaynakları, ekolojik ve ekonomik süreçler, hatta yetişen tarım ürünleri çeşit ve miktarında önemli ölçüde farklılaşacağı öngörülmüştür

Kumar ve ark. (2008) bir ülkenin su durumu, suya erişim ve kullanım, su ortamının durumu ve su sektöründeki kurumsal yetenekler ile ekonomik büyüme arasındaki bağlantının doğasını analiz etmişlerdir. Bir ülkenin su durumunu gerçekçi bir şekilde değerlendirmek amacıyla; farklı kullanımlar için suya erişim gibi önemli özellikleri yakalayabilen; değişik sektörlerde su tüketim düzeyi; su varlığının durumu ve su sektöründeki teknolojik ve kurumsal kapasiteyi dikkate alan, Sürdürülebilir Su Kullanım Endeksi (SWUI) adlı 18 Su Yoksulluk Endeksinden (WPI) [Sullivan, 2002] türetilmiş yeni bir endeks önermişlerdir. Çalışmalarında Su Yoksulluk Endeksinden elde edilen sürdürülebilir su kullanım endeksi verileri; 145 ülke için insani gelişme ve kişi başına düşen GSYH (satın alma gücü paritesi) ve 117 ülke için küresel açlık endeksi verileri analiz edilmiştir. Aynı zamanda sıcak ve kurak tropik iklim bölgesinde yer alan ülkelerde su depoları oluşturmaının ekonomik gelişimi nasıl büyüteceğini göstermek amacıyla 22 ülke için kişi başına baraj depolama verileri üzerinde analitik değerlendirme yapmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre ekonomik açıdan düşük gelire sahip ülkelerin, su

ihtiyaçlarına çözüm bulmak için ekonomik koşulların iyileşmesini beklemesine gerek olmadığını göstermiştir. Bunun yerine, su altyapısı için yatırım, kurumların oluşturması, suya erişim ve kullanımı ve su durumunu iyileştirecek politika reformlarının uygulanması önerilmiştir.

Her ne kadar son yönetmelik değişiklikleri ile “gri su” kullanımının zorunlu hale getirildiği sınırlamalar konulmuşsa da, bu uygulamanın müstakil ev, yazlık, villa gibi sahiplerinin gelir düzeyi orta ve üstü olan şahsi binalar için de getirilmesi genel anlamda kamu menfaati için gereklidir.

Yağmur sularının toplanıp depolanması daha büyük ölçekte belediyeler tarafından da yapılması yönünde -vatandaşların ileriye dönük ihtiyaçları için düşünülmesi ve alternatif çözümler sunulması da- önümüzdeki dönemlerde gündem olması beklenmektedir.

Sonuçlar

1) Çatı yapılması tüm binalar için zorunlu olmalıdır. Çatı, sadece yağıştan koruyan değil aynı zamanda kaplaması nedeniyle dikey yönden de ısı yalıtımı konusunda fayda sağlamaktadır. Özellikle sıcak yerleşimlerde dış cephe yalıtımı ve çatı kaplaması olan binalarda klima vb ısıtıcı/soğutucu kullanımında düşüş sağlanarak enerji tüketiminde tasarruf edilmesine katkı sağlayacaktır.

2) Su yönetimi konusu başta yerel idareler olmak üzere öncelikli planlamaya alınmalıdır. Cadde ve sokaklarda boşa akan suyun depolanıp, yeşil alan sulama, yangın hidrant sistemine entegre edilmesi ve hatta bazı ticari işletmelerin kullanımına sunulması da dahil olmak üzere bir çok alanda yeniden kullanılabilirliği yönünde adımlar atılmalıdır. Yerel idarelerce depolama için Osmanlı döneminde olduğu gibi sarnıç ya da aküfer gibi yapıların inşa edilmesi düşünülmelidir.

3) Bina inşaatlarında gaz beton, bims ve perlit esaslı tuğla ve taş yünü gibi hafif ve yalıtımlı malzeme tercih edilmesi teşvik edilmelidir. Dış cephe yalıtımında ülkemizde çoğunlukla XPS ve EPS tercih edilse de bu malzemelerin yalıtım yönünden ziyade yangına karşı zaafı ve dolayısıyla karbon salınımı da dikkate alınmalıdır.

4) Neredeyse Sıfır Enerjili Bina (nSEB) kapsamı kademeli olarak genişletilmeli, kapalı alanı 1000 m² ve üzeri olan tüm binalar için uygulanmalıdır. Hatta; yazlık, müstakil ev, villa tipindeki konutlar için de -bu tür yapıların maliyetinin yanında önemli bir tutar olmayacağı için- uygulanmalıdır. Yazlık, villa gibi evlerde tüketilen enerjinin ortalama bir apartman dairesinden fazla olduğu herkes tarafından bilinmekte olduğundan, böyle evleri kullananlar için önemli bir ek maliyet getirmeyeceği dikkate alınmalıdır.

5) Yalıtımlı yapı çözümleri eski binalar için de olsa, vatandaşlar için lüks olarak görülmemeli zorunluluk arz ettiği – gerekirse mahalle odaklı- bilgilendirmeler yapılmalıdır.

Kaynakça

Arslan M.A. ve Aktaş M. (2018) İnşaat Sektöründe Kullanılan Yalıtım Malzemelerinin Isı ve Ses Yalıtımı Açısından Değerlendirilmesi. Politeknik Dergisi. Cilt: 21 Sayı: 2, 299 – 320 <https://doi.org/10.2339/politeknik.407257>

Kumar, M.D., Shah, Z., Mukherjee, S. and A. Mudgerikar, 2008, “Water, human development and economic growth: some international perspectives”, Conference Papers, International Water Management Institute, 842-858.

Fıstıkoglu, O., Biberoglu, E., 2008, Küresel İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkisi ve Uyum Önlemleri, TMMOB İklim Değişimi Semp., 238- 252, 13-14 Mart , Ankara

BDDK, Bankacılık Düzenleme ve Denetleme Kurumu: Karar Sayısı: 10249 Karar Tarihi: 23.06.2022

İzoder., Isı, Su, Ses ve Yangın Yalıtımcıları Derneği, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Yapı Denetim Kuruluşları Yalıtım Semineri, (2003).

İzoder., Isı, Su, Ses VE Yangın Yalıtımcıları Derneği
<https://www.izoder.org.tr/dergiler/izoder-160-e-dergi/> erişim tarihi: 30.11.2025

İzoder., Isı, Su, Ses VE Yangın Yalıtımcıları Derneği
<https://www.izoder.org.tr/dergiler/izoder-172-e-dergi/#book/7> erişim tarihi: 30.11.2025

Kırbyık E., “Ses ve Isı Yalıtımlı Ekolojik Yapı Malzemelerinin İncelenmesi ve Trakya Bölgesinde Yetiştirilen Ayçiçeği Bitkisinin Yalıtım Malzemesi Olarak Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).

Resmi Gazete

<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2022/02/20220219-2.htm> erişim tarihi: 01.12.2025

Resmi Gazete

<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2025/03/20250311-1.htm> erişim tarihi: 04.05.2025

T.C. Dışişleri Bakanlığı, https://www.mfa.gov.tr/turkiye_nin-enerji-stratejisi.tr.mfa erişim tarihi: 05.12.2025

TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu

<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Dis-Ticaret-Istatistikleri-Ekim-2025-53907> erişim tarihi: 01.12.2025

BÖLÜM 5

YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİNDE PERİYOT UZAMASININ HESABI

KANAT BURAK BOZDOĞAN¹
ERDİNÇ KESKİN²

Giriş

Depremler, insanlık tarihi boyunca yol açtıkları yıkıcı etkilerle büyük can ve mal kayıplarına neden olmuştur. Kuzey Anadolu, Doğu Anadolu ve Batı Anadolu fay sistemleri gibi aktif tektonik kuşaklar üzerinde yer alan Türkiye, bu nedenle yüksek deprem tehlikesi altındaki ülkelerden biridir (Yalçın vd., 2013).

Tarihsel ve aletsel dönemlere ait deprem kayıtları, Türkiye genelinde büyük can ve mal kayıplarına neden olan çok sayıda yıkıcı depremin meydana geldiğini göstermektedir. Bu depremler; yapıların hasar görmesi veya tamamen göçmesi, altyapı sistemlerinin işlevini yitirmesi, ciddi ekonomik kayıplar ve sosyal yaşamın uzun süreli sekteye uğraması gibi sonuçlar doğurmaktadır. Dolayısıyla, deprem etkilerinin sağlıklı bir şekilde değerlendirilmesi

¹ Prof. Dr., Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-7528-2418

² Doç. Dr., Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-8728-2906

ve yapı güvenliğinin artırılmasına yönelik mühendislik yaklaşımlarının geliştirilmesi, Türkiye için yalnızca teknik değil, aynı zamanda toplumsal bir zorunluluk olarak karşıımıza çıkmaktadır (Bikçe, 2015).

Deprem etkisinde yapıların dinamik davranışı, yalnızca taşıyıcı sistem özellikleriyle sınırlı kalmayıp, yapının oturduğu zeminin dinamik karakteristikleri ve temel–zemin etkileşiminin ortak etkisi altında belirlenmektedir (Bapir vd., 2023; Tekin & Gencer, 2024).

Geleneksel deprem mühendisliği yaklaşımlarında temellerin rijit kabul edilmesi ve zemin etkilerinin ihmal edilmesi yaygın olarak benimsenen bir varsayım olmakla birlikte, bu yaklaşım özellikle yumuşak ve orta sertlikte zemin koşullarında yapı tepkisinin gerçekçi olmayan biçimde tahmin edilmesine yol açabilmektedir (Chopra & Gutierrez, 1974). Yapı–zemin etkileşimi, yapısal sistemin dinamik özelliklerini değiştirerek doğal titreşim periyodunun uzamasına, eşdeğer sönüm oranlarının değişmesine ve deprem etkilerinin yapıya iletilme sürecinin yeniden şekillenmesine yol açmaktadır (Kara vd., 2021; Neha vd., 2022). Dolayısıyla, yapı–zemin etkileşimini içeren bütüncül analiz yaklaşımları, deprem davranışının gerçekçi biçimde modellenmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Kara vd., 2020).

Yapı–zemin etkileşiminin en belirgin sonuçlarından biri, sistemin etkin rijitliğinin azalmasına bağlı olarak doğal titreşim periyodunun uzamasıdır (zgr & Bozdoğan, 2022; Tallah vd., 2024). Temel ve zemin deformasyonlarının yapısal sisteme eklenmesiyle birlikte, yapı yalnızca üstyapı özellikleriyle değil, zemin rijitliği ve sönüm karakteristikleriyle birlikte davranan birleşik bir sistem haline gelmektedir (Chatterjee & Sengupta, 2024). Bu durum, özellikle yumuşak zemin koşullarında yapının baskın periyodunun, serbest zemin kabul altında elde edilen periyoda kıyasla önemli ölçüde artmasına neden olmaktadır (Mohasseb vd.,

2020; Yang vd., 2024). Periyot uzaması, deprem etkilerinin spektral içeriğiyle etkileşerek yapıya etkiyen iç kuvvetleri, yer değiştirmeleri ve ivme taleplerini doğrudan etkilemektedir (Kabtanu vd., 2018).

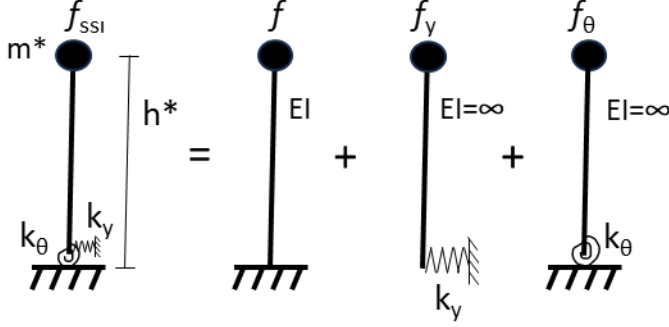
Yapı–zemin etkileşimi kapsamında ortaya çıkan bir diğer önemli mekanizma ise temel dönmesidir. Deprem etkisi altında, zemin deformasyonları ve temel altı gerilme dağılımlarındaki düzensizlikler nedeniyle temelde dönme hareketleri meydana gelebilmektedir. Temel dönmesi, yapının kat deplasmanlarını ve iç kuvvet dağılımlarını değiştirmekte; özellikle yüksekliği fazla ve rijitliği sınırlı yapı sistemlerinde ilave ikinci mertebe etkilerinin ortaya çıkmasına yol açabilmektedir (Bozdoğan vd., 2024). Bu dönme hareketi, yapının üstyapı dinamik tepkisini önemli ölçüde etkileyerek, serbest zemin varsayımı altında elde edilen deprem taleplerinden anlamlı sapmalara neden olmaktadır (Bozdoğan & Keskin, 2024).

Bu bölümde, yapı–zemin etkileşimi analizlerinde periyot uzaması için yaygın olarak kullanılan Veletsos ve Chowdhury yaklaşımı ile FEMA esaslı yöntemler, ilgili varsayımlar ve temel denklemler çerçevesinde ele alınmıştır (Chowdhury & Dasgupta, 2019; FEMA, 2020). Söz konusu yaklaşımların seçilen bir örnek problem üzerinden her iki yönteme ait çözüm adımları sunulmuş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Böylece, yapı–zemin etkileşiminin dinamik sistem davranışı üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılması hedeflenmiştir.

Yapı-Zemin Etkileşiminde Periyot Uzaması için FEMA Yaklaşımı

Tek Serbestlik Dereceli (TSD) bir sistem Şekil 1’de verilmiştir.

Şekil 1 Tek serbestlik dereceli bir sistem



Föppl-Papkovic teoremine göre Şekil 1’de görülen zemin-yapı etkileşimli sistemin frekansı için Denklem 1 yazılabilir.

$$\frac{1}{f_{SSI}^2} \cong \frac{1}{f^2} + \frac{1}{f_y^2} + \frac{1}{f_\theta^2} \quad (1)$$

Bu denklemde f_{SSI} , yapı–zemin etkileşimi dikkate alındığında üstyapı ile temel–zemin sisteminin birlikte dinamik davranışını temsil eden eşdeğer doğal frekansı; f , temelin rijit kabul edildiği durumda yalnızca üstyapıya ait doğal frekansı; f_y , temelin zemine göre yatay ötelenme hareketine karşılık gelen ve zemin yatay rijitliğinin etkisini temsil eden doğal frekansı; f_θ ise temelin zemine göre dönme hareketine karşılık gelen ve zemin dönme rijitliği ile temel geometrisinin sistem dinamik davranışına katkısını ifade eden doğal frekansı göstermektedir. Denklem 1, periyotlar cinsinden Denklem 2 şeklinde yazılabilir.

$$T_{SSI}^2 = T^2 + T_y^2 + T_\theta^2 \quad (2)$$

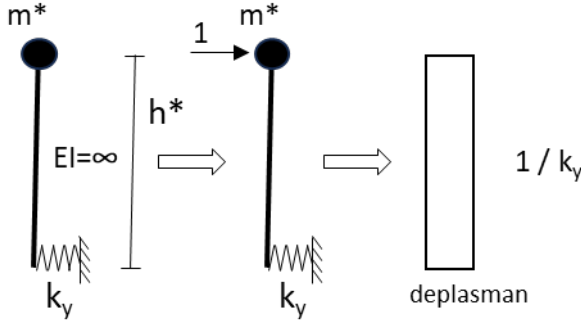
Bu denklemde T_{SSI} , yapı–zemin etkileşimi dikkate alındığında üstyapı ile temel–zemin sisteminin birlikte dinamik davranışını temsil eden eşdeğer doğal titreşim periyodunu; T , temelin rijit kabul edildiği durumda yalnızca üstyapıya ait doğal titreşim periyodunu; T_y , temelin zemine göre yatay ötelenme

hareketinden kaynaklanan ve zemin yatay esnekliğinin sisteme olan katkısını ifade eden eşdeğer titreşim periyodunu; T_θ ise temelin zemine göre dönme hareketinden kaynaklanan ve zemin dönme esnekliği ile temel geometrisinin sistem dinamik davranışı üzerindeki etkisini temsil eden eşdeğer titreşim periyodunu göstermektedir. Denklem 2'nin karekökü alınırsa, Denklem 3 elde edilir.

$$T_{SSI} = \sqrt{T^2 + T_y^2 + T_\theta^2} \quad (3)$$

Temelin zemine göre yatay ötelenme hareketinden kaynaklanan ve zemin yatay esnekliğinin sisteme olan katkısını ifade eden eşdeğer titreşim periyodu T_y 'yi bulmak için Şekil 2'de verilen model kullanılabilir.

Şekil 2 Yatay ötelenme hareketinden kaynaklanan periyodun bulunması için kullanılan model

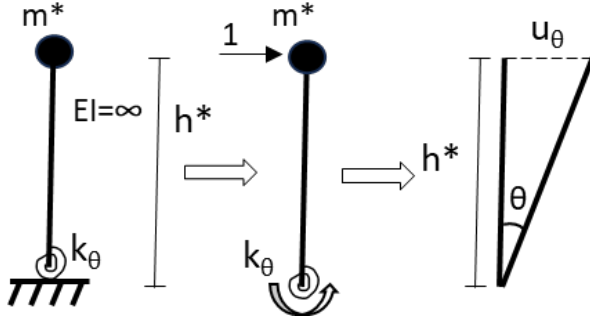


Bu modelde; sırasıyla h^* ve m^* hâkim titreşim moduna karşılık gelen etkin yüksekliği ve etkin kütle temsil etmektedir. Bu modele göre, bir birimlik yükten dolayı kütlein yaptığı yer değiştirme $1/k_y$ olur ve yer değiştirmenin tersi alınır, rijitlik k_y olarak elde edilir. Periyot değeri ise k_y değerine bağlı olarak Denklem 4'te verildiği gibi bulunur.

$$T_y = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k_y}} \quad (4)$$

Temelin zemine göre dönme hareketinden kaynaklanan ve zemin dönme esnekliği ile temel geometrisinin sistem dinamik davranışı üzerindeki etkisini temsil eden eşdeğer titreşim periyodu T_θ 'nın bulunması için Şekil 3'te verilen model kullanılabilir.

Şekil 3 Temeldeki dönme hareketinden kaynaklanan periyodun bulunması için kullanılan model



Burada; θ , temel dönme açısını, u_θ ise yatay yer değiştirmeyi, k_θ ise dönme yay rijitliğini ifade etmektedir. Temeldeki moment için Denklem 5 ile verilen ilişki yazılabilir.

$$M = k_\theta \theta \quad (5)$$

Burada bir birimlik kuvvetin tabanda oluşturacağı moment h^* 'a eşit olacağından, Denklem 5 yerine Denklem 6 yazılabilir.

$$\theta = \frac{h^*}{k_\theta} \quad (6)$$

θ açısı çok küçük olduğundan açının tanjantı kendine eşit olacağından, Denklem 7'deki ifade yazılabilir.

$$\theta = \frac{u_\theta}{h^*} \quad (7)$$

Denklem 6 ve Denklem 7'den yararlanılarak Denklem 8 elde edilir.

$$u_\theta = \frac{(h^*)^2}{k_\theta} \quad (8)$$

Buradan, rijitlik değeri Denklem 9'dan elde edilir.

$$\frac{1}{u_{\theta}} = \frac{k_{\theta}}{(h^*)^2} \quad (9)$$

Denklem 9'dan yararlanılarak dönme hareketine ait periyot değeri ise Denklem 10'da verildiği gibi hesaplanır.

$$T_{\theta} = 2\pi \sqrt{\frac{m^* (h^*)^2}{k_{\theta}}} \quad (10)$$

Rijit temel durumuna ait periyot değeri ise Denklem 11'de gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{\bar{k}_y}} \quad (11)$$

Burada; $\bar{k}_y$, üstyapının eşdeğer rijitliğini göstermektedir. Denklem 4, Denklem 10 ve Denklem 11, Denklem 3'te yerine yazılırsa, Denklem 12 elde edilir.

$$T_{SSI} = T \sqrt{1 + \left(\frac{T_y}{T}\right)^2 + \left(\frac{T_{\theta}}{T}\right)^2} \quad (12)$$

Denklem 12'de gerekli düzenlemeler yapılırsa Denklem 13 ve Denklem 14 elde edilir.

$$\frac{T_y^2}{T^2} = \frac{\frac{4\pi^2 m^*}{k_y}}{4\pi^2 \frac{m^*}{\bar{k}_y}} = \frac{\bar{k}_y}{k_y} \quad (13)$$

$$\frac{T_{\theta}^2}{T^2} = \frac{\frac{4\pi^2 m^* (h^*)^2}{k_{\theta}}}{4\pi^2 \frac{m^*}{\bar{k}_y}} = \frac{\bar{k}_y (h^*)^2}{k_{\theta}} \quad (14)$$

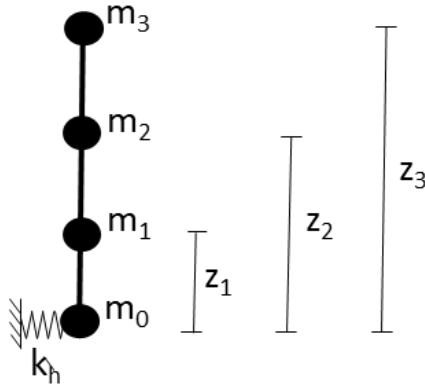
Buradan, yapı-zemin etkileşim durumundaki periyot değeri Denklem 15 ile hesaplanabilir.

$$T_{SSI} = T \sqrt{1 + \frac{\bar{k}_y}{k_y} + \frac{\bar{k}_y (h^*)^2}{k_{\theta}}} \quad (15)$$

Yukarıda verilen periyot uzaması bağıntısının temel kütleleri dikkate alınarak türetilmesi için Şekil 4'te gösterilen çok serbestlik dereceli (ÇSD) bir sistem göz önünde bulundurulmuştur. Bu modele göre, temelin öteleme hareketine karşılık gelen periyot değeri, Denklem (16)'da sunulan bağıntı yardımıyla aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$T_y \cong 2\pi \sqrt{\frac{m_t}{k_h}} \quad (16)$$

Şekil 4 Temel kütleli ÇSD'li sistem



Burada; m_t , toplam kütleyi ifade etmekte olup, Denklem 17 ile hesaplanabilir.

$$m_t = m_0 + m_1 + m_2 + m_3 \quad (17)$$

Dönme hareketine ait periyot için ise Denklem 18 bağıntısı yazılabilir.

$$T_\theta = 2\pi \sqrt{\frac{J/g}{k_\theta}} \quad (18)$$

Burada; g , yerçekimi ivmesini göstermektedir, J ise dönme atalet momentini ifade etmekte ve Denklem 19’da tanımlanmaktadır.

$$J = m_1 z_1^2 + m_2 z_2^2 + m_3 z_3^2 \quad (19)$$

Yapı-Zemin Etkileşiminde Sönüm

Yapı-zemin etkileşiminde üstyapının sönümü zemin etkisiyle büyüyecektir. Bu durumdaki sönüm oranı Denklem 20’de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon}{(T_{SSI}/T)^3} \quad (20)$$

Burada, ε , rijit mesnetli sistemin sönümü, ε_0 ise temelin sönümünü, $\bar{\varepsilon}$ ise yapı-zemin etkileşiminde sönümü ifade etmektedir. Temelin sönümü eşdeğer temel yarıçapına bağlı olarak FEMA’da verilen grafik yardımıyla belirlenebilir.

Yapı-Zemin Etkileşimi Analizinde Veletsos ve Chowdhury Yaklaşımı

Veletsos ve Chowdhury tarafından geliştirilen yaklaşımda, yapı-zemin etkileşimi frekansa bağlı karmaşık empedanslar aracılığıyla modellenmekte; bu sayede temel ötelenmesi, temel

dönmesi ve radyasyon sönümünün yapının dinamik tepkisi üzerindeki etkileri bütüncül olarak değerlendirilebilmektedir. Veletsos ve Chowdhury'ye göre 21 nolu matris denklem yazılabilir.

$$\frac{[I]}{[k]} = \frac{[I]}{[k_s]} + \frac{[I]}{[k_h]} + \frac{[z^2]}{[k_\theta]} \quad (21)$$

(21) nolu denklem başka bir formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[I][k]^{-1} = [I][k_s]^{-1} + [I][k_h]^{-1} + \underbrace{\left[\frac{z^2}{k_\theta} \right]}_{[h^2][k_\theta]^{-1}} \quad (22)$$

(22) nolu denklemden aşağıdaki matris bağıntı elde edilir.

$$[F] = [k_s]^{-1} + [k_h]^{-1} + [z]^2 [k_\theta]^{-1} \quad (23)$$

Aşağıda 3 serbestlik dereceli bir sistem için k_h , k_θ ve z matrislerinin yazılışları gösterilmiştir.

$$[k_h] = \begin{bmatrix} k_h & 0 & 0 \\ 0 & k_h & 0 \\ 0 & 0 & k_h \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$[k_\theta] = \begin{bmatrix} k_\theta & 0 & 0 \\ 0 & k_\theta & 0 \\ 0 & 0 & k_\theta \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$[z] = \begin{bmatrix} z_1 & 0 & 0 \\ 0 & z_2 & 0 \\ 0 & 0 & z_3 \end{bmatrix} \quad (26)$$

F matrisinin tersinden K rijitlik matrisi bulunabilir ve Scilab kullanılarak açısıl frekans ve mod şekilleri aşağıdaki komutlarla bulunabilir (Bozdoğan & Keskin, 2024)

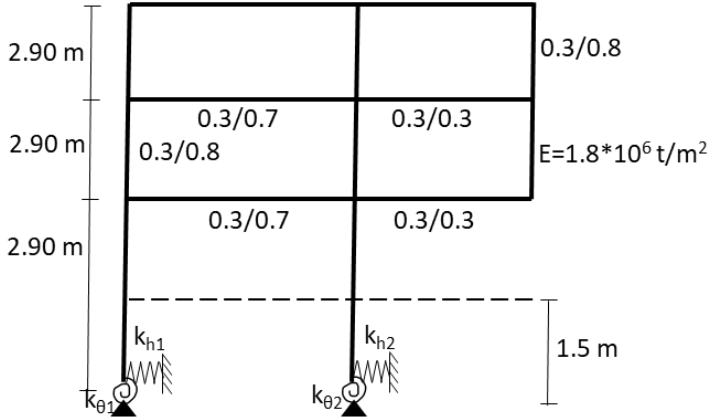
$$A = \text{inv}(M) \times K \quad (27)$$

$$[v, d] = spec(A) \quad (28)$$

Örnek: Bu bölümde, Roberto Agular Falconí'den (Falconí, 2012) alınan ve Quito kentinde “Sucre” Belediye Eğitim Merkezi olarak kullanılan binanın özellikleri Şekil 5'te verilmiştir. Başlangıçta iki katlı betonarme olarak planlanan binaya daha sonra bir çelik kat ilave edilmiştir. İlave edilen çelik elemanların kesit alanı 0.001801 m^2 , atalet momenti 0.0000097468 m^4 ve elastisite modülü $21.000.000 \text{ t/m}^2$ olarak dikkate alınmıştır. Buna göre

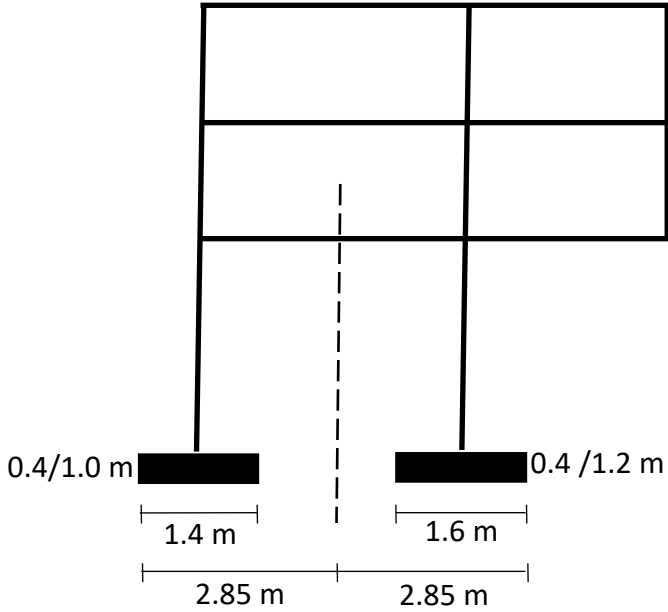
- Veletsos ve Chowdhury yaklaşımı ile
- FEMA 'da verilmiş olan periyot uzaması yaklaşımı ile hâkim periyodu hesaplanmıştır.

Şekil 5 Üç katlı çerçeve örneği



Şekil 6' çerçevenin temel boyutları verilmiş olup toplam temel kütlesi $0.325 \text{ tsn}^2/\text{m}$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 6 Üç katlı çerçevede temel boyutları



a) Verilen çerçevede üst yapının indirgenmiş rijitlik matrisi her katta yatay yönde 3 serbestlik derecesi olmak üzere aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$[k_s] = \begin{bmatrix} 28893 & -11554 & 111 \\ -11554 & 7792 & -304 \\ 111 & -304 & 188 \end{bmatrix}$$

Buna karşın üst yapının kütle matrisi ve z matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$[M_s] = \begin{bmatrix} 2.870 & 0 & 0 \\ 0 & 2.486 & 0 \\ 0 & 0 & 0.174 \end{bmatrix}$$

$$[z] = \begin{bmatrix} 4.40 & 0 & 0 \\ 0 & 7.30 & 0 \\ 0 & 0 & 10.20 \end{bmatrix}$$

Temelin zemine göre yatay hareketini temsil eden yay rijitliklerinin toplamı aşağıdaki gibi bulunur.

$$\sum k_h = k_{h_1} + k_{h_2} = 98475 \text{ t/m}$$

Benzer şekilde dönme yay rijitliklerinin toplamı ise aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$k_\theta = 1217100 \text{ tm / radyan}$$

k_h ve k_θ matrisleri sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$[k_h] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times 98475$$

$$[k_\theta] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times 1217100$$

z matrisi de aşağıdaki gibi bulunur.

$$[z] = \begin{bmatrix} 4.4 & 0 & 0 \\ 0 & 7.30 & 0 \\ 0 & 0 & 10.20 \end{bmatrix}$$

Yapı zemin etkileşimi durumunda esneklik matrisi (23) nolu bağıntı ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$[F] = \begin{bmatrix} 0.0001154 & 0.0001392 & 0.0001723 \\ 0.0001392 & 0.0004078 & 0.00049 \\ 0.0001723 & 0.00049 & 0.0061053 \end{bmatrix}$$

k rijitlik matrisi ise F matrisinin tersi olarak Scilab kullanılarak aşağıdaki komutla hesaplanabilir.

$$[k] = \text{inv}(F)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} 14731.983 & -5011.9 & -13.56 \\ -5011.9 & 4419.25 & -213.20 \\ -1356 & -21320 & 181.28 \end{bmatrix}$$

Açısal frekans ve modların bulunması için Scilab programından yararlanılırsa aşağıdaki komutlar yazılabilir.

$$[A] = \text{inv}(M) \times [k]$$

$$[\nu_1 d] = \text{spec}(A)$$

Açısal frekansların karelerini içeren d matrisi aşağıdaki gibi bulunur.

$$[A] = \begin{bmatrix} 5975.08 & 0 & 0 \\ 0 & 1296.59 & 0 \\ 0 & 0 & 680.95 \end{bmatrix}$$

Açısal frekanslar ve karşı gelen periyotlar ise aşağıdaki gibi bulunur.

$$\begin{array}{ll} w_1 \cong 26.095 \text{ rd/sn} & T_1 \cong 0.241 \text{ sn} \\ w_2 \cong 36.008 \text{ rd/sn} & T_2 \cong 0.174 \text{ sn} \\ w_3 \cong 77.30 \text{ rd/sn} & T_3 \cong 0.081 \text{ sn} \end{array}$$

b) FEMA’da periyot uzaması için ankastre temel durumundaki periyot, etkin kütle ve etkin yükseklik değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$T_s = 0.2345 \text{ sn} \quad m^* = 2.963 \text{ ton}, \quad h^* = 6.539 \text{ m}$$

Buna karşın yalnız temeldeki öteleme hareketini temsil eden periyot (4) nolu bağıntı ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$T_y = 2\pi\sqrt{\frac{2.963}{98475}} = 0.034 \text{ sn}$$

Temeldeki dönme hareketini temsil eden periyot değeri ise (10) nolu bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$T_\theta = 2\pi\sqrt{\frac{2.963 \times 6.539^2}{1217100}} \cong 0.064 \text{ sn}$$

Yapı zemin etkileşimli periyot ise (3) nolu denklemden yararlanılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$T_{SSI} = \sqrt{0.2345^2 + 0.034^2 + 0.064^2} = 0.2454 \text{ sn}$$

Periyot uzaması bağıntısını temel kütlelerini dikkate alarak aşağıdaki gibi de bulabiliriz. Bunun için önce toplam kütleleri aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz.

$$m_t = 0.325 + 2.870 + 2.486 + 0.174 = 5.855 \text{ tsn}^2 / m$$

(19) nolu bağıntıdan J ise aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$J = 2.870 * 4.40^2 + 2.486 * 7.30^2 + 0.174 * 10.20^2 = 206.145 \text{ tm}^2 / m / \text{sn}$$

Denklem (16) ve Denklem (18)' den temelin öteleme ve dönme durumuna ait periyot değerleri ise aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$T_y \cong 2\pi\sqrt{\frac{5.855}{98475}} = 0.048 \text{ s}$$

$$T_\theta = 2\pi\sqrt{\frac{206.145/9.81}{1217100}} = 0.0261 \text{ s}$$

Bu durumda (3) nolu bağıntıdan periyot uzaması ise

$$T_{SSI} = \sqrt{0.2345^2 + 0.048^2 + 0.0261^2} = 0.241 \text{ sn}$$

olarak bulunur.

Sonuçlar

Bu kitap bölümünde, yapı–zemin etkileşimi etkisi altında meydana gelen periyot uzamasının hesaplanmasına yönelik olarak, literatürde yaygın biçimde kullanılan iki farklı yaklaşım ele alınmıştır. Bu kapsamda, Veletsos ve Chowdhury yaklaşımı ile FEMA esaslı yöntem, teorik altyapıları ve temel varsayımlarıyla birlikte incelenmiş ve her iki yöntemin periyot uzaması üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bölümün sonunda, literatürden alınan bir örnek problem her iki yaklaşım kullanılarak çözülmüş ve yapı–zemin etkileşimi dikkate alınarak elde edilen hâkim titreşim periyotları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, her iki yaklaşımın hesapladığı periyot değerlerinin birbiriyle uyumlu olduğunu ve yapı–zemin etkileşiminin hâkim periyot üzerindeki etkisini benzer düzeylerde yansıttığını göstermiştir.

Kaynakça

- Bapir, B., Abrahamczyk, L., Wichtmann, T., & Prada-Sarmiento, L. F. (2023). Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1120351.
- Bikçe, M. (2015). Türkiye’de Hasara ve Can Kaybına Neden Olan Deprem Listesi (1900-2014). 3. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı (14-16 Ekim 2015)*, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Bozdoğan, K. B., & Keskin, E. (2024). A method for determination of moment contribution ratio under foundation rotation in shear wall-frame systems. *Buildings*, 14(2), 467.
- Bozdoğan, K. B., Keskin, E., & Ozturk, D. (2024). A Practical Method for Determining Dynamic Characteristics of Buildings Under the Effect of Foundation Rotations. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 24(04), 2450035. <https://doi.org/10.1142/S0219455424500354>
- Bozdoğan, K. B., & Keskin, E. (2024). Scilab ve Mühendislik Uygulamaları. *İçinde Mühendislik Alanında Akademik Araştırma ve Derlemeler II* (C. 1, ss. 323-343).
- Chatterjee, A., & Sengupta, H. (2024). *Evaluation of Soil-Structure Interaction on RC Framed Irregular Building Under Varying Ground Conditions* (C. 371, ss. 291-303). Proceedings of the 7th International Conference on Civil Engineering Springer Nature Singapore. 978-981-99-4045-5_25
- Chopra, A. K., & Gutierrez, J. A. (1974). Earthquake response analysis of multistorey buildings including foundation

- interaction. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 3(1), 65-77. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290030106>
- Chowdhury, I., & Dasgupta, S. P. (2019). *Earthquake Analysis and Design of Industrial Structures and Infra-structures*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-90832-8>
- Falconí, R. A. (2012). *Dinámica de Estructuras con CEINCI-LAB* (2. bs, C. 1). Centro de Investigaciones Científicas.
- FEMA, P. (2020). 2091; A Practical Guide to Soil-Structure Interaction. *Applied Technology Council: Redwood, CA, USA*.
- Kabtam, H. G., Peng, G., & Chen, D. (2018). Dynamic analysis of soil structure interaction effect on multi story RC frame. *Open Journal of Civil Engineering*, 8(4), 426-446.
- Kara, D., Bozdoğan, K. B., & Keskin, E. (2021). A simplified method for free vibration analysis of wall-frames considering soil structure interaction. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 77(1), 37-46.
- Kara, D., Bozdoğan, K. B., & Keskin, E. (2020). Çerçeve sistemlerin yapı zemin etkileşimli serbest titreşim analizi. *Politeknik Dergisi*, 23(4), 1347-1355.
- Mohasseb, S., Ghazanfari, N., Rostami, M., & Rostami, S. (2020). Effect of Soil–Pile–Structure Interaction on Seismic Design of Tall and Massive Buildings Through Case Studies. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 7(1), 13-45. <https://doi.org/10.1007/s40515-019-00086-7>
- Neha, Nigam, S., & Saxena, N. (2022). *SSI Effects on Behavior of a Low-Rise Load-Bearing Structural Walled Building Including Foundation* (C. 188, ss. 323-333). Earthquakes and

Structures Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5673-6_26

Özgür, M., & Bozdoğan, K. B. (2022). Betonarme Binalarda Zemin-Yapı Etkileşiminin Sismik Tasarım Parametrelerine Etkileri. *El-Cezeri*, 9(2), 507-521.

Tallah, N., Boulaouad, A., & Berrabah, F. (2024). Dynamic Modeling of Soil-Structure Interaction for Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Building. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 14(2), 342-347. <https://doi.org/10.2478/jaes-2024-0042>

Tekin, G., & Gencer, S. (2024). The Dynamic Soil–Foundation–Structure Interaction Problem in the Time Domain Using a Discrete Element Model. *Applied Sciences* (2076-3417), 14(23).

Yalçın, H., Levent Gülen, & Utkucu, M. (2013). Türkiye ve yakın çevresinin aktif fayları veri bankası ve deprem tehlikesinin araştırılması. *Yerbilimleri*, 34(3), 133-160.

Yang, K., Cai, P., Zhang, Z., Hou, Q., Zheng, R., Hao, B., & Wang, B. (2024). Effects of Soil–Structure Interaction on the Seismic Response of RC Frame–Shear Wall Building Structures Under Far-Field Long-Period Ground Motions. *Buildings*, 14(12), 3796.

BÖLÜM 6

ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ ve GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE ÖNEMİ

ONUR YAVAN¹
ERDİNÇ KESKİN²

Giriş

Zemin iyileştirme, geoteknik mühendisliğinde yetersiz taşıma gücüne sahip zemin tabakalarında temel bir ihtiyaç olup, inşası planlanan altyapının veya temelin gereksinimlerini karşılayabilmek için doğal zemin özelliklerinin fiziksel, mekanik veya hidrolik özelliklerinin bilinçli olarak iyileştirme sürecidir (Abdel-Rahman, 2021; Herrmann vd., 2023). Bu süreç, mevcut zemin tabakasının yeterli olmayan kayma mukavemetlerinin veya fiziksel özelliklerinin iyileştirilerek güvenli ve sürdürülebilir inşaat yapımı için büyük önem taşır. Yüksek binaların inşası, geniş ulaşım ağları, fabrika inşaatları, enerji tesisleri vs. dahil olmak üzere birçok büyük ölçekli inşaat mühendisliği projesinin uygulanabilirliği, uygun zemin iyileştirme tekniklerinin başarılı bir şekilde

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-9615-253X.

² Doç. Dr., Kırklareli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-8728-2906.

uygulanmasına doğrudan ilişkilidir (Mitchell & Kelly, 2013; Ram vd., 2023).

Zemin iyileştirme uygulamaları, zemin tabakalarının farklı ve kritik mühendislik parametrelerinin iyileştirilmesinin gerekliliği durumlarında zorunlu olarak yapılması gerekmektedir (Das, 2011; Rogers vd., 2012a; Brown vd., 2023; Herrmann vd., 2023). Buradaki öncelik yapıların ağırlıklarından dolayı zeminde meydana gelecek gerilmelerin güvenli olarak taşınması durumudur. Zeminin taşıma kapasitesinin yeterli olmadığı durumlarda, temel zemininin türüne göre uygulanacak iyileştirme yöntemleri önemli ölçüde zeminin kayma mukavemeti parametre değerlerini artıracaktır (Abdel-Rahman, 2021; Harabinova vd., 2019; Durdevac vd., 2024). İyileştirilen zemin tabakası üzerine inşa edilecek yapının ve bu yapı yükünden dolayı oluşacak gerilmelerin güvenli bir şekilde karşılanabilmesi geoteknik mühendisliğinin en önemli konularından bir tanesidir.

Zemin iyileştirme yöntemleri aynı zamanda zemin tabakalarında meydana gelebilecek ani veya konsolidasyon oturmalarının önlenmesi veya bu oturma miktarlarının izin verilen değerler içerisinde kalması için de uygulanmaktadır (Rui-chen vd., 2014; Sharmeelee & Ahmad, 2024). Zeminde oluşabilecek oturmalarla karşı yapılan iyileştirme uygulamaları sayesinde zeminin boşluklu yapısı kimyasal veya mekanik iyileştirme yöntemleri iyileştirilir (Alamanis & Chouliaras, 2018). Eğer bu boşluklu yapıya önlem alınmazsa, zemin tabakası üzerine inşa edilen yapıda ciddi yapısal hasar oluşabilir veya zamanla oluşacak oturmalarla dolaylı yapıyı oluşturan çerçeve sistemlerde dikkate alınmayan gerilmeler oluşabilecektir. Bu durum yapının hizmet süresini azaltacağı gibi potansiyel çökmelere de yol açabilecektir.

Zemin iyileştirme uygulamaları sadece zemin taşıma gücünü artırmak veya zemin tabakalarının oturma problemlerine önlem almak için yapılmaz. Destek yapısı olarak inşa edilen özellikle istinat

duvarları ve setler gibi geoteknik yapıların arkasında bulunan granüler dolgular için kayma mukavemeti parametrelerini ve stabilitesini artırmak, hatta deprem yükleri gibi dinamik yüklere maruz kalındığında zemin sıvılaşması gibi tehlikeli durumlarında önemli riskini azaltmak için zemin iyileştirme yöntemleri kullanılır (Krishna, 2011; Yadav vd., 2020).

Zemin iyileştirme yöntemleri, zemin tabakalarının stabilite ve oturma problemlerini ele almanın yanı sıra, özellikle killi zeminlerin şişme veya konsolidasyon oturmalarını önlemek için de gereklidir (Basma & Tuncer, 1991; Sakr vd., 2022). Bu yöntemler, yüksek sıkıştırılabilir yumuşak killerde konsolidasyon hızının artırılması, dikkate alınması gereken hacim değişikliğine maruz kalan killi zemin tabakalarının genleşme riskini azaltılması, istenmeyen sızıntı suyu oluşumunu veya permeabilite özelliklerinin iyileştirmesini içerir (Firoozi vd., 2016; Shi & Kong, 2018). Bu tür zemin tabakalarının bulunduğu bölgelerde, derin temeller veya zemin tabakasının sıyrılıp yerine yeni dolgu tabakanın oluşturulması gibi daha pahalı inşaat yöntemlerini tercih etmek yerine mevcut zemin tabakasına uygun iyileştirme yöntemleri uygulanarak, inşaat süreci daha ekonomik ve uygulanabilirlik yönünden daha verimli bir çözüm olacaktır. Bu nedenle, mevcut zemin tabakasının yetersiz mukavemet özellikleri uygun iyileştirme yöntemleri kullanılarak iyileştirilir ve üzerine inşa edilecek üst yapının uzun vadede bütünlüğü ve performansının korunması hedeflenir

Zemin iyileştirme uygulamasının kararı için o bölgede yapılan sondaj çalışmalarından elde edilecek zemin etütlerinin dikkatlice uzman geoteknik mühendisleri tarafından hazırlanması gerekmektedir. Üst yapıdan gelecek yüklerin zemin tabakalarının güvenli bir şekilde taşıyabilmesi gerekmektedir. Üst yapının tasarım gerekliliklerine göre mevcut zemin tabakalarının özellikleri ve varsa eksiklikleri geoteknik analizlerle belirlenir. Zemin tabakalarının iyileştirme gerektiren temel yetersizlikler (Das, 2011);

- *Oturma Problemleri;* Gevşek granüler zeminler veya yumuşak kil tabakalarda meydana gelir. Bu tür zeminlerde üst yapı yükünden dolayı ani oturmalar (gevşek granüler zeminler) ve/veya konsolidasyon oturmaları (yumuşak killeri) meydana gelecektir. Bu oturma hesaplamaları çok dikkatlice yapılmalı ve uygun iyileştirme yöntemleri zemin tabakalarına uygulanmalıdır.
- *Taşıma Gücü Problemleri;* Üst yapının kesitlerinden ve boyutlarından dolayı zemin tabakalarına taşıyabileceğinden fazla yük gelmesinden kaynaklanan problem türüdür. Temelin inşa edileceği zemin tabakasının yetersiz kayma mukavemeti parametre (ϕ, c) değerlerinin iyileştirilmesi gerekmektedir.
- *Zeminin Hidrolik Özelliklerinden Kaynaklanan Problemler;* Zemin tabakalarının geçirimsizlik, kapillarite, boşluk suyu basıncı gibi hidrolik özellikleri geoteknik projelerde en kritik parametreler arasındadır. Su, zemin tabakalarının yapısını hem fiziksel hem de kimyasal olarak etkileyerek ciddi mühendislik sorunlarına yol açabilir. Özellikle killi zeminlerde şişme/oturma problemleri olarak karşımıza çıkacaktır.

olarak sıralanabilir.

Zemin iyileştirme yöntemleri özellikle dinamik yüklere maruz kalabilecek deprem kuşağı ülkelerde önemli bir konu haline gelmiştir. Uygun geoteknik özelliklerine sahip olmayan zemin türleri deprem yüklerini büyütürken üzerinde bulunan yapılara etki edeceği çalışmalarda gösterilmiştir. Yakın zamanda meydana gelen depremlerde görülen bazı hasarlar, zayıf zemin koşullarının deprem hasarlarının oluşmasında belirleyici bir etkiye sahip olabileceğini ve yerel zemin koşullarının sismik titreşimlerin şiddetini önemli ölçüde artırabildiğini göstermiştir. 2025 Myanmar Depremi örneğinde,

Bangkok'ta, 15–30 metre kalınlığındaki suya doymun yumuşak kil tabakası ve 150 m/s'nin altındaki dūřuk kayma dalgası hızı (V_{s30}) değerleri, yer hareketini beklenen değerin iki katına kadar bŸyŸten ve yapısal hasar riskini tetikleyen bir durum yaratmıştır (Ismail vd., 2025). 2023 Kahramanmarař Depremlerinde ise, Antakya, İşkenderun ve GŸlbařı gibi bŸlgelerde, binaların kısmen sıvılaşmış zemine batmasına veya devrilmesine neden olan belirgin bir zemin sıvılaşması sorunu ortaya çıkmıştır (Ulusay vd., 2024; Ŗser vd., 2025). Ancak, İşkenderun'da zemin sıvılaşmasından etkilenen bir alanda bulunan kŸtŸphane binası, uygulanan zemin iyileştirme teknikleri sayesinde hasar gŸrmemiř ve hizmet vermeye devam edebilmiştir (Damcı vd., 2025). Bu durum zemin kaynaklı deprem hasarlarını hafifletmek amacıyla zemin iyileştirme tekniklerinin etkin şekilde kullanılabileceğini gŸstermektedir.

Geoteknik mŸhendislięinde zemin iyileştirme konusu yapıların ve canlıların gŸvenlięi için Ŗnem arz eden konulardan bir tanesidir ve bu konuda çalışmalar devam etmektedir. Zemin tŸrŸne gŸre uygun iyileştirme yŸntemlerinden birisi seçilmeli ve inşa edilecek Ÿst yapının gŸvenlięi sağlanmalıdır. Ayrıca arazi koşulları dikkate alınarak ve Ÿst yapının projesi detaylıca incelenerek yŸzeyssel veya derin zemin iyileştirme yŸntemlerinden birisi veya daha fazlası uygulanmalıdır.

Zemin İyileştirme YŸntemleri

Geoteknik mŸhendislięinde, zemin iyileştirme zemin tabakalarının mŸhendislik performansını iyileştirmek için uygulanan uygulamaları ifade eder. Dolayısıyla zemin iyileştirme yŸntemlerinin amacı, uygun mukavemet parametrelerine sahip olmayan zemin tabakalarının temel mŸhendislik Ŗzelliklerini ve tasarım gereksinimlerini karşılayacak şekilde geliştirmektir (Rogers vd., 2012b). Bu yŸntemlerle Ŗzellikle beş temel zemin parametre

değerlerinin iyileştirilmesi amaçlanır (Das, 2011; Afrin, 2017; Vaníček, 2017; Sinha & Iyer, 2020; Al-Shorman vd., 2023).

- Kayma mukavemeti; τ
- Elastisite ve Rijitlik Modülleri; E, G
- Sıkıştırılabilirlik; C_c
- Permeabilite; k
- Relatif Yoğunluk; D_r

Zemin iyileştirme yöntemleri uyguladığımızda, aslında zemin tabakasının fiziksel durumu ve/veya kimyasal bileşimi değiştirilmiş olur (Amhadi & Assaf, 2019). Zeminin kayma mukavemet parametre (ϕ ve c) değerleri artırıldığında, zemin kayma gerilmelerine daha dayanıklı duruma gelecektir. Aynı şekilde, zemin tabakalarının boşluk oranı (e) azaltıldığında, özellikle kohezyonlu zeminlerde birincil ve ikincil konsolidasyon oturma miktarı en aza indirilir. Rijitlik modüllerinin değerlerinin iyileştirilmesi zemin tabakasında meydana gelen herhangi bir oturmanın yapı için tolere edilebilir sınırlar içinde kalmasına olanak tanır. Zemin permeabilitesi (k) ise yapılacak yapının kullanım amacına bağlı olarak (drenajı hızlandırmak veya azaltmak için) uygun iyileştirme yöntemleri kullanılarak azaltılmakta veya yükseltilebilmektedir.

Yüzeysel Zemin İyileştirme Yöntemleri

Bu zemin iyileştirme yöntemleri genellikle zemin tabakalarının üst tabakalarını hedef alır. Bu yöntemler kaldırımlar, sıg temeller ve setler için stabil bir zemin tabakası veya çalışma platformu oluşturmak için kullanılırlar (Das, 2011).

Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri genellikle üst tabakalara uygulanan mekanik veya kimyasal işlemlerdir (Das,

2011; Amhadi & Assaf, 2019). Mekanik sıkıştırma ile zemin daneleri arasındaki boşlukların azaltılması için uygulanan statik veya titreşimli enerji yöntemleridir (Raison, 2004). Bu yöntemler, granüler zeminlerin relatif yoğunluğunu (D_r) ve kohezyonlu zeminlerin Kuru Birim Hacim Ağırlığını (γ_k) hedefler ve bu da taşıma kapasitesindeki artışla doğrudan ilişkilidir (Bowles, 1997; Das, 2011).

Kimyasal Stabilizasyon, zemin üst tabakalarının kireç, çimento ve bitüm gibi bağlayıcıların eklenmesini içerir. Bu malzemeler, zemini moleküler düzeyde değiştirir. Özellikle şişme eğilimi gösteren killerde kireç, katyon değişimini kolaylaştırarak plastik limit değerini artırır ve bu killi zeminin suya olan hassasiyetini azaltır (Phanikumar & Suri, 2013; Bouras vd., 2020; Ignjatović vd., 2024). Daha sonraki puzolanik reaksiyonlar, sert bir yapı oluşturarak yumuşak zemini, önemli ölçüde daha yüksek mukavemet ve serbest basınç dayanımı olan yarı sert bir kaplama tabakasına dönüştürür. Granüler zeminlerde ise bu işlem çimento kullanarak yapmak uygun olacaktır. Çimento granüler zeminlerde boşluk oranını düşürerek zeminin kuru birim hacim ağırlığı ve içsel sürtünme açısı değerini yükseltecektir. Dolayısıyla zeminin kayma mukavemeti daha yüksek bir değere ulaşacaktır.

Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri aşağıda verilen beş ana başlıkla sıralanabilir (Bowles, 1997; Das, 2011):

1. *Mekanik olarak yüzeysel sıkıştırma işlemleri*; bu işlemler, mekanik enerjiyle zemin tabakaları içinde bulunan hava boşluklarını gidererek zeminin yoğunluğunu artırmak için kullanılan en yaygın yöntemdir. Mekanik sıkıştırma, granüler zeminlerde (kum ve çakıl) veya belirli nem içeriğine sahip iyi derecelendirilmiş dolgularda en etkili yüzeysel zemin iyileştirme yöntemlerindendir. İnşaat mühendisliğinde, yüksek kuru birim hacim ağırlık gerektiren

otoyol alt zeminleri, demiryolu alt tabaka dolguları ve havaalanı yolu inşaatlarında teker izleri gibi çukurlaşmama olmaması için bu mekanik sıkıştırma çok önemli bir iyileştirme yöntemidir. Demir balyajlı silindirler, lastik bandajlı silindirler ve keçi ayağı silindirler gibi inşaat makineleri ile bu uygulama gerçekleştirilir. Bu makineler statik veya dinamik yük uygulayabilirler. Özellikle keçi ayağı silindirleri, siltli veya killi yüzeylerde zemin topraklarını parçalamak ve yoğurma etkisi sağlamak için kullanılır. Özellikle kil çekirdek hazneye sahip barajların sıkıştırılmasında bu keçi ayaklı silindirler kullanılır.

2. *Zemin tabakası değişimi işlemleri*; zemin profili yüzeyinde bulunan organik madde bakımından zengin, aşırı yumuşak veya genleşebilir (turba veya yüksek plastisiteli kil) zeminlerin kazı yapılarak şantiye arazisinden uzaklaştırılarak, yerine uygun dolgu malzemesinin mekanik veya dinamik olarak sıkıştırılma işlemidir.
3. *Yüzeysel kimyasal stabilizasyon işlemleri*; bu işlem, zemin üst tabakasının moleküler veya yapısal davranışını değiştirmek için kimyasal bağlayıcıların bu tabakaya karıştırılmasını işlemidir. Bu yöntemde özellikle şişme potansiyeline sahip killerin mineralojini değiştirmek için kireç, boşluklu yapıya sahip granüler zeminlerde yüksek mukavemet elde etmek için çimento, durabilite ve su sızıntılarını kontrol altına almak için ise bitüm ve/veya uçucu kül malzemeleri tercih edilmektedir. Kimyasal stabilizasyon, şişen killer veya yumuşak siltler gibi ince daneli tabakalar için özellikle uygundur. Bu yöntem, doğal zemin tabakasının şişmeye eğilimli olduğu yerlerde ve otopark temellerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.
4. *Zemin tabakası yüzeyine yapılan dolgu (grouting) işlemleri*; bu işlemler genellikle derin bir yöntem olmakla birlikte, bazı durumlarda yüzey stabilizasyonu için sığ uygulamalar da

kullanılabilmektedir. Bu yöntem, gevşek kum yüzeylerini iyileştirmek veya mevcut döşemelerin altındaki küçük sığ boşlukları doldurmak için kullanılır.

5. *Geosentetiklerle donatılendirma işlemleri*; bu yöntemde, zeminin sahip olmadığı çekme gerilme kuvvetlerini karşılamak için polimer malzemeler kullanır. Bu yöntemde Geogridler ve geotekstilller en çok tercih edilen geosentetik ürünlerdir.

Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri

Derin zemin iyileştirme teknikleri, yumuşak kil veya gevşek kumdan oluşan kalın zemin tabakalarında karşılaşılabilecek problemleri çözmek için kullanılan yöntemlerdir. Zayıf zemin tabakaları yüzey inşaat makinelerinin erişebileceği mesafeyi aştığında, yüzeysel zemin iyileştirme yöntemlerinin yerine derin zemin iyileştirme yöntemleri kullanılmaktadır.

Derin zemin iyileştirme yöntemleri, öncelikle standart inşaat ekipmanlarının ulaşabileceği derinliğin çok altında uzanan zayıf, sıkıştırılabilir veya mühendislik özellikleri yetersiz zemin tabakalarının varlığı nedeniyle gereklidir. Geoteknik mühendisliğinde, yüksek binalar veya köprü ayakları gibi ağır yapılardan oluşan gerilmeler, yüzeysel zemin iyileştirmelerinin etkisinin olmadığı derinliklere ulaşır (Das, 2011). Zemin profilinde derinlerde bulunan yumuşak kil veya organik zeminler gibi tabakalar üst yapı imalatı öncesinde dikkate alınıp stabilizasyon işlemi yapılmazsa, yapı onlarca yıl boyunca birincil ve ikincil konsolidasyon oturmasına maruz kalacaktır. Düşey drenajlı ön yüklemeli gibi derin iyileştirme yöntemleri, inşaat başlamadan önce bu konsolidasyon oturmalarının tamamlanması açısından önemli bir yöntemdir (Wong, 2005; Khan & Farooqi, 2019).

Derin iyileştirme yöntemleri için bir diğer önemli faktör ise sıvılaşmanın potansiyelinin azaltılmasıdır (Bowles, 1997; Das,

2011). Deprem eğilimli bölgelerde, gevşek ve doymuş kumlu topraklar sismik olaylar sırasında kayma mukavemetini tamamen kaybedebilir, sıvı gibi davranarak felaketle sonuçlanan temel göçmelerine neden olabilir. Bu zemin yüzeyinden derinlerde bulunan bu sıvılaşabilir tabakalar derin iyileştirme yöntemleri ile stabilize edilmesi gerekir. Bu sıvılaşma potansiyeli yüksek gevşek granüler zemin tabakalarının relatif yoğunluğunu artırmak için Vibro-Sıkıştırma veya Derin Dinamik Sıkıştırma gibi derin zemin iyileştirme teknikleri kullanılır (Slocombe vd., 2000; Moffat, 2007).

Ekonomik açıdan bakıldığında, derin zemin iyileştirme yöntemleri forekazıklar gibi geleneksel derin temellere göre maliyet açısından daha uygun bir alternatif olarak hizmet edebilir (Elbadry & Eid, 2018). Yapı gerilmelerini daha derinlerde bulunan sağlam zemine aktaran forekazıklar yerine, taş kolonlar veya derin zemin karıştırma yöntemleri kullanarak zayıf zemin tabakası güçlendirilip, kompozit bir kütleye dönüştürülebilir (Shishkin & Zachyosov, 2007; Nagaraju & Gobinath, 2025).

Bunlara ilave olarak, derin iyileştirme yöntemleri çevresel ve hidrolik kontrol için çok önemlidir. Özellikle barajlar, setler veya endüstri alanlarını içeren projelerde, dikkat edilmesi gereken ilk konu zemin tabakalarının sıvı geçirgenliğidir (permeabilite) (Raisinghani & Viswanadham, 2010; Zhan vd., 2022). Barajlar ve setlerde zemin tabakası çok boşluklu ise, su barajın altından sızarak iç borulanmaya neden olabilir, endüstri projelerinde ise asbestli sıvı atıklar yeraltı su tabakasına geçebilir. Jet Grout gibi derin stabilizasyon yöntemleri, zemin tabakalarında dikey, geçirimsiz bariyerler oluşturur. Bu bölgelerde yapılan bu derin iyileştirme yöntemleri, çevredeki ekosistemi korumak ve büyük ölçekli su tutma yapılarının hidrolik stabilitesini sağlamak için çok önemlidir.

Derin zemin iyileştirme yöntemleri ile zamana bağlı birincil ve ikincil konsolidasyon oturmaları ve yer altı su sızıntıları (permeabilite) kontrol altına alınır, sıvılaşma potansiyeli olan zemin

güçlendirilir, düşük taşıma kapasitesi artırılır. Kazıklı temeller yerine uygulanabilir ve proje detaylarına göre daha ekonomik çözüm de olabilirler.

Sonuçlar ve Öneriler

Zemin iyileştirme yöntemleri, modern geoteknik mühendisliğin önemli bir konusu olarak uygun olmayan doğal zemin koşullarını güvenli ve yüksek performanslı altyapının oluşturulmasını sağlar. Yüzeysel veya derin iyileştirme teknikleri ile zeminin mekanik ve kimyasal özelliklerini doğrudan değiştirilir ve bu zeminlerin taşıma kapasitesi artırılır, konsolidasyon oturmaları kontrol altına alınır ve olası sismik durumlarda sıvılaşma gibi tehlikeli olayların riski azaltılmış olur. Zemin iyileştirme uygulamaları sadece teknik bir tercih değil, yapısal bütünlüğü koruyan ve bulunduğu çevrenin ömrünü önemli ölçüde uzatan gerekli bir güvenlik önlemidir.

Günümüzde sürdürülebilir inşaat proje çalışmaları kapsamında zemin iyileştirme yöntemleri her zamankinden daha önemli hale getirmiştir. Zemini yerinde iyileştirmek, bir projenin büyük hafriyat ihtiyacını azaltır, ağır nakliye enerji harcamalarını düşürür ve genellikle uçucu kül veya cüruf gibi endüstriyel yan ürünleri stabilizatör olarak kullanır. Bu durum, altyapının sadece sağlam olmasını değil, aynı zamanda küresel çevre hedefleriyle de uyumlu olmasını sağlar.

Sonuç olarak, zemin iyileştirmenin başarılı bir şekilde uygulanması, yapı-zemin etkileşiminin derinlemesine anlaşılmasını ve sahaya özgü bir metodoloji seçiminin yapılmasını gerektirir. Şehirlerimiz giderek daha zorlu arazilere yayıldıkça, zemin iyileştirme alanındaki yenilikler hayati önemini koruyacaktır. Herhangi bir mühendislik projesinde, zemin iyileştirmeye öncelik vermek hem zamanın hem de doğanın testlerine dayanabilecek

istikrarlı, uygun maliyetli ve dayanıklı bir yapı inşaaı için önemli bir aşamadır.

Kaynakça

- Abdel-Rahman, M. M. (2021). Review of Soil Improvement Techniques. İçinde H. Shehata & M. Badr (Ed.), *Advancements in Geotechnical Engineering* (ss. 175-199). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62908-3_14.
- Afrin, H. (2017). A review on different types soil stabilization techniques. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 3(2), 19-24.
- Alamanis, N., & Chouliaras, I. (2018). Improvements to loose soil. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*(2018), 43(1), 190-210.
- Al-Shorman, B., Baker, M. B., & Ayadat, T. (2023). Comprehensive review of soil stabilization agents. *Materials Research Proceedings*, 31.
- Amhadi, T. S., & Assaf, G. J. (2019). Overview of Soil Stabilization Methods in Road Construction. İçinde S. El-Badawy & J. Valentin (Ed.), *Sustainable Solutions for Railways and Transportation Engineering* (ss. 21-33). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01911-2_3.
- Basma, A. A., & Tuncer, E. R. (1991). Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays. *Transportation research record*, 1295.
- Bouras, F., Tapsoba, N., Martin, M., Sabio, S., Jacquet, A., Beck, K., Belayachi, N., Bouasker, M., & Al-Mukhtar, M. (2020). Effect of hydrated lime and cement on the engineering

- behavior of highly expansive clay. *Athens Journal of Technology and Engineering*, 7(1), 1-14.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design* (5th ed). The McGraw-Hill Companies, Inc.
- 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>.
- Damcı, E., Temür, R., Kanbir, Z., Şekerci, Ç., & Köroğlu, E. Ö. (2025). Comprehensive investigation of damage due to 2023 Kahramanmaraş earthquakes in Türkiye: Causes, consequences, and mitigation. *Journal of Building Engineering*, 99, 111420.
- Das, B. M. (2011). *Principles of foundation engineering* (7th ed). Cengage Learning.
- Durdevac, V., Ignjatović, S., Ignjatović, D., & Savić, D. (2024). Different types of soil stabilization techniques. *Engineering Bor* 2/2024, 47.
- Elbadry, H., & Eid, A. (2018). Simplified technique achieving low cost and high performance impact for construction in very deep very soft ground sites. *HBRC journal*, 14(1), 56-65.
- Firoozi, A. A., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. (2016). A review of clayey soils. *Asian Journal of Applied Sciences (ISSN: 2321-0893)*, 4(06).
- Harabinova, S., Panulinova, E., Kormaníková, E., & Kotrasova, K. (2019). Importance of soil shear strength parameters for optimal design of the building foundation. *Theory and Building Practice*, 1 (1), 2019, 1(1), 5-11.

- Herrmann, G., Milo, D., & Serridge, C. (2023). *ICE Manual of Geotechnical Engineering, Volume II*.
- Ignjatović, D., Ignjatović, S., Đurđevac, V., Đurđevac, I. L., & Tašić, D. (2024). Lime soil stabilization. *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, 2, 43-46. <https://doi.org/10.5937/mmeb2402043I>
- Ismail, F. A., Istijono, B., Farhan, M. A., & Hape, M. T. (2025). Seismic amplification and resonance effects of the 2025 Myanmar earthquake in Bangkok's soft-soil area. *E3S Web of Conferences*, 677, 09003.
- Khan, S. A., & Farooqi, M. A. (2019). *Application of vertical drains and vacuum preloading in soft soil stabilization*.
- Krishna, A. M. (2011). Mitigation of liquefaction hazard using granular piles. *International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering (IJGEE)*, 2(1), 44-66.
- Mitchell, J. K., & Kelly, R. (2013). Addressing some current challenges in ground improvement. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 166(3), 127-137. <https://doi.org/10.1680/grim.12.00030>.
- Moffat, B. S. (2007). Soil Remediation Techniques for Reduction of Earthquake-Induced Liquefaction. *New Horizons and Better Practices*, 1-10. [https://doi.org/10.1061/40946\(248\)62](https://doi.org/10.1061/40946(248)62)
- Nagaraju, T. V., & Gobinath. (2025). Reinforcing Soft Grounds: The Utility of Stone Columns. *Içinde Ground Improvement Techniques for Sustainable Engineering* (ss. 84-98). Bentham Science Publisher.
- Öser, C., Sarğın, S., Yildirim, A. K., Korkmaz, G., Altinok, E., & Kelesoglu, M. K. (2025). Geotechnical aspects and site

- investigations on Kahramanmaras earthquakes, February 06, 2023. *Natural Hazards*, 121(5), 5637-5668.
- Phanikumar, B. R., & Suri, S. (2013). *Chemical Amelioration of Expansive Soils*. 7(12).
- Raisinghani, D. V., & Viswanadham, B. V. S. (2010). Evaluation of permeability characteristics of a geosynthetic-reinforced soil through laboratory tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(6), 579-588.
- Raison, C. (2004). *Ground and soil improvement*. Thomas Telford.
- Ram, H., Solanki, D., & Dave, M. (2023). Ground Improvement Methods to Increase Weak Soil's Bearing Capacity. *International Journal of Innovative Research in Computer Science and Technology*, 11, 45-49. <https://doi.org/10.55524/ijircst.2023.11.5.9>
- Rogers, C. D., Burland, J., Chapman, T., Skinner, H., & Brown, M. (2012a). The role of ground improvement. İçinde *ICE Manual of Geotechnical Engineering* (C. 1, ss. 271-280). Thomas Telford London, UK.
- Rogers, C. D., Burland, J., Chapman, T., Skinner, H., & Brown, M. (2012b). The role of ground improvement. İçinde *ICE Manual of Geotechnical Engineering* (C. 1, ss. 271-280). Thomas Telford London, UK.
- Rui-chen, J. I. A., Zhong-yuan, D., & Jing-lian, Z. (2014). Application of dynamic consolidation method in soft clay improvement. *Hydro-Science and Engineering*, 2, 76-78.
- Sakr, M., Elsawwaf, M. A., Nazir, A. K., Azzam, W. R., Eldisouky, E. A., & Ali, N. O. (2022). Improvement of soft clay soil with different techniques—State of the art. *Int. J. Adv. Struct. Geotech. Eng. ASGE*, 6(03), 35-44.

- Sharmeelee, S., & Ahmad, F. (2024). Ground Improvement Techniques for Soft Soil. İçinde N. Sabtu (Ed.), *Proceedings of AWAM International Conference on Civil Engineering 2022—Volume 3* (C. 386, ss. 63-71). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6026-2_6
- Shi, B., & Kong, X. (2018). Study on Methods for Predicting the Settlements of Soft Clay Roadbed. İçinde W. Frikha, S. Varaksin, & A. Viana Da Fonseca (Ed.), *Soil Testing, Soil Stability and Ground Improvement* (ss. 370-377). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61902-6_30
- Shishkin, V., & Zachyosov, V. (2007). Strengthening the bed soils of existing buildings by crushed-stone piles. *Soil Mechanics & Foundation Engineering*, 44(6).
- Sinha, P., & Iyer, K. K. R. (2020). Effect of Stabilization on Characteristics of Subgrade Soil: A Review. İçinde A. Prashant, A. Sachan, & C. S. Desai (Ed.), *Advances in Computer Methods and Geomechanics* (C. 55, ss. 667-682). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0886-8_54
- Slocombe, B. C., Bell, A. L., & Baez, J. I. (2000). The densification of granular soils using vibro methods. *Géotechnique*, 50(6), 715-725. <https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.6.715>
- Ulusay, R., Aydan, Ö., & Kumsar, H. (2024). Ground liquefaction caused by 6 February 2023 Kahramanmaraş earthquakes of Türkiye and some assessments on its extent and impacts on built environment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(11), 447.

- Vaniček, I. (2017). Stabilization and Specification of Characteristic Value of Geotechnical Parameters. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 10, 61-64.
- Wong, P. (2005). Application of analytical method for preloading design of selected case studies. İçinde *Elsevier Geo-Engineering Book Series* (C. 3, ss. 231-246). Elsevier.
- Yadav, R., Gupta, R., Gautam, R., Rawat, P., & Yadav, P. (2020). *Strengthening of Weak Soil against Liquefaction*. 07(05).
- Zhan, Z., Chen, H., Zhang, Y., Cheng, R., & Deng, G. (2022). A review of test methods for the determination of the permeability coefficient of gravelly soils used for embankment dams. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 18(1), 131.

BÖLÜM 7

GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE DİSİPLİNLERARASI YENİLİKÇİ UYGULAMALAR VE YAKLAŞIMLAR

1. PELİN YÜKSEL KÖKEN¹
2. ATILA DEMİRÖZ²

Giriş

Geoteknik mühendisliği, yapıların güvenliği, dayanıklılığı ve ekonomik verimliliği açısından temel bir mühendislik disiplini. Zeminlerin taşıma kapasitesi, oturma davranışı, su geçirgenliği ve sıvılaşma potansiyeli gibi özellikleri, yapıların performansını doğrudan etkileyen parametrelerdir. Bu nedenle, zeminlerin doğru tanımlanması, iyileştirilmesi ve modellenmesi, mühendislik projelerinin başarısı açısından kritik öneme sahiptir.

Uzun yıllardır kullanılan geleneksel zemin iyileştirme yöntemleri, belirli koşullar altında başarılı sonuçlar üretmektedir. Drenaj sistemleri, sıkıştırma yöntemleri, kimyasal stabilizasyon ve taş kolon uygulamaları; özellikle sığ derinliklerde ve homojen zemin

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Konya Teknik Lisans Eğitim Enstitüsü., İnş. Müh., Orcid: 0009-0002-0597-3285

² Dr. Öğr. Üyesi, Konya Teknik Üni, İnş. Müh., Orcid: 0000-0003-1672-1630

profillerinde etkili çözümler sunmaktadır. Bu tekniklerin avantajları arasında düşük maliyet, yaygın saha bilgisi ve hızlı uygulama süreleri sayılabilir. Ancak, bu yöntemlerin karmaşık zemin yapıları, derin temel gereksinimleri, sismik risk taşıyan bölgeler ve çevresel sürdürülebilirlik gibi modern mühendislik gereksinimlerini karşılamada sınırlı kaldığı gözlemlenmektedir.

Günümüzde artan kentleşme, iklim değişikliği, deniz seviyesi yükselmesi, mega altyapı projelerinin artışı ve yapısal yüklerin büyümesi gibi faktörler, geoteknik mühendisliğinde daha hassas, bütüncül ve yüksek doğrulukta çözümler sunan tekniklerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu bağlamda, yenilikçi zemin iyileştirme ve izleme yaklaşımları giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Derin karıştırma yöntemleri (DSM), elektrokimyasal stabilizasyon, geopolimer enjeksiyon teknikleri ve mikrobiyal olarak indüklenen kalsit çökeltmesi (MICP) gibi yöntemler, yalnızca zemini iyileştirmekle kalmayıp; aynı zamanda çevresel etkileri azaltma, uygulama derinliğini artırma ve zemin parametrelerinin daha kalıcı şekilde değiştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Bununla birlikte, gelişmiş zemin tanımlama ve izleme teknolojileri olan CPTu (piezokoni) ve SCPT (sismik koni testi) gibi test sistemleri sayesinde, zeminlerin yalnızca statik değil aynı zamanda dinamik ve hidrojeolojik davranışları da eşzamanlı olarak ölçülebilmektedir. Bu testler, geleneksel sondaj ve numune alma yöntemlerine göre daha hızlı, güvenilir ve sürekli veri üretme kapasitesiyle öne çıkmaktadır. Ayrıca gerçek zamanlı zemin izleme sistemleri ile zemin davranışı, proje süresince ve sonrasında anlık olarak takip edilebilmekte; böylece riskli deformasyonlar ya da sıvılaşma eğilimleri erken aşamada tespit edilebilmektedir. Mekanizmalar; sensör entegrasyonu, uzaktan erişim, yapay zekâ destekli analiz ve otomatik uyarı mekanizmaları gibi birçok yeniliği bir araya getirerek, geoteknik mühendisliğinde proaktif yaklaşımları mümkün kılmaktadır.

Bu çalışma, geoteknik mühendisliğinde uygulanan geleneksel ve yenilikçi zemin iyileştirme tekniklerini ele almaktadır. Ayrıca gelişmiş in-situ test sistemleri, parametrik sayısal modellemeler ve gerçek zamanlı izleme teknolojileri aracılığıyla zemin davranışının daha doğru ve güvenilir şekilde modellenmesine yönelik çağdaş yöntemler detaylandırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, mühendislik karar süreçlerinde veriye dayalı, çevresel etkilere duyarlı ve yüksek güvenlik standartlarına sahip çözümler geliştirilmesine katkı sunmak; disiplinler arası bir yaklaşımla gelecekteki araştırmalara metodolojik bir zemin oluşturmaktır.

Yenilikçi Yöntemlere Neden İhtiyaç Duyulmaktadır?

Günümüz mühendislik uygulamaları, yalnızca yapısal dayanım açısından değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik, ekonomik verimlilik ve afet direnci gibi çok boyutlu kriterlere yanıt vermek zorundadır. Artan yapı yükleri, değişen iklim koşulları ve karmaşık jeolojik ortamlarda güvenli yapı-zemin etkileşimi kurmak, klasik yöntemlerle sınırlı kalındığında çoğu zaman yetersiz sonuçlar doğurmaktadır (Zuo, Zhang, & Ng, 2018) (Shukla, 2017). Killi zeminler; düşük taşıma kapasitesi, yüksek plastisite ve heterojen yapı geleneksel yöntemlerin sınırlarını zorlayan (hedeflenen mühendislik performansını sağlayamamakta) en zorlu zemin türlerindendir. Bu nedenle, yenilikçi teknolojiler artık sadece bir alternatif değil, çoğu zaman bir gereklilik haline getirmektedir.

Bu ihtiyaca karşılık olarak geliştirilen yeni nesil yöntemler; hem zeminlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini mikro düzeyde değiştirebilecek kapasiteye sahip, hem de sürekli izlenebilirlik ve veri üretimi ile bütünleşmiş sistemlerdir (DeJong, Mortensen, Martinez, & Nelson, 2013). Örneğin, Mikrobiyal Olarak İndüklenen Kalsit Çökmesi (MICP), zeminin gözenekliliğini azaltarak geçirgenliği düşürebilmekte ve çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Ivanov & Chu, 2008). Yine, derin karıştırma

yöntemleri, özellikle suya doygun, yumuşak kil tabakalarında, klasik kompaksiyon tekniklerinin erişemediği derinliklerde etkili sonuçlar üretmektedir (Topolnicki, 2004).

Ayrıca, yapay zekâ destekli karar destek sistemleri, sahadan elde edilen büyük veri setleri ile beslenerek hem tasarım doğruluğunu artırmakta hem de proje yönetiminde zaman ve kaynak optimizasyonu sağlamaktadır (Goh, Goh, & Zhang, 2020). Bu tür gelişmeler, zemin mühendisliğinde veri odaklı, dinamik ve ileri teknolojilere dayalı bir anlayışın yükseldiğini göstermektedir.

Geoteknik Mühendisliğinde Geleneksel Zemin İyileştirme Yöntemlerine Genel Bir Bakış

Geleneksel yöntemler, zeminlerin stabilizasyon sorunlarını çözmek amacıyla geçmişten günümüze uygulanmış kazık temeller, drenler ve drenaj kanalları, dinamik sıkıştırma, kimyasal stabilizasyon ve taş kolonlar gibi yöntemlerdir. Geoteknik mühendisliğinde geleneksel yöntemler hâlâ önemli bir yere sahip olsa da özellikle zorlayıcı zemin koşullarında ve kentsel alanlardaki yapılaşma ihtiyacında yenilikçi tekniklerin önemi her geçen gün artmaktadır.

Geleneksel zemin iyileştirme yöntemleri; zemin iyileştirme, zemin güçlendirme, drenaj, dolgu sistemleri, şev stabilitesi, ayırma sistemleri, kıyı ve liman koruması, katı atık depolama sahaları, sulama kurutma alanları gibi geniş uygulama yelpazesine sahiptir. Her bir yöntemin başarıyla kullanılabilmesi, zeminin koşullarına, uygulama kabiliyetine ve projeye özgü detaylı analizlere bağlıdır. Bu çalışmada geleneksel zemin iyileştirme yöntemleri, uygulama derinliğine bağlı olarak sınıflandırılarak yüzeysel ve derin zemin iyileştirme yöntemleri başlıkları altında incelenmiştir.

Yüzeysel Zemin İyileştirme Yöntemleri

Yüzeysel Drenaj Yöntemleri

Drenaj yöntemleri, zemin içinde bulunan fazla suyun uzaklaştırılarak zeminin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini hedefler. Özellikle kohezyonlu zeminlerdeki su muhtevası, taşıma gücü sorunlarına sebep olabilmektedir. Drenajla düzenli bir su muhtevası sağlanarak bu taşıma gücü sorunlarının önüne geçilmeye çalışılmaktadır. Bu yöntemler çoğunlukla aşağıda belirtilen biçimlerde uygulanır:

Fransız dreni: Yüzeyde veya yer altında biriken suyun kontrollü şekilde uzaklaştırılması için kullanılan, çakıl veya kırmataş dolgu ile oluşturulan, çoğunlukla delikli boru içeren bir drenaj sistemidir. Genellikle zemin suyunun temel, istinat duvarı, bahçe veya saha tabanından uzaklaştırılmasında tercih edilir.

Çevre drenleri: Bir yapının dış çevresi boyunca, genellikle temel kotunun biraz altına yerleştirilen, suyu toplayıp tahliye eden delikli boru ve çakıl dolgu sistemidir.

Köstebek drenler: Tarım arazilerinde veya geniş geçirimsiz zemin alanlarında yer altı suyu tahliyesini sağlamak amacıyla kullanılan, borusuz ve ekonomik yer altı drenaj sistemleridir. Özellikle kil oranı yüksek ve geçirimsiz topraklarda ani drenaja uygun olmayan zeminlerde, klasik borulu drenaj sistemlerine ekonomik bir alternatif olarak geliştirilmiştir

Yüzey Kompaksiyonu

Kompaksiyon yöntemleri dünya genelinde çoğunlukla dolgu barajlar, havaalanı pistleri ve otoyol projelerinde tercih edilir (Seed & Idriss, 1970). Kohezyonlu zeminlerde yüzey kompaksiyonunun en verimli biçimde uygulanabilmesi için zemin içindeki suyun ideal miktarda olması çok önemlidir. Bu su miktarı farklı zemin tipleri için değişiklik gösterdiği gibi aynı zeminler içinde kullanılan

kompaksiyon ekipmanına ve uygulanan enerjiye göre de değişkenlik göstermektedir. Ancak, kohezyonsuz zeminlerin sıkıştırılmasında bu ideal su miktarı daha az önem taşır çünkü kohezyonsuz zeminlerde danelerin boyutu büyük olduğundan zemindeki havanın çıkması kolaydır (Özaydın, 1999).

Yüzey kompaksiyonu uygulaması için kullanılan birçok silindirli geleneksel makine vardır (Selçukhan & Ekinci, 2020). Bu makineler; düz ayaklı silindirler, lastik tekerlekli silindirler, keçi ayaklı silindirler, titreşimli silindirler, darbeli sıkıştırma araçları, demir bandajlı silindirler ve pnömatik silindirler biçimde sınıflandırılabilir.

Yüzey kompaksiyonunda hangi tip silindirlerin kullanılacağı, zemin cinsi; sıkıştırma derecesi, işin büyüklüğü ve silindir tipleri kapasitesi parametrelerine bağlıdır (Selçukhan & Ekinci, 2020). Mevcut silindire, zeminin cinsi ve tabaka kalınlığına göre sahada deneyimli bir elemanın sıkışma kontrolünü gerçekleştirmesi gereklidir.

Yüzey kompaksiyonu yöntemi, stabilize edilecek zeminin derin olmadığı bölgelerde uygulanması uygun olan bir yöntemdir. Bu sebeple sıkıştırılan tabaka arttıkça homojen bir sıkışma elde etmek güçleşir ve sıkışma miktarı azalır (Özaydın, 1999). Yüzey kompaksiyonu uygulaması, zeminin taşıma gücünü artırır. Oturmaları ve geçirimliliği azaltır ancak derinliklere inildiğinde diğer yöntemler kadar etkili değildir. Maliyeti düşüktür ancak uygulama süresi daha fazladır.

Kimyasal Stabilizasyon

Kimyasal stabilizasyon, zeminin doğal özelliklerini değiştirmek ve dayanımını artırmak için kimyasal maddelerin zemine karıştırılması yöntemidir. Özellikle kohezyonlu (kil) zeminlerde tercih edilmektedir. Karayolu temelleri, baraj dolguları ve sanayi sahaları, geçici şantiye yolları ve platformlar, endüstriyel

sahalarda yüzey kaplaması, asfalt geri dönüşüm uygulamaları ve donma-çözülme döngüsünün yoğun olduğu bölgelerde stabilizasyon gibi geniş uygulama alanları vardır.

Kullanılan başlıca malzemeler şunlardır:

Kireç stabilizasyonu: Kireç, en eski stabilizasyon katkılarından biridir. Kil içeren kohezyonlu zeminlerde kireç eklenerek uzun vadede şişme ve büzülme problemleri azaltılır, zeminin mukavemetinin artırılması hedeflenir. Kireç stabilizasyonu, özellikle plastik kil zeminlerde yaygın olarak kullanılır ve zeminin plastisitesini azaltarak taşıma kapasitesini artırır (Mitchell & Soga, Fundamentals of Soil Behavior, 2005). Killi zeminlerde sönmüş kireç daha etkiliyken, ince kumlarda ise sönmemiş kireç hidrasyon esnasında çıkardığı ısı ve emdiği sudan dolayı daha iyi sonuç vermektedir (Ünlü Şahan, 2016).

Uçucu kül ile stabilizasyon: Uçucu kül, termik santrallerde kömürün yanması sonucu elde edilen, silis ve alüminyum açısından zengin bir puzolanik malzemedir. Tek başına veya kireçle birlikte kullanıldığında bağlayıcı özellik gösterir.

Uçucu külün stabilizasyondaki etkileri şunlardır:

- Zeminin geçirimsizliğini azaltır ve su geçirgenliğini düşürür.
- Uzun süreli dayanım artışı sağlar (Demirel, Taşdemir, & Uysal, 2022).
- Çimento tüketimini azaltarak çevresel etkileri düşürür (Şahin & Koç, 2021).
- Yüksek miktarda silis ve alümina içeren uçucu küller, özellikle kireçle birlikte kullanıldığında etkili bir puzolanik reaksiyon oluşturur (Davidovits, 1991); (Provis & van Deventer, 2009); (Saran & Demiröz, 2022).

Kireç ve Uçucu kül ile stabilizasyon: Kireç ve uçucu kül birlikte kullanıldığında sinerjik bir etki sağlar. Kireç ilk etapta zemin plastisitesini azaltırken, uçucu kül uzun vadeli bağlayıcılık görevini üstlenir. Bu kombinasyonun avantajları şunlardır:

- Dayanım artışı daha kalıcıdır.
- Maliyet açısından ekonomiktir.
- Yüksek plastisiteli killerde etkili sonuçlar verir.

Birçok çalışmada, optimum karışım oranlarının kireç için %3–6, uçucu kül için %10–25 arasında olduğu belirtilmiştir (Bozbey & Taşpolat, 2011); (Saran & Demiröz, 2025).

Çimento stabilizasyonu: Temel prensip, zeminin çimento ile karıştırılarak sertleştirilip dayanımının geliştirilmesidir. Çimentonun içinde bulunan silika, içinde kil mineralleri barındırdığı için betondaki gibi zemin daneleri arasında bağlayıcı özellik gösterir. Betondan en önemli farkı ise çok düşük çimento oranlarıyla stabilizasyon uygulamasının yapılabilme imkanındır. Zeminin dayanımını bu çimento oranı belirlemektedir. Bu oran yaklaşık olarak, zeminin kuru birim ağırlığının %5-15'i arasında değişmektedir (Ünlü Şahan, 2016). Ünlü Şahan (2016)'a göre çimento ile stabilizasyon yöntemi, saf kohezyonlu ve organik zeminler haricine tüm zemin tipleri için kullanılabilir. Uygulamada ise yol inşaatlarında sıkça kullanılan bir yöntemdir.

Bitüm ile stabilizasyon: Bitüm ile zemin stabilizasyonu, özellikle suya duyarlı veya kohezyonsuz zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntem, özellikle geçirimsizlik, drenaj kontrolü, donma-çözülme direnci ve yüzey dayanımını artırmak gibi performans hedefleri için tercih edilir. Asfalt yol yapımında temel veya alt temel katmanlarında kullanılan bitümlü stabilizasyon, aynı zamanda sanayi ve depo sahalarında, geçici platformlarda da uygulanabilir.

(Sherwood, Soil Stabilization with Cement and Lime, 1993); (Hausmann, 1990).

Bitüm, su itici (hidrofobik) yapısıyla zemine eklendiğinde, zemin tanecikleri etrafında adeta film tabakası oluşturarak şu etkileri sağlar:

- Suya karşı koruyucu kalkan oluşturarak zeminin plastisite ve şişme potansiyelini azaltır.
- Kayma direncini artırır; tanecikler arası kohezyonu bitümle sağlar.
- Donma-çözülme döngüsüne karşı dayanım kazandırır (Fang, 2013).

Bu etkiler, bitümün türü (anyonik, katyonik, cutback, emülsiyon vs.), zemin tipi ve uygulama yöntemine göre değişkenlik gösterir (Sherwood, 1993). Araştırmalarda, kumlu-siltli zeminlerde %3–6 bitüm içeriği ile önemli ölçüde mukavemet ve geçirimsizlik artışı sağlandığı rapor edilmiştir (Hausmann, 1990) (Sherwood, 1993)

Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri

Önyükleme ve Düşey Drenler

Zemin iyileştirme çalışmalarında, konsolidasyonun hızlandırılması ve oturma miktarının kontrol altına alınması hedeflendiğinde, en etkili yöntemlerden biri önyükleme (preloading) ve bununla birlikte uygulanan düşey dren sistemleridir. Bu yöntemler özellikle kil, silt ve turba gibi düşük geçirgenlikli ve yüksek sıkışabilirliğe sahip zeminlerde kullanılır (Mitchell & Soga, 2005) (Hausmann, 1990).

Önyükleme, inşa edilecek yapının neden olacağı yüklerden önce zemine geçici yük uygulanarak, zeminin önceden oturtulması işlemidir. Bu yöntemle zemin içindeki su dışarı atılır

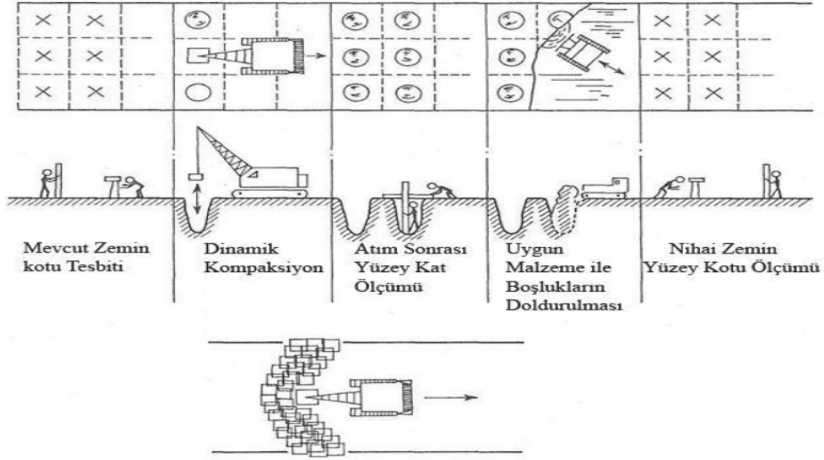
(konsolidasyon), böylece gelecekteki yapı oturmaları büyük ölçüde önceden gerçekleşmiş olur. Ön yükleme uygulandığında zeminin konsolidasyonunu sağlamak için çok uzun süreler gerekebilir. Bu süreyi kısaltmak için zeminin içinde düşey dren sistemleri kullanılmaktadır.

Düşey drenler, zemine dikey olarak yerleştirilen sıkıştırılmış sentetik (geosentetik) şeritler veya kum kolonlar vasıtasıyla, suyun yatay olarak değil dikey olarak yüzeye yönlendirilmesini sağlar. Düşey dren sistemleri drenaj yolunu azaltır, boşluk suyu basınçlarını hızla sönmeler (Ünlü Şahan, 2016).

Kompaksiyon

Dinamik Kompaksiyon: Dinamik kompaksiyon zeminlerin mekanik özelliklerinin derin seviyelere kadar iyileştirilmesine yönelik bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu yöntemde, taban zemini, büyük bir ağırlığın değişken yükseklikten serbest düşüm ile zemin yüzeyine belirli ara mesafeler ile düşürülmesi sonucunda sıkıştırılmaktadır (Durgunoğlu, Varaksin, Karadayılar, Nasöz, & Briet, 2002). Dinamik kompaksiyonda esas, zemine enerji uygulamak olsa da doygun temel zemini yerinden kaldırılmadan, üstüne düşürülen ağırlıklar yardımıyla sıvılaşmaya zorlanmakta ve sıkışma bu şekilde gerçekleştirilmektedir (Önalp, 1985). Bu teknikteki tecrübeleri ve daha önceki uygulamaları da göz önüne alarak kapsamlı olarak zemin davranışını anlamak, başarılı bir zemin iyileştirmesi için büyük önem arz etmektedir (Slocombe, 2004).

Dinamik Kompaksiyon uygulaması

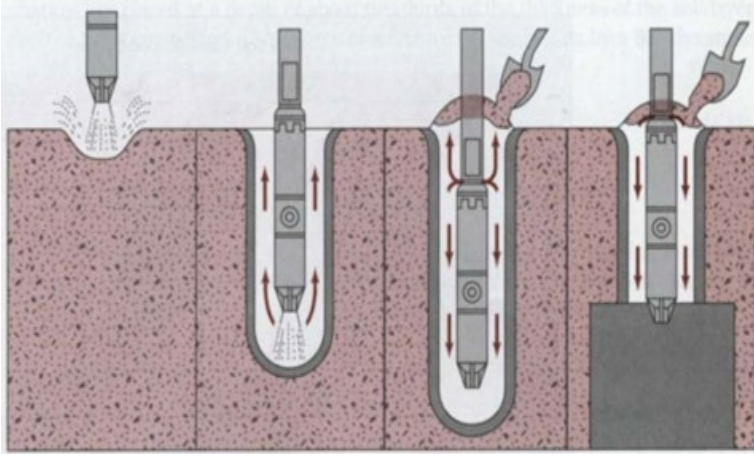


Kaynak: (Bergado, Anderson, N., & S, 1996).

Vibro Kompaksiyon (Flotasyon): Vibro kompaksiyon, derin ve kum-çakıl (ince-iri daneli) vb. kohezyonsuz zeminlerde; zemine yerleştirilen bir sondanın enerji titreşimleri ile zemini sıkıştırarak istenilen zemin özelliklerine ulaşılmasını sağlayan, yaygın kullanılan bir zemin stabilizasyon tekniğidir. Titreşimli silindirler ve plaka kompaktörler kullanılarak zemin sıkıştırılır. Yatay doğrultuda verilen titreşimler sonrasında kalın, ince ve iri daneliler arasında geçici sürtünme kaybı yaşanır. Granüler zeminlerde sondayı çevreleyen zeminde sıvılaşma gerçekleşir. Bu sıvılaşma sonucunda ani ve hızlı oturmalar olur. Zeminde çökmeler oluşur ve bu sebeple sonda etrafındaki zeminde sıkışma gerçekleşmiş olur.

(Demiröz & Karaduman, 2009), uygulama öncesinde ve sonrasında sahada yapılan kalite kontrol ile uygulamanın istenilen iyileştirmeyi yapıp yapmadığının kontrol edilebilir olduğunu ve bu kontroller için de deneyimli sahibi bir kişiye ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir. Uygulama maliyeti olarak, diğer yöntemlerle aynı seviyededir ancak uygulama süresinin kısılması ön plana çıkmaktadır.

Vibro Kompaksiyon uygulaması



Kaynak: (Ünlü Şahan, 2016)

Patlatma ile Kompaksiyon: Patlayıcıların patlama etkisinden dolayı ortaya çıkan şok dalgalarının ve titreşimlerin, zeminin sıkılaşması ve sıvılaşmasına neden olduğu tekniktir. Patlama ile kompaksiyon yöntemiyle yumuşak zeminlerin oturmaları ve granüler zeminlerin taşıma kapasitesi artırılabilir. Rölatif sıkılıkta %35 ile %85 arasında artış sağlanabilmektedir.

(Selçukhan & Ekinci, 2020)'a göre, granüler zeminlerde patlama ile taşıma kapasitesinin artırılmasının başarılı olabilmesi için zeminin tam doygun olması gerekmektedir ve zeminde ne kadar hava varsa taşıma kapasitesinin iyileştirilmesi o kadar zorlaşmaktadır. Patlama yönteminin en büyük avantajları arasında ekonomiklik ve diğer yöntemlerin imkân vermediği derinliklerde kullanılabilir olmasıdır. 40 metre derinliğe kadar başarılı bir uygulama nihayetinde patlatma ile kompaksiyon sonuçları elde edilmektedir. Uygulama süresi kısa olmasına rağmen bu yöntem, teorik bilgiden ziyade tecrübeye dayalı uygulandığından ve yanlış kullanımı güvenlik açısından risk oluşturduğundan ayrıca doğa için çok zararlı olması gibi etmenlerden dolayı sık tercih edilmemektedir.

Kompaksiyon kazığı: Kompaksiyon kazığı, kohezyonsuz ve gevşek zeminlerin (özellikle kumlu zeminlerin) sıkıştırılarak taşıma gücünün artırılması ve diferansiyel oturmaların azaltılması amacıyla uygulanan, dinamik olmayan (statik) sıkıştırma yöntemidir. Bu yöntemde, zemine yerleştirilen kazık tipi elemanlar sayesinde çevre zemin, yerinde yoğunlaştırılır (Barksdale & Bachus, 1983) (Mitchell J. K., 1981).

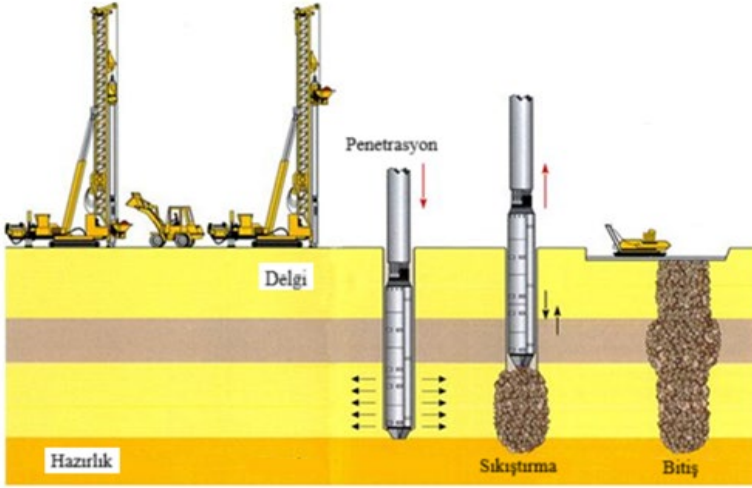
Kompaksiyon kazıkları, genellikle kum-çakıl karışımları, kum-çimento harcı ya da sıkıştırılmış beton gibi malzemelerle hazırlanır ve zemine yerleştirilir. Kazık yerleştirme işlemi sırasında veya sonrasında çevresindeki zemin radyal yönde sıkışır. Bu sıkışma sayesinde:

- Zemin içi boşluk oranı azalır,
- Yüzeysel ve toplam oturma miktarı düşer,
- Zemin taşıma gücü artar ve yer altı suyu etkisiyle oluşabilecek sıvılaşma riski azaltılır (Hausmann, 1990); (Mitchell & Soga, 2005).

Taş Kolonlar

Taş kolonlar, granüler malzemelerle imal edilen; zemin içine yerleştirilen sütun formunda kazıklardır. Bu kazıklar, zayıf zeminlerde yük taşıma kapasitesini artırarak oturma sorunlarını azaltmayı hedefler. Taş kolonlar, zeminin su jetiyle doğrudan delinerek granüler malzemenin yerleştirilmesi sonrası vibrasyon ile sıkıştırılması sonucu elde edilir.

Taş Kolon uygulaması



Kaynak: (Raju & Sondermann, 2005).

(Demiröz & Karaduman, 2009) taş kolonların genellikle yumuşak veya orta katı kil zeminlerde ve iyileştirilecek zeminin 10m derinliği geçmeyen koşullarda tercih edildiğinden bahsetmiştir. Bu yöntem sayesinde iyileştirilen zeminlerin, vibrasyon etkisi ile sıkıştırılması sağlanarak yoğunluk artışı elde edilir. Dolayısıyla taşıma gücü, kayma dayanımı ve dren kabiliyetlerinde artış görülmektedir. Taş kolonlar dren özelliği de sergilediği için konsolidasyonu hızlandırmaktadır. Uygulamasının çok hızlı ve ekonomik olmasıyla öne çıkan bir yöntemdir. (Yee & Aun, 2010)' a göre uygulama doğaya en çok CO₂ salınımına sebep olan zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir.

Enjeksiyon yöntemleri

Zemin iyileştirmede enjeksiyon yöntemleri, zayıf taşıma gücüne sahip veya geçirimsizliğin sağlanmasının gerekli olduğu zeminlerin performansını artırmak amacıyla yer altına çeşitli sıvı veya yarı akışkan malzemelerin enjekte edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu teknikler, farklı bağlayıcı türleri ve uygulama

yöntemlerine bağılı olarak çok çeşitli saha koşullarında başarıyla uygulanabilmektedir. Enjeksiyonla yapılan iyileştirme işlemleri, genellikle oturma kontrolü, taşıma gücü artırımı, su geçirimsizliği sağlama ve zemin stabilizasyonu gibi amaçlarla tercih edilmektedir (Karol, 2003). Çoğunlukla şehir merkezlerindeki inşaat projelerinde ve tarihi yapıların korunma alanlarında tercih edilir.

Enjeksiyon yöntemlerinde, bağlayıcı madde düşük viskoziteli bir sıvı hâlinde zemine yerleştirilen borular veya delikler aracılığıyla yüksek veya düşük basınçla enjekte edilir. Bu işlem sırasında bağlayıcı, zemin boşluklarına nüfuz eder ve burada kimyasal reaksiyona girerek priz alır. Böylece zemin matrisinde bir bağ oluşturur ve dayanımı artırır (Bruce, 2005).

Kullanılan Malzeme Türleri

- **Çimento Bazlı Harçlar:** En yaygın kullanılan bağlayıcılardır. Genellikle silt ve kum zeminlerde uygundur.
- **Kimyasal Enjeksiyonlar:** Sodyum silikat, akrilamid, poliüretan gibi düşük viskoziteli kimyasallar kullanılır. Özellikle ince taneli zeminlerde tercih edilir (Bell, 1993).
- Mikro-çimento ve Süperplastifiyanlı (yüksek oranda akışkanlaştırıcı katkı içeren) Karışımlar: Daha derin enjeksiyonlar ve ince çatlaklara nüfuz edebilme açısından avantaj sağlar.
- **Geopolimer Esaslı Enjeksiyonlar:** Sürdürülebilirlik odaklı, endüstriyel atık bazlı çevre dostu enjeksiyon alternatifleridir (Provis & van Deventer, 2009); (Hamed & Demiröz, 2024).

Enjeksiyon Yöntem Çeşitleri

- **Perdah (Permeation) Enjeksiyonu:** Enjeksiyon sıvısı, zeminin mevcut boşluklarında akarak ilerler ve zemini yapısal olarak bağlar. Bu yöntem genellikle ince kum ve silt zeminlerde uygulanır. Düşük basınç kullanılır (Karol, 2003).
- **Jet Grouting (Yüksek Basıncılı Enjeksiyon):** Yüksek basınçla enjekte edilen bağlayıcı, zemini parçalayarak yerinde karıştırır ve silindirik biçimli iyileştirilmiş kolonlar oluşturur. Farklı çaplarda kolon üretimi mümkündür (Bruce & Gallavresi, 1988).
- **Kompaksiyon Enjeksiyonu:** Zemine düşük viskoziteli bağlayıcılar yüksek basınçla verilerek zemin sıkıştırılır. Genellikle çakıllı veya gevşek kumlu zeminlerde uygulanır.
- **Kimyasal Enjeksiyon (Grout Curtain):** Baraj, tünel ve su yapılarında geçirimsizlik sağlamak amacıyla bağlayıcı malzeme, zemin içinde sürekli perde şeklinde yerleştirilir (Lombardi, 2003).

Enjeksiyon yöntemleri, hızlı ve çeşitli zemin türlerinde uygulanabilirlik; zemin kazısı gerektirmeme ve yüksek geçirimsizlik sağlama imkanları sunar. Öte yandan yüksek maliyet ve sınırlı etki alanı, derin uygulama kontrol zorluğu, kimyasal malzemelerin çevreye olumsuz etkileri gibi kısıtlamalar getirmektedir.

Kireç kazıkları

Kireç kazıkları, yumuşak, sıkışabilir ve düşük taşıma kapasiteli killi zeminlerde şekil değişimi, dayanım ve oturma sorunlarını azaltmak amacıyla kullanılan bir derin karıştırma stabilizasyon yöntemidir. Bu yöntemde, zemine düşey doğrultuda yerleştirilen kireç enjeksiyonları sayesinde düşük dayanımlı doğal zemin tabakaları yerinde stabilize edilir (Hausmann, 1990) (Mitchell & Soga, 2005).

Kireçle zemin iyileştirme yöntemi, özellikle inorganik, suya doygun ve plastisiteleri yüksek killerde oldukça etkili olup hem fiziksel hem de kimyasal zemin özelliklerini değiştirmektedir. Yol ve demiryolu dolgu tabanları, baraj şevleri ve gövde altı stabilizasyonu, sanayi yapıları altı zemin iyileştirmesi, zayıf kıyı dolguları ve heyelan riskli sahalarda rijitlik artırımı uygulama alanları arasındadır. Kireç kazıkları, önceden belirlenmiş bir yerleşim düzenine göre zemine açılan deliklere kireç yerleştirilmesi ve mekanik karıştırma ile zeminin yerinde modifiye edilmesiyle oluşturulur. Kireçle tepkimeye giren kil mineralleri aşağıdaki yollarla iyileşir:

Temel reaksiyonlar şunlardır:

- **Puzolanik Reaksiyon:** Kirecin kil mineralleriyle reaksiyonu sonucu dayanımı yüksek kalsiyum-silikat ve kalsiyum-alüminat hidratlar oluşur.
- **Agregasyon ve Flokülasyon:** Kil parçacıkları birleşerek daha iri taneli yapıya geçer, plastisite azalır.
- **Kuruma etkisi:** Kireç, zemindeki serbest suyu bağlayarak nem içeriğini azaltır, kohezyon artar.
- Zemin ve kireç arasındaki bu kimyasal etkileşimler sonucunda plastisite düşer, kesme dayanımı ve rijitlik artar (Sherwood, 1993); (elik & şengül, 2020).

Mini kazıklar

İlk olarak 1950’li yıllarda İtalya’da "pali radice" (kök kazık) adıyla geliştirilmiş, daha sonra ABD ve Avrupa’da tarihi yapı güçlendirme projeleriyle yaygınlık kazanmıştır. Günümüzde ise mevcut yapıların temellerinin güçlendirilmesi, tarihi yapı restorasyonları (düşük titreşim avantajı nedeniyle), zayıf zeminlerde taşıma gücü artırımı, tünel giriş-çıkışlarında yüzey stabilitesi, şev stabilizasyon sistemleri, deprem bölgelerinde rijitlik artırımı gibi çok

çeşitli geoteknik problemlerin çözümünde etkin olarak kullanılmaktadır.

Mini kazıklar, çapları genellikle 100 mm ile 300 mm arasında olan, zemin içerisine enjeksiyon dolgulu ve genellikle çelik donatılı olarak yerleştirilen derin temel elemanlarıdır. Mini kazıklar, yükleri zemine uç dayanımı veya sürtünme dayanımıyla aktarabilme kabiliyetine sahiptir. Bu kazıklar, özellikle sınırlı erişime sahip alanlarda, mevcut yapıların temel güçlendirmesi veya zayıf zeminlerin taşıma kapasitesinin artırılması amacıyla tercih edilmektedir (Bruce & Gallavresi, 1988); (FHWA, 2005).

Uygulama süreci şu biçimdedir:

- **Sondaj:** Kazık çapına uygun delik, rotari sondajla açılır.
- **Donatı yerleştirme:** Tek çelik çubuk veya kablo yerleştirilir.
- **Grout enjeksiyonu:** Delik içi yüksek basınçla çimento esaslı enjeksiyonla doldurulur.
- **Kür süresi:** Enjeksiyon harcı kürlenirken stabilite sağlanır.
- **Yük transferi:** Temel elemanlarına veya ankraj sistemine bağlantı yapılır.

Geotekstil ve geogrid kullanımı

Geotekstil ve geogrid malzemeler, zeminin stabilite sorunlarını çözmek ve yük dağılımını iyileştirmek için günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Geotekstil malzemeler, genellikle yol ve otoyol projelerinde zemin ayrıştırıcı ve güçlendirici işlev görür. Geogridler taşıma kapasitesini artırmak için zeminle bütünleşik olarak çalışır. Özellikle yumuşak zeminlerde, geogrid uygulamaları dolgu malzemesinin stabilitesini önemli ölçüde artırır (Koerner, 1998). Bu geleneksel yöntemler uzun yıllar boyunca güvenilir çözümler sunmuş olsalar da modern inşaat sektöründe yenilikçi teknolojilerle desteklenerek daha etkili gelmiştir. Örneğin

geotekstil kullanımı gibi geleneksel teknikler artık dijital sensörlerle birleştirilerek zemin davranışını gerçek izleme avantajı sunmaktadır (Das B. , 2011) (Budhu, 2010).

Zemin çivileri

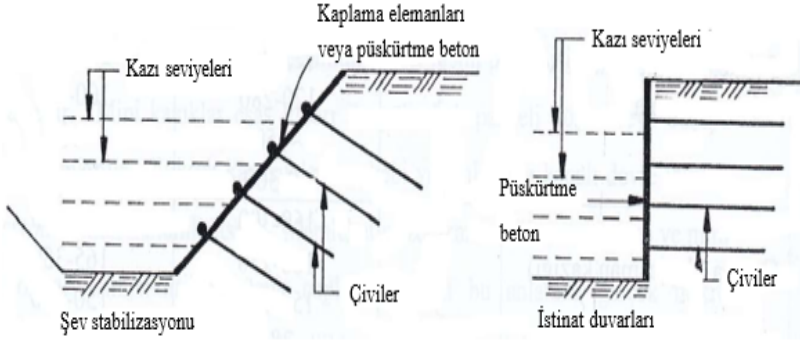
Zemin çivisi (*soil nailing*), doğal ya da kazı sonucu oluşmuş dik veya eğimli yüzeylerin stabilitesini artırmak amacıyla kullanılan, yerinde takviye esaslı bir zemin iyileştirme ve kazı destekleme yöntemidir. Yöntemin temel ilkesi, zemine yerleştirilen pasif donatı elemanlarının (çivilerin) zeminin iç kesitinde çekme etkisi altında çalışarak olası kayma veya devrilme yüzeylerini engellemesidir (Schlosser & Guillaux, 1991). Zemin çivileri, çekme kuvvetleri ile çalışır ve zemin içerisine yerleştirildikleri konumda şevin iç stabilitesini artırır. Yapısal olarak perde gibi davranmamakla birlikte, zeminin deformasyonunu sınırlar, aktif ve pasif gerilmeleri dengeler. Nümerik modellemelerde, çivilerin oluşturduğu takviye kuvvetlerinin şev kayma yüzeyine dik bileşenleri, kaymaya karşı dirençte önemli rol oynar (Gassler & Gudehus, 1981). Zemin çivisi yöntemi, tipik olarak aşağıdaki bileşenlerden oluşur:

- **Eğik donatı çubukları (çiviler):** Genellikle 15°–20° açılarla yerleştirilen çelik çubuklar veya kablolar.
- **Enjeksiyon (grout):** Çivilerin zeminle aderansını artırmak için çimento esaslı enjeksiyon malzemesi.
- **Yüzey kaplaması:** Beton püskürtme (shotcrete), tel hasır veya geotekstil ile yüzey koruması.
- **Drenaj sistemleri:** Yüzey suyu veya zemin suyunun tahliyesi için kullanılır.

Bu sistem, kademeli kazı yöntemi ile ilerletilir: kazı ilerledikçe çiviler yerleştirilir ve yüzey kaplaması uygulanır. Böylece zemin, kendi ağırlığını taşıırken dıştan desteklenir.

Derin kazı destek sistemleri (kentsel alanlar), otoyol ve demiryolu kenar şevleri, tünel portal stabilizasyonu, geçici kazı destekleri, kaya düşmelerine karşı önlemler ve zemin hareketlerinin sınırlandırılması gereken alanlarda kullanımı tercih edilir.

Zemin çivileri uygulaması



Kaynak: (Ünlü Şahan, 2016).

Well-Point sistemi

Well-point sistemi, inşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan, özellikle geçici kazı sahalarında yer altı suyu seviyesini düşürmek amacıyla uygulanan bir drenaj yöntemidir. Bu sistem, zemin içerisine yerleştirilen küçük çaplı dren kuyularının (well-point'ler), bir manifold hattı ve vakum etkili pompa sistemi ile çalıştırılması esasına dayanır (Cashman & Preene, 2001). Yer altı suyunun kontrolü, temel kazılarının güvenli biçimde yürütülmesi, suya doymuş zeminlerin taşıma gücünün artırılması ve şev stabilitesinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Well-point sistemi, bu ihtiyaçlara hızlı, ekonomik ve esnek çözümler sunabilen bir yöntemdir.

Well-point sistemi, geçici temel kazılarında, yüzeysel drenajın yetersiz olduğu durumlarda etkili, pratik ve taşınabilir bir zemin iyileştirme ve su kontrol yöntemidir. Modern pompa

sistemleri ve otomasyon teknolojileriyle desteklenerek günümüzde halen geçerliliğini koruyan klasik bir mühendislik çözümdür. Şevli kazılarda geçici su kontrolü, borulama ve altyapı geçişleri (içme suyu, kanalizasyon hatları), metro ve tünel inşaatları, baraj ve su yapılarında temel kazısı ve yüksek yer altı suyu seviyesine sahip sahalar kullanım alanlarıdır. Türkiye’de özellikle İstanbul, İzmir, Bursa gibi zemin suyu yüksek kentlerde inşa edilen metro ve altyapı projelerinde well-point sistemi sıklıkla kullanılmaktadır (Yılmaz & Aksoy, 2016).

Geoteknik Mühendisliğinde Yenilikçi Yaklaşımların İncelemesi

Geoteknik mühendisliğindeki yenilikçi yaklaşımlar, zemin etüdü ve tasarımına dair yeni teknolojilerin, materyallerin ve yöntemlerin uygulanmasını içerir. Bu yenilikçi yaklaşımlar, zemin özelliklerinin daha doğru bir şekilde anlaşılmasını, inşaatın dayanıklılığının artırılmasını ve maliyetlerin düşürülmesini amaçlar. Bu çalışmada yenilikçi yaklaşımlar jeofizik yöntemler, zemin iyileştirme teknikleri, biyoteknolojik yöntemler, zemin modelleme ve simülasyon teknolojileri, ileri düzey zemin test yöntemleri, sıvılaştırma riski değerlendirmesi ve kontrolü, akıllı zemin sistemleri başlıkları altında incelenmiştir.

a. Jeofizik Yöntemler

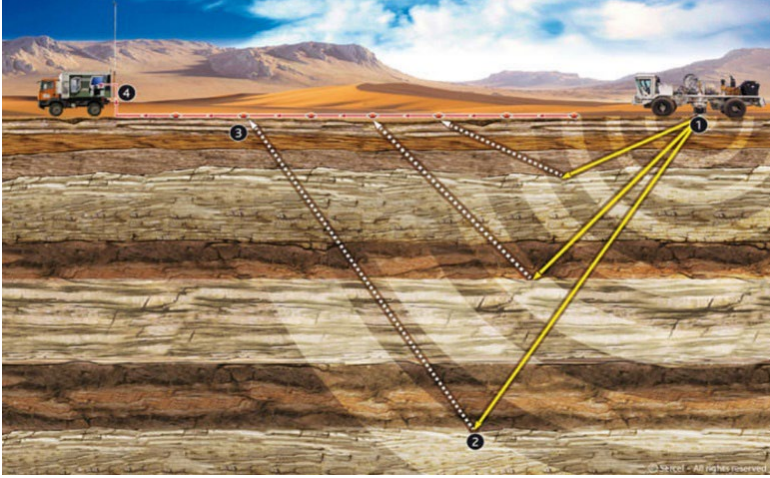
Jeofizik yöntemler, zeminlerin fiziksel özelliklerini yerinde hızlı bir şekilde analiz etmek için kullanılır. Bu yöntemler, zemin etüdü sırasında yer altı yapılarının haritalanmasını sağlar.

Sismik Yansıma (Seismic Refraction)

Sismik yansıma yöntemi, yeraltı yapılarını incelemek için jeofizik yöntemlerden biridir ve geoteknik mühendisliği projelerinde zemin katmanlarının hızı ve kalınlığını belirlemek için kullanılır. Bu yöntem, sismik dalgaların farklı zemin veya kaya katmanları arasındaki sınırdan yansıması prensibine dayanır. Yapay bir kaynak

(örneğin patlayıcı, çekiç darbesi veya vibratör) kullanılarak sismik dalgalar oluşturulur. Oluşturulan sismik dalgalar, zemin içinde hareket eder ve farklı yoğunluk veya elastikiyet özelliklerine sahip katmanlardan yansıyarak geri döner. Yansıyan dalgalar, yüzeyde yerleştirilmiş jeofonlar tarafından algılanır ve kaydedilir.

Sismik Yansıma



Kaynak: (Enerjeo Sismik Aramalar, 2025).

Elektriksel iletkenlik testleri, zeminlerin elektriksel özelliklerini inceleyerek, mühendislik projeleri için kritik zemin parametrelerini belirlemek amacıyla kullanılan bir jeofizik yöntemdir. Bu testler, zemin içindeki mineralojik yapı, su içeriği ve iyon konsantrasyonu gibi faktörlere duyarlıdır ve geniş bir uygulama alanına sahiptir. Elektriksel iletkenlik testleri, zemine uygulanan bir elektrik akımının zemin tarafından iletilme kapasitesini ölçmeye dayanır. Zeminin elektriksel iletkenliği, su içeriği ve içindeki çözünmüş iyonlar gibi özelliklere bağlı olarak değişir. Zemine yerleştirilen elektrotlar aracılığıyla alternatif veya doğru akım uygulanarak akımın geçtiği yol boyunca gerilim farkı ölçülür, zemin direnci hesaplanır. Yeraltı su seviyelerinin (YASS) belirlenmesi, zemin sınıflandırması ve kirlilik izleme uygulama alanlarıdır.

Yer çekimi (Gravite)

Yer çekimi, zemin altındaki yoğunluk değişikliklerini tespit etmek amaçlı kullanılan jeofizik yöntemlerdendir. Bu tip jeofizik yöntemler, yer altı yapılarını ve boşluklarını belirlemek için kullanılır. Yerçekimi ölçümleri, yer altındaki kayaç ve zemin tabakalarının yoğunluk farklarını analiz ederek, yer altındaki yapısal özellikler hakkında bilgi verir.

Manyetik yöntemler

Manyetik yöntemler, temel olarak yer yüzeyindeki manyetik alanın ölçülmesi prensibine dayanır. Bu yöntem, yer altındaki manyetik özelliklere sahip materyallerin varlığına dayalıdır. Özellikle manyetik minerallerin (örneğin, manyetit, magnetit gibi) bulunduğu yer altı yapılarının tespiti için kullanılır. Manyetik veriler, yer yüzeyindeki manyetik anomaliyi (manyetik alanın sapması) ölçerek, yer altı yapıları hakkında bilgi verir. Manyetik ölçümler, yer altındaki manyetik minerallerin farklılıklarını belirleyerek, zemin mühendisliğinde önemli olan yapısal özelliklerin analizi için kullanılır. (Mallon & Finnegan, 2017), manyetik yöntemlerin özellikle fay hatları, tektonik yapılar, yer altı boşlukları ve yer altı su seviyeleri gibi kritik jeolojik unsurların haritalanmasında faydalı olduğunu vurgulamaktadır.

b. Yenilikçi Zemin İyileştirme Teknikleri

Zemin iyileştirme, doğal zeminlerin taşıma kapasitesini artırmak, yer değiştirmeleri azaltmak veya sıvılaşma riskini kontrol altına almak amacıyla uygulanan mühendislik çözümlerini ifade eder. Geleneksel yöntemlerin (örneğin, mekanik sıkıştırma, drenaj, preloading) ötesinde, günümüzde yeni teknolojilerle desteklenen inovatif teknikler ön plana çıkmaktadır. Bu gelişmeler, zemin özelliklerini hedefe yönelik şekilde değiştirebilmekte, aynı zamanda çevresel etkileri de minimize etmektedir. Bu başlık altında yenilikçi zemin iyileştirme teknikleri sınıflandırılarak incelenmiştir.

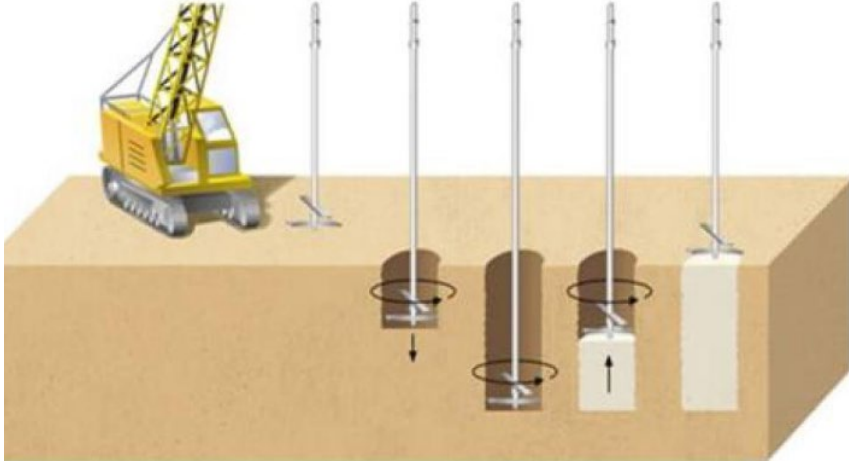
Derin karıştırma yöntemi (Deep Soil Mixing – DSM)

Derin Karıştırma Yöntemi (DSM), zayıf veya gevşek zeminlerin ekonomik ve teknolojik amaçlar paralelinde taşıma gücünü arttırmak; oturmalarını azaltmak ve geçirimsizliğini kontrol etmek amacıyla yerinde mekanik karıştırma ile uygulanan bir zemin stabilizasyon tekniğidir. Bu yöntem temel olarak, zemine mekanik olarak karıştırılan bağlayıcı malzemeler (ör. çimento, kireç vb. puzolan malzemeler) ile zemini stabil hale getirme prensibine dayanır. DSM yöntemi, yumuşak ve doymuş zeminlerde silindirik biçimde kolonlar oluşturarak taşıma kapasitesini ve stabiliteyi artırır (Terashi, 2003).

DSM, temel altı güçlendirme; liman, dolgu ve kıyı yapıları, kazı destek sistemleri, tünel çevresi enjeksiyonu, zemin geçirimsizlik perdeleri gibi geniş kullanım alanları sunmaktadır. Uygulamada kullanılan bağlayıcılar (çimento, kireç vb.) sayesinde yüksek dayanım sağlanabilirken, özellikle deniz tabanı uygulamalarında oturma kontrolü de mümkündür (Terashi, 2003). DSM yöntemi, bağlayıcı malzemelerin zemine enjeksiyonu ile karıştırılması esasına dayanır. Bu süreçte zemin içerisindeki doğal nem ile kimyasal reaksiyona giren bağlayıcılar, çimento veya kireç stabilizasyonu ile sertleşerek kolon veya duvar elemanları oluşturur.

Uygulama sırasında sırasıyla karıştırıcı uç, istenilen derinliğe kadar zemine sokulur. Bağlayıcı malzeme zemine enjekte edilir. Karıştırıcı dönerken yukarı doğru çekilir ve oluşan karışım kür süresine bırakılır.

Derin karıştırma yönteminde delgi ve rijit kolonların oluşturulması



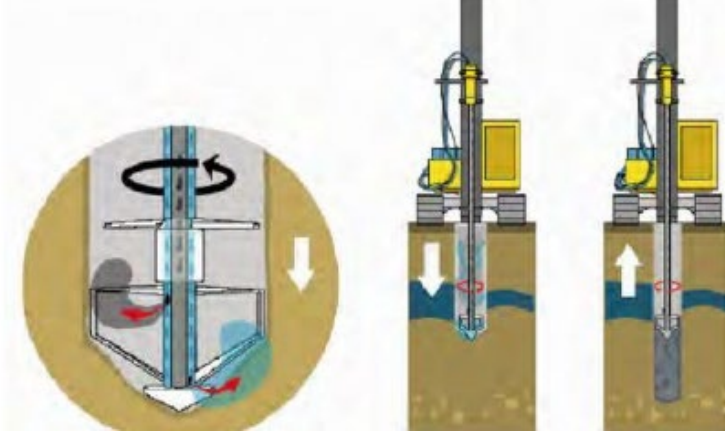
Kaynak: (Scientific Figure on ResearchGate , 2025)

Uygulama biçimine göre ikiye ayrılır:

Islak Yöntem (Wet DSM): Çimento-su karışımı gibi sıvı bağlayıcılar, döner karıştırıcılar ile zemine yerleştirilerek karıştırılır. Yumuşak ve suya doymun zeminlerde tercih edilir.

Kuru Yöntem (Dry DSM): (Gunther, Holm, Westberg, & Eriksson, 2004) tarafından İsveç' te geliştirilen Kuru Karıştırma Yöntemi, yenilikçi zemin stabilizasyonu alanında geoteknik camiası tarafından en yakın zamanda kullanılmaya başlanan yöntemlerdendir. Bu yöntem, zemin neminin yeterli olduğu koşullarda uygulanır (Madhyannapu, Puppala, Bhadriraju, & Nazarian, 2009). Zeminlerin suya doymun veya yeraltı su seviyesi altında olduğu durumlarda toz halindeki bağlayıcı malzemenin karıştırıcının ucundan kompresörler (sıkıştırılmış hava) aracılığıyla zemine kuru olarak enjekte edilmesi şeklinde uygulanmaktadır.

Kuru karıştırma yönteminin şematik gösterimi



Kaynak: (Gunther, Holm, Westberg, & Eriksson, 2004).

Her iki yöntemde de ortası delik burgular veya kanatlı karıştırıcılar yardımı ile bağlayıcı malzeme; zeminle karıştırılarak tasarım derinliğine kadar uygulanır. Tasarım derinliğine ulaşıldıktan sonra seçilen yöneme göre, bağlayıcı malzeme dolgu işlemi devam ederek yukarıya doğru karıştırılarak çıkılır. Her iki işlem sırasında da enjekte edilen bağlayıcı malzemenin ve zeminin üniform bir dozajda; belirli bir çap ve hacim içinde karışımı temin edilerek rijit bir kolon oluşturulur.

RIC (Rapid impact compaction-Hızlı darbe sıkıştırma)

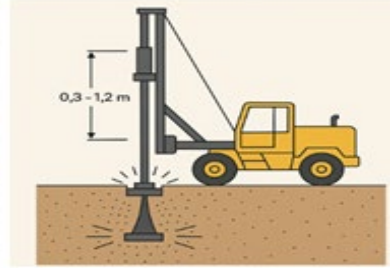
Hızlı darbe sıkıştırma (RIC), özellikle kumlu ve gevşek zeminlerde zemin iyileştirmesine yönelik dinamik bir metoda dayanmaktadır. Bu yöntemde darbe enerjisinin kontrollü şekilde zemine aktarılması yoluyla, zemin yoğunluğu ve taşıma kapasitesi artırılmaktadır.

Geleneksel kompaksiyon yöntemlerine kıyasla RIC, orta derinlikteki zemin iyileştirmesi için eşsiz bir avantaj sunmakta; bu sayede özellikle yapı temellerinde stabilite artışı sağlanmaktadır (Smith & Johnson, 2017); (Yılmaz & Özdemir, 2013). RIC yönteminde, genellikle yaklaşık 9 tonluk ağır bir darbe cihazı belirli

yüksekliklerden (0,3 m ile 1,2 m) serbest düşürülerek çalışır. Bu işlem sırasında cihaz, özel tasarlanmış çelik taban üzerine çarparak her darbeye 26.500 ila 106.000 joule arasında enerji aktarır. Sahada uygulanan bu darbenin temel amacı, zeminde sıkıştırılmış bir plaka oluşturarak, art arda gelen darbeler sayesinde enerjinin daha derin katmanlara iletilmesini sağlamaktır.

Uygulama parametrelerinin belirlenmesi, zemin özellikleri (ör. taneli yapı, nem içeriği) ve zemin tepkisi göz önünde bulundurularak optimize edilir (Atkins, Erfle, & Guo, 2001).

RIC uygulaması



RIC, yapı temellerinin iyileştirilmesi, dolgu alanlarının stabilize edilmesi ve yer altı altyapı projeleri gibi çeşitli mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. Hızlı uygulama süreci ve ekonomik getirisi, yöntemin özellikle kentsel ve kritik altyapı projelerinde kullanımını mümkün kılmaktadır. Uygulama sırasında zeminde oluşan titreşim seviyelerinin kontrol altında tutulması, yan yapıların zarar görme riskini minimize etmektedir. Böylece, çevresel etkilerin değerlendirilmesi ve izlenmesi, yöntemin sürdürülebilir bir

zemin iyileştirme yöntemi olarak geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Davis & Lee, 2019).

RIC yöntemi, dinamik zemin iyileştirme teknikleri arasında hem teknik hem de ekonomik açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Uygulama sırasında kullanılan enerji miktarının, düşme yüksekliğinin ve zemin özelliklerinin dikkatlice optimize edilmesi; yöntemin başarısı için kritik öneme sahiptir. Saha verilerinin ve deneysel çalışmaların ışığında, RIC'nin kumlu ve gevşek zeminlerde beklenen iyileştirici etkiyi sağladığı görülmektedir. Gelecekte, numerik modellemeler ve disiplinler arası araştırmalar yoluyla, yöntemin parametrelerinin daha da iyileştirilmesi ve geniş uygulama alanlarına entegre edilmesi beklenmektedir (Smith & Johnson, 2017); (Yılmaz & Özdemir, 2013).

Elektrokimyasal zemin iyileştirme

Elektrokimyasal iyileştirme (EKİ), zemin ortamında iyonların ve suyun kontrollü şekilde hareket ettirilmesini sağlayan bir iyileştirme tekniğidir. Temel prensibi, zemin içine yerleştirilen anot ve katot elektrotları arasına uygulanan doğru akım aracılığıyla zemine düşük voltaj uygulanarak iyon taşınımı; su migrasyonu ve pH değişimleri yaratılmasıdır (Acar & Alshawabkeh, 1993). Bu işlemle, zemin içerisindeki iyon hareketleri düzenlenerek zeminin geçirgenliğinin ve su muhtevasının azaltılması hedeflenir. Bu teknik, ince taneli zeminlerin iyileştirilmesinde tercih edilir Organik zeminlerde ise konsolidasyon sürecini önemli ölçüde hızlandırdığı gösterilmiştir (Al-Tabbaa & Evans, 2005). Bu teknik, özellikle tarihi alanlarda yapı temelleri altında minimal müdahaleyle uygulanabildiği için tercih edilir.

“Teorik olarak, Elektrokimyasal yöntemlerin etkinliği; elektrokinetik taşınım süreçleri olan elektroosmoz, iyon göçü (migration) ve elektroforez fenomenlerine dayanır (Pamukcu & Wittle, 1992). Bu süreçler aşağıdaki gibi açıklanabilir:

- **Elektroosmoz:** Toprak gözeneklerindeki suyun, elektrik alan etkisiyle anottan katoda doğru hareket etmesidir.
- **Elektroforez:** Yüklü parçacıkların elektrik alan boyunca gözenek sıvısında sürüklenmesidir.
- **Elektromigrasyon:** Çözülmüş iyonların elektrik alan altında yer değiştirmesidir (Yeung, 1994). Bu etkiler, düşük geçirgenliğe sahip killerde bile yüksek verimle işlem yapılmasına olanak tanır.

Elektrokimyasal iyileştirme, aşağıdaki uygulama alanlarında yaygın bir biçimde tercih edilmektedir:

- **Kirlenmiş zeminlerin arıtımı:** Ağır metal iyonlarının veya organik kirleticilerin uzaklaştırılması.
- **Zeminlerin güçlendirilmesi:** Yumuşak kil zeminlerin dayanımının artırılması ve konsolidasyonun hızlandırılması (Alshawabkeh & Sheahan, 2003).
- **Geotekstil destekli elektrokinetik drenaj sistemleri:** Suyun tahliyesi ve taşıma kapasitesinin iyileştirilmesi.
- **Mikrobiyal iyileştirmelerle kombine yöntemler:** MICP gibi tekniklerle eş zamanlı uygulanarak kalsit çökelişi artırılabilir (Kim, Rittmann, & Kim, 2008).

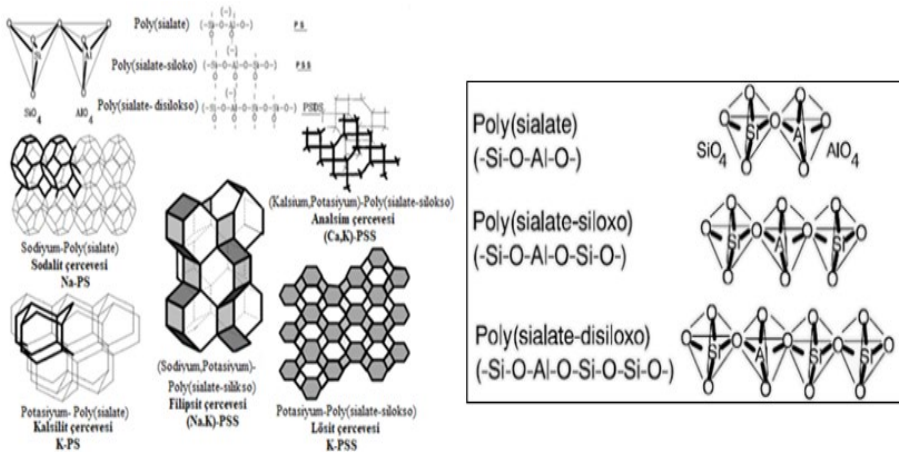
Elektrokimyasal stabilizasyon yöntemi, düşük geçirgenliğe sahip zeminlerde etkili sonuçlar sağlayarak; geleneksel yöntemlerin başarısız olduğu ortamlarda alternatif bir çözüm sunar. Uygulama sırasında yüzeyde büyük çaplı kazıya ihtiyaç duyulmaması ve elektrotların yeniden kullanılabilmesiyle uzun vadede ekonomik olabilir. Öte yandan sürekli akım gerektirdiğinden enerji maliyeti yüksektir. Elektrot etrafında asidik veya bazik zonlar oluşabilir, dolayısıyla oluşan pH dengesizlikleri zemin yapısını olumsuz etkileyebilir. Ayrıca elektrotların uzun süreli kullanımı sonucu

korozyon meydana gelebilir. Büyük ölçekli uygulamalarda zemin homojenliği ve drenaj sınır koşulları sorun teşkil edebilir (Acar, ve diğerleri, 1995).

Geopolimer enjeksiyonu ile zemin iyileştirme

Geoteknik mühendisliğinde son yıllarda sürdürülebilir, çevre dostu ve yüksek dayanımlı malzeme arayışları doğrultusunda geopolimer esaslı zemin iyileştirme teknikleri ön plana çıkmaktadır. Geopolimerler, yüksek oranda amorf alüminosilikat içeren malzemelerin alkali aktivasyonla reaksiyona girerek oluşturduğu inorganik polimer matrislerdir. Geopolimerlerin kimyasal yönden karmaşık şekillerde oluşma yetenekleri, yüksek dayanımları, çevresel etkenlere karşı dayanıklılıkları, korozyon ve kimyasal saldırıya direnme yetenekleri gibi çeşitli avantajları vardır. İlk defa, toprak mineral esaslı çoğu malzemelerin patentlerine de sahip olan Davidovits tarafından tanımlanan geopolimerler 3 boyutlu poly (sialate), poly (sialate-siloxo) ve poly (sialate-disiloxo) polimerik zincirlerini oluşturan AlO_4 ve SiO_4 dörtyüzlülerini içermektedir (Davidovits, 1991); (Sisol, Drabová, & Mosej, 2014).

Geopolimerlerin moleküler çerçevesi ve bunlara ilişkin kristal yapılanmalar



Kaynak: (Davidovits, 1991).

Geopolimerlerin üretimi esnasında enerjiye daha az ihtiyaç duyulması ve sera gazı emisyonunun diğer yöntemlere kıyasla daha az olması gibi özellikleri, çimentoya göre daha fazla çevre dostu bir malzeme olarak ortaya çıkmasını sağlamaktadır (Muse, 2023). Bu yöntemde kullanılan geopolimer karışımları genellikle uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin gibi atık malzemelere dayalıdır ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılır (Davidovits, 1991).

Geopolimer enjeksiyonu yöntemi temel olarak, endüstriyel atık bazlı bağlayıcılar kullanılarak çevreci bir zemin iyileştirme sağlanmasıdır. Zemin içerisindeki boşluklara ve zayıf zonlara nüfuz eden bu karışımlar, kısa sürede priz alarak yapının stabilizasyonunu sağlar. Yüksek sıcaklık ve basınca gerek kalmadan uygulanabilir olmasıyla öne çıkar. Geopolimer enjeksiyonu, zemin içerisine düşük viskoziteli, hızlı priz alan ve çevresel etkilere dirençli geopolimer karışımlarının enjekte edilmesi yoluyla zeminin taşıma gücünü ve rijitliğini artırmayı hedefler. Özellikle çimento kullanımının sınırlandırılması ve karbon ayak izinin azaltılması açısından bu yöntem, klasik enjeksiyon tekniklerine alternatif oluşturmaktadır (Provis & van Deventer, 2009). Uygulama esnasında enjeksiyon basıncı ve karışımın jeolojik özellikleri dikkatle kontrol edilmelidir. Yapılan saha uygulamalarında, zemin mukavemetinde %200'e varan artışlar rapor edilmiştir.

Geopolimer enjeksiyonu, çeşitli mühendislik projelerinde zemin iyileştirme amacıyla tercih edilmektedir:

- **Zemin Stabilizasyonu:** Gevşek yapıda ve düşük taşıma kapasiteli zeminlerde, geopolimer enjeksiyonu yöntemi ile zemin partikülleri arasında bağ oluşturularak stabilizasyon sağlanır.
- **Sıvılaşma Önleme:** Deprem riski taşıyan bölgelerde zemin mukavemeti artırılarak sıvılaşma riski minimuma indirgenir.

- **Kirleticilerin İmmobilizasyonu:** Endüstriyel atık sahalarında, ağır metallerin ve diğer kirleticilerin hareketliliğini azaltarak çevresel koruma sağlanır.
- **Temel Güçlendirme:** Mevcut yapıların (tarihi yapılar) temel sistemlerinde, taşıma kapasitesi artırılarak oturma problemleri önlenir.
- **Yeraltı Su Yönetimi:** Geopolimerlerin düşük geçirgenlik özelliği sayesinde, yeraltı suyu kontrolü sağlanarak suyun istenmeyen hareketleri engellenir (Özçınar, 2024).

Enjeksiyon tabanlı kimyasal yöntemlerle zemin iyileştirme

Kimyasal enjeksiyon teknikleri, geoteknik mühendisliğinde gevşek, geçirgen ve taşıma kapasitesi düşük zeminlerin mekanik özelliklerini artırmak amacıyla yaygın biçimde kullanılan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu teknik, zemin gözeneklerine düşük viskoziteli kimyasal solüsyonların enjekte edilmesi yoluyla gerçekleştirilir. Enjekte edilen çözelti, zemindeki partiküller arasında bağ oluşturarak zeminin dayanımını ve rijitliğini artırır, aynı zamanda su geçirgenliğini azaltır (Karol, 2003). Bu yöntemin en önemli avantajı, mevcut yapıların altına müdahalesiz olarak uygulanabilmesidir (Karol, 2003). Özellikle su geçirgenliği yüksek kumlu ve çakıllı zeminlerde, enjeksiyon tabanlı yöntemler, alternatif iyileştirme tekniklerine göre çok daha ekonomik ve etkili sonuçlar vermektedir (Karol, 2003); (Hausmann, 1990).

Uygulama yapılırken, enjeksiyon sisteminde kimyasal bileşik, genellikle düşük basınçla (bazen yüksek basınçlı jet grouting yöntemlerinde olduğu gibi) zemine enjekte edilir. Enjeksiyon işlemi tipik olarak şu adımlardan oluşur:

1. **Zemin etüdü ve enjeksiyon planlaması:** Zemin tipi ve geçirgenlik derecesi belirlenir.
2. **Delgi işlemi:** Enjeksiyon yapılacak derinlikte delikler açılır.

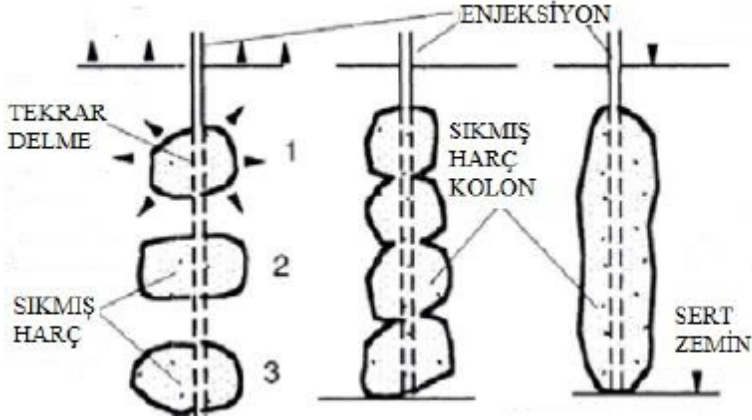
3. **Enjeksiyon:** Belirli bir basınç altında kimyasal solüsyon zemine enjekte edilir.
4. **Jelleşme ve sertleşme:** Kimyasal çözelti zeminde reaksiyona girerek sert bir yapı oluşturur.

Enjeksiyon malzemesinin zemin ortamının içine nüfuz etme biçimine göre enjeksiyon yöntemleri dört kategoriden oluşur. Bunlar emdirme, kompaksiyon, jet ve çatlatma enjeksiyonu biçiminde adlandırılır. Bu yöntemlerin her biri farklı amaçlar için tercih edilmektedir, dolayısıyla farklı ekipman gereksinimi duyulmaktadır. Buradaki yöntemler için geçirimsizlik katsayısı 10-1 cm/sn'den küçük olan zeminlerde çatlatma meydana getirebilmektedir.

Emdirme enjeksiyonu, yapının bütünlüğünü bozmayacak düşük basınçlar altında; şerbetin kayalardaki birleşme noktalarını varsa mevcut çatlakları ve zemin içi boşlukların doldurulması işlemidir. Emdirme enjeksiyon yöntemi, geleneksel tekniklerin uygulanmasının zor veya mümkün olmadığı alanlarda zemin iyileştirme yöntemi olarak tercih edilebilmektedir.

Kompaksiyon enjeksiyonu, katı enjeksiyon malzemesinin; zemin boşlukları içerisine nüfuz etmeden enjeksiyon noktası etrafında giderek genişleyen bir kütle oluşturarak ve böylece çevresindeki gevşek zeminleri sıkıştıracak şekilde yüksek basınçlarda enjeksiyonudur.

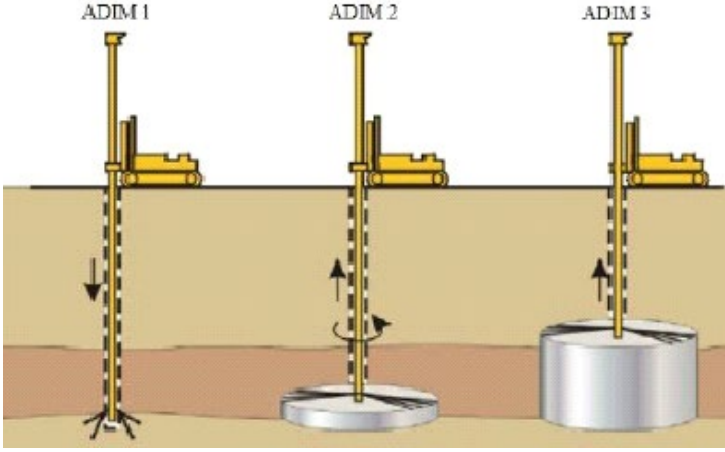
Harç ile Kompaksiyon Yöntemi.



Kaynak: (Woodward, 2005).

Jet enjeksiyonu, karakteristik özellikleri kötü olan zeminlerde inşası yapılacak yapılarda; zemin içine basınçlı hava, su, çimento enjeksiyonu yaparak zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Su jetinin çalışma prensibine dayanır. Uygulama sırasında zemine yüksek bir basınçla sokulan sonda istenilen derinliğe indirilinceye kadar enjeksiyon yapılmaz. Daha sonra çok yüksek hızda bir enjeksiyonla sonda döndürülerek ve yavaşça çekilerek çıkartılır. Yapının temeli sınırlama ve zemin özelliklerine göre, şaşırtmalı, atlamalı ya da bitişik nizam şeklinde, hesaplanan uzunluktaki beton kolonların enjeksiyonu yardımıyla doldurulması şeklinde uygulanır.

Süper Jet Yöntemi



Kaynak: (Welsh & Burke, 2000)

Çatlatma enjeksiyonu ise, zeminin kontrollü biçimde; kararlı fakat düşük viskoziteli çimento enjeksiyonu ile yüksek basınçlarda (4 MPa) çatlatılması işlemidir. Bu enjeksiyon tekniği temel olarak emdirme enjeksiyonunun mümkün olmadığı düşük geçirimsizliğe sahip, ince daneli zeminlerin iyileştirilmesinde tercih edilmektedir. Çatlatma enjeksiyonunun gelişimi tünel veya kazı aktiviteleri esnasında meydana gelen oturmaları önleme çalışmalarına dayanmaktadır (Pekrioğlu Balkıs, 2009). Reaksiyon süresi, kullanılan kimyasalın türüne ve çevresel koşullara göre değişiklik gösterir. Bu işlemler sonucunda zeminde geçirimsizlik sağlanması, kayma dayanımının artması, oturma miktarlarının azalması ve yapı temellerinin daha stabil hale gelmesi hedeflenir.

Uygulama tekniği açısından, performans özellikleri itibariyle temel olarak üç çeşit karışım (şerbet) söz konusudur. Bunlar daneli karışımlar (süspansiyon veya çimentolaşma özelliği olan malzemeler), solüsyon (boyutsuz/danesiz, kimyasal) ve emülsiyonlardır.

Daneli karışımlar, çimento; kil, bentonit, bazen de kum ile hazırlanmış, çökelme hızına göre kararlı veya kararsız olmayan harçlardır. Bingham sıvıları gibi davranış gösterirler. Toprak ve kil-su karışımı şerbetler kompaksiyon ve geçirimsizlik sağlama amaçlı kullanılırlar. Killi şerbetlerde oluşan bağlar, çimento şerbetindeki bağlara kıyasla daha güçsüzdür. Bu tip şerbetler, zeminin geoteknik özelliklerini güçlendirme işlemini boşlukları doldurarak sağlarlar. Ayrıca çimento şerbeti uygulamadan sonra, ortamda geçirimsizliği ve zemin mukavemetinde artışı zemin içi boşluklarını doldurarak ve zemin oturmalarını önleyerek sağlarlar. Çimento şerbeti için su/çimento oranı 0.5/1 ile 5/1 arasında değişebilmektedir. Düşük su/çimento oranı, mukavemeti arttırırken aynı zamanda enjekte edilebilirliği de azaltmaktadır (Pekrioğlu Balkıs, 2009).

Koloidal solüsyonlar, zamanla vizkozite değeri artan Newton akışkanlarındandır. Saf solüsyonlar ise priz süresine kadar vizkozitesi artış gösteren Newton akışkanlarındandır. Kimyasal harçlar, Newton sıvıları veya organik reçine olarak bilinmekte olup organik monomerlerden (acrylamides, phenoplast, aminoplast) yapılmaktadır. Viskoziteleri suyunkine yakındır ve priz yapana kadar da sabit kalmaktadır. Kaba kumlarda veya kumlu çakıllarda kimyasal enjeksiyon kullanılır. Böylece, temel altındaki zeminde istenilen seviyeye kadar bir blok oluşturulur. Yanında kazı yapılacak temellerin emniyete alınması gibi hallerde sık kullanılmaktadır (Pekrioğlu Balkıs, 2009).

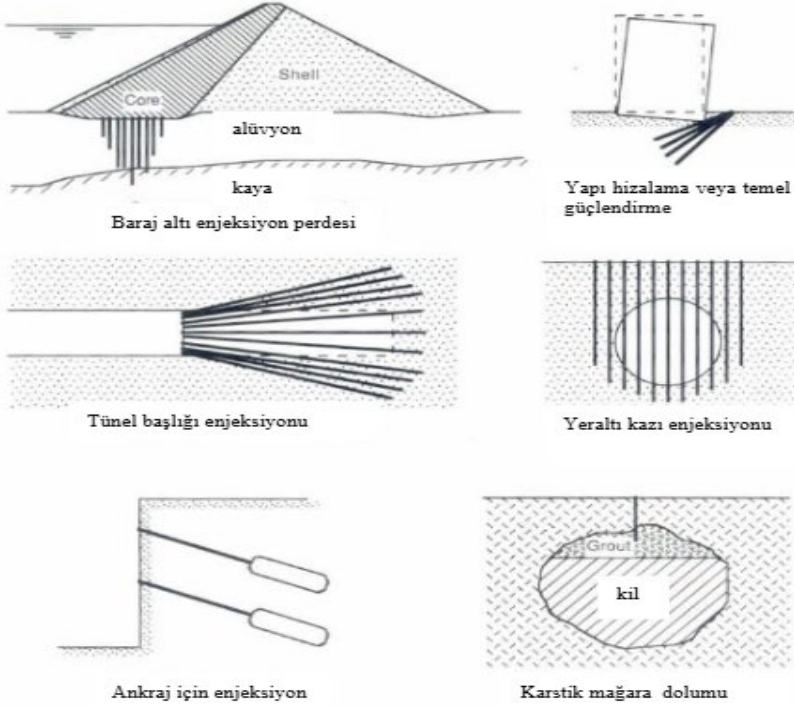
Emülsiyonlar gazların emülsifiye edilmesi ile elde edilir. Köpükler kabarma sayısı ile tanımlanır. Kabarma sayısı, gazın hacminin sıvının hacmine oranıdır. Bu sayı zeminin boşluk oranına eşdeğerdir (Pekrioğlu Balkıs, 2009).

Enjeksiyon yapılacak malzemelerin seçiminde zemin türü, geçirgenlik, su içeriği ve çevresel etkiler dikkate alınır (Karol, 2003); (Warner, 2004). En sık kullanılan enjeksiyon malzemeleri şunlardır:

- **Sodyum silikatlar (su camı):** Kumlu zeminlerde yaygın olarak kullanılır.
- **Akrilik ve poliüretan reçineler:** Sızdırmazlık sağlamak amacıyla genellikle tünel ve yer altı yapılarında kullanılır.
- **Epoksi reçineler:** Yüksek mukavemet sağlar, ancak maliyeti yüksektir.
- **Çimento bazlı süspansiyonlar:** Daha ekonomik ama düşük geçirgenliğe sahip zeminlerde sınırlı uygulanabilirlik sağlar.

Enjeksiyon tabanlı kimyasal yöntemler; tarihi yapıların temellerinin güçlendirilmesi, su sızdırmazlığı gereken baraj-tünel ve yer altı yapıları, zemin sıvılaşması riski taşıyan bölgelerde yüzey altı iyileştirme, raylı sistemler ve yolların altındaki gevşek zeminlerin stabilizasyonu ve deprem bölgelerinde taşıma kapasitesi düşük zeminlerde önleyici müdahale gibi çok çeşitli uygulama alanları sunmaktadır.

Tipik Enjeksiyon Uygulamaları



Kaynak: (U.S.Army, 1984).

Biyoteknolojik yöntemler-Mikrobiyal olarak indüklenen kalsit çökmesi (MICP)

Biyoteknolojik zemin iyileştirme yöntemleri, mikroorganizma tabanlı biyokimyasal süreçler yoluyla zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesini hedefler. Bu yöntemler, özellikle çevre dostu, düşük enerji tüketimli ve sürdürülebilir mühendislik çözümleri sunmalarıyla öne çıkmaktadır (Ivanov & Chu, 2008).

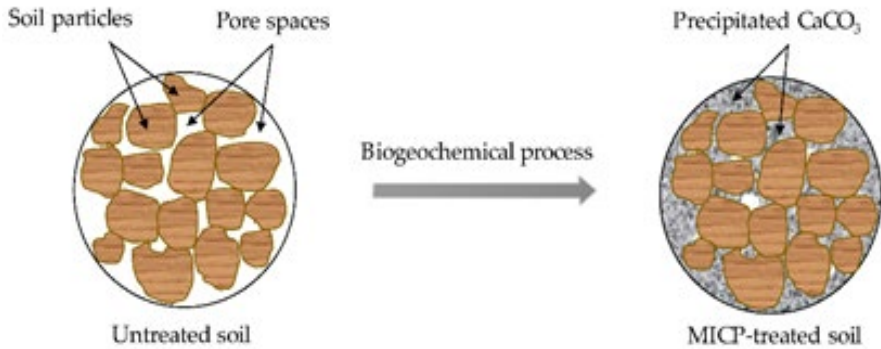
MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation), zemindeki bakteri aktiviteleriyle kalsiyum karbonat (CaCO_3) çökeltmesini sağlayarak zemin partiküllerini birbirine bağlar. En yaygın kullanılan mikroorganizma türü *Sporosarcina pasteurii*'dir.

Bu bakteri üreaz enzimi aracılığıyla üreyi parçalar ve ortamda çözünmüş kalsiyumla reaksiyona girerek kalsit çökmesine neden olur (DeJong, Mortensen, Martinez, & Nelson, 2013).

Reaksiyon süreci:

$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_4^+ + \text{CO}_3^{2-}$ ve $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3 \downarrow$ Reaksiyonlar sonucu açığa çıkan kalsit ile zemin gözenekleri doldurulur, dayanım artar, geçirgenlik azalır. Yöntem, çevre dostu ve kalıcı iyileştirme sunarken öte yandan sıcaklık ve nem koşullarına bağımlı bir yöntemdir. Ülkemizde halen araştırma aşamasındadır.

MICP ile zemin stabilizasyonunun çalışma prensibi



Kaynak: (Rahman, ve diğerleri, 2020)

MICP üç ana yöntemle zemine uygulanabilir:

- **Yüzeyden infiltrasyon:** Bakteri ve kimyasal çözeltiler yüzeye dökülerek yerçekimiyle zemine işler.
- **Yerinde enjeksiyon:** Delikler aracılığıyla mikroorganizma ve kimyasal bileşenlerin zemin içine doğrudan enjekte edilmesi.
- **In situ (yerinde) doğal bakteri aktivasyonu:** Zemindeki mikroorganizma popülasyonunun besinlerle uyarılması.

Uygulama esnasında uygulama parametrelerine oldukça bağımlı bir yöntemdir. Sıcaklık, pH, iyon konsantrasyonu ve bakteri yoğunluğu gibi etmenler reaksiyon verimliliğini doğrudan etkilemektedir.

MICP yöntemi, çeşitli uygulama alanları sunmaktadır. Uygulama alanları aşağıdaki gibidir:

- Sıvılaşma riski taşıyan zeminlerde iyileştirme,
- Tarihi yapılarda düşük müdahale gerektiren uygulamalar,
- Tozlu alanlarda rüzgâr erozyonu önleme (biyoparçalanabilir yüzey kaplama),
- Petrol sahalarında geçirimsizlik sağlama (bioclogging),
- Karayolu/demiryolu dolgu stabilizasyonu.

c. Zemin Modelleme ve Simülasyon Teknolojileri

Zemin, doğası gereği heterojen, anizotropik ve zamana bağlı olarak değişken özellikler gösteren bir mühendislik malzemesidir. Bu nedenle, zeminle etkileşim içinde olan yapıların güvenli bir şekilde tasarlanabilmesi için, zemin davranışlarının gerçekçi biçimde modellenmesi büyük önem taşımaktadır. Geleneksel yöntemlerle elde edilen sınırlı verilerle karar vermek çoğu zaman yetersiz kalırken, sayısal modelleme ve simülasyon teknolojileri, karmaşık zemin-yapı etkileşimlerinin analizinde devrim niteliğinde gelişmeler sağlamıştır.

Sayısal modelleme yöntemleri

Zeminlerin karmaşık davranışlarını anlamada, klasik analiz yöntemlerinin ötesine geçmek ve sayısal modelleme araçlarını kullanmak kaçınılmazdır (Potts & Zdravković, 1999). Günümüzde en yaygın kullanılan zemin modelleme teknikleri arasında,

- Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)

- Ayırık Elemanlar Yöntemi (DEM)
- Sonlu Farklar Yöntemi (FDM)
- Meshless (örgüsüz) yöntemler
- Kopula tabanlı istatistiksel modelleme yöntemleri yer almaktadır.

Bu yöntemler sayesinde zemin içerisindeki gerilme-deformasyon dağılımları, yer değiştirmeler, stabilite problemleri ve sıvılaşma gibi olgular ayrıntılı olarak modellenabilmektedir.

1. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM)

FEM (Finite Element Analysis), zemin içindeki gerilme; deformasyon ve yerdeğiştirme dağılımlarının hesaplanmasında en yaygın kullanılan sayısal yöntemdir. Farklı zemin türleri için Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Cam-Clay gibi malzeme modelleri tanımlanarak çeşitli yükleme durumları altında zemin davranışı tahmin edilebilir.

FEM, geoteknik mühendisliğinde karmaşık zemin-yapı etkileşimlerini modellemede en esnek ve güçlü araçlardan biridir (Potts & Zdravković, 1999). Bu yöntem, sürekli bir ortamın (örneğin zemin kütlesi) sonlu sayıda küçük elemanlara bölünmesi esasına dayanır. Her eleman için diferansiyel denklemler kurularak, tüm yapı üzerinde sistematik bir çözüm elde edilir. FEM, geoteknik mühendisliğinde yalnızca analiz değil, tasarımın iyileştirilmesi ve risklerin azaltılması açısından da kritik bir araçtır. Özellikle iklim değişikliği, artan nüfus baskısı ve karmaşık altyapı sistemleri düşünüldüğünde, FEM tabanlı sistemlerin; yapay zekâ ile bütünleştirilmesi, gerçek zamanlı saha verileriyle senkronize çalışması, BIM ve IoT sistemleriyle entegre edilmesi gelecekteki en önemli gelişme alanlarını oluşturacaktır.

Geoteknik mühendisliğinde FEM 'in kullanıldığı başlıca uygulama alanları şunlardır:

- Temel ve kazık sistemlerinin davranış analizi,
- Şev stabilitesi değerlendirmeleri,
- Tünel açma sırasında yer değiştirme tahminleri,
- Baraj ve dolgu yapılarının gerilme ve oturma analizleri,
- Zemin-çevre yapı etkileşimlerinin modellenmesi,
- Sıvılaşma ve konsolidasyon süreçlerinin simülasyonu.

Gerçekçi bir FEM analizi, uygun malzeme modelinin seçimiyle başlar; zemin davranışını ne kadar doğru temsil edilirse, analiz o kadar güvenilir olur (Griffiths & Lane, 1999). FEM analizlerinde zeminlerin karmaşık davranışlarını temsil etmek amacıyla kullanılan çeşitli malzeme modelleri Tablo 1.'de belirtilmiştir.

Tablo 1. FEM analizlerinde kullanılan çeşitli malzeme modelleri

Malzeme modeli	Özellikleri	Uygulama alanı
Lineer Elastik	Basit ve hızlı analizler için	İlk tasarım aşamaları
Mohr-Coulomb	Kesme mukavemeti ve dilatans dikkate alınır.	Şev stabilitesi, temel analizi
Hardening Sol Model	Plastik deformasyonlar ve sertleşme özellikleri	Kazı, dolgu ve konsolidasyon süreçleri
Cam Clay Model	İleri düzey konsolidasyon modellemesi	Yumuşak killler, denizel zeminler

FEM analizleri çoğunlukla aşağıdaki adımları içerir:

- **Geometri Tanımı:** Arazi veya yapı sisteminin 2D/3D geometrisinin modellenmesi.
- **Ağ (Mesh) Oluşturulması:** Modelin küçük elemanlara bölünmesi.
- **Malzeme Özelliklerinin Tanımı:** Elastik modül, kohezyon, içsel sürtünme açısı vb.

- **Sınır Şartlarının Belirlenmesi:** Yer değiştirme kısıtları, zemin-su koşulları.
- **Yükleme Koşullarının Tanımı:** Yapı yükleri, trafik yükleri, sismik etkiler.
- **Çözüm ve Sonuçların Yorumlanması:** Gerilme dağılımı, yer değiştirme, güvenlik katsayısı.

Geoteknik Mühendisliğinde yenilikçi yaklaşımlar kapsamında, çeşitli ihtiyaçlar, değişken parametreler ve kontrolü yapılması gereken yapı-zemin etkileşimlerinin endüstriyel ölçekte analizi için birçok yazılım geliştirilmiştir. Tablo 2’ de FEM tabanlı yazılımlar ve kullanım alanları özetlenmiştir.

Tablo 2. FEM tabanlı yazılımlar ve kullanım alanları

Yazılım	Özellikler	Kullanım Alanı
PLAXIS 2D/3D	Geoteknik projeler için optimize edilmiş FEM aracı	Tünel, şev, temel analizleri
FLAC / FLAC3D	Zemin davranışı ve deformasyon analizleri için	Derin kazı, zemin iyileştirme
MIDAS GTS NX	Gelişmiş 3D FEM çözümlemeleri	Baraj, metro, derin kazı
Abaqus	Genel amaçlı FEM aracı	Çok-fizikli sistemler

2. Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM)

Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM), özellikle tane yapılı, süreksiz ve yüksek deformasyon gösteren zemin ve kaya ortamlarının analizinde kullanılan sayısal bir modelleme yöntemidir. İlk kez Cundall ve Strack tarafından 1979’da önerilen bu yöntem, özellikle granüler ortamların mikromekanik davranışlarını anlamak için geliştirilmiştir. DEM (Discrete Elements Method), zemin veya kaya ortamını sayısız küçük parçacık (eleman) şeklinde tanımlar ve bu parçacıklar arasındaki etkileşimleri hesaplayarak sistemin dinamik davranışını simüle eder. Böylece klasik sürekli ortam varsayımı dışına çıkarak daha gerçekçi sonuçlar üretme imkânı sağlar.

DEM, malzemenin süreksizliğini açıkça tanımlayabilen ve parçacık düzeyindeki kuvvet aktarımını izleyebilen birkaç yöntemden biridir (Cundall & Strack, 1979). DEM, her parçacığın kütlesi, momenti ve diğer fiziksel özellikleri dikkate alınarak Newton'un ikinci hareket yasasına göre çözüm yapılması prensibine dayanır. Parçacıklar arası çarpışmalar, sürtünmeler ve temaslar dikkate alınarak hem kuvvet hem de moment dengesi kurulmaktadır. Hesaplamalar zamana bağlı olarak adım adım yapılır. Bu yöntemde her parçacık ayrı bir rijit cisim kabul edilir, parçacıklar arası temas kuvvetleri (normal, kayma, sürtünme) belirlenir ve temas kuvvetleri sayesinde sistemin makro davranışı elde edilir.

DEM, geoteknik problemlerin çözümünde hem mikroskobik hem de makroskobik ölçeklerde analiz yapabilme yeteneğiyle öne çıkmaktadır (O'Sullivan, 2011) (Tablo 3). Tane yapılı zemin davranışları, yamaç stabilitesi, tünel kazısı ve destek sistemleri, şev çökmeleri ve kaya düşmeleri, dolguların yerleştirilmesi ve sıkışma davranışı analizlerinde sıklıkla tercih edilir.

Tablo 3. DEM tabanlı yazılımlar ve kullanım alanları

Yazılım	Özellikler	Kullanım Alanı
PFC (Particle Flow Code)	2D/3D parçacık tabanlı simülasyon	Geoteknik ve madencilik mühendisliği
UDEC/3DEC (Itasca)	Ayrık blok modelleri	Kaya mekaniği, tünel tasarımı
YADE	Açık kaynak kodlu DEM çözümleyicisi	Akademik ve araştırma amaçlı
EDEM	Granüler madde simülasyonu	Endüstriyel akış, silo davranışı

3. Sonlu Farklar Yöntemi (FDM)

Sayısal yöntemlerin geoteknik mühendisliğinde giderek daha yaygın kullanılması, zeminlerin karmaşık davranışlarının analitik yöntemlerle açıklanmasının sınırlı olduğu durumlarda alternatif çözüm araçlarının geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Bu bağlamda Sonlu Farklar Yöntemi (FDM), süreksiz ortamların analizinde

kullanılan klasik diferansiyel denklem temelli çözüm yöntemlerinden biri olarak ön plana çıkmaktadır. Özellikle gerilme-deformasyon davranışı, şev stabilitesi, yer altı yapılarının davranışı ve sismik yüklemeler altındaki zemin yanıtının değerlendirilmesinde etkin bir modelleme aracı sunmaktadır.

FDM, karmaşık sınır koşullarının bulunduğu problemlerde zamanla değişen (transient) durumların modellenmesine olanak sağlayarak mühendislik analizlerinde dinamik çözümlerin gerçekleştirilmesine katkı sunmaktadır (Smith G. D., 1985). Temelinde ise sürekli diferansiyel denklemlerin sayısal çözümünde kullanılan ayrıklaştırma esaslı bir tekniktir. Bu yöntemde çözüm alanı, belirli büyüklükteki hücrelere ayrılır ve diferansiyel denklemler bu noktalarda sonlu fark biçiminde temsil edilir. Örneğin, bir değişkenin ikinci dereceden türevi aşağıdaki Langrange Metodu (1) ile yaklaşık olarak hesaplanır:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \simeq \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (1)$$

Bu tür ayrıklaştırmalar sayesinde hem doğrusal hem de doğrusal olmayan problemler zamana bağlı ya da zamandan bağımsız şekilde çözümlenebilir. Özellikle Lagrangian çözüm yaklaşımı ile FDM, deformasyonla birlikte hareket eden çözüm ızgaraları sayesinde plastik deformasyonların ve büyük şekil değiştirmelerin modellenmesine imkân tanır (Itasca, 2000).

Geoteknik mühendisliğinde FDM'nin kullanım alanları oldukça geniştir (Tablo 4):

- Derin kazı ve ankraj sistemlerinde, zemin-yapı etkileşimlerinin modellenmesinde,
- Özellikle dinamik yüklü şevlerde şev stabilitesi analizlerinde,

- Ön destekleme sistemlerinin davranışları, tünel ve galeri tasarımlarında,
- Sismik zemin tepkisi modellemeleri ve
- Zemin iyileştirme yöntemlerinin etki analizlerinde yaygın biçimde tercih edilir.

FDM'nin bu uygulama alanlarındaki başarısı, yüksek deformasyonların ve karmaşık malzeme davranışlarının zamanla birlikte analiz edilebilmesine bağlıdır (Brinkgreve, Engin, & Swolfs, 2007).

Tablo 4. FDM tabanlı yazılımlar ve kullanım alanları

Yazılım	Özellikler	Kullanım Alanı
FLAC / FLAC3D	Lagrangian çözüm yaklaşımı, elastik-plastik modelleme.	Derin kazı, tünel, sismik analiz.
Explicit FDM (Açık kaynak kodlu)	Akademik araştırmalarda kullanılan açık kodlu FDM çözücüler.	Araştırma, eğitim amaçlı modeller.

4. Örgüsüz (Meshless) Yöntemler

Sayısal analiz yöntemleri arasında özellikle karmaşık geometriye sahip, yüksek deformasyon içeren ve süreksiz ortam problemlerinde örgüye (mesh) dayalı geleneksel yöntemlerin (FEM, FDM) sınırlılıklarını aşmak amacıyla geliştirilen örgüsüz (meshless) yöntemler, geoteknik mühendisliğinde giderek artan bir öneme sahip olmaktadır. Bu yöntemler, çözüm bölgesini önceden tanımlanmış örgüye ihtiyaç duymaksızın noktasal dağılımlar üzerinden analiz edebilmekte ve bu sayede şekil değiştiren sınırlar, kırılma yüzeyleri ve büyük deformasyonların olduğu sistemlerde daha esnek çözümler sunabilmektedir.

Meshless yöntemlerin temel avantajı, sürekli topoloji değişimlerinin olduğu ortamlarda yeniden ağ üretimi gereksiniminin ortadan kaldırılarak; hesaplamalarda verimliliğin arttırılmasıdır (Liu & Gu, 2001).

Örgüsüz yöntemlerde, çözüm alanı içinde yalnızca “noktalar” tanımlanır; bu noktalar etrafındaki etkileyici bölgelerde ağırlıklı interpolasyon fonksiyonları kullanılarak alan üzerindeki fiziksel değişkenlerin yaklaşık değerleri elde edilir. Bu yöntemler, temelde çekirdek (Kernel) fonksiyonları ve ağırlıklandırılmış rezidüel ilkeleri kullanarak denklemlerin zayıf ya da güçlü formülasyonlarını sayısallaştırır (Belytschko, Organ, & Krongauz, A review of meshless methods, 1996).

Başlıca örgüsüz yöntemler şunlardır:

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), ilk olarak astrofizik problemlerinde kullanılmak üzere (Lucy, 1977) ve (Gingold & Monaghan, 1977) tarafından geliştirilen örgüsüz (meshless) bir Lagrangian yöntemidir. Bu yöntem, fiziksel alanın sonlu sayıda parçacıkla temsil edilmesini esas alır ve her parçacık belirli bir kütle, konuma ve diğer fiziksel özelliklere sahiptir. SPH, özellikle büyük deformasyon, kırılma, parçalanma ve sıvı-zemin etkileşimli dinamik problemlerde başarılı sonuçlar vermektedir.

Element-Free Galerkin (EFG) Yöntemi: Element-Free Galerkin (EFG) yöntemi, klasik sonlu eleman yöntemlerinin (FEM) bazı sınırlamalarını aşmak üzere (Belytschko, Lu, & Gu, Element-free Galerkin methods, 1994) tarafından geliştirilmiş bir meshless (örgüsüz) sayısal yöntemdir. Bu yaklaşım, özellikle karmaşık deformasyon alanlarına sahip, büyük şekil değişimlerinin ve çatlak oluşumlarının meydana geldiği mühendislik problemlerinde kullanılmaktadır.

Moving Least Squares (MLS): Moving Least Squares (MLS) yaklaşımı, örgüsüz (meshless) sayısal analiz yöntemlerinde sürekli, türevlenebilir ve yüksek doğrulukta şekil fonksiyonları elde etmek amacıyla kullanılan temel matematiksel yaklaşımlardan biridir. Bu yöntem ilk olarak (Lancaster & Salkauskas, 1981)

tarafından önerilmiş ve daha sonra Element-Free Galerkin (EFG) yöntemi gibi meshless analiz tekniklerinin temel yapı taşı haline gelmiştir. (Lancaster & Salkauskas, 1981)’e göre, MLS yaklaşımı; klasik interpolasyon fonksiyonlarının sınırlarını aşarak, daha esnek ve sürekli bir modelleme altyapısı sunar.

Reproducing Kernel Particle Method (RKPM): RKPM, örgüsüz (meshless) sayısal analiz yöntemlerinin önemli bir temsilcisi olup; özellikle deformasyona açık ortamların ve karmaşık sınır koşullarının modellenmesinde tercih edilmektedir. Bu yöntem, Liu, Jun ve Belytschko tarafından 1995 yılında geliştirilmiştir ve klasik sonlu eleman yöntemine kıyasla daha esnek ve yüksek hassasiyetli çözümler sunar.

Meshless Local Petrov–Galerkin (MLPG) Yöntemi: Bu yöntem yerel zayıf formülasyonun örgüsüz analize entegrasyonudur. Meshless Local Petrov–Galerkin (MLPG) yöntemi, meshless (örgüsüz) sayısal analiz yaklaşımlarının en gelişmiş türlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem, (Atluri & Zhu, 1998) tarafından geliştirilen, yerel zayıf formülasyon ilkelerine dayalı, esnek sınır koşulları uygulama kabiliyeti ile öne çıkar.

Bunların her biri, deformasyonların, çatlakların veya sıvı-zemin etkileşiminin modellenmesinde farklı avantajlar sunmaktadır.

5. Kopula Tabanlı İstatistiksel Modelleme

Kopula (copula) fonksiyonları, çok değişkenli istatistiksel bağımlılıkları modellemede kullanılan güçlü matematiksel araçlardır. Geleneksel korelasyon katsayıları lineer bağımlılıkları yeterince tanımlamakta yetersiz kalırken, kopula fonksiyonları doğrusal olmayan ve asimetrik bağımlılık yapılarının temsilinde daha esnek ve doğru sonuçlar sunar (Nelsen, 2006). Geoteknik mühendisliğinde, özellikle çok değişkenli belirsizliklerin söz konusu olduğu zemin davranışlarının modellenmesinde kopula tabanlı yaklaşımlar giderek yaygınlaşmaktadır. Kopula fonksiyonları,

marjinal dağılımlar korunarak değişkenler arasındaki bağımlılığı modelleyebilen esnek yapılardır (Nelsen, 2006).

Kopula fonksiyonu, Sklar Teoremi'ne (2) dayanır. Bu teoreme göre, herhangi birçok değişkenli dağılım fonksiyonu; marjinal dağılımlar ve bir kopula fonksiyonu yardımıyla ayrıştırılabilir.

$$H(x, y) = C(F_x(x), F_y(y)) \quad (2)$$

Bu denklemde;

$H(x, y)$: Ortak dağılım fonksiyonu

$F_x(x), F_y(y)$: Marjinal dağılımlar

c: Kopula fonksiyonu biçiminde ifade edilir.

Bu yapı sayesinde farklı türde (örneğin normal, lognormal, beta) marjinal dağılımlara sahip değişkenler arasındaki bağımlılık, parametrik olmayan bir yaklaşımla modellenenebilir (Genest & Favre, 2007).

Geoteknik uygulamaları şunlardır:

- **Şev Stabilitesi Analizleri:** Kopula yöntemleri, şev stabilitesi hesaplarında kritik olan kohezyon, içsel sürtünme açısı ve birim hacim ağırlığı gibi parametreler arasındaki bağımlılıkları modellemek için kullanılır.
- **Zemin Sıvılaşması Riski Tahmini:** Zemin özelliklerinin (örn. CPT değerleri, ince dane oranı, yer altı su seviyesi) ortak etkileri, kopula modelleri ile entegre edilerek sıvılaşma olasılığı hesaplanabilir.
- **Zemin Parametrelerinin Olasılıksal Dağılımının Modellemesi:** Doğal zeminler heterojen yapıda olduğu için, bu parametrelerin olasılıksal analizinde kopula yöntemleri

sayesinde parametrik olmayan bağımlılıklar daha doğru modellenebilmektedir.

Kullanılan başlıca kopula fonksiyonları şunlardır:

- **Gaussian Kopula:** Sadece simetrik bağımlılıklar için uygundur.
- **t-Kopula:** Uç olaylarda bağımlılık içerir (tail dependence).
- **Clayton Kopula:** Alt kuyruk bağımlılığı yüksek durumlar için idealdir.
- **Gumbel Kopula:** Üst kuyruk bağımlılığı baskın senaryolarda kullanılır.
- Model seçiminde Akaike Bilgi Kriteri (AIC) veya Bayesian Bilgi Kriteri (BIC) gibi yöntemlerle en uygun kopula türü belirlenmektedir.

3B ve çok-fizikli simülasyonlar

Geleneksel geoteknik modellemeler çoğunlukla iki boyutlu (2B) ve tek fiziksel alanı temel alırken, zemin davranışlarının gerçekte üç boyutlu (3B) ve çoklu fiziksel süreçlerin etkileşimiyle şekillendiği bilinmektedir. Üç boyutlu (3B) ve çok-fizikli (multi-physics) simülasyonlar, zemin-su-ısı-gaz etkileşimlerinin eş zamanlı modellenmesiyle daha bütüncül, hassas ve gerçekçi mühendislik analizlerinin yapılmasını mümkün kılmaktadır. Bu tür simülasyonlar, özellikle kapsamlı altyapı projeleri, tünel kazıları, baraj güvenlik analizleri ve iklim değişikliğinin zemin üzerindeki etkilerinin modellenmesi gibi karmaşık uygulamalarda giderek daha fazla kullanılmaktadır.

Çok-fizikli simülasyonlar, farklı fiziksel süreçleri (örneğin, yeraltı suyu akışı, ısı transferi, gaz difüzyonu, mekanik deformasyon) aynı anda ve etkileşimli şekilde çözen bağlantılı

denklemler sistemini temel alır. Bu amaçla genellikle aşağıdaki yöntemler kullanılır:

- Termo-hidro-mekanik (THM) modelleme
- Termo-hidro-mekanik-kimyasal (THMC) modelleme
- Çok fazlı ortam simülasyonları

Bu sayılan yöntemler, genellikle sonlu elemanlar (FEM), sonlu farklar (FDM) veya örgüsüz yaklaşımlar (meshless methods) ile entegre sayısal çözüme tabi tutulur.

Üç boyutlu (3B) modelleme, özellikle düzensiz zemin topografyası, tünel inşaatları, istinat duvarları, kazık temelleri ve baraj dolgu alanları gibi karmaşık yapı-zemin etkileşimlerinde kritik rol oynar. 3B sonlu eleman (FEM) veya ayrık eleman (DEM) modelleri sayesinde yapısal davranışların hem düşey hem de yatay bileşenleri detaylı şekilde simüle edilebilir (Oñate, Zienkiewicz, & Taylor, 2011). Ayrıca, 3B modeller zemin deformasyonlarının yan alana yayılımını da içerebildiğinden, gerilme alanlarının daha hassas hesaplanmasını sağlar.

Multifizik simülasyonlar: (Laloui & Ferrari, 2019)'a göre, farklı fiziksel etkilerin zemin davranışı üzerindeki birleşik etkisini değerlendirme konusunda eşsiz bir araç sunar. Çok-fizikli modelleme, farklı fiziksel süreçlerin (örneğin mekanik, hidrolojik, termal ve kimyasal süreçler) eş zamanlı ve etkileşimli biçimde modellenmesini içerir. Bu yaklaşım, aşağıdaki alanlarda kullanılır:

- Zemin-su etkileşimleri (THM- termal-hidrolik-mekanik modeller)
- Sıvılaşma süreçlerinin zamana bağlı modellenmesi
- Donma-çözülme etkilerinin zemin dayanımı üzerindeki rolü
- Zemin içinde kimyasal yayılım ve reaktif geçirgenlik (örneğin MICP süreçleri)

Modern geoteknik uygulamalarda PLAXIS 3D, FLAC3D, COMSOL Multiphysics, ABAQUS ve OpenGeoSys gibi sayısal analiz yazılımları hem 3B hem de çok-fizikli simülasyonların gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu yazılımlar sayesinde, zemin-yapı-su sistemlerinin davranışları ileri düzey malzeme modelleriyle (örn. elasto-plastik, viskoplastik modeller) detaylı biçimde analiz edilebilmektedir (Bui, Fukagawa, Sako, & Ohno, 2008). Ayrıca, GPU tabanlı hesaplama altyapıları ile yüksek çözünürlüklü çok-fizikli modellerin çözüm süreleri önemli ölçüde kısaltılmakta, bu da büyük ölçekli mühendislik projelerinde gerçek zamanlı simülasyonlara olanak sağlamaktadır.

Veri tabanlı ve yapay zekâ destekli modelleme: Günümüzde geoteknik mühendisliği uygulamaları, yüksek hacimli ve çok çeşitli verilerin analizini gerektiren karmaşık süreçleri içermektedir. Geleneksel fizik tabanlı modelleme yaklaşımlarının sınırlılıklarını aşmak üzere, veri tabanlı modelleme ve yapay zekâ (YZ) algoritmaları giderek daha yaygın şekilde kullanılmakta; bu sayede zemin davranışı, şev stabilitesi, zemin iyileştirme etkisi ve sıvılaşma riski gibi kritik mühendislik problemleri daha hızlı ve doğru biçimde tahmin edilebilmektedir (Goh, 1995); (Phoon & Kulhawy, 1999).

YZ temelli yöntemler, özellikle yapay sinir ağları (YSA), destek vektör makineleri (SVM), karar ağaçları, rastgele ormanlar (RF), gradyan artırılmalı makineler (GBM) ve son yıllarda yaygınlaşan derin öğrenme (DL) mimarileri ile temsil edilmektedir. Bu yöntemler, karmaşık veri setleri arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri öğrenerek yüksek doğrulukta tahmin modelleri geliştirmeye imkân tanımaktadır.

Yapay zekâ teknikleri, belirsizliğin yüksek olduğu geoteknik sistemlerde mühendislik yargısının yerini tam anlamıyla alamasa da; tamamlayıcı ve güçlü bir karar destek aracı olarak ön plana çıkmaktadır.

Veri Tabanlı Modelleme Yaklaşımı: Veri tabanlı modelleme, sistemin fiziksel mekanizmalarını matematiksel olarak ifade etmek yerine, geçmiş gözlemlerden öğrenerek bir model kurmayı amaçlar. Bu yaklaşım, istatistiksel öğrenme kuramına dayanır ve özellikle doğrusal olmayan, karmaşık ilişkiler içeren sistemlerde etkili olur (Hastie, Tibshirani, & Friedman, 2009). Geoteknik mühendisliğinde zemin özellikleri gibi belirsiz, heterojen ve çok değişkenli verilerin modellenmesi açısından veri odaklı yaklaşımlar klasik deterministik modellere göre daha esnektir (Phoon & Kulhawy, 1999).

Türkiye'de de bu yöntemlerin kullanımına yönelik çalışmalar artmaktadır. Örneğin, (Bozbey & Taşpolat, 2011), zemin dayanımı tahminlerinde geleneksel korelasyon yöntemleri ile yapay sinir ağı (YSA) modellerini karşılaştırmış ve Yapay Sinir Ağı'nın daha az hata ile daha güvenilir tahminler sunduğunu belirtmiştir.

Makine Öğrenmesi (Machine Learning): Makine öğrenmesi (MO), verilerden öğrenen ve tahmin yapan algoritmalar bütünüdür. MO sistemleri, deneysel veriler üzerinden bir genelleme işlevi öğrenerek bilinmeyen veriler üzerinde tahmin yeteneği kazanır (Mitchell T. , 1997). (Akbulut & Tüylü, 2006) taşıma gücü hesaplarında MO yöntemlerinin doğruluğunu araştırmış ve özellikle heterojen zeminlerde klasik yöntemlere göre daha kararlı sonuçlar elde edildiğini ortaya koymuştur.

Geoteknikte sık kullanılan makine öğrenme algoritmaları şunlardır:

- 1. Yapay Sinir Ağları (YSA):** İnsan beynindeki sinaptik yapıyı taklit eden katmanlı mimarilere sahip öğrenme sistemleridir. Özellikle sıvılaşma potansiyeli (Zhang, Robertson, & Brachman, 2002), taşıma gücü (Goh, Empirical design in geotechnics using neural networks , 1995) oturma tahmini gibi problemler için uygundur.

2. **Destek Vektör Makineleri (SVM):** Doğrusal olmayan sınıflandırma ve regresyon problemlerinde yüksek doğruluk sağlayan teorik olarak güçlü bir yöntemdir.
3. **Rastgele Orman (RF) ve XGBoost:** Karar ağaçlarının birleştirilmesiyle oluşturulan topluluk (ensemble) algoritmalarıdır. Gürültülü ve eksik veri içeren zemin çalışmaları için dayanıklıdır.

Derin Öğrenme ve Gelişmiş Yöntemler: Derin öğrenme, özellikle çok katmanlı yapay sinir ağlarını (örneğin CNN, RNN) kullanarak veri içerisindeki karmaşık örüntüleri tespit etme becerisine sahiptir. Görüntü tanıma ve çok boyutlu saha verilerinin yorumlanmasında potansiyel sunmaktadır (LeCun & Hinton, 2015). Fizik Bilgilendirilmiş Sinir Ağları (PINNs), klasik sinir ağı yapısına diferansiyel denklemler gibi fizik temelli kısıtları entegre ederek mühendislik doğruluğu yüksek modeller üretir (Raissi, Perdikaris, & Karniadakis, 2019). Bu, veri tabanlı modellerin en önemli eleştirilerinden biri olan "fiziksel bağlamdan kopukluk" sorununa çözüm sunar.

Türkiye'de (Kurtuluş & Balcı, 2020) tarafından yapılan bir çalışmada, CNN tabanlı derin öğrenme modeli ile metro tünel kazılarında oturma miktarı tahmin edilmiştir. Bu çalışma, büyük veri kümelerinin derin öğrenme ile işlenebilirliğini ve mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliğini göstermektedir. Derin öğrenme tabanlı model, oturma miktarını klasik elastik teorilere kıyasla daha yüksek doğrulukla tahmin etmiştir.

Belirsizlik ve Güvenilirlik Analizi: Veri odaklı modelleme, genellikle probabilistik yapı ile ele alınır. Zemin parametrelerindeki doğal belirsizlikler nedeniyle tekil deterministik sonuçlar yerine güven aralıklarıyla sunulan tahminler, mühendislik kararlarını daha güvenli hale getirir (Phoon & Kulhawy, 1999). Türkiye'de (Çetin & Ergunay, 2004), zemin sıvılaşması riski analizlerinde belirsizliklerin

değerlendirilmesine yönelik Bayes yaklaşımı kullanmıştır. Bununla birlikte, kopula fonksiyonları da çok değişkenli bağımlılıkların modellenmesinde ön plana çıkmaktadır (Nelsen, 2006).

Veri tabanlı modelleme süreçleri genel olarak aşağıdaki aşamalardan oluşur:

1. **Veri Toplama ve Temizleme:** Zemin özellikleri, deneysel sonuçlar, yerinde ölçümler (CPT, SPT, LWD vb.)
2. **Öznitelik Seçimi ve Mühendisliği:** Modeli en çok etkileyen değişkenlerin belirlenmesi
3. **Model Eğitimi ve Doğrulama:** YSA, RF, DL vb. yöntemlerle öğrenme süreci
4. **Performans Değerlendirme:** MAE, RMSE, R^2 gibi hata ve doğruluk metrikleri ile

Uygulama alanları Tablo 5’te özetlenmiştir.

Tablo 5. YZ destekli modelleme teknolojisinin geoteknik mühendisliğinde uygulama alanları

Uygulama Konusu	YZ Tabanlı Model Kullanımı
Zemin sınıflandırma	Karar ağaçları ve k-en yakın komşuluk algoritmaları ile zemin türü tahmini
Taşıma gücü ve oturma tahmini	Derin sinir ağları ile CPT/SPT verilerinden oturma miktarı kestirimi
Sıvılaşma potansiyeli	SVM ve lojistik regresyon ile sıvılaşma olup olmama durumunun sınıflandırılması
Zemin iyileştirme performansı	RF algoritması ile jet grout veya kolon iyileştirme verilerinden mukavemet tahmini
Şev stabilitesi	GBM ve XGBoost ile faktör-of-safety tahmin modellerinin oluşturulması

Gerçek zamanlı simülasyon ve BIM entegrasyonu

Gerçek zamanlı simülasyon, mühendislik uygulamalarında fiziksel sistemlerin davranışlarını anlık olarak izleyerek dinamik verilerle güncellenen hesaplamalarla karar destek süreçlerine katkı sağlamayı amaçlar. Bu sistemler genellikle sensör verileri,

algoritmalar ve hesaplama altyapısını entegre ederek tasarım, analiz ve uygulama döngüsünü dijital olarak birleştirir (Khosrowshahi & Arayici, 2012). Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ise, yapıların fiziksel ve fonksiyonel özelliklerini dijital ortamda temsil eden parametrik ve çok katmanlı veri modelleridir. BIM, özellikle tasarım, yapım ve işletme aşamalarında çok disiplinli veri entegrasyonu sağlar (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2011).

Bu iki yaklaşımın meydana getirdiği entegrasyon, inşaat mühendisliğinde olduğu gibi geoteknik mühendisliği uygulamalarında da giderek önem kazanmaktadır. Gerçek zamanlı zemin sensörlerinden elde edilen verilerin BIM ortamına aktarılması, örneğin kazı güvenliği, oturma gözlemleri veya şev stabilitesi analizlerinde, proaktif mühendislik müdahalelerine olanak tanımaktadır.

Gerçek zamanlı simülasyon ve BIM entegrasyonunun teorik arka planı, esasen sistem mühendisliği, sayısal modelleme, veri yönetimi ve geoteknik bilgi sistemleri gibi çok disiplinli yaklaşımların bir bileşimidir. Bu bütünleşik sistemde, çeşitli teorik yaklaşımlar birbirini tamamlayıcı biçimde görev almaktadır:

a. Siber-Fiziksel Sistemler ve Dijital İkiz Kuramı: Gerçek zamanlı simülasyon, temelinde siber-fiziksel sistemler (Cyber-Physical Systems - CPS) kuramına dayanır. Bu sistemler, fiziksel süreçler ile bilgi teknolojisi bileşenlerini senkronize ederek, gerçek dünyadaki olayların âdeta dijital bir yansımasını oluşturur. Dijital ikiz (Digital Twin) ise, gerçek bir nesnenin, yapının veya sistemin dijital ortamda dinamik bir temsilidir. Zemin davranışlarının simülasyonu, bu yapının jeoteknik dijital ikizi üzerinden yürütülür. Siber-fiziksel sistemler, fiziksel olayların dijital modellerle eşzamanlı temsilini mümkün kılarak mühendislik alanlarında etkin bir karar destek sistemi sağlar.

b. Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) Teorisi: BIM, yalnızca üç boyutlu (3B) geometrik modelleme değil, aynı zamanda bir bilgi yönetimi sistemidir. BIM'in teorik temelleri, çok disiplinli bilgi entegrasyonuna dayanır ve özellikle inşaat mühendisliği süreçlerinde zamansal, mekânsal ve içeriksel uyumu hedefler. BIM, çok katmanlı bilgi yapısı ve süreç temelli işleyişi ile mühendislik projelerinde bütünsel bir sistem yaklaşımı sunar (Succar, 2009).

c. Sensör Verisi Tabanlı Geri Besleme (Feedback Loop) Yaklaşımı: Gerçek zamanlı sistemlerde, sahadan gelen sensör verileri modele sürekli olarak geri beslenir. Bu süreç, otomatik geri besleme kontrol teorisine dayanır. Zemin deformasyonları, su basıncı, yer değiştirme gibi parametreler anlık olarak modele aktarılır ve model buna göre güncellenir (Zhou, Lu, & Guo, 2019). Bu, modelin statik değil adaptif olmasını sağlar. Gerçek zamanlı modelleme, veriye dayalı adaptasyon özelliği ile klasik deterministik sistemlerden ayrılır (Zhou, Lu, & Guo, 2019).

d. Sayısal Modelleme ve Sonlu Elemanlar Kuramı: Zemin davranışlarının modellenmesinde yaygın olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) veya Sonlu Farklar Yöntemi (FDM) gibi nümerik teknikler kullanılmaktadır. Gerçek zamanlı simülasyonlarda bu yöntemler, sensör verileri ile güncellenerek, dinamik zemin tepkilerinin izlenmesini sağlar (Zienkiewicz & Taylor, 2005). Zemin-zaman ilişkilerinin modellenmesi için klasik sayısal yöntemler, veri odaklı uyarlanabilir hale getirilmelidir (Zienkiewicz & Taylor, 2005).

e. Bilgi Entegrasyonu ve Ontolojik Yapılar: BIM sistemlerinin teorik temeli aynı zamanda bilgi bilimi (knowledge science) ve ontoloji disiplinlerine dayanmaktadır. Zemin mühendisliği gibi disiplinlerde, parametrelerin tanımı, ilişkileri ve bağlamları, ontolojik yapılar içinde modellenir. Bu yapıların gerçek zamanlı sistemlerle entegrasyonu, bilgi çıkarımı ve yapay zekâ tabanlı analizlere olanak tanır.

Gerçek zamanlı simülasyon ve BIM entegrasyonu, özellikle aşağıdaki uygulama alanlarında dikkate değerdir:

- **Tünel kazıları:** Anlık deformasyon verileri ile tahkimat tasarımlarının eş zamanlı güncellenmesi.
- **Şantiye yönetimi:** Zemin iyileştirme uygulamalarının, enjeksiyon verilerinin veya konsolidasyon süresinin BIM üzerinde izlenmesi.
- **Zemin izleme sistemleri:** Eğilme, yer değiştirme, su seviyesi gibi sahada ölçülen değerlerin dijital ikiz (digital twin) ortamına entegre edilmesi.

Bu bağlamda BIM, geleneksel çizimlerin ötesinde dinamik veri tabanlı bir süreç yönetim aracına dönüşmektedir.

Türkiye’de BIM uygulamalarının inşaat ve altyapı projelerine entegrasyonu giderek artmakta ve önem kazanmaktadır. Bu uygulamalara örnek (Doğan & Arayıcı, 2019)’nin, İstanbul’daki altyapı projelerinde BIM kullanımını analiz etmesi ve saha verilerinin zamanında alınmasının karar vericilerin müdahale süresini önemli ölçüde kısalttığını belirtmesi gösterilebilir. BIM, gerçek zamanlı verilerle senkronize edildiğinde, proje yönetimi süreçlerinde çeviklik ve müdahale hızı önemli ölçüde artmaktadır (Doğan & Arayıcı, 2019). Bir diğer örnek ise, (Yılmaz & Coşgun, 2020) ise Karadeniz bölgesindeki zemin iyileştirme projelerinde sensör destekli veri toplamayı BIM modelleri ile entegre ederek; özellikle şev stabilitesi izleme süreçlerinin dijital ortamda kontrolünü mümkün kılmıştır. Zemin gözlem verilerinin BIM’e entegrasyonu, yapı-zemin etkileşiminde sürekliliği ve güvenliği destekleyen önemli bir teknolojik adımdır (Yılmaz ve Coşgun, 2020). (Türker & Akcamete, 2017) tarafından yapılan çalışmada, BIM’in baraj inşaatlarındaki zemin enjeksiyon yönetiminde etkinliği vurgulanmıştır. Gerçek zamanlı enjeksiyon basınç ve hacim verileri,

modellerle senkronize edilerek zemin iyileştirme kararlarının etkinliği artırılmıştır.

Zemin davranışında parametrik simülasyonlar

Parametrik simülasyonlar, bir mühendislik probleminin çözümünde etkili olan parametrelerin sistematik olarak değiştirilerek zemin davranışının nasıl etkilendiğini analiz etmeyi amaçlayan sayısal modelleme sürecidir. Bu tür analizler, belirsizliklerin yönetilmesi, tasarım optimizasyonu ve risk analizlerinin yapılması açısından büyük önem taşır (Zienkiewicz & Taylor, 2005). Zemin mekaniği kapsamında, özellikle zemin türü; kohezyon, içsel sürtünme açısı, sıkışabilirlik, geçirgenlik ve su basınçları gibi birçok parametre zemin davranışını önemli ölçüde etkileyen girdilerdir. Parametrik simülasyonlar, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM); Sonlu Farklar Yöntemi (FDM) ve diğer ileri sayısal analiz yaklaşımları ile bir arada kullanılmakta olup, geoteknik tasarımda kritik kararlara yön vermektedir (Smith & Griffiths, 2004).

Zemin davranışında parametrik simülasyonlar, temel olarak deterministik ve stokastik modelleme kuramları, duyarlılık analizi, regresyon temelli optimizasyonlar ve olasılıksal güvenilirlik analizleri gibi teorik dayanaklara oturur:

- **Deterministik parametrik analiz:** Belirli bir fiziksel veya mekanik modelde tek bir parametrenin değiştirilerek çıktılar üzerindeki etkisinin analizidir.
- **Çoklu parametrik analiz:** Birden fazla parametrenin eş zamanlı değişimiyle sistematik senaryo üretimidir.
- **Duyarlılık analizi:** Çıktılar üzerinde en fazla etkiye sahip parametrelerin tanımlanmasına olanak verir.
- **Kopula tabanlı modelleme** gibi yöntemlerle parametreler arası bağımlılıklar dikkate alınarak çok daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir (Nelsen, 2006).

Parametrik simülasyonlar, aşağıdaki geoteknik mühendisliği uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır:

- Şev stabilitesi analizleri
- Zemin iyileştirme senaryolarının karşılaştırılması
- Tünel açma sırasında yan duvar deplasmanlarının kontrolü
- Yumuşak zemin oturmalarının modellenmesi
- Deprem etkisi altında sıvılaşma değerlendirmeleri

Bu uygulamalarda parametrik değişkenler, alınan mühendislik kararlarının hassasiyetini belirlemekte ve güvenilirliğini test etmektedir.

Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de yapılan birçok akademik çalışma da parametrik simülasyonların etkinliğini ortaya koymaktadır. Örneğin, (Güler & Ergün, 2018), şev stabilitesinin farklı zemin parametrelerine olan duyarlılığını FEM tabanlı analizlerle incelemiş ve içsel sürtünme açısının kritik bir değişken olduğunu vurgulamıştır. *Zemin parametrelerindeki küçük değişiklikler, özellikle düşük emniyet katsayılı sistemlerde yüksek risk doğurabilir* (Güler & Ergün, 2018). (Çelik & Şengül, 2020), tünel kazılarında yan zemin hareketlerinin çeşitli elastik modül değerleri altında nasıl değiştiğini modellemiş ve bu tür parametrik analizlerin tasarımda optimizasyon sağladığını göstermiştir.

Elastik parametrelerin modellenmesinde yapılan varyasyonlar, kazı sırasında yapısal risklerin kontrolünü sağlamaktadır (Çelik & Şengül, 2020). (Karabulut & Alperen, 2021), zemine uygulanan enjeksiyon yöntemlerinin geçirgenlik ve dayanım üzerindeki etkilerini parametrik olarak analiz etmiş, enjeksiyon hacmi ve karışım oranı gibi parametrelerin performans çıktıları üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermiştir.

a. İleri Düzey Zemin Test Yöntemleri

Zemin mekaniğinde doğru ve güvenilir verilerin elde edilmesi, tasarım ve analiz süreçlerinin temelini oluşturur. Geleneksel saha ve laboratuvar testlerinin yanı sıra, ileri düzey zemin test yöntemleri, zeminlerin daha hassas, hızlı ve kapsamlı değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemler, özellikle heterojen ve karmaşık zemin koşullarında daha detaylı bilgi edinme imkânı sunar (Lunne, Robertson, & Powell, 1997).

Türkiye’de de son yıllarda bu ileri tekniklerin kullanımı artmakta ve çeşitli araştırmalarla uygulama alanları genişlemektedir. İleri düzey zemin test yöntemleri, günümüz jeoteknik mühendisliğinde sahada karşılaşılan karmaşık ve zorlayıcı zemin koşullarının anlaşılmasında kritik öneme sahiptir. Türkiye’de artan altyapı yatırımları ve şehirleşme ile bu testlerin kullanımı hızla artmakta, yerel zemin koşullarına uyarlanmış özgün yöntemler geliştirilmektedir. Böylece, daha güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir mühendislik çözümleri mümkün olmaktadır. Zeminin özellikleri, yapısı ve tasarım için gerekli parametrelerin seçimi doğrultusunda test yöntemleri de çeşitlilik göstermektedir.

Sondajlı kesme testleri (Vane Shear Test – VST)

Sondajlı kesme testleri (Vane Shear Test – VST), özellikle kohezyonlu yumuşak zeminlerin drenajsız kayma dayanımının sahada doğrudan ölçülmesine olanak sağlayan pratik ve güvenilir bir test yöntemidir. İlk olarak 1948 yılında Hvorslev tarafından tanımlanmış olan bu yöntem, düşük mukavemetli killerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde geniş uygulama alanı bulmuştur (Hvorslev, 1948). VST, zemin kesme mukavemetini doğrudan sahada ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Özellikle yumuşak kil zeminlerde ve çamur zeminlerde efektif sonuçlar verir (Das B. M., 2011).

VST, zemine dik olarak yerleştirilen dört kanatlı bir vane'nin (pala) belirli bir hızla döndürülmesi esasına dayanır. Veyn'nin dönmeye karşı gösterdiği direnç, zemin içerisindeki drenajsız kayma dayanımına doğrudan ilişkilidir. Test sırasında, vaneye uygulanan tork (T) ile zemin kesme dayanımı (τ) arasındaki ilişki (3)'deki biçimde şekilde ifade edilir

$$\tau = \frac{T}{K} \quad (3)$$

Burada K, kullanılan vanenin boyutlarına göre belirlenen bir kalibrasyon katsayısıdır. Bu yöntem, özellikle kohezyonlu zeminlerin doğal yapılarının bozulmadan değerlendirilmesini mümkün kılması açısından önemlidir (Lunne, Berre, & Strandvik, 1997).

Uygulama alanları şunlardır:

- Yumuşak kil ve siltlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi
- Baraj, dolgu ve zemin iyileştirme projelerinde zemin stabilitesinin değerlendirilmesi
- Zemin taşıma gücü analizlerinde temel parametrelerin sağlanması
- Derin zeminlerde temel tasarımı için geoteknik modellemenin kalibrasyonu

Özellikle Türkiye'de, İstanbul, Sakarya ve İzmir gibi deprem riski yüksek bölgelerde yürütülen altyapı projelerinde bu test, sıkça tercih edilen sahada uygulamalı yöntemlerden biridir (Karaköse, 2019). Vane kesme testi, düşük mukavemetli zeminlerde hızlı ve güvenilir mukavemet tahminleri sunmaktadır (Demirci & Yalçın, 2019).

Düşey elektrikli kesme testi (SECT)

Düşey Elektrikli Kesme Testi (Vertical Electrical Cone Test, SECT), geoteknik mühendisliğinde özellikle düşük geçirgenliğe sahip zeminlerin mekanik ve elektriksel özelliklerini eş zamanlı olarak değerlendirmek amacıyla kullanılan yenilikçi bir in-situ test yöntemidir.

SECT, konvansiyonel konik penetrasyon testine (CPT) entegre edilen elektriksel direnç ölçümleri sayesinde, zemin tabakalarının litolojik ve nem içeriğine göre karakterizasyonunu olanaklı kılar (Parkin & Bratley, 1982). Bu yöntem, zaman ve maliyet açısından avantajlı olup, klasik kesme testlerine alternatif olarak öne çıkmaktadır.

SECT testi, standart konik uçlu bir penetrometreye entegre edilen elektrotlar yardımıyla zemine uygulanan düşük voltajlı elektrik akımının iletim direncinin ölçülmesine dayanır. Bu sistem sayesinde hem mekanik parametreler (uç direnci, sürtünme direnci) hem de elektriksel iletkenlik eşzamanlı olarak kaydedilir. Elektriksel direnç (ρ), (4)'teki biçimde tanımlanır.

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (4)$$

Burada:

R: ölçülen direnç (Ω),

A: elektrot kesit alanı (m^2),

L: elektrotlar arası mesafe (m) dir.

Uygulama alanları şunlardır:

- Geoteknik zemin sınıflandırmaları ve tabaka ayrımları
- Yeraltı su seviyesinin tespiti
- Kontamine zeminlerin tanımlanması

- Yumuşak zeminlerde konsolidasyon davranışlarının gözlenmesi

Bu yöntem, özellikle su içeriği ve kil minerallerinin varlığı gibi zemin özelliklerinin elektriksel özellikleri üzerindeki etkisini belirlemeye yöneliktir (Aydın, Kılıç, & Demir, 2011). Ek olarak Düşey Elektrikli Kesme Testi, çift parametreliliği veri üretimi (mekanik + elektriksel), hızlı; ekonomik ve yerinde ölçüm olanağı, geoteknik ve jeoelektrik karakterizasyonun birleştirilmesi ve kirlenmiş zeminlerde sızıntı izleme olanağı sunmaktadır. Ancak yüksek dirençli (kuru, çakıllı) zeminlerde sinyalizasyonda zayıflama, yüzey etkileri ve parazitlerin sonuçları etkileyebilirliği, kalibrasyon ve yorumlamanın uzmanlık gerektirmesi kısıtlamalarını da getirmektedir.

Düşey Elektrikli Kesme Testi, özellikle kil içerikli, düşük geçirgenlikli zeminlerde zemin davranışlarının hem jeomekanik hem de jeoelektrik yönlerden değerlendirilmesine olanak tanıyan bütünlük bir çözümdür. Zemin iyileştirme ve risk analizi çalışmaları açısından sahada hızlı veri üretimi sayesinde önemli mühendislik katkıları sunmaktadır.

Çevresel mikrosismik testler

Sismik yöntemler içinde yer alan çevresel mikrosismik testler, düşük enerjili doğal veya yapay titreşimlerin zemin içindeki yayılımını inceleyerek zemin özelliklerini belirler. Özellikle kentsel alanlarda ve yer altı yapılarının yakınında tercih edilmektedir (Aydemir, 2021).

Gelişmiş penetrasyon testleri; CPTu ve SCPT

Klasik konik penetrasyon testi (CPT) ve modifiye versiyonu olan CPTu (pore suyu basıncı ölçümü ile) ve SCPT (sismik CPT) yöntemleri, zemin parametrelerinin hızlı ve sürekli olarak elde edilmesini sağlar. CPTu, klasik Konik Penetrometre Testi (CPT) cihazına, piyezometrik ölçüm kapasitesi eklenmiş halidir. Bu testte,

standart konik uca ek olarak bir veya birden fazla piyezosensör yerleştirilerek, zemin içindeki boşluk suyu basıncı (u) eşzamanlı olarak kaydedilir. Böylece hem mekanik hem de hidrojeolojik davranışların birlikte değerlendirilmesi sağlanır (Robertson P. K., 2010). CPTu testiyle elde edilen başlıca parametreler şunlardır:

- Koni uç direnci
- Sürtünme direnci
- Boşluk suyu basıncı

Bu veriler yardımıyla zeminlerin konsolidasyon davranışı, geçirgenlik özellikleri, tane boyu dağılımı, piyezometrik basınç değişimleri ve geçici/dinamik yüklemelere karşı tepkisi değerlendirilebilir. Özellikle drenajsız koşullar altında yapılan CPTu testleri, yumuşak kil tabakalarının mühendislik özelliklerini ortaya koymakta oldukça etkilidir (Mayne, 2007). Ayrıca CPTu verileriyle birlikte yapılan boşluk basıncı normalizasyonu, zeminlerin suya doygunluk durumu ve faz geçiş sınırları hakkında da önemli bilgiler sunmaktadır.

SCPT, CPT sistemine entegre edilmiş sismik sensörler (jeofon veya hız ölçerler) aracılığıyla, zeminde dalga yayılımı ölçümlerinin yapılmasına olanak tanır. Bu yöntemle zemin tabakaları boyunca kesme dalgası hızı (V_s) ve bazen basınç dalgası hızı (V_p) belirlenir. Bu veriler yardımıyla zeminin dinamik özellikleri, özellikle kesme modülü (G_{max}) ve Poisson oranı (ν) gibi parametreler hesaplanabilir. SCPT testinde, genellikle test alanının yüzeyine yerleştirilen sismik kaynak yardımıyla dalgalar üretilir ve bu dalgaların zemin içindeki yayılma süreleri derinliğe bağlı olarak kaydedilir. Bu şekilde zemin profilinin sismik tanımlaması, özellikle deprem mühendisliği ve yapı-zemin etkileşimi çalışmalarında kritik önem taşır (Campanella, Robertson, & Gillespie, 1986).

SCPT'nin avantajları şunlardır:

- Yüzeysel ve derin tabakaların doğrudan V_s ölçümü
- Zemin sınıflandırması için daha kapsamlı veri üretimi
- Deprem etkilerinin modellenmesinde giriş parametresi olarak kullanılabilirlik
- Zemin sıvılaşma potansiyelinin tayininde etkinlik

CPTu ve SCPT, zemin davranışının yalnızca statik değil, aynı zamanda dinamik yönlerini de gözlemlemeye olanak sağlayan, günümüzdeki en gelişmiş in-situ test teknikleri arasında yer almaktadır. Bu yöntemler sayesinde, geoteknik mühendisliğinde daha güvenli tasarımlar ve daha doğru zemin karakterizasyonları mümkündür. Özellikle sismik risk analizleri, temel tasarımları ve altyapı planlamalarında, bu testlerden elde edilen veriler karar sürecinin bilimsel temellere dayanmasını sağlamaktadır.

Gerçek zamanlı zemin izleme sistemleri

Modern geoteknik mühendisliği uygulamaları, zemin davranışının yalnızca laboratuvar veya statik saha testleriyle değil, aynı zamanda gerçek zamanlı veri akışı ile izlenmesini gerekli kılmaktadır. Özellikle büyük altyapı projeleri, şev stabilitesi uygulamaları, derin kazılar ve baraj güvenliği gibi mühendislik problemlerinde, zemin koşullarının zamana bağlı olarak değişimi kritik önem taşır.

İleri zemin test yöntemlerinin bir diğer ayağı ise gerçek zamanlı sensörlerle zemin davranışının izlenmesidir. Bu bağlamda geliştirilen Gerçek Zamanlı Zemin İzleme Sistemleri (Real-Time Ground Monitoring Systems), zemin davranışını sürekli gözlemlemeye olanak tanıyan, sensör tabanlı ve çoğunlukla dijital haberleşme altyapısıyla bütünleşik sistemlerdir. Fiber optik sensörler, piyezometreler ve eğrilme ölçerler gibi teknolojilerle saha

verileri anlık olarak toplanmakta, böylece dinamik yüklemelere karşı zemin tepkileri anında analiz edilmektedir (Kaya, 2020).

Gerçek zamanlı zemin izleme sistemleri, genel olarak üç temel bileşenden oluşur:

- 1. Sensörler:** Zemin içi ve yüzeyine yerleştirilen çeşitli türde sensörler aracılığıyla veri toplanır. Bunlar arasında piezometreler, inklinometreler, strain gauge'lar, yük hücreleri, yer değiştirme ölçerler (LVDT), zemin sıcaklık sensörleri ve ivmeölçerler yer alır.
- 2. Veri Toplama ve Aktarım Sistemleri:** Toplanan veriler, otomatik veri kaydediciler (datalogger) ile zaman damgalı olarak arşivlenir. Bu veriler, kablosuz haberleşme modülleri (GPRS, LTE, LoRaWAN vb.) ile merkezi bir sunucuya iletilir.
- 3. Veri Analizi ve Uyarı Mekanizmaları:** Veriler, analiz yazılımları aracılığıyla gerçek zamanlı olarak değerlendirilir. Belirlenen eşik değerlerinin aşılması durumunda, sistem otomatik uyarı sistemleri (SMS, e-posta, alarm vs.) vasıtasıyla müdahale birimlerini bilgilendirir.

Gerçek zamanlı izleme sistemleri, birçok kritik mühendislik uygulamasında kullanılmaktadır:

- **Şev ve yamaç stabilitesi izleme:** Heyelan riski taşıyan bölgelerde zemin kaymalarının erken teşhisi.
- **Baraj ve dolgu gövde izleme:** Gövde deformasyonları, iç su basıncı değişimleri ve oturma takibi.
- **Tünel ve kazı projeleri:** Yer değiştirme, çatlak genişlemesi ve zemin tepkisinin kontrolü.
- **Deprem izleme sistemleri:** Zemin titreşimlerinin ve sismik dalgaların izlenmesi.

- **Zemin sıvılaşma takibi:** Yer altı su seviyesi ve por suyu basıncı değişimlerinin gerçek zamanlı izlenmesi.

Gerçek zamanlı zemin izleme sistemlerinin uygulamada sunduğu avantajlar şunlardır:

- **Erken uyarı sağlama:** Kritik değerlerin aşılması durumunda hızlı müdahale imkânı tanır.
- **Sürekli veri üretimi:** Anlık ve sürekli veri toplanarak zamana bağlı davranış eğrileri oluşturulabilir.
- **Risk yönetimi:** Proje sahalarında riskin kantitatif olarak değerlendirilmesini sağlar.
- **Veri tabanlı karar destek sistemleri:** Tasarım güncellemeleri, tahkimat önlemleri ve müdahale planları gerçek verilerle desteklenebilir.
- **Ekonomik ve zamansal verimlilik:** Manuel ölçüm ihtiyacını azaltarak insan hatasını minimize eder ve kaynak kullanımını optimize eder.

Son yıllarda bu sistemlerde yapay zekâ ve makine öğrenimi tabanlı analiz yöntemleri entegre edilmeye başlanmıştır. Özellikle öngörücü bakım ve risk temelli otomatik karar sistemleri, sensörlerden gelen büyük veri kümeleri üzerinde çalışılarak zemin davranışındaki anomalilerin erken teşhisini mümkün kılmaktadır (Mihret & Thakur, 2022). Ayrıca, geo-nesnelerin interneti (Geo-IoT) kavramı doğrultusunda geliştirilen sistemler sayesinde, farklı coğrafi bölgelerdeki zemin izleme istasyonları merkezi bir platformda birleştirilerek bölgesel zemin davranış haritaları oluşturulabilmektedir.

Gerçek zamanlı zemin izleme sistemleri, zemin mühendisliğinde önleyici yaklaşımın temel bileşenlerinden biridir. Bu sistemler sayesinde hem zemin kaynaklı yapısal risklerin hem de

çevresel tehlikelerin etkileri önceden belirlenebilir ve proaktif mühendislik çözümleri geliştirilebilir. Özellikle büyük altyapı projelerinde bu sistemlerin kullanımı, sürdürülebilirlik, güvenlik ve verimlilik açısından artık kaçınılmaz hale gelmiştir.

a. Sıvılaşırma Riski Değerlendirmesi ve Kontrolü

Zemin sıvılaşması, doymun, gevşek ve kumlu zeminlerin, özellikle tekrarlı dinamik yüklemeler (örneğin depremler) altında taşıma gücünü ve kesme dayanımını kaybetmesi sonucu meydana gelen bir jeoteknik olaydır (Seed & Idriss, 1971). Bu olay, yapı temellerinde oturma, taşıma gücü kaybı ve yapısal hasarlarla sonuçlanabilir.

Türkiye gibi aktif tektonik kuşakta yer alan ölkelerde sıvılaşırma riski, özellikle alüvyonel vadiler, kıyı dolgu alanları ve deltalar gibi zeminlerin yaygın olduğu bölgelerde kritik bir mühendislik sorunudur. Sıvılaşırma, dinamik yüklemeler altında zemin tanecikleri arasındaki boşluk suyu basıncının artmasıyla efektif gerilmelerin sıfıra yaklaşması sonucu ortaya çıkar. Bu durumda zemin, makaslama dayanımını geçici olarak kaybederek viskoz bir sıvı gibi davranır. Bu olay, özellikle gevşek kum zeminlerde, yüksek yeraltı su seviyesi ve yüksek sismik ivmelere sahip bölgelerde daha sık gözlenir. Bu olay sırasında zemin, geçici olarak sıvı gibi davranır. Zemin sıvılaşırmasına karşı dayanımı belirleyen başlıca parametreler arasında zemin tanecik dağılımı, yerinde sıkılık derecesi, doymunluk oranı ve yer altı su seviyesi bulunur.

Zemin sıvılaşırmasına ilişkin en yaygın kullanılan teorik yaklaşımlardan biri, “cyclic stress ratio” (CSR) ile “cyclic resistance ratio” (CRR) kıyaslamasıdır. CSR, zeminin maruz kalacağı sismik gerilme oranını; CRR ise zeminin sıvılaşırma karşı direncini temsil eder. Eğer $CSR > CRR$ ise sıvılaşırma olasılığı artar.

Sıvılaşma potansiyeli iki ana yöntemle belirlenir:

- 1. Ampirik ve yarı-ampirik yöntemler:** Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Konik Penetrasyon Testi (CPT) verilerine dayalı olarak geliştirilen ampirik yaklaşımlar, sıvılaşma riskinin pratik değerlendirmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle (Robertson P. K., 1998) tarafından geliştirilen CPT tabanlı grafiksel yöntem, dünya genelinde yaygın bir uygulama alanı bulmuştur.

Türkiye’de (Çetin, Seed, Der Kiureghian, & Tokimatsu, 2004) tarafından geliştirilen zemin sıvılaşma modeli, yerel zemin koşullarına uyarlanmış olup İstanbul, İzmir ve Bursa gibi büyükşehirlerin mikrozonlama çalışmalarında etkin olarak kullanılmaktadır. Bu model, deprem büyüklüğü, SPT-N değerleri ve yeraltı su seviyesine bağlı olarak sıvılaşma riskini istatistiksel olarak değerlendirmektedir.

- 2. Sayısal Yöntemler:** Dinamik analizlerin sayısal modeller aracılığıyla yapılması, zemin-sıvılaşma davranışının daha gerçekçi biçimde değerlendirilmesine imkân tanır. Finite Element Method (FEM), Finite Difference Method (FDM) ve Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) yaklaşımları, bu tür analizlerde tercih edilmektedir (Zhang, Chen, & Wang, 2004). FLAC, OpenSees ve PLAXIS gibi yazılımlar sıvılaşmayı göz önüne alan özel modellerle analiz yapılmasına olanak tanır.

Sıvılaşma Kontrol Yöntemleri

Zemin iyileştirme yöntemleri ve alınabilecek yapısal önlemler başlığı altında iki grupta incelenmiştir.

1. Zemin iyileştirme yöntemleri

Dinamik Kompaktlama: Gevřek kumların yüksek enerjili dűřürme ile sıkılaştırılması yoluyla sıvılaşma potansiyelinin azaltılması temeline dayanır.

Drenaj Yöntemleri: Yüksek boşluk suyu basıncını hızla boşaltmak amacıyla dikey drenler veya geçirgen tabakalar oluşturulur.

Taş Kolonlar: Zemin içerisine yerleştirilen taş kolonlar hem taşıma gücünü artırır hem de zemin içi drenajı teşvik ederek sıvılaşma etkisini sınırlar.

Kimyasal Enjeksiyonlar: Çimento, silikat gibi bağlayıcılar ile zemin içi yapı stabilizasyonu sağlanır.

MICP (Mikrobiyal Olarak İndüklenen Kalsiyum Karbonat Çökmesi): Zemin taneleri arasında kalsiyum karbonat çökmesini teşvik ederek geçirgenliği azaltır ve dayanımı artırır. Bu yöntemle ilgili saha denemeleri Türkiye’de halen araştırma aşamasındadır (Karataş & Cihan, 2022).

2. Yapısal Önlemler

Kazıklı Temeller: Yapının yükünü sıvılaşmadan etkilenmeyecek derin katmanlara aktarır.

Zemin-Yapı Etkileşim Tasarımı: Zemin sıvılaşmasının yaratacağı oturmaları absorbe edebilecek esnek sistem tasarımları önerilir. Sıvılaştırma riski değerlendirmesi ve kontrolü uygulamaları ve avantaj/dezavantaj değerlendirmesi Tablo 6’da özetlenmiştir.

Tablo 6. Sıvılaştırma riski değerlendirilmesi ve kontrolü uygulamaları ve avantaj/dezavantaj değerlendirilmesi

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
SPT/CPT ile ampirik analiz	Hızlı ve ekonomik	Yerel varyasyonları göz ardı edebilir
Sayısal modelleme (FEM/PLAXIS)	Üç boyutlu analiz ve farklı senaryoları değerlendirme imkânı	Karmaşık kalibrasyon, yüksek maliyet
Dinamik kompaktlama	Uygun maliyet, hızlı uygulama	Derin tabakalarda etkisiz olabilir
MICP	Çevreci ve yenilikçi bir çözüm, geçirgenlik ve dayanım artırımı	Saha uygulama süreci halen araştırma aşamasında, yüksek teknik bilgi gerektirir.

Sıvılaşma riski, yapı güvenliğini doğrudan etkileyen ve özellikle Türkiye gibi deprem kuşağındaki ülkelerde önemle değerlendirilmesi gereken bir jeoteknik problemdir. Ampirik analizlerden gelişmiş sayısal modellere kadar geniş bir değerlendirme yelpazesi mevcut olup, modern uygulamalar yerel saha koşullarına özel olarak seçilmelidir. Türkiye'deki çeşitli saha örnekleri, zemin karakterizasyonunun önemi ve iyileştirme stratejilerinin etkinliğini göstermektedir.

b. Akıllı Zemin Sistemleri

Geoteknik mühendisliğinde zemin davranışının anlaşılması, projelerin güvenliği ve sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Geleneksel izleme ve ölçüm yöntemleri, sınırlı zaman çözünürlüğü ve reaktif doğası nedeniyle karmaşık zemin davranışlarını yeterince yansıtamamaktadır. Bu bağlamda geliştirilen akıllı zemin sistemleri, zemin yapılarının kendi davranışlarını algılayabilen, analiz edebilen ve sonuçlara göre tepki verebilen bütünleşmiş teknolojik sistemlerdir. Bu sistemler; sensör teknolojileri, yapay zekâ, büyük veri analizi ve Nesnelerin İnterneti

(IoT) gibi disiplinler arası yaklaşımları entegre ederek zemin mühendisliğinde devrimsel nitelikte yenilikler sunmaktadır.

Akıllı zemin sistemlerinin temelinde, zemin içerisine yerleştirilen ya da yüzeyine entegre edilen algılama ve iletim teknolojileri yer alır. Bu sistemler genellikle aşağıdaki bileşenlerden oluşur:

- **Fiber Optik Sensörler (FOS):** Özellikle Fiber Bragg Izgarası (FBG) teknolojisi kullanılarak zemin içindeki gerinim, sıcaklık ve nem gibi parametreler yüksek doğrulukla ölçülebilmektedir.
- **Kablosuz Sensör Ağları (Wireless Sensor Networks- WSN):** Enerji tasarruflu mikro sensörler ile büyük alanlarda veri toplama imkânı sağlar. Gömülü sistemler sayesinde sürekli izleme yapılabilir.
- **Akıllı Malzemeler:** Piezoelektrik kristaller ve manyeto-reolojik jeller gibi çevresel etkilere duyarlı malzemeler, zemin davranışına entegre edilerek tepki yeteneği kazandırır.
- **Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi:** Toplanan büyük veri setlerinin analizi, sınıflandırılması ve tahminsel modellemesi için faydalanılmaktadır.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Sonuçlar

Bu çalışma, geoteknik mühendisliğinde zemin iyileştirme, tanımlama ve izleme süreçlerine yönelik geleneksel ve yenilikçi yöntemleri bütüncül bir bakış açısıyla analiz etmektedir. Zemin iyileştirme teknikleri arasında kompaksiyon, taş kolonları ve ön yükleme sistemleri gibi klasik yaklaşımların yanı sıra jet grout, derin karıştırma ve geosentetik donatılar gibi ileri mühendislik çözümleri değerlendirilmektedir. Zemin tanımlama süreçleri hem arazi hem de laboratuvar deneylerine ek olarak jeofizik temelli yöntemlerle

desteklenerek, mühendislik parametrelerinin yüksek doğrulukla belirlenmesine odaklanmaktadır. Ayrıca izleme süreçlerinde, geleneksel sensör teknolojilerinin yanı sıra dijital ve kablosuz sistemlerin kullanımına, büyük veri analitiği ve yapay zekâ destekli karar destek sistemlerinin entegrasyonuna yer verilmiştir. Elde edilen bulgular, geoteknik uygulamaların yalnızca statik verilerle değil, dinamik, çevresel ve dijital parametrelerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda çalışma, zemin mühendisliğinde daha bütünleşmiş ve çok katmanlı analizlere olan gereksinimi vurgulamaktadır.

Geleneksel yöntemlerin hâlâ geçerliliği olmakla birlikte, bu yöntemlerin sınırlı derinliğe etkili olmaları, heterojen zeminlerde güvenilir sonuçlar verememeleri ve çevresel sürdürülebilirlik açısından tartışmalı olmaları nedeniyle karmaşık zemin problemlerinde yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir.

Derin karıştırma (DSM), elektrokimyasal stabilizasyon, mikrobiyal kalsit çökmesi (MICP) ve geopolimer enjeksiyonu gibi yenilikçi teknikler, özellikle yüksek su içeriğine sahip zayıf zeminlerde, geleneksel yöntemlerin etkin olamadığı alanlarda alternatif ve etkili çözümler sunmaktadır.

CPTu ve SCPT gibi gelişmiş penetrasyon testleri, klasik sondaj ve SPT yöntemlerine göre daha fazla sayıda ve sürekli veri sağlayarak, zemin profilinin yüksek çözünürlükle modellenmesini mümkün kılmıştır. Özellikle sıvılaşma riski, oturma analizi ve taşıma gücü hesaplarında bu testlerin güvenilirliği dikkate değerdir.

Gerçek zamanlı zemin izleme sistemlerinin kullanıldığı projelerde (ör. büyük kazı alanları, tünel inşaatları ve baraj güvenliği uygulamaları), zemin deformasyonları erken aşamada tespit edilerek mühendislik müdahaleleri zamanında yapılabilmiştir. Sensör tabanlı uyarı sistemleri, risk yönetimi süreçlerini proaktif hâle getirmiştir.

Yapay zekâ ve makine öğrenimi temelli analiz sistemleri, CPTu/SCPT verilerinin yorumlanmasında, zemin türü sınıflandırmalarında ve davranış öngörülerinde yüksek doğruluk sağlayarak karar destek sistemlerine katkı sunmuştur.

Öneriler

Tasarım Süreçlerine Entegrasyon: Yenilikçi zemin iyileştirme ve izleme sistemleri, projelerin başlangıç aşamasından itibaren planlamaya entegre edilmelidir. Özellikle karmaşık ve kritik yapı temellerinde DSM, MICP ve gerçek zamanlı izleme sistemlerinin birlikte kullanılması önerilmektedir.

Test Sistemlerinin Standartlaşması: CPTu ve SCPT gibi gelişmiş in-situ test yöntemlerinin ulusal standartlara entegrasyonu sağlanmalı, bu testlerin kullanımı teşvik edilmeli ve mühendislik firmalarına eğitim desteği verilmelidir.

Yapay Zekâ Destekli Karar Sistemleri: Veri odaklı modelleme araçlarının, geoteknik tasarım sürecinde daha yaygın şekilde kullanılması teşvik edilmeli; özellikle derin öğrenme algoritmaları ile sahadan elde edilen büyük veri kümeleri analiz edilerek öngörüsül zemin davranış tahminleri yapılmalıdır.

Çevresel Etki Analizi: Geleneksel kimyasal enjeksiyonların çevresel etkileri dikkate alınarak, karbon ayak izi düşük, biyolojik ya da jeopolimer temelli yenilikçi yöntemlere geçiş planlanmalıdır.

Çok Disiplinli Yaklaşım: Geoteknik mühendisliği artık tek başına zemin mekaniğine dayalı bir alan olmaktan çıkmakta; veri bilimi, çevre mühendisliği, malzeme bilimi ve yapay zekâ ile entegre çalışan bir yapıya dönüşmektedir. Bu nedenle, projelerin multidisipliner ekiplerle yönetilmesi önem arz etmektedir.

Yerli Teknoloji Geliştirme: Gerçek zamanlı sensör sistemlerinin ve CPTu/SCPT ekipmanlarının yerli üretimi teşvik

edilmeli, maliyetlerin düşürülmesi ve dışa bağımlılığın azaltılması hedeflenmelidir.

Elektrokinetik Stabilizasyon: Düşük geçirgenlikli zeminlerde (örneğin kil) elektroosmotik akım kullanılarak suyun uzaklaştırılması ve mukavemetin artırılması sağlanıyor. Özellikle tarihi yapılar veya hassas alanlarda kazısız müdahale yapılabilir.

Biyoteknolojik Yöntemler: Mikroorganizmalar kullanarak zeminde kalsiyum karbonat çöktürülmesi sağlanıyor. Bu yöntemle taşıma gücü artırılırken sıvılaşma riski azaltılabiliyor. Özellikle çevresel etkilerin minimize edilmesi gereken projelerde dikkat çekici bir çözümdür.

Gelecek Çalışmalar İçin Perspektif

Bu çalışmanın çıktıları doğrultusunda, gelecek araştırmalarda aşağıdaki alanlara odaklanılması önerilmektedir:

- Mikrobiyal zemin iyileştirme yöntemlerinin farklı zemin türlerinde uzun vadeli davranışlarının izlenmesi ve ülkemizde uygulamalarının artırılması.
- CPTu ve SCPT verilerinin yapay zekâ tabanlı algoritmalarla otomatik yorumlanması için açık veri kümelerinin oluşturulması.
- Gerçek zamanlı zemin izleme verilerinin GIS (coğrafi bilgi sistemleri) ile bütünleştirilerek bölgesel risk haritalarının çıkarılması.
- Geoteknik tasarım sürecinde karbon ayak izinin hesaplanmasını içeren çevresel sürdürülebilirlik modellerinin geliştirilmesi.

Kaynakça

Acar, Y. B., & Alshawabkeh, A. N. (1993). Principles of electrokinetic remediation . *Environmental Science & Technology*, 27(13), s. 2638–2647.

Acar, Y. B., Gale, R. J., Alshawabkeh, A. N., Marks, R. E., Puppala, S., Bricka, M., & Parker, R. (1995). Electrokinetic remediation: Basics and technology status. *Journal of Hazardous Materials*, 40(2), s. 117–137.

Akbulut, S., & Tüylü, S. (2006). Yapay Sinir Ağları ile Zemin Taşıma Gücünün Tahmini. *ZKÜ Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 6(2), s. 63-70.

Alshawabkeh, A. N., & Sheahan, T. C. (2003). Soft soil stabilization by ionic injection under electric fields. *Ground Improvement*, 7(4), s. 177–185.

Al-Tabbaa, A., & Evans, C. W. (2005). Electrokinetic stabilization of organic clay soils. *Ground Improvement*, 9(1), s. 33–41.

Atkins, A. M., Erfle, J. B., & Guo, Y. (2001). In situ evaluation of dynamic compaction of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(8), s. 773–783.

Atluri, S. N., & Zhu, T. (1998). A new meshless local Petrov-Galerkin (MLPG) approach in computational mechanics. *Computational Mechanics*, 22(2), s. 117–127.

Aydemir, M. (2021). Çevresel mikrosismik yöntemlerin kentsel alanlarda zemin özelliklerinin belirlenmesindeki uygulamaları. *Jeofizik Dergisi*, 36(1), 45-59.

Aydın, A., Kılıç, A., & Demir, Y. (2011). Düşey elektrik direnç testleriyle sahada zemin sınıflandırması. *Jeoteknik Bülteni*, 25(3), 145–159.

Barksdale, R. D., & Bachus, R. C. (1983). *Design and construction of stone columns*, vol. (No. FHWA/RD-83/026; SCEGIT-83-104). Turner-Fairbank Highway Research Center.

Bell, F. G. (1993). *Engineering treatment of soils*. London: CRC Press.

Belytschko, T., Lu, Y. Y., & Gu, L. (1994). Element-free Galerkin methods. *International journal for numerical methods in engineering*, 37(2), s. 229-256.

Belytschko, T., Organ, D., & Krongauz, Y. (1996). A review of meshless methods. *Mathematics and Computers in Simulation*, 39(1-2), s. 91–103.

Bergado, D. T., Anderson, L. R., N., M., & S, B. A. (1996). *Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environment*. New York: ASCE Press.

Bozbey, İ., & Taşpolat, Z. (2011). Sıkışabilirlik Parametrelerinin Yapay Sinir Ağı ile Tahmini. *İnşaat Mühendisliği Dergisi*, 22(1), s. 55-64.

Brinkgreve, R. B., Engin, E., & Swolfs, W. M. (2007). *PLAXIS 3D Foundation Manual*. Delft University of Technology.

Bruce, D. A. (2005). *The practice of grouting in geotechnical engineering*. ASCE.

Bruce, D. A., & Gallavresi, M. (1988). The development of jet grouting in soil and rock. *Ground Engineering*, 21(3), s. 25–32.

Budhu, M. (2010). *Soil Mechanics and Foundations*. John Wiley ve Sons.

Bui, H. H., Fukagawa, R., Sako, K., & Ohno, S. (2008). Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil

constitutive model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(12), s. 1537–1570.

Campanella, R. G., Robertson, P. K., & Gillespie, D. (1986). Seismic Cone Penetration Test Proc. INSTU'86. *Geot. Special Publ.* (s. 116–130). ASCE.

Cashman, P. M., & Preene, M. (2001). *Groundwater Lowering in Construction: A Practical Guide to Dewatering*. Spon Press.

Cundall, P. A., & Strack, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1), 47-65.

Çelik, F., & Şengül, M. (2020). FEM tabanlı parametrik simülasyonlarla tünel çevresi deformasyon analizleri. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Dergisi*, 44(2), s. 81–92.

Çelik, F., & Şengül, M. (2020). FEM tabanlı parametrik simülasyonlarla tünel çevresi deformasyon analizleri. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Dergisi*, 44(2), 81–92.

Çetin, K. O., & Ergunay, O. (2004). Probabilistic Assessment of Soil Liquefaction: Bayesian Perspective. *Geotechnical Earthquake Engineering Symposium*. İstanbul.

Çetin, K. Ö., Seed, R. B., Der Kiureghian, A., & Tokimatsu, K. (2004). Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(12), 1314–1340.

Das, B. (2011). *Principle of Geotechnical Engineering*. Stamford: Cengage Learning, .

Das, B. M. (2011). *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning.

Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials . *Journal of Thermal Analysis*, 37, s. 1663-1656.

Davis, R. E., & Lee, S. K. (2019). Environmental impacts of dynamic soil improvement methods . *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 123, s. 75–85.

DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. (2013). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2), s. 197–210.

DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. (2013). Bio-mediated soil improvement., . *Ecological Engineering* 36(2), s. 197–210.

Demirci, M., & Yalçın, O. (2019). Doğu Marmara alüvyonlarında vane kesme testinin değerlendirilmesi. *Türkiye Jeoteknik Bülteni*, 24(2), 33-42.

Demirel, B., Taşdemir, M. A., & Uysal, M. (2022). Geopolimer beton ve çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(1), s. 55–64.

Demiröz, A., & Karaduman, M. (2009). Zemin İyileştirme Metotları. *Selçuk-Teknik Dergisi* 8(3), s. 176–192.

Doğan, S., & Arayıcı, Y. (2019). Türkiye’de altyapı projelerinde BIM uygulamaları: Süreç odaklı bir değerlendirme. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 15(2), s. 142–156.

Durgunoğlu, H., Varaksin, S., Karadayılar, T., Nasöz, E., & Briet, S. (2002). Ağır Dinamik Kompaksiyon-Yüksek Enerji Kolonları ile Zemin İslahına Ait Bir Vaka Analizi,. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi* (s. Cilt 2, 444-452). Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers (2nd ed.)*. Wiley.

Enerjeo Sismik Aramalar. (2025, 11 3). Enerjeo : <https://www.enerjeo.com.tr/sismik-aramalar.php> adresinden alındı

Fang, H. Y. (2013). *Foundation engineering handbook*. Springer Science & Business Media.

FHWA. (2005). *Micropile Design and Construction Guidelines Implementation Manual*. U.S. Department of Transportation, Publication No. FHWA-SA-97-070.

Gassler, G., & Gudehus, G. (1981). Soil nailing: Load transfer mechanism and dimensioning. *Proceedings of the 10th ICSMFE*. Stockholm.

Genest, C., & Favre, A.-C. (2007). Everything you always wanted to know about copula modelling but were afraid to ask. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(4), s. 347-368.

Gingold, R. A., & Monaghan, J. J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: Theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181(3), s. 375–389.

Goh, A. T. (1995). Empirical design in geotechnics using neural networks . *Geotechnique*, 45(4), s. 709–714.

Goh, A. T., Goh, S. H., & Zhang, Y. (2020). A review of application of artificial intelligence in geotechnical engineering. *Automation in Construction*, 113., (s. 103-105.).

Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Géotechnique*, 49(3), 387-403.

Gunther, J., Holm, G., Westberg, G., & Eriksson, H. (2004). Modified Dry Mixing (MDM)—a new possibility in Deep mixing. *In Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, (s. 1375-1384).

Güler, H., & Ergün, M. (2018). Şev stabilitesine etki eden zemin parametrelerinin duyarlılık analizi. *Geoteknik Dünya*, 12(3), s. 55–68.

Hamed, E., & Demiröz, A. (2024). Optimization of geotechnical characteristics of clayey soils using fly ash and granulated blast furnace slag-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 441, 137488.

Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning (2nd ed.)*. Springer.

Hausmann, M. R. (1990). *Engineering Principles of Ground Modification*. McGraw-Hill.

Hvorslev, M. J. (1948). *Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purposes*. Vicksburg, Mississippi: Waterways Experiment Station.

Itasca, C. G. (2000). *FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua (Version 4.0)*. Minneapolis: Itasca.

Ivanov, V., & Chu, J. (2008). Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7(2), s. 139–153.

Karabulut, M., & Alperen, Y. (2021). Parametrik modelleme ile zemin enjeksiyon performans değerlendirmesi. *İnşaat Teknolojileri Dergisi*, 16(1), 25–39.

Karaköse, M. (2019). Yumuşak kil zeminlerde sahada yapılan kesme testlerinin analizine yönelik bir yaklaşım. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dergisi*, 38(2), 113–128.

Karataş, İ., & Cihan, E. (. (2022). MICP (Mikrobiyal İndüklenmiş Kalsit Çökmesi) ile Zemin İyileştirmesi: Laboratuvar Ölçekli Bir Çalışma. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Dergisi*, 10(1), 43–52.

Karol, R. H. (2003). *Chemical grouting and soil stabilization*. New Jersey: CRC Press.

Kaya, E. (2020). Fiber optik sensörlerle gerçek zamanlı zemin izleme teknolojileri . *Jeoteknik Araştırmalar*, 12(1), 23-37.

Khosrowshahi, F., & Arayıcı, Y. (2012). Roadmap for implementation of BIM in the UK construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 19(6), s. 610–635.

Kim, D. H., Rittmann, B. E., & Kim, S. J. (2008). Combination of electrokinetics and bioaugmentation: Effective and innovative remediation of contaminated sites. *Biodegradation*, 19(6), s. 837–846.

Koerner, R. M. (1998). *Desingning with geosynthetics*. New Jersey: Prentice Hall.

Kurtuluş, B., & Balcı, M. (2020). Derin öğrenme ile kazı sonrası oturma tahmini: İstanbul metro hattı örneği. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 16(1), s. 78-91.

Laloui, L., & Ferrari, A. (2019). *Energy Geotechnics: Advances in Theory and Practice*. Springer.

Lancaster, P., & Salkauskas, K. (1981). Surfaces generated by moving least squares methods. *Mathematics of Computation*, 37(155), s. 141-158.

LeCun, Y. B., & Hinton, G. (2015). Deep learning. (s. 436–444). *Nature*, 521.

Liu, W. K., & Gu, L. (2001). A brief overview of meshfree methods. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 50(5), s. 1129–1146.

Lombardi, G. (2003). Grouting of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(4), s. 457–470.

Lucy, L. B. (1977). A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *The Astronomical Journal*, 82, s. 1013–1024.

Lunne, T., Berre, T., & Strandvik, S. (1997). Strength and deformation properties of Norwegian soft marine clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(3), 457–478.

Lunne, T., Robertson, P. K., & Powell, J. J. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. EveFN Spon.

Madhyannapu, R., Puppala, A., Bhadriraju, V., & Nazarian, S. (2009). Deep Soil Mixing (DSM) Treatment of Expansive Soils. *Us-China Workshop on Ground Improvement Technologies* (s. 130-139). Asce.

Mallon, A., & Finnegan, W. (2017). Geophysical Survey Methods in Geotechnical Engineering. . *International Journal of Geophysics*, 12(1), s. 52-68.

Mayne, P. W. (2007). Geotechnical site characterization using piezocone tests: 2006 James K. Mitchell Lecture. *Proceedings of the 2nd International Conference on Site Characterization*.

Mengé, P. (2007). Surface compaction of hydraulic fills of limited thickness. *In Presentation made at T.C. 17 Workshop at I4ECSMGE*, 24-27.

Mihret, D. G., & Thakur, V. (2022). Smart monitoring technologies in geotechnical engineering: A review. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 11(1), 45–59.

Mitchell, J. K. (1981). *Soil improvement: State of the art report*. Stockholm: Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE) Vol. 4.

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc.

Mitchell, T. (1997). *Machine Learning*. McGraw-Hill.

Muse, N. M. (2023). Kohezyonsuz Zemin Özelliklerinin İyileştirilmesinde Geopolimerlerin Kullanılması. Konya: Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü.

Nelsen, R. B. (2006). *An Introduction to Copulas*. Springer Science ve Business Media.

O’Sullivan, C. (2011). *Particulate Discrete Element Modelling: A Geomechanics Perspective*. CRC Press.

Oñate, E., Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2011). *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Butterworth-Heinemann.

Önalp, A. (1985). Samsun Liman Sahasında Dinamik Konsolidasyon Uygulaması. *Türkiye İnşaat Mühendisliği 8. Teknik Kongresi*, (s. 189-208). Ankara,

Özaydın, K. (1999). *Zemin Mekaniği*. İstanbul: Birsan Yayınevi.

Özçınar, E. (2024). Geopolimer ile İyileştirilen Zeminlerin Optimum Karışım Oranlarının Yapay Zekâ Destekli Belirlenmesi. Şanlıurfa: Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü – İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.

Pamukcu, S., & Wittle, J. K. (1992). Electrokinetic removal of selected heavy metals from soil. *Environmental Progress*, 11(3), s. 241–250.

Parkin, R. C., & Bratley, A. (1982). The development of a resistivity cone for site investigation. *Ground Engineering*, 15(1), 30–37.

Pekrioğlu Balkıs, A. (2009). Enjeksiyon Yöntemleriyle Zemin İyileştirilmesi. 3. *Geoteknik Sempozyumu*. Adana: Çukurova Üniversitesi.

Phoon, K. K., & Kulhawy, F. H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), s. 612–624.

Potts, D. M., & Zdravković, L. (1999). *(Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory*. Thomas Telford Publishing.

Provis, J. L., & van Deventer, J. S. (2009). *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. Woodhead Publishing.

Rahman, M. M., Hora, R. N., Ahenkorah, I., Beecham, S., Karim, M. R., & Iqbal, A. (2020). State-of-the-Art Review of Microbial-Induced Calcite Precipitation and Its Sustainability in Engineering Applications. *Sustainability*, 12(15), s. 6281. <https://doi.org/10.3390/su12156281>.

Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, s. 686–707.

Raju, V., & Sondermann, W. (2005). Application of the vacuum preloading method in land reclamation and soil

improvement projects. Chapter 21, Ground Improvement - Case Histories. B. Indraratna ve J. Chu (Eds.), Elsevier, .

Reserchgate. (3 Nov 2025, Kasım 3).
https://www.researchgate.net/figure/The-vane-shear-test_fig13_271444045 adresinden alındı

Robertson, P. K. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 442–459.

Robertson, P. K. (2010). Soil classification using the cone penetration test: a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(11), 1337–1355.

Saran, O., & Demiröz, A. (2022). Zemin Stabilizasyonunda Bazalt Fiber ve Uçucu Kül Kullanımının Araştırılması. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 10(2), 495-511.

Saran, O., & Demiröz, A. (2025). Strength improvement and crack mitigation in clay soil using basalt fiber and pozzolanic additives. *Geotechnical and Geological Engineering*, 43(7), 367.

Schlosser, F., & Guilloux, A. (1991). Soil nailing: Application and analysis. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Tokyo.

Scientific Figure on ResearchGate. (2025, Kasım 3).
https://www.researchgate.net/figure/The-in-situ-deep-soil-mixing-method_fig6_326097396 adresinden alındı

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1970). *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses*. Berkeley: Report to University of California.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9), 1249–1273.

Selçukhan, O., & Ekinci, A. (2020). Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Yaygın Kullanımına Bağlı Değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), s. 481–496.

Sherwood, P. (1993). *Soil Stabilization with Cement and Lime*. HMSO.

Sherwood, P. (1993). *Soil Stabilization with Cement and Lime*. HMSO.

Shukla, S. K. (2017). Fundamentals of geosynthetic engineering. *CRC Press*.

Sisol, M., Drabová, M., & Mosej, J. (2014). Alkali activation of fresh and deposited black coal fly ash with high loss on ignition. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*.

Slocombe, B. C. (2004). *Dynamic compaction*. In M. P. Moseley & K. Kirsch (Eds.), *Ground Improvement*. New York: 2nd Ed.: Spon Press.

Smith, G. D. (1985). *Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Methods*. Oxford University Press.

Smith, I. M., & Griffiths, D. V. (2004). *Programming the Finite Element Method (4th ed.)*. Wiley.

Smith, J. M., & Johnson, D. L. (2017). Advances in rapid impact compaction for silty soils. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 22(4), s. 310–328.

Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), s. 357–375.

Şahin, A., & Koç, H. (2021). Yüksek fırın cürufu bazlı jeopolimerlerin mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesi.

Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 9(4), s. 301–312.

Terashi, M. (2003). The state of practice in deep mixing methods. *Third International Conference on Grouting and Ground Treatment*, (s. 1–34).

Topolnicki, M. (2004). Deep soil mixing—A brief history, current state-of-the-art, and future development. *Proceedings of the International Conference on Deep Mixing*.

Türker, C., & Akcamete, A. (2017). BIM temelli zemin enjeksiyon süreci yönetimi: Bir baraj projesi örneği. *İnşaat Mühendisliği Dergisi*, 28(4), s. 223–235.

U.S.Army. (1984). *U.S. Army Corps of Engineers, “Engineering and Design: Grouting Technology,”*. CECW-EG Engineer Manual.

Ünlü Şahan, M. (2016). *Yapım İşlerinde Zemin İyileştirme Yöntemleri Uzmanlık Tezi*, İller Bankası Anonim Şirketi.

Warner, J. (2004). *Practical Handbook of Grouting: Soil, Rock, and Structures*. Wiley.

Welsh, J. P., & Burke, G. K. (2000). Advances in grouting technology. *In ISRM International Symposium*. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

Woodward, J. (2005). *An introduction to geotechnical processes*. CRC Press.

Yee, K., & Aun, O. T. (2010). Ground Improvement—A Green Technology towards a Sustainable Housing, Infrastructure and Utilities Developments in Malaysia. *Geotechnical Engineering*, 41(1), s. 123.

Yeung, A. T. (1994). Electrokinetic flow processes in porous media and their applications. *Advances in Porous Media*, 2, s. 309–395.

Yılmaz, A., & Coşgun, T. (2020). Şev stabilitesinin gerçek zamanlı izlenmesinde BIM tabanlı yaklaşım. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Dergisi*, 44(1), s. 33–45.

Yılmaz, E., & Aksoy, C. (2016). Derin kazılarda zemin davranışlarının saha testleriyle modellenmesi: Kadıköy-Kartal metro hattı örneği. *İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 25(4), s. 59–73.

Yılmaz, H., & Özdemir, M. (2013). Zeminin dinamik sıkıştırılması ve iyileştirme teknikleri: Uygulamalar ve performans analizi. *Mühendislik Dergisi*, 27(3), s. 233–245.

Zhang, J., Chen, Q., & Wang, Y. (2004). Numerical modeling of soil liquefaction: A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(5), 333–346.

Zhang, J., Robertson, P. K., & Brachman, R. W. (2002). Estimating liquefaction potential of sand using artificial neural network. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(3), s. 622–639.

Zhou, D., Lu, D., & Guo, Y. (2019). Review of electrokinetic remediation technologies for the removal of heavy metal pollutants from soil . *Journal of Environmental Management*, 246, s. 29–39.

Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics (6th ed.)*. Elsevier.

Zuo, L., Zhang, L. M., & Ng, C. W. (2018). Geotechnical reliability analysis: A review of recent progress. *Georisk*, s. 149-172.

BÖLÜM 8

BİTİŞİK NİZAM YAPILARDA ANKRAJLI FORE KAZIK UYGULAMASI

1. MERTCAN YAKUT¹
2. MUSTAFA VEKLİ²

Giriş

Sanayileşme, hızlı nüfus artışı ve kentleşme süreçleri, özellikle büyük metropollerde mevcut yapı stokunun yenilenmesini zorunlu hâle getirmiştir. Türkiye özelinde, 1999 Marmara Depremi sonrasında yapı güvenliği konusundaki farkındalığın artması, kentsel dönüşüm uygulamalarını hızlandırmış; buna paralel olarak, sınırlı parsel alanlarında daha derin bodrumlu yapıların inşa edilmesi yaygınlaşmıştır. Özellikle merkezi iş alanlarında, otopark ve teknik hacim ihtiyacının artması, bodrum kat sayılarının çoğalmasına ve buna bağlı olarak derin kazı gereksiniminin ortaya çıkmasına neden olmuştur (Clough & O'Rourke, 1990).

Geleneksel kazı destek sistemleri, geniş alanlara sahip müstakil parseller için yeterli olabilmekteyken, kentsel dönüşüm

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Ondokuzmayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Orcid: 0009-0005-8915-0922

² Doç.Dr, Ondokuzmayıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0002-5850-731X

kapsamında çoğunlukla karşılaşılan dar ve bitişik nizam parsellerde yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda, yüksek rijitliğe ve kontrollü deformasyon davranışına sahip iksa sistemleri ön plana çıkmış; ankrajlı fore kazık duvarları, bu ihtiyaca cevap veren en yaygın çözümlerden biri hâline gelmiştir (Bowles, 1996).

Bitişik Nizam Yapılarda Karşılaşılan Temel Mühendislik ve Hukuki Zorluklar

Bitişik nizam kazılarda karşılaşılan en önemli mühendislik problemleri; kazı kaynaklı yatay yer değiştirmelerin sınırlandırılması, komşu yapı temelleri üzerindeki ilave gerilmelerin kontrol altına alınması ve mülkiyet haklarına bağlı hukuki kısıtların aşılmasıdır. Komşu yapıların çoğunlukla eski yönetmeliklere göre inşa edilmiş olması, bu yapıların deformasyona karşı toleransını azaltmakta ve kazı sırasında oluşabilecek küçük yer değiştirmelerin dahi ciddi hasarlara yol açabilmesine neden olmaktadır (Burland, 1995).

Buna ek olarak, ankraj uygulamalarının komşu parsel altına girmesi durumunda ortaya çıkan hukuki süreçler, mühendislik tasarımını doğrudan etkileyen bir parametre hâline gelmektedir. Bu bağlamda bitişik nizam kazılarda, mühendislik çözümleri yalnızca teknik yeterlilik açısından değil, aynı zamanda uygulanabilirlik ve hukuki uygunluk açısından da değerlendirilmelidir.

Çalışmanın Amacı, Kapsamı ve Bölüm Yapısı

Bu çalışmanın amacı, bitişik nizam yapılarda kullanılan ankrajlı fore kazık iksa sistemlerinin tasarım esaslarını, zemin-yapı etkileşimi çerçevesinde bütüncül bir yaklaşımla ele almaktır. Çalışma kapsamında, teorik tasarım ilkeleri, sayısal analiz yöntemleri, uygulama teknikleri ve izleme sistemleri birlikte değerlendirilmiş; elde edilen bilgiler, gerçek bir proje uygulaması üzerinden somutlaştırılmıştır.

BİTİŞİK NİZAM YAPILARDA ZEMİN–YAPI ETKİLEŞİMİ VE PERFORMANS KRİTERLERİ (TBDY 2018)

Bitişik nizam kazılarda zemin–yapı etkileşimi problemi, kazı destek sisteminin performansını belirleyen en kritik mühendislik konularından biridir. Kazı sırasında zeminde meydana gelen gerilme yeniden dağılımları, hem iksa sisteminde iç kuvvet artışlarına hem de komşu yapılarda ilave deformasyonlara neden olmaktadır. Bu bağlamda, komşu yapıların temel sistemleri ve zemin koşulları, iksa tasarımının ayrılmaz bir parçası olarak ele alınmalıdır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) kapsamında, derin kazıların mevcut yapılara etkisi, yerel zemin sınıfı, tasarım deprem düzeyi (DD-1, DD-2) ve performans hedefleri ile birlikte değerlendirilmelidir.

Komşu Bina Temellerinin Kazı Üzerindeki Ek Sürşarj Etkileri

Komşu yapı temelleri, kazı duvarı arkasında ilave bir sürşarj yükü oluşturarak aktif toprak basınçlarını artırmaktadır. Literatürde, çok katlı betonarme binalar için bu sürşarj yükünün 10–30 kPa aralığında, ağır ve rijit yapılarda ise 40 kPa’ya kadar çıkabildiği belirtilmektedir (Das, 2010). Bu ilave yük, kazı duvarında oluşan maksimum eğilme momentlerini ve ankraj kuvvetlerini doğrudan artırmaktadır.

Sığ temelli yapılarda, temel tabanından yayılan gerilme bulunun kazı duvarı ile çakışması durumunda, yatay basınç dağılımı klasik Rankine veya Coulomb yaklaşımlarından önemli ölçüde sapabilmektedir. Bu bağlamda bitişik nizam kazılarda sürşarj yüklerinin homojen yayılı yük olarak modellenmesi çoğu zaman güvenli tarafta kalmak açısından tercih edilmektedir.

Tablo 1. Komşu yapı kaynaklı tipik sürşarj yükleri (uygulamada sık kullanılan aralıklar).

Komşu yapı türü (temsili)	Sürşarj yükü, q (kPa)	Not
3–6 kat betonarme çerçeve	10–30	Ön boyutlandırmada yaygın aralık
Rijit/ağır yapı (yüksek katlı, yoğun dolu)	30–40	Emniyetli tarafta kabul için üst sınır
Trafik/yaya yükleri (kentsel koşullar)	5–15	Yol/otopark etkisi ayrıca değerlendirilir

(Das, 2010).

Kazı Kaynaklı Deformasyonların Mevcut Yapıların Davranışı Üzerindeki Etkileri

Kazı sırasında meydana gelen yatay yer değiştirmeler, komşu yapılarda diferansiyel oturma ve dönmelere neden olmaktadır. Bu deformasyonlar, taşıyıcı sistem elemanlarında ilave iç kuvvetlerin oluşmasına yol açmakta ve özellikle gevrek davranış gösteren yığma yapılarda ciddi hasar riskleri doğurmaktadır. Yapısal hasarın büyüklüğü, mutlak oturmadan ziyade oturma gradyanı ve açısız sapma ile daha yakından ilişkilidir (Burland, 1995).

Sayısal ve deneysel çalışmalar, kazı duvarı arkasında maksimum yatay deplasmanın genellikle kazı derinliğinin %0.2–0.4’ü mertebesinde gerçekleştiğini göstermektedir. Ankrajlı ve rijit iksa sistemlerinde bu oran %0.1–0.2 seviyelerine kadar düşürülebilmektedir (Clough & O’Rourke, 1990).

Kabul Edilebilir Deformasyon Sınırları ve TBDY 2018 Performans Yaklaşımı

Mevcut yapıların hasar değerlendirmesinde, Burland tarafından önerilen açısız sapma (angular distortion) kriterleri

yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna göre, 1/500'den küçük açıl sapmalar genellikle ihmal edilebilir hasar seviyesine karşılık gelirken, 1/300–1/150 aralığı orta düzey hasar, 1/150'den büyük değerler ise ciddi yapısal hasar riski olarak değerlendirilmektedir (Burland, 1995).

Tablo 2. Bitişik nizam kazılarda komşu yapı hasar değerlendirmesi için yaygın deformasyon ölçütleri.

Performans/hasar düzeyi (temsili)	Açıl sapma, β	Açıklama
İhmal edilebilir / çok hafif	$< 1/500$	İnce saçak/kaplama çatlakları görülebilir
Orta düzey hasar	$1/300 - 1/150$	Duvar çatlakları, servis verilebilirlik etkilenebilir
Ciddi yapısal risk	$> 1/150$	Taşıyıcı sistemde hasar olasılığı artar

(Burland,1995).

Yatay ötelenmeler için ise, bitişik nizam kazılarda kabul edilebilir sınır değerler genellikle kazı derinliğinin %0.1–0.3'ü aralığında alınmaktadır. Bu sınırların aşılması durumunda, özellikle rijit ve eski yapı stokunda çatlak oluşumu ve servis verilebilirlik problemleri kaçınılmaz hâle gelmektedir. TBDY 2018'e göre, mevcut yapıların bitişğinde gerçekleştirilen kazılarda, kazı kaynaklı deformasyonların deprem etkileri ile birleşik olarak değerlendirilmesi ve yapıların hedeflenen performans düzeylerinin (Sınırlı Hasar, Kontrollü Hasar) sağlanması esastır.

ANKRAJLI FORE KAZIK İKSA SİSTEMLERİNİN TASARIM ESASLARI (TBDY 2018 VE EUROCODE 7)

Ankrajlı fore kazık sistemleri, bitişik nizam yapılarda derin kazıların güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlayan, yüksek rijitlik ve aktif deformasyon kontrolü sunan iksa çözümleridir. TBDY 2018 kapsamında bu tür sistemler, deprem etkileri altında mevcut ve yeni yapıların güvenliğini sağlayacak şekilde tasarlanmalı; kazı destek sistemlerinin deprem sırasında ve sonrasında stabilitesini koruyacak performans kriterlerini sağlaması beklenmektedir. Bu sistemlerin tasarımında temel hedef; global stabilitenin sağlanmasının yanı sıra, komşu yapılarda oluşabilecek oturma, dönme ve çatlak hasarlarının kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutulmasıdır. Bu bağlamda tasarım yaklaşımı, yalnızca taşıma gücü esaslı değil, aynı zamanda deformasyon temelli bir mühendislik anlayışı üzerine kurulmalıdır.

Bitişik nizam kazılarda iksa sistemlerinin performansı; kazı derinliği (H), zemin tabakalanması, yeraltı suyu seviyesi, komşu yapıların temel türü ve ankraj konfigürasyonu gibi çok sayıda parametreden etkilenmektedir. Ankrajlı fore kazık sistemleri, bu parametrelerin birlikte değerlendirilmesine olanak tanıyan esnek bir tasarım altyapısı sunmaktadır (Clough & O'Rourke, 1990).

Kazık Geometrisinin Belirlenmesi ve Rijitlik Temelli Boyutlandırma

Fore kazık duvarlarının geometrik tasarımı; kazık çapı ($\emptyset$), kazıklar arası aks mesafesi (s) ve kazıkların kazı tabanı altına soketlenme derinliği (L_s) parametrelerine bağlıdır. Bu parametreler, hem iç kuvvet dağılımını hem de sistemin yatay deplasman davranışını doğrudan etkilemektedir.

Uygulamada, bitişik nizam kazılarda kullanılan fore kazık çapları çoğunlukla Ø65 cm ile Ø120 cm aralığında seçilmektedir. Kazık çapının artması, kesit atalet momentini artırarak eğilme rijitliğini önemli ölçüde yükseltmektedir. Atalet momenti, dairesel kesitli bir kazık için $I = \pi \cdot D^4 / 64$ bağıntısı ile ifade edilmekte olup, çapta meydana gelen küçük artışlar dahi rijitlik üzerinde büyük etki yaratmaktadır (Bowles, 1996).

Kazık aks aralıkları genellikle 2.0–3.0 m aralığında seçilmekte olup, daha sık aralıklar duvar sürekliliğini artırarak yatay yer değiştirmelerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Ancak aks aralığının azaltılması, yapım süresini ve maliyeti artırdığından, bu parametre deformasyon temelli analizler ışığında optimize edilmelidir.

Tablo 3. Fore kazık geometrisi için uygulamada yaygın kullanılan aralıklar.

Parametre	Tipik aralık	Tasarıma etkisi
Kazık çapı, Ø (cm)	65 – 120	Rijitlik ve moment kapasitesi
Kazık aks aralığı, s (m)	2.0 – 3.0	Duvar sürekliliği ve deplasman kontrolü
Soket boyu, L_s / H	%30 – %50	Dönme stabilitesi

(Bowles, 1996; Das, 2010).

Kazıkların kazı tabanı altına soketlenme derinliği (L_s), dönmeye karşı stabilitenin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Literatürde, soket boyunun kazı derinliğinin en az %30–50’si kadar olması gerektiği belirtilmekte; ancak bitişik nizam koşullarında bu oran çoğu zaman artırılmaktadır (Das, 2010). Pasif Zemin Direncinin Mobilizasyonu ve Soket Boyu Tasarım Kriterleri

Kazıkların kazı tabanı altında kalan kısmında mobilize edilen pasif zemin direnci, iksa sisteminin dönme stabilitesini sağlayan

temel mekanizmadır. Pasif direnç hesabında, pasif toprak basıncı katsayısı (K_p) kullanılarak zemin direnci belirlenmektedir. Ancak bitişik nizam kazılarda, kazı tabanı yakınındaki zemin tabakalarında oluşan gevşeme ve örselenme nedeniyle, pasif direncin tamamının seferber edilmesi gerçekçi değildir.

Bu bağlamda Eurocode 7’de önerildiği üzere, kazı tabanı altındaki yaklaşık 0.50–1.00 m kalınlığındaki zemin tabakası analiz dışı bırakılmakta ve pasif direnç emniyetli tarafta değerlendirilmektedir (EN 1997-1). Ayrıca yeraltı suyunun yüksek olduğu durumlarda, efektif gerilmelerdeki azalma nedeniyle pasif direncin önemli ölçüde düşeceği dikkate alınmalıdır.

Fore Kazıkların Betonarme Tasarım İlkeleri ve Donatı Düzenlemeleri

Fore kazıkların betonarme tasarımı, TS 500 ve TS EN 1536 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmelidir. Maksimum eğilme momentlerinin olduğu bölgeler, genellikle kazı tabanı ile ilk ankraj seviyesi arasındaki kazık kesitlerinde yoğunlaşmaktadır. Bu bağlamda boyuna donatı oranı bu bölgelerde artırılmakta, minimum donatı oranı ise genellikle %1.0–1.5 aralığında seçilmektedir.

Beton sınıfı, bitişik nizam uygulamalarda genellikle C30/37 ve üzeri olarak tercih edilmekte; bu sayede hem dayanım hem de dayanıklılık açısından güvenli bir performans hedeflenmektedir. Donatı kafeslerinin rijitliği, beton dökümü sırasında segregasyon ve kafes burkulması risklerini azaltacak şekilde tasarlanmalıdır.

Ankraj Tasarımı: Serbest Boy, Kök Boyu ve Taşıma Kapasitesi

Ankrajlar, iksa sisteminin aktif deformasyon kontrolünü sağlayan temel elemanlardır. Ankraj tasarımında ilk adım, serbest boyun (L_f) teorik aktif kayma yüzeyinin tamamen dışında kalacak şekilde belirlenmesidir. Rankine aktif toprak basıncı teorisine göre

zeminlerde ise 50–100 kN/m² aralığında alınmaktadır (FHWA, 2005).

Ankraj Öngerme Kuvvetleri, Zaman Bağımlı Etkiler ve Deprem Davranışı

Ankrajlara uygulanan öngerme kuvveti, kazı sırasında iksa arkasındaki zemin gevşemesini engelleyerek yatay deplasmanların kontrol altına alınmasını sağlamaktadır. Öngerme kuvveti genellikle ankraj tasarım yükünün %60–80’i mertebesinde seçilmektedir.

Zamanla çelik halatlarda meydana gelen gevşeme (relaxation) ve özellikle kohezyonlu zeminlerde görülen sürünme (creep) etkileri nedeniyle ankraj kuvvetlerinde azalma meydana gelmektedir. Uzun dönemli izleme çalışmalarında bu kayıpların %5–20 aralığında olduğu rapor edilmiştir. Bu bölümde güvenli tarafta kalmak amacıyla %10–15 aralığında kuvvet kaybı öngörülmüş ve tasarım bu kabule göre yapılmıştır (FHWA, 2005; Brinkgreve vd., 2016). Ayrıca TBDY 2018 doğrultusunda, ankrajlı iksa sistemlerinin deprem etkileri altında ani dayanım kaybı yaşamaması için, ankraj ve kazık elemanlarının sünek davranış gösterecek şekilde boyutlandırılması ve deprem yüklerinin birleşik yük kombinasyonları içerisinde değerlendirilmesi esas alınmıştır.

Kuşak Kirişleri: Yük Aktarımı, Rijitlik Katkısı ve Detaylandırma

Ankraj kuvvetlerinin fore kazıklara üniform şekilde dağıtılması kuşak kirişleri aracılığıyla sağlanmaktadır. Kuşak kirişleri genellikle çift I profilli çelik elemanlar veya yerinde dökme betonarme kirişler olarak tasarlanmaktadır. Kirişler, ankraj noktaları arasında sürekli kiriş kabulü ile analiz edilmekte; eğilme momenti ve kesme kuvveti tahkikleri yapılmaktadır.

Ankraj başlıklarının kiriş üzerinde oluşturduğu lokal basınç gerilmeleri ayrıca kontrol edilmekte, gerekli durumlarda berkitme

levhaları kullanılarak ezilme ve zımbalama riskleri azaltılmaktadır (Bowles, 1996).

Komşu Parsel Altındaki Ankraj Uygulamaları: Teknik ve Hukuki Boyut

Bitişik nizam kazılarda ankrajların çoğu zaman komşu parsel altına girmesi kaçınılmaz olmaktadır. Türk Medeni Kanunu gereği bu durumlarda mülk sahibinden yazılı muvafakat alınması zorunludur. Muvafakat alınamayan durumlarda, ankrajsız daha rijit iksa sistemleri veya alternatif kazı destek yöntemleri değerlendirilmelidir.

Bu bağlamda hukuki kısıtlar, bitişik nizam projelerde yalnızca idari bir konu değil, doğrudan tasarım parametresi olarak ele alınmalı ve mühendislik çözümleri bu gerçeklik doğrultusunda geliştirilmelidir.

SAYISAL ANALİZ VE MODELLEME YAKLAŞIMLARI

Bitişik nizam kazılarda iksa sistemlerinin davranışını öngörebilmek amacıyla literatürde farklı sayısal analiz yaklaşımları kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar, kazı destek sistemlerinin stabilite ve deformasyon performansının değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Limit Denge Yaklaşımları

Limit denge yöntemleri, iksa sistemlerinin genel stabilitesinin değerlendirilmesinde uzun yıllardır kullanılan klasik mühendislik yaklaşımlarıdır. Bu yöntemler, aktif ve pasif zemin basınçlarının denge koşullarına dayanmakta olup, özellikle ön tasarım aşamalarında pratik ve hızlı çözümler sunmaktadır. Ancak limit denge yaklaşımları, zemin–yapı etkileşimini ve kazı sürecinde

meydana gelen deformasyonların gelişimini ayrıntılı biçimde temsil edememektedir.

Deformasyon Temelli Sayısal Analiz Yaklaşımları

Deformasyon temelli analiz yöntemleri, zemin davranışının doğrusal olmayan özelliklerini ve kazı aşamalarının sistem üzerindeki etkilerini dikkate alarak daha gerçekçi sonuçlar üretmektedir. Bu yaklaşımlar, özellikle bitişik nizam kazılarda komşu yapıların performansının değerlendirilmesinde önemli avantajlar sağlamaktadır.

Aşamalı Kazı Modelleme İlkeleri

Kazı destek sistemlerinin davranışı, kazı ve destek elemanlarının devreye alınma sırasına büyük ölçüde bağlıdır. Aşamalı kazı modelleme yaklaşımı, kazı adımlarının ve destek sistemlerinin gerçek saha koşullarına uygun biçimde temsil edilmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, kazı sırasında oluşabilecek geçici deformasyonların ve zemin gevşemelerinin daha doğru şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır.

SAHA UYGULAMALARI, YAPIM TEKNİKLERİ VE KALİTE KONTROL

Sarsıntısız Delgi Yöntemleri

Bitişik nizam uygulamalarda, titreşim kaynaklı hasar riskini azaltmak amacıyla sarsıntısız delgi yöntemleri tercih edilmektedir. Bu yöntemler, özellikle hassas yapılara komşu kazılarda önemli avantajlar sağlamaktadır.

Ankraj Enjeksiyonu ve Çekme Deneyleri

Ankrajların tasarım kapasitesinin doğrulanması amacıyla yapılan çekme (kabul) deneyleri, kalite kontrol sürecinin

vazgeçilmez bir parçasıdır. Deney sonuçları, tasarım varsayımlarının sahada doğrulanmasını sağlamaktadır (FHWA, 2005).

Yeraltı Suyu Kontrolü

Yeraltı suyu, kazı stabilitesi ve taban kabarması açısından kritik bir faktördür. Bu bağlamda drenaj ve su indirimi sistemleri, iksa tasarımının ayrılmaz bir parçası olarak ele alınmalıdır.

İZLEME, ENSTRÜMANTASYON VE GÖZLEME DAYALI TASARIM (OBSERVATIONAL METHOD)

Bitişik nizam kazılarda iksa sistemlerinin tasarımı, zemin parametrelerindeki belirsizlikler ve yapım sürecine bağlı değişkenler nedeniyle mutlak doğrulukla öngörülememektedir. Bu bağlamda modern geoteknik mühendisliğinde, yalnızca hesap ve sayısal analizlere dayalı bir tasarım yaklaşımı yerine, saha ölçümleri ile desteklenen ve gerektiğinde tasarımın revize edilmesine olanak tanıyan izleme temelli yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır ve uygulamada belirleyici olmaktadır. Bu anlayış, özellikle TBDY 2018 kapsamında yüksek sismisiteye sahip bölgelerde gerçekleştirilen derin kazılarda kritik önem taşımaktadır.

İnclinometre Ölçümleri ile Yatay Deplasmanların İzlenmesi

İnclinometreler, iksa sistemlerinde yatay yer değiştirmelerin derinlik boyunca dağılımını belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan ölçüm cihazlarıdır. Ölçümler genellikle kazı öncesi referans alınarak başlatılmakta ve kazının her aşamasında tekrarlanmaktadır. Literatürde, ankrajlı ve rijit iksa sistemlerinde maksimum yatay deplasmanların kazı derinliğinin %0.1–0.3’ü aralığında kalması beklenmektedir.

İnclinometre verileri, sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılarak model doğrulaması yapılmasına olanak sağlamaktadır. Ölçülen deplasmanların analiz sonuçlarından belirgin

şekilde sapması durumunda, ankraj öngerme kuvvetlerinin artırılması veya ilave destek seviyelerinin planlanması gibi düzeltici önlemler devreye alınabilmektedir.

Ankraj Yük Hücreleri ve Kuvvet Takibi

Ankraj yük hücreleri (load cells), öngerme kuvvetlerinin zamanla değişimini izlemek amacıyla kullanılmaktadır. Özellikle kohezyonlu zeminlerde, sürünme (creep) ve gevşeme (relaxation) etkileri nedeniyle ankraj kuvvetlerinde azalma meydana gelmesi beklenmektedir. Yapılan saha gözlemleri, bu kayıpların ilk birkaç ay içerisinde daha belirgin olduğunu ve zamanla stabil hâle geldiğini göstermektedir.

Ölçülen ankraj kuvvetleri, tasarımda öngörülen kuvvet kayıpları ile karşılaştırılarak, uzun dönemli stabilitenin sağlanıp sağlanmadığı değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, tasarım varsayımlarının sahada doğrulanması açısından önemli bir kalite kontrol mekanizması oluşturmaktadır.

Optik Ölçümler ve Mevcut Yapıların Davranışı

Bitişik nizam kazılarda, yalnızca iksa sisteminin değil, komşu yapıların davranışının da izlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, total station veya benzeri optik ölçüm sistemleri kullanılarak, mevcut yapıların düşey ve yatay hareketleri düzenli olarak takip edilmektedir.

Optik ölçümlerden elde edilen veriler, açısal sapma (angular distortion) ve diferansiyel oturma hesaplarında kullanılmakta; bu değerlerin Burland tarafından önerilen sınırları aşması durumunda, kazı hızının düşürülmesi veya destek sisteminin güçlendirilmesi gibi önlemler alınmaktadır.

Gözlemsel Yöntem (Observational Method) ve Tasarımın Revizyonu

Gözlemsel yöntem, ilk olarak Peck (1969) tarafından önerilen ve tasarımın saha gözlemleri doğrultusunda aşamalı olarak güncellenmesini öngören bir yaklaşımdır. Bu yöntemde, tasarım aşamasında öngörülen davranış ile ölçülen saha verileri sürekli olarak karşılaştırılmakta ve gerekli durumlarda tasarım parametreleri revize edilmektedir.

Bitişik nizam kazılarda gözlemsel yöntemin uygulanması, hem güvenlik seviyesinin artırılmasına hem de aşırı muhafazakâr tasarımların önüne geçilmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, TBDY 2018'in öngördüğü performansa dayalı tasarım felsefesi ile de uyumludur.

SONUÇLAR, DEĞERLENDİRMELER VE ÖNERİLER

Bu kitap bölümünde, bitişik nizam yapılarda derin kazı gerektiren projelerde yaygın olarak kullanılan ankrajlı fore kazık iksa sistemleri; zemin-yapı etkileşimi, tasarım esasları, sayısal analiz yaklaşımları, saha uygulamaları ve izleme süreçleri çerçevesinde ele alınmıştır. Özellikle kentsel dönüşüm projelerinde karşılaşılan sınırlı parsel koşulları ve mevcut yapıların deformasyona karşı hassasiyeti, iksa tasarımının yalnızca taşıma gücü temelli bir problem olarak ele alınamayacağını ortaya koymaktadır.

Ankrajlı fore kazık sistemleri, yüksek eğilme rijitliği ve aktif öngerme etkisi sayesinde, kazı sırasında zemin gevşemesini sınırlandırmakta ve komşu yapılarda meydana gelebilecek diferansiyel oturma ile açısız sapmaları kontrol altında tutmaktadır. Bu sistemlerin etkinliği; kazık geometrisinin, soket boyunun ve

ankraj konfigürasyonunun zemin koşulları ile uyumlu biçimde belirlenmesine bağlıdır.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) kapsamında, derin kazı destek sistemlerinin mevcut yapılar üzerindeki etkilerinin deprem talepleri ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda ankrajlı fore kazık iksa sistemleri, sünek davranış potansiyeli ve deformasyon kontrolü sağlayan özellikleri ile bitişik nizam kazılar için güvenli bir çözüm sunmaktadır.

Sonuç olarak, bitişik nizam yapılarda gerçekleştirilen derin kazı projelerinde başarı; deformasyon temelli tasarım yaklaşımının benimsenmesi, izleme ve gözlemsel yöntemlerin tasarım sürecine entegre edilmesi ve hukuki kısıtların erken aşamada değerlendirilmesi ile mümkündür. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı zemin koşulları ve kazı geometrileri için ankrajlı iksa sistemlerinin davranışının kuramsal ve deneysel olarak incelenmesi, literatüre önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Anagnostopoulos, S. A. (1988). *Pounding of buildings in series during earthquakes*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 16(3), 443–456.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., & Swolfs, W. (2016). *PLAXIS 2D Reference Manual*. Plaxis bv.
- Burland, J. B. (1995). *Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation*. Proceedings of the International Conference on Damage Assessment of Structures, 118–131.
- Clough, G. W., & O'Rourke, T. D. (1990). *Construction induced movements of in situ walls*. Design and Performance of Earth Retaining Structures, ASCE Geotechnical Special Publication No. 25, 439–470.
- Das, B. M. (2010). *Principles of Foundation Engineering* (7th ed.). Cengage Learning.
- EN 1997-1 (2004). *Eurocode 7: Geotechnical Design – Part 1: General Rules*. European Committee for Standardization.
- FHWA (2005). *Ground Anchors and Anchored Systems* (FHWA-NHI-05-039). Federal Highway Administration.
- Peck, R. B. (1969). *Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics*. Géotechnique, 19(2), 171–187.
- TS 500 (2000). *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*. Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 1536 (2010). *Özel Temel Kazıkları – Fore Kazıklar*. Türk Standartları Enstitüsü.

TBDY (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD).

BÖLÜM 9

FARKLI PÜRÜZLÜLÜKTEKİ İSTİNAT DUVARI TABANLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

1. YAZAR ADI-(BESTAMİ MİRAC SERT)¹

2. YAZAR ADI-(BAHADİR OK)²

3. YAZAR ADI-(SAMİ DÖNER)³

Giriş

Dayanma yapısı olarak da isimlendirilen istinat duvarları farklı seviyeli zeminlerde zemin tutma yapısı olarak kullanılırlar. Maruz kaldıkları yükler, boyutlarının belirlenmesinde önemli bir faktördür (Uray, 2020). İstinat duvarlarının, aktif/pasif yanal zemin basınçları, boşluk suyu basıncı kaynaklı hidrostatik basınçlar, çevresel yapılardan gelen ilave gerilmeler ve deprem durumunda oluşan dinamik etkiler karşısında kabul edilebilir deplasmanlardan fazla deplasman yapmayacak şekilde tasarlanmaları gerekmektedir (Leblebici, 2021). İstinat duvarına etkiyen yanal basınçları, istinat duvarının tuttuğu zeminin kayma dayanımı, endeks özellikleri ve

¹ Yüksek Lisans Öğrenci, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Orcid: 0009-0003-9930-4660

²Doçent, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Orcid:0000-0001-8333-5671

³ Doktor, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Orcid:0000-0002-5934-3548

drenaj faktörleri doğrudan etkilemektedir (Yenidoğan, 2006). Bu bakıma tutulan zeminin geoteknik ve hidrolik iletkenlik özellikleri istinat duvarı tasarımıda etkin parametrelerdir. Bu durumda kayma dayanımı düşük olan kohezyonsuz gevşek veya kohezyonlu yumuşak zeminlerde istinat duvarı tasarımları ve inşaatları geoteknik mühendislerinin karşılaştığı önemli problemlerden birini oluşturmaktadır.

Geoteknik mühendisleri istinat duvarı tasarımlarında dayanma yapısının stabilitesini yaptıkları kayma tahkiki, devrilme tahkiki, taşıma gücü kapasitesi tahkiki, oturma tahkiki ve toptan göçme tahkiki gibi tahkiklerle değerlendirmektedirler. İstinat duvarları yatay kuvvetler etkisinde kaymaya karşı pasif yanal zemin basıncı ve istinat tabanı ile temel zemini arasındaki sürtünme ve adezyon kuvvetleri ile karşı koymaktadır. Kayma dayanımı (τ_f) Denklem 1’de gösterildiği gibi hesaplanır (Das, 2007).

$$\tau_f = C_a + \sigma \tan \delta \quad [1]$$

Burada C_a temel zemini ile istinat duvarı arasındaki adezyonu, σ normal yükü ve δ istinat duvarı ile temel zemini arasındaki ara yüz sürtünme açısını ifade etmektedir.

İstinat duvarı tuttuğu zemine göre yeterli kayma dayanımına sahip değilse yani istinat duvarını kaydırmaya çalışan yatay kuvvetler kaymaya engel olan kuvvetlerden daha büyük olması durumunda kaymaya engel olan kuvvetlerin arttırılması için istinat duvarı tabanına dış ekleme veya istinat duvarı boyutlarını değiştirme gibi çeşitli yöntemlere başvurulabilir (Uzuner, 2010). Bu durumda istinat duvarı ile taban zemini arasındaki sürtünmenin arttırılması (δ açısının arttırılması) da değerlendirilebilir. Son yıllarda birçok araştırmacı yapı elemanı ve temel zemini arasındaki sürtünmeyi incelemiş ve hangi durumlarda bu sürtünmenin arttırılabileceğini tartışmışlardır.

Buna bağılı olarak araştırmacılar çalışmalarında farklı yüzeyler (elik, beton, aħřap vb.) zerinde farklı geometri ve boyutlarda pürüzler üretmişler ve sonuçları karşılaştırabilmek için pürüzlülük değerleri hesap etmişlerdir. Pürüzlülük değerleri hesabında genellikle pürüzlerin geometrik özellikleri ve zemin dane çapları kullanılmıştır (Aksoy, Gr, & İnal, 2016), (Han, Ganju, Salgado, & Prezzi, 2018), (Nardelli, Cacciari, & Futai, 2019), (Janipour, Mousivad, & Bayat, 2022), (Liu, ve diğerleri, 2023), (Su, Zhou, Chen, & Jie, 2018), (Li, Lv, Guo, & Huang, 2021), (Chen, ve diğerleri, 2022), (Namjoo, ve diğerleri, 2022), (Fang, ve diğerleri, 2023). Tablo 1’de bazı araştırmacıların hesapladıkları pürüzlülük değerleri sunulmaktadır.

Tablo 1 nceki çalışmalarda hesap edilmiş pürüzlülük değerleri

Çalışma	Zemi n Tipi	D ₅₀ (mm)	R _a	R _t	R _n (R _z)	R _{max}	R _{max,avg}	r(d)
1.Aksoy ve diğerleri (2016)	Kil	0.57	1.53	11.1 0	6.91	-	-	-
2.Han ve diğerleri (2018)	Silis Kum u	0.23-2.68	1.08-- 9.31 μm		0.002 -- 0.107	0.088 -- 4.812 mm	-	-
3.Nardelli ve diğerleri (2019)	Silis Kum u	SP16=1.7 3 SP100=0. 24	0.006-- 0.418 mm	-	0,051 -- 2.781	-	3.1 -- 61 μm	-
4.Janipou r ve diğerleri (2022)	Kuml u Zemi n	-	-	-	-	-	-	0-2-4-8 mm

5.Liu ve diğ�erleri (2023)	Kum	0.8	0-5-10-15mm	-	-	-	-	-
6.Su ve diğ�erleri (2018)	Kum	1.590-1.020-0.638	-	-	0-0.25-0.5-1-2	-	-	-
7. Li ve diğ�erleri (2021)	Silt	-	-	-	-	0-1-2-4 mm	-	-
8.Chen ve diğ�erleri (2022)	Kum	-	0-10-20-30mm	-	-	-	-	-
9.Namjoo ve diğ�erleri (2022)	Kum	0.23-0.45-0.65-0.89-1.59-2.18	-	-	0.034--1.282	-	0.014--0.912mm	-
10.Fang ve diğ�erleri (2023)	Siltli Kil		-	-	-	-	-	0-0.146-0.254-0.392-0.552

*D₅₀: Zeminlerin %50'sinin geçtiği elek çapı, r ve d: Oluşturulan pürüzlerin yüksekliği, R_a, R_t, R_n, R_{max}, R_{max,avg}: Pürüzlülük değerleri

Bazı araştırmacılar pürüzlülük hesabının sadece pürüz yüksekliği ve dane çapı ile hesap edilmesine ek olarak, pürüzlülük hesabında pürüz kısmının hacminin hesap edilmesini ve buna bağlı olarak pürüzlülük değerlerinin hesap edilmesini  onermişlerdir (Fang, ve diğ erleri, 2023), (Liu, ve diğ erleri, 2023). Literatürde sunulan pürüzlülük hesap yöntemlerinin birbirinden farklı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu bağlamda sabit bir pürüz için hangi yönteme göre pürüzlülük hesap edilmesi gerektiği net değildir. Sabit bir pürüz için farklı yöntemlerle pürüzlülüklerin hesap edilip, birbirleri ile kıyaslanması hem literatürdeki bir boşluğu doldurabilecek hem de

yapı-temel zemini arasındaki sürtünmenin daha doğru değerlendirilmesine katkı sağlayabilecektir.

İstinat duvarı tabanı ile temel zemini arasındaki sürtünmeyi arttırmak için istinat duvarının tabanı pürüzlü olarak inşa edilebilir. Bu pürüzlü taban özellikle prefabrik şekilde üretilip, yerine taşınıp yerleştirilen veya modüler olarak imal edilip arazide birleştirilen istinat duvarları için gerçekleştirilebilir bir hedef olarak görülmektedir. Bu durumda istinat duvarının tabanını pürüzlü olarak imal edebilmek adına 3D (üç boyutlu) yazıcılardan yararlanmak kalıp masraflarını azaltıp üretim işlemini hızlandırarak kolaylaştırabilir. Burada 3D yazıcıdan üretilen prototipler, kalıp gibi kullanılarak pürüzlü tabana sahip istinat duvarları üretimi gerçekleştirilebilir. Ayrıca ilerleyen süreçlerde 3D yazıcının doğrudan istinat duvarı elemanlarının üretimi için kullanılabilir hale gelmesi beklenmektedir.

Bu çalışmada, pürüzlü istinat duvarı tabanı üretimi için kullanılabilmesi düşünülen farklı geometrilerdeki (30, 45 ve 60 derece açılara sahip üçgen ve yamuk) taban pürüzlerinin 3D yazıcı ile basılabilmesi durumu araştırılmıştır. Ayrıca üretilen pürüzlü istinat duvarı tabanları için üç farklı yaklaşımla pürüzlülük hesap edilip, pürüzlülük hesap yöntemlerinin pürüz geometrilerine göre birbirleri ile kıyaslanması bu çalışmanın önemli araştırma konularından biridir.

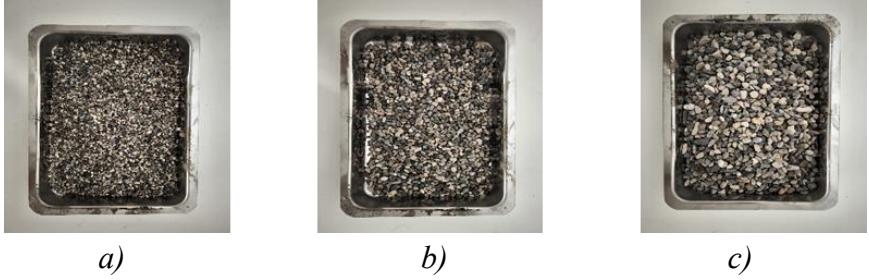
Materyal

Zemin numuneleri

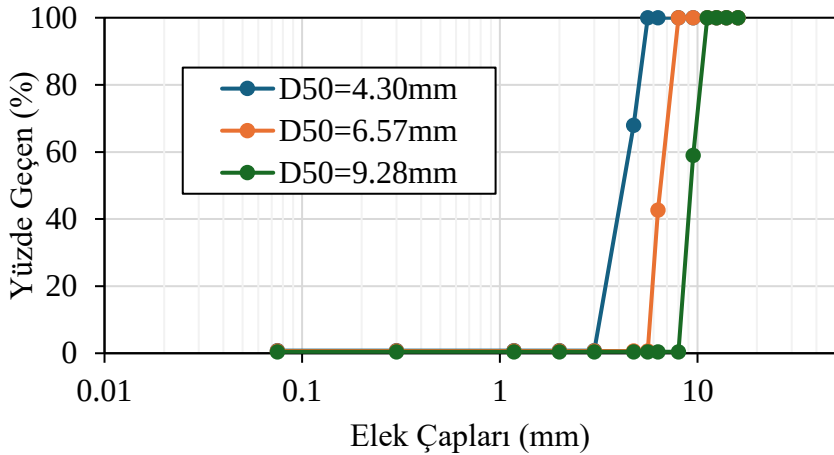
Bu çalışmada, zeminin %50'sinin geçtiği elek çapı (D_{50}) ve pürüz yüksekliği (R_{max}) kullanılarak hesap edilen pürüzlülük değeri için üç temsili zemin değerlendirmeye alınmıştır (Şekil 1). Temsili zeminlerin D_{50} çapları sırası ile 4.30 mm, 6.57 mm, 9.28 mm olup birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre SP, GP ve GP

olarak sınıflandırılmıştır. Temsili zeminlerin elek analizi Şekil 2’de sunulmaktadır.

Şekil 1 Temsili zemin numuneleri a) D_{50} 4.30 mm, b) D_{50} 6.57mm, c) D_{50} 9.28 mm



Şekil 2 Zeminlerin gradasyonları



Filament

Prototip taban pürüzlerinin 3D yazıcıda basımı için sarf malzemesi olarak Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) filamenti kullanılmıştır. PETG filamenti polietilen tereftalat (PET) esaslı bir malzemenin glükol katkısıyla modifiye edilmesiyle elde edilen yarı amorf bir termoplastiktir. Bu yapı, camsı geçiş sıcaklığını düşürerek kırılgenliği azaltmakta ve 3D baskı süreçlerinde daha

kararlı bir üretim ortamı sağlamaktadır (Kuruoğlu, Akgün, & Demir, 2022). Ayrıca PETG, yüksek darbe dayanımı, düşük çekme deformasyonu ve katmanlar arası yapışma kabiliyeti sayesinde Fused Deposition Modelling (FDM) tabanlı sistemlerde PLA ve ABS'ye kıyasla güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Tareh, Mezher, & Daway, 2023), (Ekrem & Yılmaz, 2025).

Metot

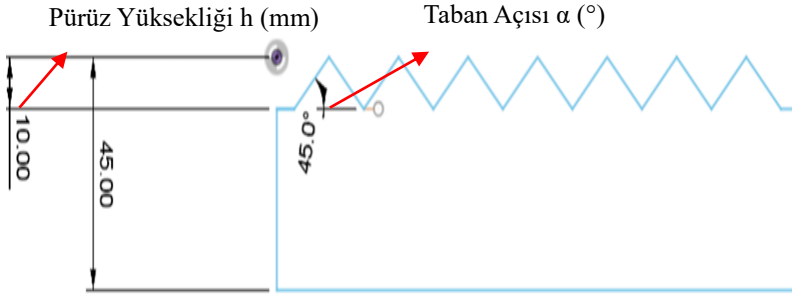
3D yazıcı ile prototip istinat duvarı tabanı pürüzlülüklerinin oluşturulması

Literatür incelenerek yamuk ve üçgen geometriye, 30, 45 ve 60 derece taban eğimine ve 5 mm, 10 mm ve 15 mm dış yüksekliğine sahip taban pürüzleri belirlenmiştir. Belirlenen pürüzlerin özellikleri ve isimlendirilmesi Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de sunulan prototip istinat tabanı pürüzleri 2 boyutta açık kaynak tabanlı Fusion 360 programı ile çizilmiştir. Şekil 3'de Prototip-2b'nin ve Prototip-4'ün iki boyutlu çizimi ile Şekil 4'de Prototip-2b ve Prototip-4'ün üç boyutlu görseli sunulmaktadır. Çalışmada üretilen prototiplerin taban alanı ölçüleri 150 mm x 150 mm ve yüksekliği 45 mm olarak tasarlanmıştır.

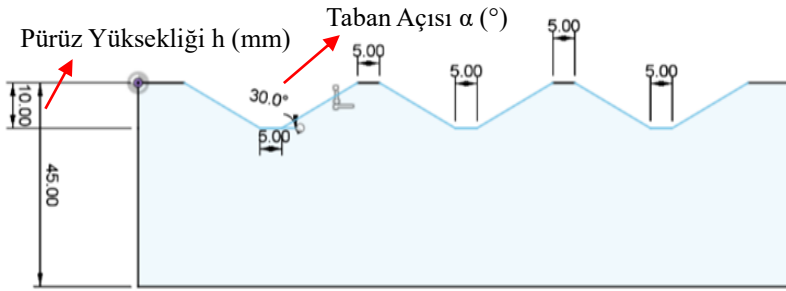
Tablo 2 Prototip taban pürüzlerin geometrik özellikleri

Prototip Adı	Geometri	Taban Açısı α (°)	Pürüz Yüksekliği h (mm)
Prototip-1	Üçgen	30	10
Prototip-2a	Üçgen	45	5
Prototip-2b	Üçgen	45	10
Prototip-2c	Üçgen	45	15
Prototip-3	Üçgen	60	10
Prototip-4	Yamuk	30	10
Prototip-5	Yamuk	45	10
Prototip-6	Yamuk	60	10

Şekil 3 2 Boyutlu çizim a) Prototip-2b (Üçgen $\alpha=45^\circ$ $h=10\text{mm}$) b)
Prototip-4 (Yamuk $\alpha=30^\circ$ $h=10\text{mm}$)

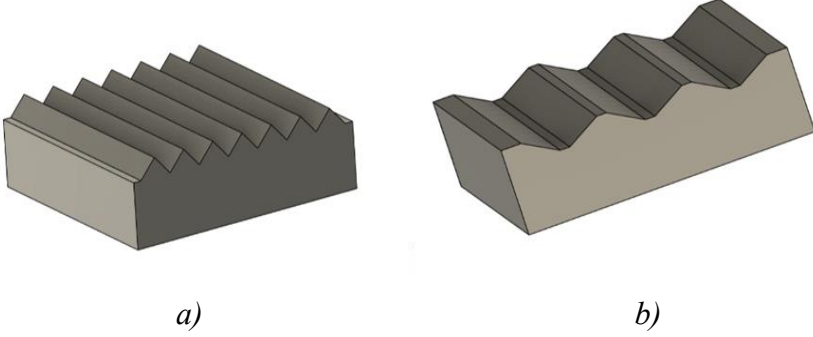


a)



b)

Şekil 4 3 Boyutlu çizim a) Prototip 2b (Üçgen $\alpha=45^\circ$ $h=10\text{mm}$) b) Prototip-4 (Yamuk $\alpha=30^\circ$ $h=10\text{mm}$)



Prototip istinat tabanı pürüzleri 3D yazıcıda basılırken Fused Deposition Modelling (FDM) yöntemi kullanılmıştır. Prototip istinat tabanı pürüzleri %100 doluluk oranında basılmıştır. Ayrıca basım işleminde basım hızı 100mm/s, nozzle kalınlığı 0.4mm, nozzle sıcaklığı 245° ve yatak sıcaklığı 80° olarak ayarlanmıştır. Şekil 5’de basım süreci gösterilmektedir.

Şekil 5 Prototip istinat tabanı pürüzlerinin 3D yazıcıda basım işlemi



Pürüzlülük Hesabı

Bu çalışmada farklı geometrilere sahip pürüzlerin pürüzlülük hesabında, pürüzlülük hesap yöntemlerinin değerlendirilebilmesi için üç farklı pürüzlülük hesabı kullanılmıştır.

Yöntem 1: Alan ve Hacim'e Dayalı Çözüm

Bu yöntemde pürüzlülük hesabı yapılırken alan ve hacimsel özelliklerden faydalanılmıştır. Bu bağlamda pürüzlülük katsayısının hesabında 'm' alan faktörünü temsil ederken 'n' hacim faktörünü temsil etmektedir. Bu katsayıların hesaplanması sırası ile Denklem 2 ve Denklem 3'te sunulmuştur. Ayrıca bu değerlere göre pürüzlülük hesabı Denklem 4'de sunulmuştur (Fang, ve diğerleri, 2023).

$$m = \frac{S_a - ab - 2ah_1 - 2bh_1}{ab} \quad [2]$$

$$n = \frac{(ab \cdot (h_2 - h_1)) - (abh_2 - V)}{ab} = \frac{V - abh_1}{ab} \quad [3]$$

$$r = n * \ln(m) = \frac{V - abh_1}{ab} \times \ln\left(\frac{S_a - ab - 2ah_1 - 2bh_1}{ab}\right) \quad [4]$$

Pürüzlülük hesabında kullanılan a: pürüzün uzunluğu, b: pürüzün genişliği, h₁: pürüzlü plakanın minimum yüksekliği, h₂: pürüzlü plakanın maximum yüksekliği, S_a: pürüzlü plakanın yüzey alanı, V: pürüzlü plakanın hacmidir. Yöntemde elde edilen pürüzlülük katsayısı birimsizdir.

Yöntem 2: Sadece Hacim'e Dayalı Çözüm (Yer değiştiren Kum Metodu)

Bu yöntem, birim hacim ağırlığı bilinen bir kum ile pürüzlü plakanın boşluklarının doldurulduğu ve bu sayede boşluk hacminin elde edilerek pürüzlülük değerinin hesaplanmasını esas almıştır (Denklem 5) (Liu, ve diğerleri, 2023).

$$r = \frac{V_{kum}}{A_a} = \frac{V - V_{pürüz}}{A_a} \quad [5]$$

Denklem 5’de V_{kum} : Kum ile dolan boşluğun alanı, V : Toplam hacim, $V_{pürüz}$: Pürüzlerin Hacmi A_a : Pürüzlerin bulunduğu yüzeyin taban alanı ve r : pürüzlülük değeridir.

Yöntem 3: Zemin Dane Çapı ve Pürüz Yüksekliğine Dayalı Çözüm

Burada ilk iki yöntemden farklı olarak zemin özellikleri hesaba dahil edilmiştir. Denklem 6’da formülü verilen yöntemde pürüzlülük katsayısı, R_{max} değerinin zemin D_{50} değerine bölünmesi ile elde edilmektedir (Su, Zhou, Chen, & Jie, 2018).

$$R_n = \frac{R_{max}}{D_{50}} \quad [6]$$

R_n değeri pürüzlülük katsayısıdır ve birimsizdir. R_{max} (h) değeri ise pürüzlerin yüksekliğidir ve birimi mm’dir. D_{50} zeminin %50 sinin elekten geçtiği dane çapıdır.

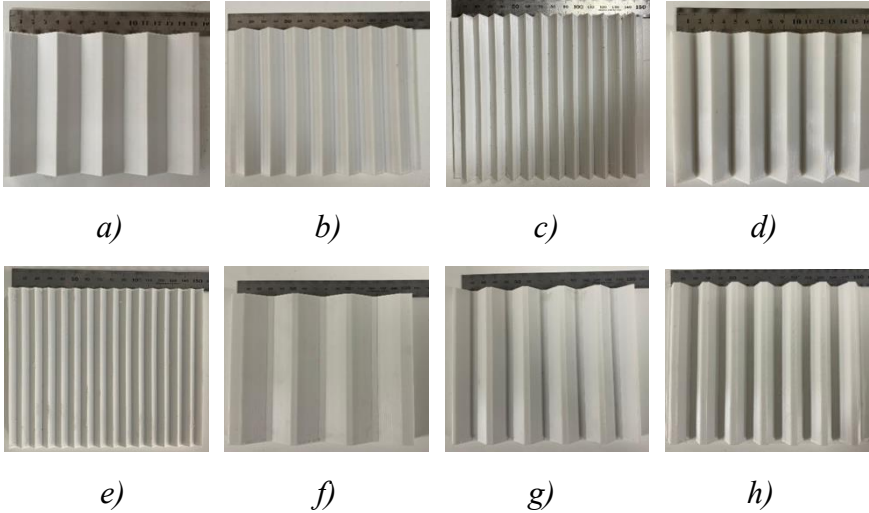
Bulgular ve tartışmalar

Prototip istinat tabanı pürüzlerinin 3D yazıcıda basılmasının değerlendirilmesi

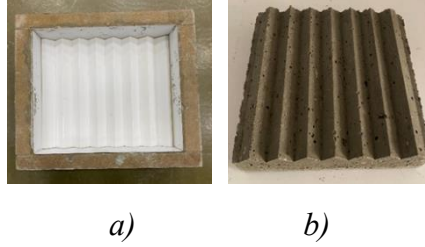
Çalışmada 3D yazıcı ile elde edilen istinat duvarı tabanı pürüzlerinin, istinat duvarının tabanını pürüzlü olarak imal edebilmek adına kalıp olarak kullanılabilmesi durumu değerlendirilmektedir. İnşaat işlerinde betonarme elemanların kalıpları genellikle ahşap işçiliği ile ya da torna veya CNC (Computer Numerical Control System) bir tezgahta kesim işlemi ile gerçekleştirilmektedir. Ahşap işçiliği ile özel kalıpların (pürüzlerin) üretilmesi oldukça zaman alıcı olması nedeni ile yüksek işçilik masrafı gerektirebilmektedir. Ayrıca pürüzlerin ahşap işçiliği ile oluşturulması kolay olmadığı için pürüz tasarımında da kısıtlamalara gitmek gerekebilmektedir. Torna veya CNC bir tezgahta tasarım

daha özgür olabilmekte ancak bu durumda da kalıp maliyetleri oldukça yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Çalışmada 3D yazıcı ile elde edilen istinat duvarı tabanı pürüzlerinin her birinin basım işlemi yaklaşık 8 saat sürmüştür. 3D yazıcıda basımın, ahşap işçiliği ile elde edilecek kalıba göre hem işçilik masrafı hem üretim süresi hem de tasarım özgürlüğü açısından avantajlı olabileceği ön görülmektedir (Şekil 6). Ayrıca bu yöntem ile elde edilen kalıbın sarf maddesi (PETG), torna veya CNC bir tezgahta elde edilecek kalıbın ham maddesine göre oldukça ucuz olması beklenmektedir. 3D yazıcı ile elde edilen bir çeşit istinat duvarı tabanı pürüzü (Prototip-2b) istinat duvarının tabanını pürüzlü olarak imal edebilmek adına kalıp olarak imal edilmiştir. Daha sonra bu kalıba beton dökülerek (C16) 7 gün kür edilmiş ve kür sonrasında kalıptan çıkartılarak prototip olarak pürüzlü bir istinat duvarı tabanı elde edilmiştir. Bu işlemler Şekil 7’de sunulmaktadır.

Şekil 6. Basılan prototip istinat tabanı pürüzleri a) Prototip-1, b) Prototip-2b, c) Prototip-3, d) Prototip-2c, e) Prototip-2a, f) Prototip-4, g) Prototip-5, h) Prototip-6



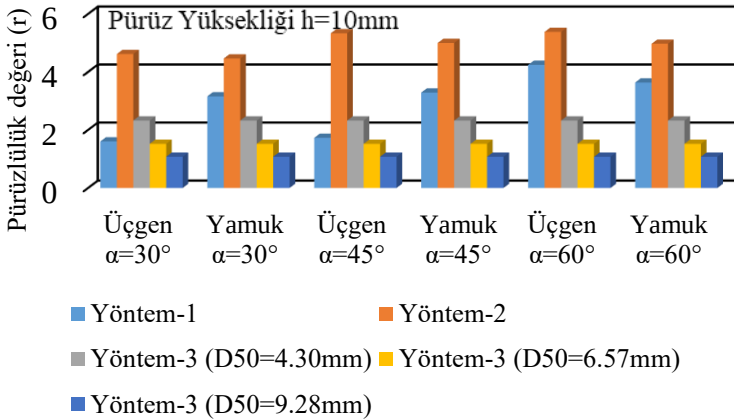
Şekil 7. Prototip pürüzlü istinat duvarı tabanı üretimi a) Kalıp b) Prototip pürüzlü istinat duvarı tabanı (Prototip-2b)



Üçgen ve Yamuk geometriye sahip pürüzde pürüzlülük hesap yöntemlerinin karşılaştırılması

Farklı taban açılarına (α) sahip pürüz yüksekliği (h) 10mm olan yamuk ve üçgen şeklindeki pürüzlerin pürüzlülük değerleri sırasıyla Yöntem 1, Yöntem 2 ve Yöntem 3'e göre Şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 8. Farklı taban açılarına sahip yamuk ve üçgen pürüzler



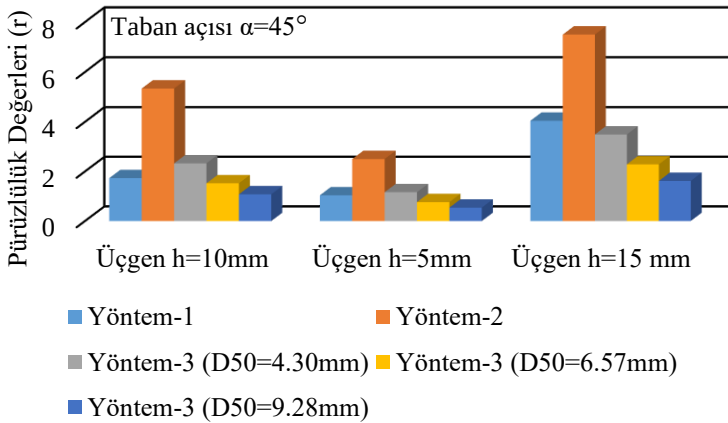
Yöntem 1 ve 2'ye göre α açıları arttıkça prototip tabanların pürüzlülük değerleri artmıştır. Taban açılarının (α) artmasıyla 150mm*150mm'lik prototip tabanların yüzeyinde daha fazla sayıda üçgen ve yamuk pürüz (örneğin $\alpha=30^\circ$ iken 3 adet üçgen mevcut iken $\alpha=45^\circ$ 'de 7 adet üçgen mevcut) oluşmaktadır. Bu durum prototip pürüzlü tabanların yüzey alanının artmasına sebep olmaktadır. Pürüzlülük hesabında kullanılan Yöntem 1'de pürüzlülük hem alan hem de hacme bağlı hesaplanmaktadır. Ancak burada alan faktörü (m) eksponansiyel bir fonksiyon olduğu için hacim faktörüne (n) göre pürüzlülük değerinde daha büyük etkiye sahiptir. Bu sebeple üçgen geometride α açısı 30° 'den 60° dereceye çıkarıldığında pürüzlülük değeri yaklaşık 2.5 katına çıkmıştır. Yamuk geometride α açısı 30° 'den 60° dereceye çıkarıldığında pürüzlülük değeri yaklaşık %15 kadar artmıştır. Yöntem 2'de ise pürüzlülük hesabı pürüzler arasında oluşan boşluk hacminden faydalanılarak yapılmaktadır. Taban açısı artışı pürüzlü yüzeydeki boşluk hacminin artmasına sebep olduğu için Yöntem 2'ye göre elde edilen pürüzlülük değerlerinin de artmasına sebep olmuştur. Ancak buradaki hesaplamada alan hesabı devreye sokulmadığı için artışlar Yöntem 1'de elde edilen artışlara göre daha sınırlı kalmıştır. Bu durumda taban açısı 30 dereceden 45 dereceye çıktığında üçgen geometride yaklaşık %16, yamuk geometride yaklaşık %12 artış olurken her iki şekil içinde 45 dereceden 60 dereceye çıkıldığında pürüzlülük değerleri yaklaşık aynı kalmıştır. Ayrıca Yöntem 1'de sabit bir taban açısı (α) için, geometri değişiminden (üçgen-yamuk) kaynaklanan pürüzlülük değerindeki değişim (üçgen-yamuk) $\alpha=30^\circ$ ve $\alpha=45^\circ$ için yaklaşık 2 katına çıkmış ve yamuk pürüzlerin daha yüksek pürüzlülük değerine sahip olduğu görülmüştür. $\alpha=60^\circ$ için ise artış sadece %17'dir ve üçgen geometri daha yüksek değere sahiptir. Yöntem 2'de ise geometri değişiminden kaynaklanan pürüzlülük artışı daha sınırlı kalmış ve tüm taban açıları (α) için üçgen geometrinin yamuk geometriye göre daha yüksek pürüzlülük

değeri aldığı görülmüştür. Bu durumun aynı açı değerine ve yüksekliğe sahip üçgen pürüzün, bir yamuk pürüze göre daha az hacme sahip olmasından dolayı üçgen pürüzlü yüzeylerde daha fazla boşluk hacmi olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yöntem 3 pürüzlülük değeri hesabında geometri ve taban açılarından bağımsız olarak D_{50} ve pürüz yüksekliği değerlerini kullanmaktadır. Bu sebeple bu yöntemde pürüzlülük değeri aynı D_{50} dane çapları için açı ve geometri değişiminden etkilenmeyerek sabit değerler almıştır.

Farklı pürüz yüksekliğine göre yöntemlerin kıyaslanması

Şekil 9’da taban açısı (α) 45° olan ve pürüz yüksekliği (h) 5mm, 10mm ve 15 mm olan üçgen pürüzler kullanılarak yöntemler kıyaslanmıştır.

Şekil 9 Farklı pürüz yüksekliğine sahip üçgen pürüzler



Kıyaslamada geometri ve taban açıları, pürüz yükseklik etkisinin daha net görülebilmesi için sabit olarak üçgen ve 45° derece olarak kullanılmıştır. Pürüz yüksekliğindeki (h) artış çalışmada göz önüne alınan hesap yöntemlerinin tamamında artışa sebep olmuştur. Yöntem 1’de yüksekliğin artması veya azalması ‘m’ alan faktöründe değişime sebep olsa da ‘n’ hacim faktöründe çok daha fazla değişime

sebebi olmuştur. Yüksekliğin artmasıyla birlikte n değerleri artarken yüksekliğin azalmasıyla birlikte n değeri azalmıştır. Bu yüzden pürüz yüksekliğinin (h) artmasıyla birlikte pürüzlülük değerleri artmıştır. Yöntem 1’de h yükseklik değerleri 5mm’den 15mm’ye arttırıldığında pürüzlülük değeri yaklaşık 4 katına çıkmıştır. Yöntem 2’de pürüz yüksekliğinin artması pürüzlü yüzeydeki pürüzler arası boşluk hacminin artmasına sebep olmuş ve pürüz yüksekliği arttıkça pürüzlülük değerleri 3 katına çıkmıştır. Son olarak Yöntem 3’de sabit bir D_{50} çapı için h yüksekliğinin artması R_{max} değerinin artmasına ve dolayısıyla pürüzlülük değerinin artmasına sebep olmuştur. Ancak farklı D_{50} çaplarında bu durum böyle değildir. Örneğin D_{50} çapı ve h yüksekliği daha büyük olan bir pürüz, D_{50} çapı ve h yüksekliği daha küçük olan bir pürüzden daha küçük bir pürüzlülük değerine sahip olabilir.

SONUÇ

Elde edilen bulgulara bakılarak şu sonuçlara ulaşılmıştır;

- Çalışmada göz önüne alınan yöntemler arasında alan ve hacim kat sayılarının bir arada kullanıldığı Yöntem 1’in, taban açısı (α), geometri ve pürüz yüksekliğindeki (h) değişimlerinin pürüzlülük değerinde daha hassas bir değişim yarattığı görülmüştür. Ayrıca Yöntem 1’in taban açısı (α), geometri ve pürüz yüksekliği (h) değişimden kaynaklanan pürüzlülük değerindeki değişimleri diğer iki yönteme göre daha fazla olmuştur. Bu sebeple pürüzlülük değeri hesaplarında Yöntem 1’in kullanılması ön görülmektedir.
- Yöntem 1 taban açısı (α) 45° ’den büyük olan pürüzün daha efektif olabileceğini göstermektedir. Pürüz tasarımında bu durumun göz önünde bulundurulması önerilmektedir.

- Pürüz yüksekliği (h) değerinin değişiminin pürüzlülük değeri üzerindeki etkisinin, taban açısı (α) ve geometri değişimine göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum h parametresinin pürüzlülük açısından daha etkili bir parametre olabileceğini göstermektedir. Saha uygulamalarında istinat duvarı tabanında pürüz yüksekliği (h) parametresinin arttırılarak pürüzlülüğün arttırılması önerilmektedir.
- Çalışma sonuçları istinat duvarı tabanı pürüzlülüğünün elde edilmesinde 3D yazıcı ile üretilen ürünlerin, betonarme istinat duvarı için kalıp olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.
- Çalışmada elde edilen sonuçlar sadece belli geometri, taban açısı ve pürüz yüksekliği için geçerli olup ileri çalışmalarda düzenli veya düzensiz farklı geometrilerin, farklı taban açılarının ve pürüz yüksekliklerinin de araştırılması önerilmektedir.

Kaynakça

- Aksoy, H. S., Gör, M., & İnal, E. (2016). A new design chart for estimating friction angle between soil and pile materials. *Geomechanics and Engineering*, 315-324.
- Chen, C., Yang, Q., Leng, W., Dong, J., Xu, F., Wei, L., & Ruan, B. (2022). Experimental Investigation of the Mechanical Properties of the Sand–Concrete Pile Interface Considering Roughness and Relative Density. *Materials*.
- Das, B. M. (2007). *Fundamentals of Geotechnical Engineering Third Edition*. United States.
- Ekrem, M., & Yılmaz, M. (2025). Mechanical Properties of PLA, PETG, and ABS Samples Printed on a High-Speed 3D Printer. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 161-174.
- Fang, R., Wang, B., Pan, J., Liu, J., Wang, Z., & Wang, Q. (2023). Effect of concrete surface roughness on shear strength of frozen soil–concrete interface based on 3D printing technology. *Construction and Building Materials*.
- Han, F., Ganju, E., Salgado, R., & Prezzi, M. (2018). Effects of Interface Roughness, Particle Geometry, and Gradation on the Sand–Steel Interface Friction Angle. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144 (12).
- Janipour, A. K., Mousivad, M., & Bayat, M. (2022). Study of interface shear strength between sand and concrete. *Arabian Journal of Geosciences*.
- Kuruoğlu, Y., Akgün, M., & Demir, H. (2022). FDM yöntemiyle üretilen ABS, PLA ve PETG numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımının modellenmesi ve optimizasyonu.

- Leblebici, T. (2021). Suya doygun kum zeminlerde inşa edilen istinat duvarların statik ve dinamik yükler altındaki davranışının araştırılması. *üksek Lisans Tezi. Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.*
- Li, Y.-H., Lv, M.-F., Guo, Y.-C., & Huang, M.-S. (2021). Effects of the soil water content and relative roughness on the shear strength of silt and steel plate interface. *Measurement.*
- Liu, S.-w., Zhang, Q.-q., Ma, B., Li, Z.-b., Yin, W.-p., & Lou, Q.-g. (2023). Study on surface roughness effect on shear behavior of concrete-soil interface. *Engineering Failure Analysis.*
- Namjoo, A. M., Baniasad, M., Jafari, K., Salam, S., Toufigh, M. M., & Toufigh, V. (2022). Studying effects of interface surface roughness, mean particle size, and particle shape on the shear behavior of sand-coated CFRP interface. *Transportation Geotechnics.*
- Nardelli, A., Cacciari, P. P., & Futai, M. M. (2019). Sand–concrete interface response: The role of surface texture and confinement conditions. *Soils and Foundations.*
- Su, L.-J., Zhou, W.-H., Chen, W.-B., & Jie, X. (2018). Effects of relative roughness and mean particle size on the shear strength of sand-steel interface. *Measurement*, 339–346.
- Taresh, O. F., Mezher, M., & Daway, E. (2023). Mechanical properties of 3D-printed PETG samples: The effect of varying infill patterns. *Journal of Composite and Advanced Materials*, 339–345.

- Uray, E. (2020). Dayanma yapılarının sezgisel yöntemler kullanılarak optimum tasarımı. *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*.
- Uzuner, B. A. (2010). *Zemin mekaniği*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Yenidoğan, C. (2006). İstinat duvarlarının deprem sırasında davranışı. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

BÖLÜM 10

AFFEDEN YOL UYGULAMALARINDA KURTARMA ALANLARI ÜZERİNE GENEL BİR BAKIŞ

ABDULLAH MALTAŞ¹

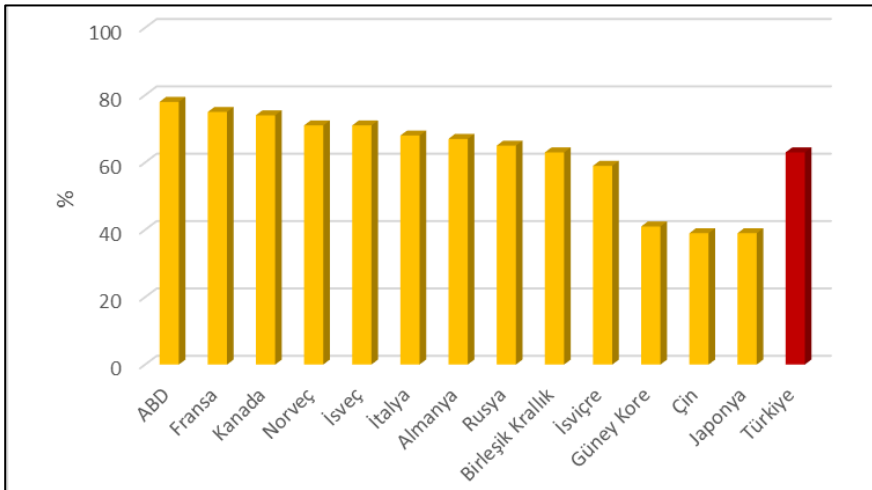
Giriş

Günümüzde taşıt sahipliğinin çoğalmasıyla birlikte ulaşım ağlarında artan trafik talebi, trafik yoğunluklarının ve gecikmelerin başlıca sebeplerinden biridir. Söz konusu artışla birlikte, tıkanıklıkların yanında güvenli sürüş uygulamaları da her geçen gün daha fazla önem kazanmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) 2023 yılında yayımladığı rapora göre, 2021 yılında meydana gelen trafik kazalarında dünya genelinde 1,19 milyon ölüm gerçekleşmiştir. Aynı rapora göre tüm yaş grupları dikkate alındığında ölüm nedenleri sıralamasında trafik kazaları (ve buna bağlı yaralanmalar) on ikinci sırada yer almaktadır (WHO, 2023a). Ülkemiz özelinde ise 2021 yılında 5362 ölüm vakası yaşanmış, 2023 ve 2024 yıllarında bu sayı 6000'in üzerine çıkmıştır (TÜİK, 2025). Yol kullanıcılarının dağılımları incelendiğinde ise bunların %63'ü

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-2595-8536

motorlu taşıt kullanıcıları olarak öne çıkmıştır. Şekil 1 incelendiğinde bu oran Almanya’da %67, Kanada’da %74, Çin’de %39, Fransa’da %75, İtalya’da %68, Norveç’te %71, Güney Kore’de %41, Rusya’da %65, İsveç’te %70, İsviçre’de %59, Japonya’da %39, Birleşik Krallık’ta %63, Amerika Birleşik Devletleri’nde ise %78 olarak hesaplanmıştır (WHO, 2023b). Ulaşım türü tercihleri göz önünde bulundurularak uzak doğu ülkeleri bir kenara bırakılırsa ölümlerin pek çoğunun motorlu taşıt kullanıcıları arasında olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 1 Ülkelere göre kazaya karışan motorlu taşıt oranları



Kaynak: WHO (2023b)

Trafikte güvenli sürüş; bireylerin can ve mal güvenliğinin sağlanmasının yanı sıra toplumsal anlamda kazaların azaltılması ve sürdürülebilir ulaşım hedeflerine ulaşma noktasında da oldukça önemlidir. Bu kapsamda yol kullanıcılarının eğitilmiş, dikkatli ve öngörülü olmaları, trafik kurallarına uygun hareket etmeleri ve güvenli sürüş alışkanlıklarını benimsemeleri neticesinde, söz konusu kullanıcılar arasındaki etkileşimin daha güvenli bir şekilde gerçekleşmesi mümkün kılınabilmektedir. Trafik güvenliğinde kullanıcıların yanı sıra araç ve altyapı da göz önünde bulundurulması

gereken trafik elemanlarıdır. Ancak insan, araç ve yol elemanları üzerinde hâkim güç konumunda yer alan trafik elemanıdır ve trafik kazalarının pek çoğunda insan kusuru ön plana çıkmaktadır.

Zamanla gelişen teknoloji sayesinde yeni nesil araçlar daha yüksek güvenlik donanımlarına sahip olmaktadır. Bilhassa mevzuatlar çerçevesinde zorunlu kılınan güvenlik donanımları ve araçların yolcu güvenliğini ön plana çıkaracak şekilde tasarlanmasıyla birlikte yaralanma ve ölüm vakalarının olabildiğince azaltılması amaçlanmaktadır. Diğer taraftan otonom araç teknolojilerinin gelişmesi ve günlük yaşama entegre olmaları ve V2X gibi iletişim teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla trafikte güvenli sürüşün artırılması önemli kazanımlar olarak öne çıkmaktadır. Ancak araç ve sürücülerin yanında ulaşım ağı altyapısının da trafik güvenliğini sağlayacak şekilde tesis edilmesi gerekmektedir. İnsan ve taşıt kaynaklı hataların önüne tam anlamıyla geçilmesi mümkün olamasa da bu hatalardan kaynaklanan sonuçların hafifletilebileceği anlayışı gittikçe daha fazla kabul görmektedir. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar **affeden yollar** (*forgiving roadsides*) kavramını doğurmuş ve bu kapsamda çeşitli uygulamalar ortaya çıkmıştır. Gerek altyapı iyileştirmeleri gerekse teknolojik destekler ile trafik kazalarının yol açtığı maddi ve manevi hasarların azaltılması trafik güvenliğinde kritik bir role sahiptir.

Affeden Yol Kavramı

Ülkemiz başta olmak üzere, dünya genelinde yılda gerçekleşen trafik kaza sayısı ele alındığı takdirde seyir güvenliğini sağlayacak uygulamaların hayata geçirilmesi oldukça önemlidir. Dar, yüksek eğimli, görüşün kısıtlı olduğu, kötü kaplaması olan düşük standartlı yollarda, güvenli seyir şartlarını sağlamak her zaman için daha zordur. Bu doğrultuda, dünyada yol tasarımında *affeden yol* kavramının benimsenmesi ve yol standartlarının

seçiminde mümkün olduğunca bu bağlamın göz önünde bulundurulması kritik öneme sahiptir (Yayla, 2015).

Affeden yol kavramı trafik güvenliğini arttırmak ve sürücü hatalarının ölümcül sonuçlara yol açmasını olabildiğince önlemek maksadıyla geliştirilen bir tür karayolu tasarımı yaklaşımıdır. Bu yaklaşımın benimsenmesiyle birlikte sürücü hatalarının ciddi sonuçlar doğuran kazalara mahal vermemesi adına fiziksel vrenin daha esnek bir yapıda olması ve hataları tolere edebilecek şekilde düzenlenmesi hedeflenmektedir. Daha açık bir ifadeyle; affeden yollar, sürücü (ve/veya taşıt) hatalarından kaynaklı olumsuz sonuçların en aza indirilmesini amaçlayan bir takım uygulamaları içinde barındırmaktadır.

Trafik kazaları ve kaza kaynaklı olumsuz etkilerin en aza indirilmesine yönelik uluslararası arenada çeşitli stratejiler geliştirilmektedir. Avrupa ulusal yol idarelerinin bir organizasyonu olan CEDR (Avrupa Yol Direktörleri Konferansı) 2012 yılında Affeden Yollar Tasarım Rehberi'ni yayınlamıştır. Farklı ülkelerden üyelerin ortaklığında hazırlanan bu rehberde yol kenarı bariyerlerin, sarsma bantlarının, banketlerin ve affedici destek yapıların tasarımına dair çeşitli ipuçları yer almaktadır (CEDR, 2013). Birleşmiş Milletler (BM) Genel Kurulu, 2020 yılının ağustos ayında 2030 yılına kadar trafik kazaları kaynaklı ölüm ve yaralanmaların en az %50 oranında önlenmesini hedefleyen ve altyapı iyileştirmelerini destekleyen 2021-2030 Karayolu Trafik Güvenliği 10 Yıllık Küresel Eylem Planı'nı (küresel karayolu güvenliğinin iyileştirilmesi) kabul etmiştir (UNECE, 2025). İlk adımı İsveç'te atılan ve bugün çok uluslu bir karayolu trafiği güvenliği projesi olan Vizyon Sıfır (Vision Zero) da karayolu güvenliğini arttırmak amacıyla pek çok ülke tarafından benimsenmektedir. Bu stratejinin temelinde sorumluluğu yol kullanıcılarından yolu tasarlayanlara aktaran ve insan hatasını affeden eylemleri bütünsel olarak ele alan güvenli sistem anlayışı

yatmaktadır (Björnberg, 2019). Aşağıdaki tabloda bazı ülkelerdeki güvenli sistem yaklaşımları gösterilmektedir.

Tablo 1 Ülkelere göre uygulanan güvenli sistem programları

Ülke	Program
İsveç	Vizyon Sıfır
Hollanda	Sürdürülebilir Güvenlik
Avustralya	Güvenli Sistem
Yeni Zelanda	Daha Güvenli Seyahatler
ABD (New York)	Vizyon Sıfır
ABD	Sıfır Can Kaybına Doğru
Meksika	Vizyon Sıfır

Kaynak: Welle & ark. (2018)

Ülkemizde 2013 yılı itibariyle Karayolları Genel Müdürlüğü bünyesinde projesi gerçekleştirilen otokorkuluklar, acil kaçış rampaları, temiz yol kenarı gibi uygulamalar ile affeden yol uygulamaları hayata geçirilmeye başlanmıştır. Buna göre, affeden yol uygulamaları ile sürdürülebilir karayolu güvenliği kapsamında yol kullanıcılarının ve taşıtların makul düzeydeki hatalarının telafi edilerek kaza kayıplarının en aza indirilmesi hedeflenmiştir (KGM, 2013).

Güncel stratejik belgeler incelenecek olursa; 2024-2027 Karayolu Trafik Güvenliği Eylem Planı'nda, yol altyapısı ve çevresinin kazaların %30'undan fazlasına neden olduğu, affeden yollar sayesinde meydana gelen kazaların şiddetinin azaltabildiği belirtilmektedir (TCİB, 2021a). 2021-2030 Karayolu Trafik Güvenliği Strateji Belgesi'nde, trafik güvenliği kılavuz ilkeleri arasında yol yapısının affeden yollar olarak dizayn edilmesiyle, hızın uygun ve güvenli seviyede kullanımıyla trafik kazasının meydana gelmesi durumunda bile insanların ciddi derecede zarar görmelerinin engellenebileceği ifade edilmektedir (TCİB, 2021b). Ayrıca, 2024-2028 yılları için hazırlanan On İkinci Kalkınma Planı'nda ifade edilen "Karayolu trafik kazalarından kaynaklı can kayıplarının azaltılması için yol kullanıcılarının hata yapabileceğini kabul eden

ve yol güvenliğini trafik sistemindeki tüm aktörlerin ortak bir sorumluluğu olarak gören güvenli sistem yaklaşımı benimsenecektir” hedefi de affeden yol kavramı ile karşılık bulabilmektedir. Bu şekilde trafik kazalarında hayatını kaybeden kişi sayısının 2028 yılına kadar 5200 seviyelerinden 3500 seviyelerine düşmesi beklenmektedir (TCC, 2023).

Görüldüğü gibi affeden yol uygulamaları ile trafik kazalarının olumsuz etkilerinin en aza indirgenmesi amaçlanmaktadır. Daha açık bir ifadeyle, affeden yollar yaklaşımı ile araçların yol dışına çıkması durumunda aracın tekrar kontrol edilebilmesi veya çarpışma şiddetinin azaltılmasına olanak tanınması, dolayısıyla da hataya karşı tolerans prensibinin ön plana çıkması, tüm bunların neticesinde ise ölüm ve yaralanma vakalarının en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Bu hedefe yönelik uygulamalara yol kenarı kurtarma alanları (clear zone), enerji emilimli bariyer sistemleri (energy-absorbing barrier), kırılabilir direk sistemleri (breakaway poles), yol kenarı şev eğimi (roadside slope design) gibi örnekler verilebilir. Bu çalışmada söz konusu uygulamalardan biri olan yol kenarı kurtarma alanları üzerine bir araştırma yapılmıştır.

Yol Kenarı Kurtarma Alanları

Affeden yol uygulamaları çeşitli şekillerde tasarlanıp hayata geçirilmektedir. Bakıldığı zaman tüm bu uygulamaların amacının, yol kenarındaki potansiyel engel ve yapıların (ağaçlar, direkler, yüksek eğimli şevler vb.) olumsuz etkilerini en aza indirmek amaçlı olduğu aşikârdır (Fitzpatrick & ark., 2014). Yoldan çıkma türündeki kazalarda 40 km/sa hızın üzerindeki hızlarda ciddi riskler ortaya çıkabilmektedir (Gallagher, 2007). Dolayısıyla, yol kenarı kurtarma alanı olarak ifade edilen uygulamalar ile birlikte yoldan çıkan taşıtların güvenli durabilmesi ve olumsuz etkilerin en aza indirgenmesi amaçlanmaktadır.

Kurtarma alanı (veya güvenli alan/temiz bölge), karayolu kenarında bulunan, taşıtın yoldan çıkması durumunda sürücünün aracını kontrol edip tekrar güvenli şekilde yola döndürebilmesi için engellerden arındırılmış, düz veya hafif eğimli güvenli bölge olarak ifade edilir (FHWA, 2025). AASHTO'nun hazırladığı Yol Kenarı Tasarım Rehberi'nde (Roadside Design Guide) belirtildiğine göre, 1960'lardan itibaren otoyollarda meydana gelen yoldan çıkma kaynaklı kazaların önlenmesine yönelik tedbirler alınmaya başlanmıştır. Bu maksatla yeterli güvenliğin sağlanması amacıyla yol kenarında yeteri kadar genişlikte kurtarma alanları bırakılması önerilmiştir. Buna yönelik yapılan çalışmalarda, yüksek hızlı yollarda yol kenarında banketler ve bisiklet yolları gibi kısımlar da dâhil olmak üzere en az 9 m genişliğinde herhangi bir engel bulunmayan bir kurtarma alanı tasarlanması tavsiye edilmekte, böylelikle yoldan çıkan araçların yaklaşık %80'inin kurtarılabileceği ifade edilmektedir. Ayrıca, bu mesafenin belirlenmesinde tasarım hızı, trafik miktarı ve hendek veya şev eğimlerine göre farklı genişliklerin ele alınması, bunun yanında yatay kurbalarda düzeltme faktörü marifetiyle bu alanların belirlenmesi gerekmektedir (AASHTO, 2011).

Tablo 2'de, tasarım hızı, günlük trafik ve şev eğimlerine bağlı olarak AASHTO'nun önerdiği güvenli alan genişlikleri verilmiştir. Örneğin, 1/6 şev eğimine sahip bir dolgu şevi için kurtarma alanı genişliği hız ve YOGT değerine göre 2 ile 9 m arasında değişkenlik göstermektedir. Tablo 3'te ise, yatay kurba yarıçapı ve tasarım hızlarına göre AASHTO tarafından önerilen düzeltme katsayılarına yer verilmiştir. Yatay kurbalarda düzeltilmiş genişlik, baz alınan genişliğin tablodaki katsayılarla çarpılmasıyla elde edilir. Şekil 2'de düzeltme katsayısının uygulanmasına dair örnek bir hava fotoğrafına yer verilmiştir.

Tablo 2 AASHTO tarafından önerilen baz kurtarma alanı genişlikleri (m)

Tasarım Hızı (km/sa)	YOGT	Şev Eğimi				
		Dolgu		Yarma		
		<1/6	1/5-1/4	1/3	1/4-1/5	<1/6
<64	<750	2	2	2	2	2
	750-1500	3	4	3	3	3
	1600-6000	4	5	4	4	4
	6000<	5	5	5	5	5
72-81	<750	3	4	3	3	3
	750-1500	5	5	3	4	4
	1600-6000	5	7	4	5	5
	6000<	6	8	5	6	6
89	<750	4	5	3	3	3
	750-1500	5	7	3	5	5
	1600-6000	6	8	5	5	5
	6000<	7	9	5	6	6
97	<750	5	7	3	4	4
	750-1500	7	9	4	5	5
	1600-6000	9	9	5	6	6
	6000<	9	9	6	8	8
113<	<750	6	7	3	5	5
	750-1500	8	9	4	6	6
	1600-6000	9	9	5	7	7
	6000<	9	9	7	9	9

Kaynak: NYSDOT (2020)

Tablo 3 Kurba yarıçapına göre kurtarma alanı düzeltme katsayıları (K_r)

Yarıçap (m)*	Tasarım Hızı (km/sa)					
	56	64	81	89	97	113
915	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2
760	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3
610	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,4
520	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4
455	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5
395	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	-
350	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	-
305	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	-
245	1,3	1,3	1,4	1,5	-	-
200	1,3	1,4	1,5	-	-	-
150	1,4	1,5	-	-	-	-
90	1,5	-	-	-	-	-

*5'in katı olacak şekilde düzenlenmiştir. Kaynak: NYSDOT (2020)

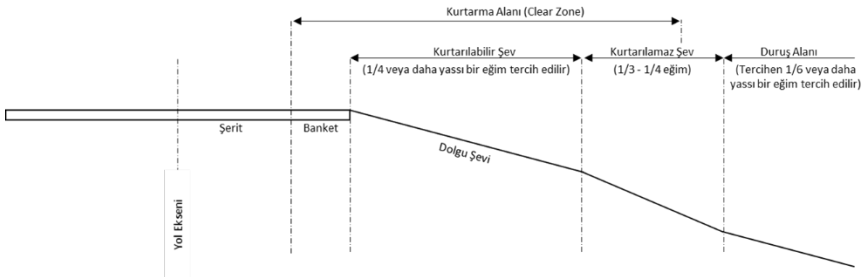
Şekil 2 Düzeltilmiş kurtarma alanı için örnek



Kaynak: HKP (2025)

Şekil 3'te dolgu tipi bir enkesit için kurtarılabılır ve kurtarılamaz şev eğimleri ile birlikte örnek bir kurtarma alanı şematik olarak verilmiştir. Kurtarılabılır şev; eğim oranı genellikle 1/4 veya daha yatık şevdir. Araç bu alana girdiğinde sürücü direksiyon hâkimiyetini tekrar kazanabilir. Kurtarılamaz şevde eğim oranı 1/3 ile 1/4 arasındadır. Araç bu şeve girdiğinde toparlanma olasılığı azalacak ve araç aşağı yönde kaymaya devam edecektir. Duruş/kurtarma alanı; kurtarılamaz şevin tabanında yer alan düz veya hafif eğimli alandır ve yoldan çıkan araç burada güvenle durabilir (HSM, 2010).

Şekil 3 Kurtarılabılır şev baz alınarak önerilen bir kurtarma alanı örneği



Kaynak: Carlton, J.C. (2025)

Eğer eğim 1/3 oranından daha dik ise araç kontrolünün tamamen kaybedilme riski artmakta ve bu da devrilme gibi sonuçlar doğurabilmektedir. Bu eğimdeki şev kritik şev olarak ifade edilebilir. Genel bir değerlendirme yapılacak olursa kurtarma alanının banket, kurtarılabilir şev, kurtarılamaz şev ve varsa duruş alanlarının toplamı olarak ifade etmek de mümkündür.

Kurtarma Alanı ile İlgili Araştırma Bulguları

Yol kenarlarında yeterli boşluk olmaması ve ağaç, aydınlatma direği gibi çeşitli engellerin yer alması durumunda, özellikle yoldan çıkma vakalarında risk faktörleri önemli ölçüde artmaktadır (Papadimitriou & ark., 2019). Dolayısıyla, gerek kent içi gerek kent dışı yollarda, yol kenarlarında yeterli kurtarma genişliklerinin bulunması son derece önemlidir. Bu konuda yapılmış çeşitli araştırmalara rastlamak mümkündür. Çalışmalar incelendiğinde görülmektedir ki; banket genişliğinin belirlenmesi, şev eğiminin seçilmesi, yol kenarı engellere müdahale edilmesi gibi farklı parametrelerin dikkate alınmasıyla yüksek hız ve hacim değerleri de gözetilmek suretiyle kurtarma alanlarının uygunluğunun değerlendirilmesi mümkündür.

2014'te yapılan bir çalışma yol kenarında yer alan ağaç ve aydınlatma direklerinin tehlikelerine vurgu yapmış ve kurtarma alanları üzerine bir değerlendirme yapmıştır. Yanal temiz bölgenin, yani kurtarma alanının genişliğinin arttıkça gözlemlenen hızların yükseldiği, elektrik direklerinin olduğu durumda ise azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca bu genişliğin artmasıyla sürücülerin kurtarma alanına daha yakın seyrettiği ifade edilmiştir (Fitzpatrick & ark., 2014).

2013'te yapılan bir diğer çalışmada, Çin'deki otoyollar için hız, yoldan çıkış açısı, yavaşlama ivmesi ve reaksiyon süresi gibi değişkenlere bağlı olarak kurtarma alanı genişliği önerileri getirilmiştir. Buna göre, kenar eğimin sıfır olduğu koşullarda tasarım

hızı 80, 100 ve 120 km/sa olan otoyollar için sırasıyla 5~6,5, 9~11 ve 13,5~15,5 m genişlikte kurtarma alanı olmasının uygun olduğu ifade edilmiştir (Xing & ark., 2013).

Kurtarma alanı genişliği ve yol kenarı bitki örtüsü yoğunluğunun etkilerinin değerlendirildiği sürüş simülatörü destekli bir simülasyon çalışmasında katılımcıların daha küçük kurtarma alanı genişliği olması durumunda daha yavaş ve yol eksenine daha yakın sürüş gerçekleştirdikleri belirlenmiştir. Diğer taraftan, yol kenarı bitki örtüsü yoğunluğunun hız veya yatay konumlandırmayı etkilemediği görülmüştür (Fitzpatrick & ark., 2016).

Iowa, ABD’de 2004-2006 yılları arasında kentsel alanda gerçekleşen kazaların analiz edildiği bir çalışmada, yol kenarı sabit cisimlere çarpışmaların tüm ölümcül kazaların %15’ini teşkil ettiği belirlenmiştir. Optimum yol kenarı güvenli alan genişliğinin araştırıldığı çalışmada 1,2 - 1,5 m civarında bırakılacak boşlukların riski %90 oranında azalttığı vurgulanmıştır (Sax & ark., 2010).

Kentsel güvenli alanların değerlendirildiği bir başka çalışmada özellikle 1/4 veya daha dik şev eğimlerinde çarpışma riskinin artması nedeniyle yüksek hacimli ve yüksek hızlı yollarda 9-10 m’yi aşan alanların bırakılmasının önemi vurgulanmıştır. Bu bağlamda hız, şev eğimi ve yol kenarındaki engellerin de dikkate alınarak tek tip standart yerine dinamik bir genişlik belirlenmesi gerektiği ifade edilmiştir (Marshall P.E. & ark., 2018).

Kırsal bölgelerin ele alındığı bir başka çalışmada, kurtarma alanı genişliğinin arttırılmasının tek başına yeterli olamayabileceği ifade edilmiştir. Özellikle yüksek hızlı yollarda riski azaltmak adına enerji emilimli bariyer sistemlerinin de dikkate alınması, ayrıca yol çevresine (ağaç, direk, şev eğimi vb.) ve hız limitlerine bağlı optimum genişliklerin belirlenerek ölümcül sonuçların önüne geçilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Ayrıca yoldan çıkış açısına bağlı olarak artan risklerin azaltılması noktasında yapılan simülasyon

alışmasında bariyer sistemlerinin etkinliği ortaya konulmuştur (Doecke ve Woolley, 2011).

Sonuç

Bu çalışmada ele alınan yol kenarı kurtarma alanı (clear zone) uygulamaları, affeden yollar yaklaşımının temel bileşenlerinden biri olarak trafik güvenliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. İncelenen literatür ve standartlar, temiz bölge genişliğinin sabit bir değer olarak belirlenmesi yerine yolun tasarım hızı, trafik hacmi, şev eğimleri ve çevresel engellere göre dinamik biçimde belirlenmesinin yerinde olacağını ortaya koymaktadır. Yüksek hızlı ve yoğun trafik hacmine sahip yollarda eğer mümkünse 9–10 metreyi aşan genişliklerin gerekliliği, kentsel alanların yanı sıra düşük hız ve düşük hacimli yollarda ise daha dar kurtarma alanlarının kabul edilebilir olduğu literatürdeki çalışmalarla desteklenmiştir. Bununla birlikte, bazı yol kesimlerinde tek başına kurtarma alanı genişliğinin artırılması yeterli olmayabilmektedir. Bu gibi durumlarda, özellikle dik şevler veya yola çok yakın sabit engellerin bulunduğu kesimlerde ya bu tür engellerin (ağaç, direk vb.) kaldırılması veya temiz bölgenin dışına taşınması, ya da enerji emilimli bariyer sistemleri ve kırılabilir direk gibi ek çözümünün sunulması gerekebilmektedir.

Türkiye’de ve dünyada yürürlüğe konan stratejik belgeler ve rehberler, affeden yollar yaklaşımını trafik güvenliğinin ayrılmaz bir parçası olarak görmektedir. Bir affeden yol uygulaması olarak ele alınan kurtarma alanlarının sürdürülebilir ulaşım ve Vizyon Sıfır hedefleriyle uyumlu şekilde hayata geçirilmesi, yol dışına çıkma türündeki trafik kazalarının ölümcül sonuçlarını azaltma konusunda etkili bir araçtır. Bu doğrultuda, ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü’nün uygulamaları ve uluslararası rehberlerle uyumlu tasarım kriterlerinin geliştirilmesi, yol güvenliğinde kalıcı iyileşmelerin sağlanmasına katkıda bulunacaktır.

Kaynakça

AASHTO (2011) *Roadside Design Guide*, American Association of State Highway and Transportation Officials, ABD (ISBN: 978-1-56051-509-8)

Björnberg, K. E. (2019). *The Vision Zero Handbook* (pp. 1-1240). S. O. Hansson, M. Å. Belin, & C. Tingvall (Eds.). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.

Carlton, J.C. (2025) *What Is the Clear Zone and Why Is It Critical to Roadway Safety?* (29/08/2025 tarihinde <https://www.jsheld.com/insights/articles/what-is-the-clear-zone-and-why-is-it-critical-to-roadway-safety> adresinden ulaşılmıştır.)

CEDR (2013) *Forgiving Roadsides Design Guide*, Conference of European Directors of Roads, Fransa. (ISBN: 979-10-93321-02-8)

Doecke, S., & Woolley, J. (2011). Further investigation into the effective use of clear zones and barriers in a safe system's context on rural roads. *Australasian Road Safety Research, Policing and Education Conference*, 6 – 9 Oct 2011, Perth, Western Australia

FHWA (2025) *Clear Zones, Federal Highway Administration*, (28/08/2025 tarihinde <https://highways.dot.gov/safety/rwd/provide-safe-recovery/clear-zones/clear-zones> adresinden ulaşılmıştır.)

Fitzpatrick, C. D., Harrington, C. P., Knodler Jr, M. A., & Romoser, M. R. (2014). The influence of clear zone size and roadside vegetation on driver behavior. *Journal of safety research*, 49, 97.e1-104.

Fitzpatrick, C. D., Samuel, S., & Knodler Jr, M. A. (2016). Evaluating the effect of vegetation and clear zone width on driver

behavior using a driving simulator. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 42, 80-89.

Gallagher, T. (2007). *Clear zones in urban environments*. Dissertation of BSci, Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, Australia.

HKP (2025) *Clear Zone Overview*, Highway Knowledge Portal, (01/09/2025 tarihinde <https://kp.uky.edu/knowledge-portal/articles/roadside-safety-knowledge-book-clear-zone-clear-zone-2/> adresinden ulaşılmıştır.)

HSM (2010) *Highway Safety Manual*, American Association of State Highway and Transportation Officials, ABD. (ISBN: 978-1-56051-477-0)

KGM (2013) *Trafik kazalarına karşı 'affeden yol'*, T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel M¼d¼rl¼ę¼, (27/08/2025 tarihinde <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Root/BasindaKGM/Haziran2013.aspx> adresinden ulaşılmıştır.)

Marshall P.E. W. E, Coppola, N., & Golombek, Y. (2018). Urban clear zones, street trees, and road safety. *Research in Transportation Business & Management*, 29, 136-143.

NYSDOT (2020) *Highway Design Manual, Chapter 10, Roadside Design, Guide Rail, and Appurtenances*, New York State Department of Transportation, ABD. (28/08/2025 tarihinde <https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/design/dqab/hdm> adresinden ulaşılmıştır.)

Papadimitriou, E., Filtress, A., Theofilatos, A., Ziakopoulos, A., Quigley, C., & Yannis, G. (2019). Review and ranking of crash risk factors related to the road infrastructure. *Accident analysis & prevention*, 125, 85-97.

Sax, C. R., Maze, T. H., Souleyrette, R. R., Hawkins, N., & Carriquiry, A. L. (2010). Optimum urban clear zone distance. *Transportation research record*, 2195(1), 27-35.

TCİB (2021a) *2024-2027 Karayolu Trafik Güvenliği Eylem Planı*, Türkiye Cumhuriyeti İçişleri Bakanlığı, Ankara, Türkiye.

TCİB (2021b) *2021-2030 Karayolu Trafik Güvenliği Strateji Belgesi*, Türkiye Cumhuriyeti İçişleri Bakanlığı, Ankara, Türkiye.

TCC (2023) *On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028)*, Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı, Ankara, Türkiye.

TÜİK (2025) *Karayolu Trafik Kaza İstatistikleri, 2024*, Türkiye İstatistik Kurumu Başkanlığı. (27/08/2025 tarihinde <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Karayolu-Trafik-Kaza-Istatistikleri-2024-54056> adresinden ulaşılmıştır.)

UNECE (2025) *Decade of Action, United Nations Economic Commission for Europe* (27/08/2025 tarihinde <https://unece.org/second-decade-action> adresinden ulaşılmıştır.)

Welle, B., Sharpin A.B., Adriazola-Steil C., Job, S., Shotten, M., Bose, D., Bhatt, A., Alveano, S., Obelheiro, M. & İmamoğlu, C. T. (2018) *Sürdürülebilir & Güvenli - Trafikte Sıfır Can Kaybı için Vizyon ve Kılavuz*, EMBARQ, ABD (ISBN 978-1-56973-927-7)

WHO (2023a) *Global status report on road safety 2023*, İsviçre. (ISBN 978-92-4-008651-7)

WHO (2023b) *Global status report on road safety 2023: country and territory profiles*, İsviçre. (ISBN 978-92-4-008771-2)

Xing, Y., Lu, L., Lu, J. J., & Zhu, S. (2013). A study on the widths design of highway roadside clear zone by considering multi-factors. *Procedia-social and behavioral sciences*, 96, 2584-2594.

Yayla, N. (2015) *Karayolu Mühendisliği*, Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye (ISBN:978-975-511-287-1)

BÖLÜM 11

ULAŞTIRMADA SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMI

Özlem BATTAL ŞAL¹

Giriş

Ulaştırma sistemleri, modern toplumların ekonomik, sosyal ve mekânsal yapısını şekillendiren temel bileşenlerden biridir. Kentleşmenin hızlanması, nüfusun artması, küreselleşmenin derinleşmesi ve yaşam standartlarının yükselmesi, ulaşım talebini her geçen yıl artırmaktadır. Ancak bu artış; enerji tüketimi, sera gazı salımları, trafik sıkışıklığı, gürültü kirliliği, yol güvenliği sorunları ve doğal çevre üzerindeki baskılar gibi çok boyutlu sürdürülebilirlik sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Bugün ulaştırma sektörü, küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık üçte birinden sorumlu olup, özellikle karayolu taşımacılığı bu payın önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu nedenle ulaşımın mevcut yapısı, uzun vadeli çevresel hedeflerle ve sürdürülebilir kalkınma perspektifiyle uyumlu değildir.

Ulaşım sektörü, toplumun genelinde önemli bir rol oynamaktadır. Bir yandan gelişimi sosyal ve ekonomik faydalar

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Karabük Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-2308-7933

sağlarken, diğer yandan olumsuz sosyal, ekonomik ve çevresel etkilere neden olmaktadır. Ayrıca, uzun vadede azaltılması gerekenler arasında trafik sıkışıklığı, hava ve su kirliliği, iklim değişikliği, yenilenemeyen kaynakların tükenmesi ve daha birçok olumsuz etki yer almaktadır. Bu etkileri azaltmak için sürdürülebilir ulaşım kavramının geliştirilmesi gerekmektedir.

Sürdürülebilir ulaşım kavramı, çevresel etkilerin azaltılmasını, toplumsal eşitliğin güçlendirilmesini ve ekonomik etkinliğin sağlanmasını hedefleyen bütüncül bir yaklaşımı ifade eder. Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA), Paris İklim Anlaşması ve Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı gibi küresel sürdürülebilirlik politikaları, ulaştırma sektörünün dönüştürülmesi gerektiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Bu dönüşüm; düşük karbonlu teknolojilerin yaygınlaşması, toplu taşımaya öncelik verilmesi, yaya ve bisiklet gibi aktif ulaşım türlerinin teşvik edilmesi, akıllı ulaşım sistemlerinin kullanımı ve sürdürülebilir kentsel hareketlilik planlarının uygulanması gibi çok çeşitli stratejileri kapsamaktadır.

Kentsel alanlar, trafik sıkışıklığı, enerji kullanımı ve karbon emisyonları (Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), 2024) dahil olmak üzere önemli trafik sorunlarıyla karşı karşıyadır. Bu nedenle, sürdürülebilir ulaşım gelişimi küresel bir fikir birliği haline gelmiştir ve ilgili araştırmalar giderek artmaktadır. Politika düzeyinde, araç çağırma hizmetlerinin işleyişinin düzenlenmesi (örneğin, filo boyutunun sınırlandırılması) emisyon artışını etkili bir şekilde azaltabilmektedir (Sun, Wang & Ertz, 2025). Ayrıca, otobüs sisteminin yerleşiminin nüfus yoğunluğuna göre optimize edilmesi, yüksek yoğunluklu bölgelerde ulaşımın karbon verimliliğini önemli ölçüde artırabilmektedir (Lee & Lee, 2025).

Bu kitap bölümünün amacı, ulaşırmada sürdürülebilirlik kavramını çevresel, sosyal ve ekonomik boyutlarıyla ele almak; politika yaklaşımlarını, uluslararası örnek uygulamaları ve geleceğe

yönelik eğilimleri değerlendirmektir. Bölüm, sürdürülebilir ulaşımın temel ilkelerini açıklamakla başlayacak, ardından sektörün dönüşümünde kritik rol oynayan teknolojiler, planlama yaklaşımları ve politika araçları incelenecektir. Son olarak, sürdürülebilir ulaştırmaya ilişkin değerlendirmeler ve öneriler sunulacaktır. Böylece hem araştırmacılar hem politika yapıcılar hem de uygulayıcılar için kapsamlı ve güncel bir çerçeve oluşturulması hedeflenmektedir.

Ulaştırmada Sürdürülebilirlik Kavramı

Tanımlar ve Temel Prensipler

Sürdürülebilir ulaşım, mevcut neslin ulaşım gereksinimlerini karşılayarak hareketliliğin ekonomik, sosyal ve çevresel boyutlarını dengede tutarken, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılama kapasitesini de güvence altına alan bütüncül bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım; enerji verimliliğinin artırılması, çevresel zararların en aza indirilmesi, toplumun tüm kesimlerinin erişilebilirliğinin sağlanması ve ekonomik kaynakların etkin kullanılması gibi bir dizi temel ilkeye dayanmaktadır.

Ulaştırma sistemleri yalnızca fiziksel hareketliliği değil, aynı zamanda toplumsal eşitliği, ekonomik büyümeyi ve çevresel sürdürülebilirliği doğrudan etkileyen karmaşık yapılardır. Bu nedenle sürdürülebilir ulaşım üç açıdan değerlendirilmektedir:

- Çevresel Sürdürülebilirlik: Sera gazı salımlarının azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması, doğal kaynakların korunması, gürültü ve hava kirliliğinin azaltılması.
- Sosyal Sürdürülebilirlik: Her bireyin güvenli, ucuz ve erişilebilir ulaşım seçeneklerine sahip olması, toplumsal kapsayıcılık, yol güvenliği; halk sağlığının gözetilmesi.

- Ekonomik Sürdürülebilirlik: Hem kısa hem uzun vadeli maliyet etkinliği, altyapı yatırımlarında yaşam döngüsü perspektifi, işletme ve bakım maliyetlerinin optimize edilmesi.

Sürdürülebilir ulaşım kavramının kökleri sürdürülebilirlik tanımına dayanmaktadır (Hall, 2002). Yaygın olarak kabul gören bir tanıma göre sürdürülebilirlik, "gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılama kabiliyetinden ödün vermeden mevcut ihtiyaçları karşılayan kalkınma" dır. Bu nedenle, mevcut ve gelecekteki toplumsal ihtiyaçları karşılamak için çevrenin kısıtlamalarına saygı gösterirken, belirli ihtiyaçlara öncelik vermeyi içermektedir (Brundtland, 1987; OECD, 1998). Ekonomik yönden bakıldığında, sürdürülebilirliği bütünleşik bir düzen olarak düşünmek mantıklıdır. Bu; çevresel, mekânsal, ekonomik, sosyal ve kurumsal düzeni tek bir varlıkta birleştirmek anlamına gelmektedir (Burchard-Dziubińska, Rzeńca & Drzazga, 2014).

Sürdürülebilir ulaşım veya çevresel yönlelere vurgu yapması nedeniyle sıklıkla yeşil ulaşım olarak da adlandırılan sürdürülebilir ulaşım, sürdürülebilir kalkınmadan kaynaklanmaktadır. Ulaştırma Araştırma Kurulu'na (Transportation Research Board, 1997) göre, "sürdürülebilirlik tehdit analiziyle ilgili değildir; sürdürülebilirlik sistem analiziyle ilgilidir. Özellikle çevresel, ekonomik ve sosyal sistemlerin çeşitli uzay tabanlı operasyon ölçeklerinde karşılıklı avantaj veya dezavantaj sağlayacak şekilde nasıl etkileşime girdiğiyle ilgilidir". Richardson sürdürülebilir bir ulaşım sisteminde yakıt tüketimi, araç emisyonları, trafik sıkışıklığı, güvenlik ve sosyal ve ekonomik erişimin gelecek nesillere kapsamlı veya geri döndürülemez zararlar vermeyecek bir düzeyde tutulması gerektiğini vurgulamaktadır (Richardson, 1999). Öte yandan OECD, sürdürülebilir ulaşımı halk sağlığını veya ekosistemleri tehlikeye atmayan ulaşım olarak tanımlamaktadır. Ayrıca, yenilenebilir ve yenilenemeyen kaynakların makul kullanımına uyulması gerekmektedir (OECD, 2001).

Sürdürülebilir ulaşım hem dar hem de geniş anlamda tanımlanmaktadır. Dar anlamda, yazarlar yalnızca kaynak tükenmesi veya hava kirliliği sorunlarına odaklanmaktadır. Ayrıca, bu sorun en önemli uzun vadeli çevresel tehdidi temsil etse de sürdürülebilir ulaşımı yalnızca çevresel unsurlarla özdeşleştirmek yanlıştır. Sürdürülebilir ulaşım geniş anlamda tanımlandığında, sosyal ve ekonomik refah da ayrıca analiz edilir. Bu nedenle, Litman ve Burwell tarafından da vurgulandığı gibi, araştırmalarda daha geniş bir tanım tercih edilmekte ve bu da sürdürülebilir ulaşımında entegre çözümler arayışını teşvik etmektedir (Litman & Burwell, 2006).

Uluslararası Çerçevesel ve Politik Yönelimler

Sürdürülebilir ulaşım, küresel politika belgelerinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu çerçeveler, ülkelerin ulaştırma sistemlerini dönüştürürken dikkate almaları gereken temel politika yönelimlerini ortaya koymaktadır.

Sürdürülebilirlik alanında gelişmiş ülkeler tarafından benimsenen politika ve uygulamalar, gelişmekte olan ülkelerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşma sürecine dolaylı ve doğrudan katkı sunmakta, aynı zamanda bu ülkelere yol gösterici bir çerçeve oluşturmaktadır. Sürdürülebilir kalkınmanın sağlanabilmesi, yalnızca belirli aktörlerin çabasıyla değil, toplumun tüm kesimlerinin ortak sorumluluk bilinci geliştirmesiyle mümkün olabilmektedir. Bu bağlamda, birey düzeyinden başlayarak üretim ve hizmet sektörlerinin tamamı ile kamu kurumlarının eşgüdüm içinde hareket etmesi ve iş birliğine dayalı bir yaklaşım benimsemesi gerekmektedir (Gürlük, 2010). Türkiye özelinde değerlendirildiğinde ise sürdürülebilir tüketim anlayışının çevre politikalarıyla bütünleşerek giderek daha görünür hale gelmesi, sürdürülebilirlik süreci açısından olumlu bir gelişme olarak öne çıkmaktadır.

Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları

Sürdürülebilirlik kavramı, 1987 yılında Gro Harlem Brundtland başkanlığında hazırlanan Birleşmiş Milletler raporu Ortak Geleceğimiz ile literatürde kapsamlı bir çerçeveye kavuşmuş; bu raporun yayımlanmasını takiben hükümetler ve kamu kurumları çevresel, ekonomik ve toplumsal sürdürülebilirlik konularını politika gündemlerinin merkezine almaya başlamıştır. Sürdürülebilirlik yaklaşımı, bireylerin yaşam standartlarının yükseltilmesini hedeflerken, doğal kaynakların sınırlı olduğu gerçeğini esas almakta ve çevresel kalite ile uyumlu bir kalkınma anlayışını benimsemektedir. Bu çerçevede sürdürülebilirliğin temel amacı, mevcut kuşakların ihtiyaçlarını karşılarken gelecek nesillerin yaşam olanaklarını tehlikeye atmadan refahın devamlılığını sağlamaktır. Kaynakların aşırı kullanımı, çevresel bozulma ve iklim değişikliği gibi küresel sorunlar, sürdürülebilir kalkınmanın gerekliliğini daha da görünür kılmıştır. Sürdürülebilirlik; ekonomik, sosyal ve çevresel olmak üzere üç temel boyut üzerinden ele alınmakta olup, teknolojik ilerleme, kültürel dönüşüm ve sanayileşme süreçlerinin etkisiyle çevresel boyut giderek daha belirleyici bir nitelik kazanmıştır. Çevresel kalkınma anlayışı ise ekosistemlerin taşıma kapasitesini esas almakta, biyolojik çeşitliliğin korunması ve doğal kaynakların kuşaklar arası sürekliliğinin sağlanması yoluyla doğal dengenin devamını hedeflemektedir (World Commission on Environment and Development (WCDE), 1987).

Birleşmiş Milletler tarafından kabul edilen Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları, ekonomik büyümenin, sosyal kapsayıcılığın ve çevresel korumanın eş zamanlı olarak ele alınmasını öngören bütüncül bir kalkınma çerçevesi sunmaktadır (Şekil 1). Bu amaçlar, ülkelerin uzun vadeli kalkınma politikalarına yön verirken, sektörel planlama ve uygulamalarda temel referans noktası oluşturmaktadır. Ulaştırma sektörüyle doğrudan veya dolaylı olarak ilişkili hedefler;

dayanıklı altyapıların geliştirilmesi, kentlerin yaşanabilirliğinin artırılması ve iklim değişikliğiyle mücadele gibi alanlarda politika üretimini teşvik etmektedir. Bu kapsamda, ulaşım altyapılarının planlanması ve inşasında sürdürülebilir yapı ve malzeme kullanımının benimsenmesi (Kisa, Yuksel & Özmen, 2024; Ertenli & Esen, 2025); doğal kaynak tüketiminin azaltılması, yaşam döngüsü maliyetlerinin düşürülmesi ve çevresel etkilerin sınırlandırılması açısından önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. Aşağıda sunulan şekilde, ulaştırma ile ilişkili Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ve bu amaçların temel odak alanları özetlenmektedir.

Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları içerisinde SKA 9 (Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı), dayanıklı, kapsayıcı ve sürdürülebilir altyapıların geliştirilmesini temel hedeflerden biri olarak tanımlamaktadır. Bu hedef, ulaştırma altyapılarının yalnızca işlevsel ve ekonomik açıdan değil, aynı zamanda çevresel etkileri en aza indirecek biçimde tasarlanmasını ve inşa edilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, yapılarında sürdürülebilir malzeme kullanımının teşvik edilmesi; doğal kaynak tüketiminin azaltılması, karbon ayak izinin düşürülmesi ve altyapıların yaşam döngüsü boyunca çevresel performansının iyileştirilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır (Ertenli & Köseoğlu, 2024; Olabi, Caglar, Kisa & Yuksel, 2021). Yenilikçi ve çevre dostu yapı malzemelerinin ulaştırma projelerine entegre edilmesi, SKA 9’un öngördüğü dirençli ve uzun ömürlü altyapı hedefleriyle doğrudan örtüşmektedir. Aşağıda sunulan şekilde, SKA 9 kapsamında ulaştırma altyapılarına yönelik temel ilkeler özetlenmektedir.

SKA 11 (“Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar”) ve SKA 9 (“Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı”), sürdürülebilir ulaşımı doğrudan ele almaktadır. Kent içi erişilebilir toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesi, güvenli yaya ve bisiklet altyapısı oluşturulması, çevre dostu teknolojilerin benimsenmesi bu hedeflerin alt bileşenleridir.



Şekil 1. Birleşmiş Milletler sürdürülebilir kalkınma hedefleri

Kaynak: BM Türkiye (2025).

Paris İklim Anlaşması

Sürdürülebilirlik alanında uluslararası ölçekte atılan önemli adımlardan biri, 1997 yılında kabul edilen Kyoto Protokolü'dür. Bu protokol, sera gazı emisyonlarının özellikle karbondioksit salımlarının azaltılmasını hedeflemiş; ancak zamanla küresel iklim politikalarının gelişmesiyle birlikte 2016 yılında yürürlüğe giren Paris Anlaşması ile yerini daha kapsamlı bir düzenlemeye bırakmıştır. Paris Anlaşması, iklim değişikliğiyle mücadelede tüm taraf ülkeler için hukuki bağlayıcılığı bulunan ilk küresel çerçeve olarak dikkat çekmektedir. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı kapsamında 12 Aralık 2015 tarihinde Fransa'da düzenlenen toplantıda 196 ülke tarafından kabul edilen anlaşma, 4 Kasım 2016 itibarıyla yürürlüğe girmiştir (United Nations, 2019).

Küresel sıcaklık artışını 1,5–2°C ile sınırlandırmayı hedefleyen Paris Anlaşması, ulaştırma sektöründe karbon emisyonlarının hızla azaltılmasını zorunlu kılar. Elektrikli araçların

yaygınlaştırılması, sürdürülebilir yakıt kullanımı, demiryolu ve denizyolu taşımacılığının güçlendirilmesi bu kapsamda öne çıkan stratejilerdir.

Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı

Avrupa Yeşil Mutabakatı (EDG), Avrupa için birçok alanı kapsayan ve 2050 yılına kadar eşitlikçi ve iklim açısından nötr bir Avrupa Birliği hedefleyen bir büyüme stratejisidir. 17 Sürdürülebilir Kalkınma Hedef'ini (SKH) kapsayan Birleşmiş Milletler 2030 Gündemi, küresel bir sürdürülebilirlik geçişinin temelini oluşturmaktadır.

Avrupa Yeşil Mutabakatı, 2050 yılına kadar iklim açısından nötr bir Avrupa için bir büyüme planıdır. İklim eylemi, enerji, tarım, sanayi, altyapı, çevre ve biyolojik çeşitlilik, ulaşım, finans ve kalkınma ile araştırma ve inovasyon dahil olmak üzere geniş bir alanı kapsamaktadır. EGD, Avrupa Birliği'ni daha sürdürülebilir ve iklime dayanıklı bir topluma dönüştürürken ekonomik büyümeyi ve sosyal eşitliği teşvik etmeyi amaçlayan politika alanları ve girişimler aracılığıyla tüm sektörleri kapsayan hem çevresel hem sosyal hem de ekonomik bir plan görevi görmektedir.

Avrupa Birliği, 2050 yılında karbon nötr bir ulaşım sistemi hedeflemektedir. Bu doğrultuda:

- Sıfır emisyonlu araçların yaygınlaşması,
- Şehirlerde sıfır kirlilik bölgeleri,
- Demiryolu taşımacılığının payının artırılması,
- Akıllı ve dijital mobilite çözümleri politik öncelikler arasında yer almaktadır.

Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planları

Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planı (SUMP) kavramı, tüm ulaşım modlarının, kamu ve özel, motorlu ve motorsuz ulaşımın

entegrasyonunu ve uzun vadeli bir planlama vizyonunu kapsamaktadır. Hareketlilik erişilebilirliğini, sürdürülebilirliği ve halkın refahını iyileştirmeyi hedeflemektedir (European Commission, 2013).

SUMP, çeşitli şehirlerde, ülkelerde ve farklı ortamlarda uygulanmıştır. Örneğin, Hırvatistan'ın Koprivnica şehrinde belediye, ulaşım durumuna ilişkin bir durum analizi gerçekleştirmiştir; bunun için çeşitli paydaşların katılımıyla kapsamlı bir istişare süreci ve kamuoyu araştırması yapılmıştır. İngiltere'nin Cambridgeshire bölgesinde ise 2011-2026 Yerel Ulaşım Planı ile hedefler belirlemiş ve bu hedefler uzun vadeli ulaşım stratejisiyle uyumlu hale getirilmiştir.

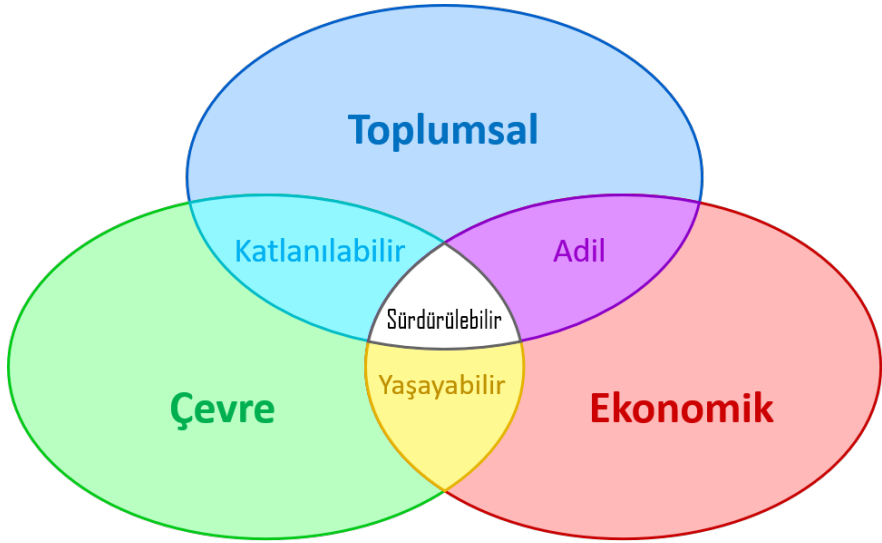
SUMP yaklaşımı, Avrupa'da şehirlerin ulaşım planlama süreçlerini yeniden tanımlamıştır. Bu model; paydaş katılımı, veri temelli karar alma, uzun vadeli vizyon geliştirme, tüm ulaşım modlarının entegrasyonunu esas almaktadır. Türkiye'de İzmir, Konya ve Eskişehir gibi şehirlerde SUMP benzeri süreçler giderek yaygınlaşmaktadır.

Sürdürülebilir Ulaşımın Bütüncül Yapısı

Kentleşme, nüfusun yoğunlaşması, iklim değişikliği, enerji bağımlılığı ve sosyal eşitsizlik gibi küresel ve yerel dinamikler, ulaşım sistemlerini radikal değişime zorlamaktadır. Bu bağlamda, ulaştırmanın sürdürülebilirliği yalnızca bir mod ya da araç seçimi değil çok katmanlı, çok disiplinli ve bütünleşmiş bir yaklaşımla ele alınmalıdır. Bu yaklaşım, ulaşım sistemlerini çevresel, ekonomik, toplumsal ve mekânsal dinamiklerle birlikte bütüncül olarak organize etmeyi hedeflemektedir (Şekil 2).

Sürdürülebilir ulaşımın temel taşlarından biri, modlar arası entegrasyon ve çok modlu mobilitedir. Toplu taşıma, bisiklet, yaya ulaşımı, paylaşımlı araçlar ve yenilenebilir enerjili araçlar, birbirini tamamlayan ve destekleyen bileşenler olarak kurgulanır. Bu sayede

kent içi ulaşım yalnızca bir modun üstünlüğüne değil, farklı modların sinerjisine dayanır. Örneğin, kısa mesafe yolculuklarda yaya ya da bisiklet; orta ve uzun mesafelerde toplu taşıma, esnek noktalara erişimde paylaşımlı araçlar ya da mikro mobilite çözümleri birlikte planlanabilir. Bu çok modlu sistem yaklaşımı, trafik yoğunluğunu, karbon emisyonlarını, enerji tüketimini ve mekânsal baskıyı azaltır; aynı zamanda toplu taşımanın ulaşılabilirliğini ve etkinliğini artırmaktadır.



Şekil 2. Sürdürülebilir ulaşımın bütüncül yapısı

Bu bütüncül yapı, yalnızca altyapı yatırımı veya araç yenilemesiyle sınırlı kalmamalı; politikalar, yönetim, finansman, planlama ve toplumsal davranış değişikliği de eşzamanlı olarak ele alınmalıdır. Karbon nötrlüğü, temiz enerji geçişi, erişilebilir şehir planlaması, adil ücretlendirme, kapsayıcı ulaşım hizmetleri, toplu taşıma–yaya–bisiklet entegrasyonu, akıllı ulaşım sistemleri ve dijital mobilite çözümleri bu sistemin ayrılmaz parçalarıdır.

Öte yandan, sürdürülebilir ulaşımда sosyal adalet ve kapsayıcılık kritik bir bileşendir. Ulaşım altyapısı ve hizmetleri

yalnızca merkezi bölgelerde değil, tüm sosyal kesimler ve mekânsal dağılımlar için eşit derecede erişilebilir olmalıdır. Bu, engelliler, yaşlılar, düşük gelir grupları, kırsal–kentsel geçiş bölgeleri gibi dezavantajlı gruplar için toplu taşıma, yaya ve bisiklet altyapısı, uygun ücretlendirme, güvenli duraklar vb. mekanizmaların oluşturulmasını gerektirir. Böylece sürdürülebilir ulaşım yalnızca çevre için değil, toplumsal eşitlik ve yaşam kalitesi için de bir araç haline gelmektedir.

Sürdürülebilir ulaşımın bütüncül yapısı, uzun vadeli planlama ve dinamik yönetim gerektirmektedir. Kentler ve ulaşım sistemleri statik değil; nüfus, talep, teknolojik yenilik, enerji, iklim gibi birçok değişkenin sürekli değiştiği dinamik bir sürece sahiptirler. Bu nedenle, planlama süreci yalnızca başlangıç yatırımı üzerine değil, yaşam döngüsü yaklaşımıyla değerlendirilmelidir. Ayrıca, veri temelli yönetim, büyük veri analitiği, karar destek sistemleri ve akıllı ulaşım teknolojileri sayesinde sistemin performansı sürekli izlenip optimize edilmelidir. Bu tür bir sistem-dinamiği yaklaşımı hem mevcut kaynakların verimli kullanılmasını hem de gelecekte oluşabilecek risklere karşı esnek ve dirençli bir yapı oluşturulmasını sağlamaktadır.

Sürdürülebilir ulaşım yalnızca çevre odaklı bir yaklaşım değildir; mekânsal planlama, altyapı politikaları, teknoloji, kullanıcı davranışı, ekonomik araçlar ve yönetim mekanizmaları ile iç içe geçen çok disiplinli bir yapıya sahiptir. Bu nedenle başarı, sadece teknolojik çözümlerin uygulanmasına değil, aynı zamanda:

- Arazi kullanım planlamasının ulaşım sistemi ile uyumlu olmasına,
- Toplu taşımanın rekabetçi ve cazip bir seçenek haline getirilmesine,
- Kullanıcı davranışını dönüştüren teşvik ve yaptırımların uygulanmasına,

- Yerel yönetimlerin koordinasyon ve finansman kapasitesine,
- Veriye dayalı yönetim stratejilerinin geliştirilmesine bağlıdır.

Çevresel Sürdürülebilirlik

Çevresel sürdürülebilirlik, ulaştırma sistemlerinin dönüştürülmesinde en kritik boyutlardan birini oluşturmaktadır. Ulaştırma sektörü, küresel ölçekte enerji tüketiminin ve karbon emisyonlarının en büyük kaynaklarından biridir. Kentleşmenin artmasıyla birlikte motorlu araç sahipliği yükselmiş, buna bağlı olarak hava kalitesi bozulmuş, gürültü seviyeleri artmış ve doğal çevre üzerindeki baskılar yoğunlaşmıştır. Bu nedenle çevresel boyut, sürdürülebilir ulaşım politikalarının temelini oluşturmaktadır.

Çevresel sürdürülebilirlik, iklim değişikliği ve karbon salımları, enerji etkinliği, su ve hava kalitesi, kuraklık, biyolojik çeşitliliğin korunması, orman alanlarının azalması ve atık yönetimi olmak üzere çok boyutlu başlıklar çerçevesinde ele alınmaktadır. Bu kapsamda çevre mevzuatına uyumun sağlanması, kirlilik düzeylerinin düzenli olarak izlenmesi ve çevre dostu teknolojilerin kullanımının yaygınlaştırılması da çevresel sürdürülebilirliğin ayrılmaz bileşenleri arasında yer almaktadır. Söz konusu başlıklar içerisinde iklim değişikliği ve sera gazı emisyonları, çevresel sürdürülebilirlik tartışmalarının merkezinde konumlanmakta; bu nedenle çok sayıda ülke uzun vadeli emisyon azaltım hedefleri belirlemektedir. Nitekim günümüzde 130'dan fazla ülke, 2050 yılına kadar insan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını net sıfır seviyesine indirmeyi taahhüt etmiş ve bu doğrultuda çeşitli politika araçlarını hayata geçirmiştir. Devletler tarafından yürürlüğe konulan bu düzenlemeler, özel sektör üzerinde de dönüştürücü bir etki yaratarak işletmeleri üretim süreçlerini yeniden yapılandırmaya ve daha düşük karbonlu uygulamalara yönelmeye zorlamaktadır (Akgül, 2010).

Ulaştırma Kaynaklı Emisyonlar ve Enerji Tüketimi

Ulaştırma sektörü hem enerji talebi hem de sera gazı emisyonları açısından küresel ölçekte en hızlı büyüyen alanlardan biridir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA, 2023) verilerine göre ulaştırma sektörü, dünya genelindeki nihai enerji tüketiminin yaklaşık %30'unu, enerji kaynaklı CO₂ emisyonlarının ise %24'ünü oluşturmaktadır. Karayolu taşımacılığı bu emisyonların yaklaşık %75'inden sorumlu olup, özellikle binek araçlar ve ağır taşıtlar toplam etkide belirleyici bir rol oynamaktadır. IPCC raporu, ulaştırma kaynaklı emisyonların 1990'dan bu yana sürekli yükseldiğini ve sektörde henüz emisyonların "zirve" noktasına ulaşmadığını vurgulamaktadır (IPCC, 2022).

Karayolu taşımacılığının baskın etkisi, fosil yakıt bağımlılığıyla doğrudan ilişkilidir. Petrol talebinin en büyük payının hâlâ ulaştırma sektöründen geldiği belirtilmektedir (IEA, 2023). Ağır taşıtlar tek başına küresel dizel tüketiminin yarısından fazlasını kullanmakta, bu da özellikle kent içi hava kalitesi üzerinde ciddi baskı oluşturmaktadır. UNEP, kentlerdeki NO_x emisyonlarının ortalama %40–60'ının karayolu araçlarından kaynaklandığını ve bu durumun halk sağlığı üzerinde önemli etkiler yarattığını göstermektedir (UNEP, 2021).

Ulaştırma sektörünün enerji yoğun yapısı, sürdürülebilirlik perspektifinden ele alındığında bütüncül politikaların gerekliliğini ortaya koymaktadır. International Transport Forum (ITF) raporları, emisyon azaltımı için tek başına teknolojik dönüşümün yeterli olmayacağını; toplu taşımanın güçlendirilmesi, aktif ulaşım altyapısının genişletilmesi ve kentsel formun kompakt yapıya dönüştürülmesi gibi talep yönetimi stratejilerinin zorunlu olduğunu vurgulamaktadır (International Transport Forum, 2021). Bunun yanında elektrikli araçların yaygınlaştırılması önemli bir potansiyeldir. Dolayısıyla, ulaştırma kaynaklı emisyonların azaltılması, enerji verimliliği, davranışsal değişiklik ve düşük

karbonlu teknolojilerin eşgüdümlü şekilde uygulanmasını gerektiren çok boyutlu bir süreçtir.

Ulaşım Altyapısının Çevresel Etkileri

Ulaşım altyapısı yollar, köprüler, tüneller, limanlar, havalimanları ve demiryolu sistemleri hem inşaat hem de işletme dönemlerinde önemli çevresel etkiler ortaya çıkaran geniş ölçekli fiziksel yapılardır. Özellikle karayolu ve köprü inşaatlarında kullanılan asfalt, çimento ve çelik gibi karbon yoğun malzemeler, yaşam döngüsü boyunca yüksek düzeyde gömülü karbon üretmektedir. IPCC raporu, altyapı inşasında ortaya çıkan gömülü karbonun birçok ülkede ulaştırma sektörünün toplam sera gazı emisyonlarının %20'sine kadar çıkabildiğini vurgulamaktadır (IPCC, 2022). Bu durum, yalnızca araç kaynaklı emisyonların değil, altyapının üretim aşamasının da sürdürülebilirlik çerçevesinde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Özellikle düşük karbonlu malzeme teknolojileri ve yaşam döngüsü değerlendirmeleri, altyapı projelerinin iklim etkisini azaltmada kritik önem taşımaktadır.

Ulaşım altyapısının en belirgin çevresel etkilerinden biri arazi kullanımı ve ekosistem parçalanmasıdır. Otoyollar ve demiryolu hatları doğal habitatları bölerek ekolojik koridorları kesintiye uğratmakta, bu da türlerin hareketliliğini ve genetik çeşitliliğini azaltmaktadır. UNEP, büyük ölçekli altyapı projelerinin sulak alanlar, orman ekosistemleri ve kıyı bölgeleri üzerinde baskı yarattığını; özellikle yol ağlarının genişlediği bölgelerde yaban hayatı geçişlerinin önemli ölçüde azaldığını belirtmektedir (UNEP, 2021).

Karayolu altyapısı, su kaynakları ve toprak kalitesi açısından da yüksek düzeyde çevresel baskı oluşturmaktadır. Asfalt ve beton yüzeylerin artırdığı geçirimsizlik, yağmur suyunun doğal yolla toprağa süzülmesini engelleyerek yüzey akışını yükseltmekte ve su

havzalarında taşkın riskini artırmaktadır. ITF raporları, yoğun trafik koridorları çevresinde toprak ve su sistemlerinde ağır metal (özellikle çinko, kurşun, kadmiyum) birikiminin çevresel sınır değerlerin birkaç katına ulaşabildiğini belirtmektedir (International Transport Forum, 2021). Lastik aşınması ve fren tozu gibi mikro kirleticilerin yağmur suyu ile drenaj sistemlerine taşındığı ve buradan yüzey sularına ulaştığı bilinmektedir. Ayrıca metro ve tünel gibi derin kazı gerektiren altyapı projeleri, yeraltı su seviyelerini etkileyerek hidrolojik dengenin bozulmasına yol açabilmektedir (UNEP, 2021).

Havalimanları ve limanlar gibi büyük ölçekli altyapı türleri ise kendilerine özgü çevresel etkiler taşımaktadır. Havalimanlarının geniş beton yüzeyleri kentsel ısı adası etkisini artırırken; uçak operasyonlarından kaynaklanan NO_x, CO ve partikül madde salımları yerel hava kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir (ICAO, 2023). Apron faaliyetleri, yer hizmet araçları ve pist operasyonları da toplam çevresel baskıyı artıran süreçler arasındadır. Liman altyapıları ise kıyı ekosistemlerinde fiziki değişime neden olmakta, su altı gürültüsü ve gemilerin balast suyu kaynaklı biyolojik kirlilik gibi ekosistem tehditleri yaratmaktadır.

Sonuç olarak ulaşım altyapısı hem karbon emisyonları hem de ekosistemler üzerindeki baskılarıyla çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir etki alanı oluşturmaktadır. Bu nedenle planlama ve uygulama süreçlerinde yaşam döngüsü emisyon analizleri, ekolojik ağların korunması, doğa temelli çözümler (ekolojik köprüler, yeşil koridorlar, yağmur bahçeleri vb.) ve geçirimsiz yüzeylerin azaltılması giderek daha önemli hâle gelmektedir. ITF, sürdürülebilir ulaştırma hedeflerine ulaşmak için altyapı projelerinde bütüncül çevresel değerlendirme yaklaşımının zorunlu olduğunu vurgulamaktadır (International Transport Forum, 2023). Dolayısıyla, altyapının planlanması, tasarımı ve işletilmesi aşamalarında ekolojik etkilerin dikkate alınması hem yerel hem de

küresel çevresel hedeflere ulaşmada temel bir gereklilik hâline gelmiştir.

Sosyal Sürdürülebilirlik

Sosyal sürdürülebilirlik, ulaşım sistemlerinin toplumsal refahı, eşitliği ve yaşam kalitesini güvence altına alan yönlerini kapsamaktadır. Ulaştırma, bireylerin sağlık, eğitim, istihdam ve sosyal hizmetlere erişimini doğrudan etkilediği için sosyal sürdürülebilirlik, sürdürülebilir kent politikalarının temel bileşenidir. Sürdürülebilir ulaşım yalnızca fiziki erişim değil; ulaşım maliyeti, kapsayıcı tasarım, güvenlik ve hizmet kalitesi gibi sosyal boyutları da içermektedir. Birleşmiş Milletler, ekonomik gelişme, sosyal gelişme ve çevrenin korunması başlıklarını sürdürülebilir gelişmenin birbirinden ayrılmaz üç bileşeni olduğunu belirtmektedir. Çevresel sürdürülebilirlik ekosistemin dengesi için bir gereksinimken, toplumsal sürdürülebilirlik de dengeli bir toplum için gerekliliktir (Magnoli, Bonanni & Khalaf, 2002).

OECD'nin Vancouver Konferansı raporunda sürdürülebilir ulaşımın sosyal ilkeleri aşağıda belirtilmiştir.

Eşitlik

Ulaşımında eşitlik kavramı iki temel boyutta ele alınmaktadır. İlk olarak, ulaşım olanaklarının herhangi bir ayrım gözetilmeksizin tüm bireyler için erişilebilir olması gerekmektedir (Alaylı, 2006). Bu kapsamda, ulaşım altyapılarının toplumun tüm kesimlerine hizmet edecek biçimde planlanması ve ulaşım maliyetlerinin farklı gelir gruplarının ödeme gücü dikkate alınarak belirlenmesi önem taşımaktadır.

Eşitlik ilkesinin ulaştırma alanındaki ikinci boyutu ise trafik faaliyetlerinin yol açtığı olumsuz dışsallıkların toplum içinde nasıl paylaşıldığı ile ilişkilidir. Özel otomobil kullanımını tercih eden bireyler veya yük taşımacılığında karayolunu seçen işletmeler

tarafından yaratılan trafik sıkışıklığı ile hava ve çevre kirliliği, sonuç itibarıyla tüm kent sakinlerini etkilemektedir. Ancak bu olumsuz etkilerin adil biçimde dağıtılabilmesi için, çevresel zarara neden olan aktörlerin daha yüksek maliyetlere katlanması gerektiği yönünde bir yaklaşım benimsenmektedir. “Kirleten öder” ilkesi olarak tanımlanan bu anlayış; araç türü ve yakıt cinsine göre vergilendirme, belirli çevresel standartlara uymayan araç ve yakıtların cezalandırılması ve karayolu kullanımına yönelik ücretlendirme uygulamaları aracılığıyla hayata geçirilmektedir. Ayrıca, kent içi trafik yoğunluğunun azaltılması ve bu yoğunluğun yarattığı maliyetlerin eşitlik temelinde paylaşılabilmesi amacıyla, trafik sıkışıklığı ücreti gibi politikaların uygulanması da literatürde önerilen araçlar arasında yer almaktadır (Babalık Sutcliffe, 2005).

Erişilebilirlik

Erişilebilirlik, bireylerin ve ekonomik faaliyetlerin ihtiyaç duyulan tesislere, hizmetlere ve etkinliklere ulaşma düzeyini ifade eden bir kavram olup, aynı zamanda ulaştırma sistemleri ile arazi kullanımının birlikte değerlendirilmesini sağlayan önemli bir performans göstergesi olarak kabul edilmektedir (Bhat & ark., 2001). Bu bağlamda erişilebilirlik; arazi kullanım düzeni, ulaştırma altyapısı ve hizmetleri, zamansal kısıtlar ile bireysel özellikler olmak üzere dört temel bileşenin etkileşimi sonucu şekillenmektedir (Geurs & Wee, 2004).

Bireylerin erişilebilirlik düzeyi; yaş, gelir seviyesi ve eğitim durumu gibi sosyo-demografik özelliklerin yanı sıra, fiziksel hareket kabiliyeti, farklı ulaşım türlerine erişim imkânı ve ulaşım harcamalarına ayırabildikleri bütçe gibi faktörlerden etkilenmektedir (Cervero, Rood & Appleyard, 1997; Shen, 1998). Bu farklılıklar, ulaşım hizmetlerinden yararlanma kapasitesinde bireyler arasında belirgin eşitsizlikler yaratabilmektedir. Dolayısıyla sürdürülebilir ulaşımın hayata geçirilebilmesi için erişilebilirlik kavramının,

toplumsal eşitlik ilkesiyle bütünleşik ve çok boyutlu bir bakış açısıyla ele alınması gerekmektedir.

Sağlık ve güvenlik

Ulaşım sistemlerinin insan sağlığını ve güvenliğini korumak adına fiziksel, psikolojik ve sosyal riskleri en aza indirecek şekilde planlanması gerekmektedir. Bu ilke, yalnızca trafik kazalarını azaltmakla kalmayıp aynı zamanda temiz hava, düşük gürültü ve güvenli yaya/bisiklet altyapısı gibi faktörlerle toplumsal yaşam kalitesini yükseltmeyi hedeflemektedir. İnsanların güvenli ve sağlıklı hareket edebileceği ortamların sağlanması, sürdürülebilir ulaşımın temel unsurlarından biridir; çünkü bu, ulaşım hizmetlerinin sadece erişilebilirlik veya verimlilik açısından değil, insan yaşam kalitesini ve kamu sağlığını doğrudan destekleyen bir sistem olmasını garanti etmektedir.

OECD'nin Vancouver ilkeleri, kent içi taşımada trafik güvenliği iyileştirmeleri, hız yönetimi, ayrı bisiklet ve yürüyüş yolları gibi fiziksel düzenlemelerle sakatlanma ve ölüm risklerinin azaltılmasını, aynı zamanda hava kirliliğine bağlı solunum ve kardiyovasküler hastalıklar gibi toplum sağlığını etkileyen faktörlerin minimize edilmesini öne çıkarmaktadır. Bu çerçevede sürdürülebilir ulaşım politikaları, trafik kazaları ve çevresel risklere bağlı sağlık yükünü azaltarak toplumda daha kapsayıcı, eşitlikçi ve düşük riskli hareketlilik modellerini teşvik etmektedir (OECD, 1997).

Ekonomik Sürdürülebilirlik

Ekonomik sürdürülebilirlik perspektifinden bakıldığında, ulaşım sistemleri toplumun hareketlilik gereksinimlerini etkinlik ve maliyet açısından rasyonel bir biçimde karşılayabilen bir yapı sunmalıdır (Mess, 1992). Bu doğrultuda ulaşım hizmetlerinin, zaman içerisinde değişen talep dinamiklerine esnek ve hızlı bir şekilde uyum sağlayabilmesi büyük önem taşımaktadır. Ancak bu

uyum süreci yalnızca operasyonel verimlilikle sınırlı olmayıp; ekonomik büyüme, istihdam olanakları, kamu maliyesi üzerindeki yükler ve ticari faaliyetler gibi daha geniş ekonomik göstergelerle birlikte değerlendirilmelidir (World Bank Group, 1996). Ekonomik sürdürülebilirlik, ulaştırma sistemlerinin Ulaştırma altyapıları, ülkelerin ekonomik gelişmesinde kritik bir role sahip olmakla birlikte, yüksek yatırım maliyetleri, işletme giderleri ve dışsal maliyetler nedeniyle ekonomik açıdan dikkatle yönetilmesi gereken alanlardır.

Sürdürülebilir ulaşım politikalarının ekonomik hedefleri aşağıdaki temel unsurlar çerçevesinde şekillenmelidir:

- Ulaşım altyapısının, ekonomik büyüme ve bölgesel kalkınma hedefleriyle uyumlu biçimde planlanması ve geliştirilmesi,
- Toplumun hareketlilik ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde, maliyet açısından erişilebilir, zaman açısından etkin ve kapasite bakımından yeterli ulaşım hizmetlerinin sunulması,
- Trafik yoğunluğu ve buna bağlı zaman kayıplarının azaltılmasına yönelik önlemlerin hayata geçirilmesi,
- Kırsal yerleşimler ile kentsel merkezler arasında fiziksel ve ekonomik entegrasyonu güçlendiren ulaşım bağlantılarının kurulması,
- Karayolu, demiryolu, denizyolu ve havayolu gibi farklı ulaşım türlerinin bir arada ve bütünleşik biçimde kullanılmasına olanak tanınması,
- Ulaşım altyapısına yönelik kamu ve özel sektör yatırımlarının artırılarak sistemin uzun vadeli sürdürülebilirliğinin güvence altına alınması. (Cracknell, 2000).

Geleneksel ulaşım planlama anlayışı kapsamında trafik yoğunluğunu azaltmaya yönelik olarak gerçekleştirilen kapasite artırımı uygulamaları, kısa vadede seyahat sürelerinin kısalması,

sıkışıklığın azalması ve araç işletme maliyetlerinin düşmesi gibi olumlu sonuçlar doğurabilmektedir. Ancak uzun vadede bu tür müdahaleler; park talebinin artması, trafik kazalarının çoğalması, hava kirliliği ve gürültü düzeylerinin yükselmesi gibi çeşitli ekonomik ve çevresel maliyetlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle ulaşım projelerinin değerlendirilmesi ve ekonomik analiz süreçlerinde, yalnızca doğrudan maliyetlerin değil, aynı zamanda bu faaliyetlerden kaynaklanan dışsal maliyetlerin de dikkate alınması gerekmektedir. Sürdürülebilirlik perspektifinden ekonomik analizlerin temel amacı, kısa ve uzun dönemde ortaya çıkan içsel ve dışsal maliyetleri bütüncül bir yaklaşımla belirlemek ve projelerin daha gerçekçi ve uygulanabilir biçimde değerlendirilmesini sağlamaktır. Bu yaklaşım sayesinde ekonomik büyüme ile toplumsal faydanın dengelendiği, çevreye duyarlı ve gelecek kuşaklar açısından olumsuz sonuçlar doğurmayan bir kalkınma sürecinin desteklenmesi mümkün olmaktadır (Daly, 1990).

Ekonomik boyut, sürdürülebilir ulaşımın yalnızca maliyet azaltmaya değil, aynı zamanda uzun vadeli ekonomik dayanıklılığa ve toplumsal refaha katkı sunmasını amaçlamaktadır. Verimli yatırım kararları, dışsal maliyetleri azaltan politikalar ve akıllı finansman araçları ile desteklenen sürdürülebilir ulaşım sistemleri hem ulusal ekonomi hem de kentlerin rekabet gücü açısından kritik öneme sahiptir.

Ulaştırma Sürdürülebilirlik Politikaları ve Stratejileri

Ulaştırma sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşabilmek, yalnızca teknik çözümler geliştirmekle değil; aynı zamanda uygun politika araçları, kurumsal düzenlemeler ve uzun vadeli stratejilerle mümkündür. Çünkü ulaşım talebi, kullanıcı davranışları, altyapı yatırımları ve ekonomik koşullar bir arada şekillenmekte; bu nedenle politika müdahaleleri hem çok boyutlu hem de eşgüdümlü olmalıdır. Sürdürülebilir ulaşımın sağlanması

tanımlanan politika alanlarını, stratejik yaklaşımları ve uygulama araçlarını kapsamaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. Sürdürülebilir ulaşım ölçütleri, hedefler ve göstergeleri

Bileşen	Ölçütler	Hedefler	Göstergeler	Alt Göstergeler
Sürdürülebilir Ulaşım	Toplu Taşıma	Erişilebilir Toplu Taşımaya Sahip Olmak	Toplu Taşıma Duraklarına Erişilebilirlik	Otobüs Durağına Erişim Mesafesi
				Raylı Sistem Durağına Erişim Mesafesi
				Denizyolu İskelesine Erişim Mesafesi
	Bisiklet	Bisiklet Altyapısına Sahip Olmak	Bisiklet Yolu ve Parkları Varlığı	Standartlara Uygun Bisiklet Yolu Oranı
				Bisiklet Parkı Oranı
	Yaya Ulaşımı	Yaya Ulaşımını Güçlendirmek	Yeterli Yaya Yolları Genişliği Oranı	
	Engelli Erişimi	Engelli Erişiminin Sağlanması	Standartlara Uygun Engelli Erişimi Varlığı	
	Özel Araç	Özel Araç Kullanımının Sınırlandırılması	Birim Başına Düşen Otopark Miktarı	

Kaynak: Altuntaş, S., T., Eyigün, Y., (2021). Sürdürülebilir Kent İçi Ulaşım Politikaları Raylı Sistemler Örneği. Journal of Technology and Applied Sciences 3(2), 217-233.

Birleşmiş Milletler çatısı altında kurulan Sürdürülebilir Kalkınma Komisyonu, sürdürülebilir kalkınmanın izlenmesi ve değerlendirilmesine yönelik göstergelerin geliştirilmesi amacıyla çalışmalar yürütmüştür. Bu kapsamda, 1995 yılında Sürdürülebilir Kalkınma Göstergeleri Çalışma Programı hayata geçirilmiş ve başlangıçta 96 temel göstergeden oluşan bir çerçeve oluşturulmuştur. İzleyen süreçte göstergelerin sadeleştirilmesine gidilerek bu sayı 50'ye indirilmiş, 2001 yılı itibarıyla ise gösterge setleri tematik başlıklar altında gruplanarak daha sistematik bir yapı kazanmıştır. Küresel sürdürülebilirlik gündeminde önemli bir dönüm noktası ise

2015 yılında Birleşmiş Milletler Genel Kurulu tarafından Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA)'nın kabul edilmesi olmuştur. Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı öncülüğünde belirlenen bu çerçeve kapsamında, 17 ana amaç ve bu amaçları destekleyen 169 alt hedef tanımlanmıştır. Söz konusu programın temel yaklaşımı; yoksulluğun ve çok boyutlu yoksunlukların ortadan kaldırılması, iklim değişikliğiyle mücadele edilmesi, su ve orman kaynaklarının korunması, sağlık ve eğitim hizmetlerinin iyileştirilmesi, toplumsal eşitsizliklerin azaltılması ve ekonomik büyümenin desteklenmesi gibi hedeflerin birbirinden bağımsız değil, bütüncül ve eşgüdümlü bir biçimde ele alınması gerektiği anlayışına dayanmaktadır. Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı tarafından belirlenen sürdürülebilir kalkınma amaçları aşağıda sunulmaktadır: (Sürdürülebilir Kalkınma İçin Küresel Amaçlar, 2025).

Tablo 2. Sürdürülebilir kalkınma amaçları

1- Yoksulluğa son	10- Eşitsizliklerin azaltılması
2- Açlığa son	11- Sürdürülebilir şehirler ve topluluklar
3- Sağlık ve kaliteli yaşam	12- Sorumlu üretim ve tüketim
4- Nitelikli eğitim	13- İklim eylemi
5- Toplumsal cinsiyet eşitliği	14- Sudaki yaşam
6- Temiz su ve sanitasyon	15- Karasal yaşam
7- Erişilebilir ve temiz enerji	16- Barış, adalet ve güçlü kurumlar
8- İnsana yakışır iş ve ekonomik büyüme	17- Amaçlar için ortaklıklar
9- Sanayi, yenilikçilik ve altyapı	

Kaynak: Sürdürülebilir Kalkınma için Küresel Amaçlar, <https://www.kureselamaclar.org> (Erişim Tarihi: 20.11.2025)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları kapsamında ulaştırma sektörü, özellikle SKA 9 (Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı), SKA 11 (Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar) ve SKA 13 (İklim Eylemi) başlıkları altında doğrudan ele alınmakta ve bu amaçlar aracılığıyla ulaşım politikalarına yön veren temel ilkeler ortaya konulmaktadır. Söz konusu çerçeve, ülkelerin ulaştırma alanında düşük karbonlu ve

evre dostu yatırımlara öncelik vermesini teşvik ederken; toplu taşıma sistemlerinin güçlendirilmesi, alternatif ve temiz yakıtların kullanımının artırılması ile güvenli ve kapsayıcı ulaşım altyapılarının yaygınlaştırılmasını temel politika alanları olarak öne çıkarmaktadır.

Bütüncül bir sürdürülebilir ulaşım politikası; enerji, evre, ekonomi, planlama, teknoloji ve kullanıcı davranışlarını bir arada ele alan çok katmanlı bir yaklaşım gerektirmektedir. Başarılı uygulamalar, güçlü bir yönetişim modeli, veri temelli karar verme süreçleri ve uzun vadeli bir stratejik vizyonla mümkündür.

Sonuçlar ve neriler

Ulaşım sektörü, bir ülkenin ekonomik gelişim sürecinde stratejik öneme sahip hizmet alanlarından biri olarak öne çıkarmaktadır. Sektörün üretmiş olduğu dışsallıklar, maliyet yapısı ve fiyatlandırma mekanizmaları; özellikle kamu yararı ve sosyal devlet anlayışı çerçevesinde, kamunun düzenleyici rolünü güçlendirmesini zorunlu kılmaktadır. Bunun yanı sıra ulaşım, kentsel ölçekte rekabet gücünü etkileyen temel unsurlardan biri olup hem doğrudan yarattığı gelirler hem de dolaylı olarak desteklediği istihdam olanakları aracılığıyla kent ekonomisi üzerinde belirleyici bir etki yaratmaktadır. Bu yönüyle ulaşım sistemleri, yalnızca bir hizmet sunumu değil, aynı zamanda kentsel ekonomik dinamizmi şekillendiren bir araç niteliği taşımaktadır.

Sürdürülebilir bir ulaşım sisteminin oluşturulması ise öncelikle kentsel mekânın planlanma ve örgütlenme biçimiyle ilişkilidir. Bu bağlamda temel hedef, yolculuk sayısını ve yolculuk mesafelerini azaltarak ulaşım talebini düşürmektir. Kentsel alanın işlevsel bir şekilde düzenlenmesi, bireyler ile hizmet ve faaliyet alanları arasındaki mesafelerin kısılmasını sağlamakta; böylece mal ve hizmetlere erişim için yapılan seyahatlerin azalmasına katkıda bulunmaktadır. Ulaşım talebindeki bu azalma, sınırlı kaynakların

daha etkin kullanılmasına olanak tanırken, çevresel ve ekonomik baskıların da hafiflemesine yardımcı olmaktadır.

Bununla birlikte sürdürülebilir ulaşım yaklaşımı, ana ekonomik ve sosyal faaliyet merkezleriyle güçlü bağlantılar kurabilen, erişilebilir ve etkin bir toplu taşıma sisteminin varlığını da gerekli kılmaktadır. Bu tür bir ulaşım altyapısına sahip kentler, yeni yatırımlar ve ekonomik faaliyetler açısından daha cazip hale gelmekte ve kentsel çekiciliklerini artırmaktadır. Dolayısıyla sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin sağladığı faydalar yalnızca trafik yoğunluğunun azaltılması ve hava kalitesinin iyileştirilmesiyle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda yoksulluğun azaltılmasına katkı sunmakta ve uzun vadede kentsel ekonomik refahın güçlenmesine hizmet etmektedir. Ulaştırma sürdürülebilirlik, çevresel, ekonomik ve toplumsal boyutları entegre eden kapsamlı bir yaklaşım gerektirmektedir. Sürdürülebilir ulaşım, çevresel etkileri azaltırken ekonomik verimliliği artırmalı ve sosyal kapsayıcılığı desteklemelidir. Finansal kaynak eksikliği, toplumsal direnç, veri eksikliği ve politika uyumsuzlukları, sürdürülebilir ulaşım uygulamalarının önündeki önemli engellerdir. Bu nedenle sistematik planlama, uzun vadeli vizyon ve güçlü yönetim mekanizmaları kritik önemdedir.

Ulaştırma sürdürülebilirlik üzerine öneriler şu şekilde sıralanabilmektedir:

-Kentsel ve ulusal ulaşım planlamalarında, gerçek zamanlı trafik verileri, kullanıcı talep analizleri ve enerji tüketim verileri kullanılarak bütüncül karar destek sistemleri geliştirilmeli.

-Yaya ve bisiklet altyapısı yaygınlaştırılmalı, toplu taşıma erişilebilirliği artırılmalı ve bu modlar ekonomik ve sosyal açıdan teşvik edilmelidir.

-Elektrikli araç, hibrit araç ve düşük emisyonlu yakıt kullanımını destekleyen regülasyonlar ve altyapı yatırımları artırılmalıdır.

-Araç paylaşımı, scooter ve bisiklet paylaşımı gibi çözümler toplu taşıma ile entegre edilerek kullanıcılar için daha çevreci ve ekonomik ulaşım alternatifleri sağlanmalıdır.

-Eğitim ve farkındalık programları ile toplumun çevreci ulaşım alışkanlıklarını benimsemesi teşvik edilmelidir.

-Kamu-özel sektör iş birlikleri, yeşil tahviller ve sürdürülebilirlik fonları gibi finansman araçları, sürdürülebilir ulaştırma yatırımlarının hayata geçirilmesini desteklemelidir.

Sürdürülebilir ulaştırma, yalnızca çevreyi korumak değil; kentlerin yaşanabilirliğini artırmak, ekonomik verimliliği desteklemek ve sosyal eşitliği sağlamak için de kritik öneme sahiptir. Başarılı bir dönüşüm, politika, teknoloji ve toplumsal davranışları uyumlu bir şekilde birleştiren bütüncül bir yaklaşımla mümkündür. Gelecek yıllarda veri temelli kararlar, paylaşımlı ve düşük karbonlu mobilite çözümleri, elektrikli ve otonom araç teknolojileri, sürdürülebilir ulaştırmanın merkezinde yer alacaktır.

Kaynakça

Akgül, U. (2010). Sürdürülebilir kalkınma: Uygulamalı antropolojinin eylem alanı. Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih Coğrafya Fakültesi Antropoloji Dergisi, 24(2), 135-159.

Alaylı, B. (2006). Land Use Optimization For Improved Transportation System Performance Case Study: Ankara, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Altuntaş, S., T. & Eyigün, Y., (2021). Sürdürülebilir Kent İçi Ulaşım Politikaları Raylı Sistemler Örneği. Journal of Technology

Babalık Sutcliffe, E. (2005). Kentsel Sorunların Çözümünde Ulaşım Politikaları; Ulaşım Sorunlarının Çözümünde Kent Planlama Politikaları. Ankara, Ankara'da Uygulanan Ulaşım Politikaları ve Kente Etkileri Sempozyumu, 57-71.

Bhat, C., Handy, S., Kockelman, K., Mahmassani, H., Chen, Q., Srour, I., & Weston, L. (2001). Assessment Of Accessibility Measure (Research Report No. 7-4938), TexasDepartment of Transportation, Texas, U.S.A.

BM Türkiye (2025). <https://turkiye.un.org/tr/sdgs>. Erişim Tarihi: 20.11.2025

Brundtland, G.H. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common FutureOur Common Future; Oxford University Press: Oxford, UK.

Burchard-Dziubińska, M., Rzeńca, A., & Drzazga, D. (2014). Zrównoważony rozwój-naturalny wybór. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.

Cervero, R., Rood, T., & Appleyard, B. (1995). Job accessibility as a performance indicator: An analysis of trends and their social policy implications in the San Francisco Bay Area.

Cracknell, J.A. (2000). Experience In Urban Traffic Management And Demand Management In Developing Countries”, World Bank Urban Transport Strategy Review –Background Paper, Washington D.C.

Daly, H. (1990). Towards Some Operational Principles Of Sustainable Development, *Ecological Economics*, 1-6.

Ertenli, M. F., & Köseoğlu, E. M. (2024). Geleneksel Bir Yapıdaki Ahşap Taşıyıcı Sistem Panelinin Yanal Yük Kapasitesinin Analizi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 16(1), 448-460.
<https://doi.org/10.29137/umagd.1409739>

Ertenli, M. F., & Esen, I. (2025). Thermo-mechanical buckling response of functionally graded sandwich dome structures. *Archive of Applied Mechanics*, 95(4), 82.

European Commission. (2013). Annex 1: A concept for sustainable urban mobility plans. Available online at https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/urban--mobility/urban--mobility--package_en

Geurs, K. T. & Wee, B. V. (2004). Accessibility Evaluation of Land-Use and Transportation Strategies: Review And Research Directions, *Journal of Transport Geography*, 12 (2), 127-140.

Gürlük, S. (2010). Sürdürülebilir Kalkınma Gelişmekte Olan Ülkelerde Uygulanabilir Mi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, 5(2), 85-99.

Hall, R. P. (2002). Introducing the Concept of Sustainable Transportation to the US DOT through the Reauthorization of TEA--278--

21 (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Engineering Systems Division, Technology and Policy Program; and,(SM)-Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering).

ICAO. (2023). Innovation and Technology in Airport Sustainability. ECO Airport Toolkit.

IEA. (2023). Energy Outlook 2023. International Energy Agency.

IEA. (2023). Oil Market Report 2023. International Energy Agency

International Energy Agency (IEA). (2024). Greenhouse gas emissions from energy. Paris, France.

International Transport Forum. (2021). ITF Transport Outlook 2021. OECD Publishing.

International Transport Forum. (2023). ITF Transport Outlook 2023. OECD Publishing.

IPCC (2022), Climate Change Mitigation: Urban system. The Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Kisa, M. H., Yuksel, S. B., & Özmen, R. (2024). Experimentally validated numerical investigation on the behavior of composite shear walls subjected to cyclic loading. Engineering Science and Technology, an International Journal, 59, 101884.

Lee, B. & Lee, S. (2025). Toward greener transit: carbon-efficient density thresholds for public transit vs. private vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 140, Article 104641.

Litman, T. & Burwell, D. (2006). Issues in sustainable transportation. *International Journal of Global Environmental Issues*, 6(4), 331-347.

OECD. (1988). *Sustainable Development: A Renewed Effort by the OECD*; Policy Brief No.; Organisation for Economic Co-Operation and Development: Paris, France.

OECD. (1997). *Towards sustainable transportation: The Vancouver conference*, Vancouver, British Columbia.

OECD. (2001). *Policy Instruments for Achieving Project Environmentally Sustainable Transport*; Organisation for Economic Co-Operation and Development: Paris, France.

Olabi, M. N., Caglar, N., Kisa, M. H., & Yuksel, S. B. (2021). Numerical study on the response of composite shear walls with steel sheets under cyclic loading. *Journal of Building Engineering*, 34, 102069.

Magnoli, G. C., Bonanni, L. A., & Khalaf, R. (2002). Designing a DNA for adaptive architecture: a new built environment for social sustainability. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 57.

Mees, W. (1992). Understanding Sustainability, in Bernd Hamm et al. (eds.) *Sustainable Development And The Future Of Cities*, Centre For European Studies, UniversitatTrier, Germany, 32.

Richardson, B. (1999). *Towards a Policy on a Sustainable Transportation System*; Transportation Research Record 1670; Transportation Research Board: Washington, DC, USA.

Shen, Q. (1998). Location Characteristics of Inner-City Neighborhoods And Employment Accessibility of Low-Wage Workers, *Environment and Planning B: Planning and Design* 25, 345–365.

Sun, S., Wang, Y., & Ertz, M. (2025). Can transportation network companies improve the sustainability of urban transportation? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 143, Article 104765.

Sürdürülebilir Kalkınma için Küresel Amaçlar, <https://www.kureselamaclar.org> (Erişim Tarihi: 20.11.2025)

Transportation Research Board. (1997). *Toward a Sustainable Future; Special Report 251*; Transportation Research Board: Washington, DC, USA.

United Nations. (2019). *The Sustainable Development Goals Report 2019*.

UNEP. (2021). *Improving Air Quality in Kampala: Initiatives for Sustainable Urban Transport*. United Nations Environment Programme

UNEP. (2021). *Global monitoring plan for persistent organic pollutants: regional monitoring report – Africa*. United Nations Environment Programme, Geneva.

World Commission On Environment And Development (WCDE). (1987). *Our Common Future*, Brundtland Report.

World Bank Group. (1996). *Sustainable transport: priorities for policy reform* (English). Development in practice Washington, D.C.: The World Bank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/113831468764674772>

BÖLÜM 12

DERİN ÖĞRENME İLE ASFALT ÇATLAKLARININ TESPİTİ

1. Muzaffer ASLAN¹

2. İhsan GÜZEL²

Giriş

Ulaşım altyapıları, bir ülkenin sosyoekonomik kalkınmasının temel unsurlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Bu altyapı sistemleri içerisinde en yaygın kullanılan ve stratejik öneme sahip olan bileşen asfalt yollardır. Asfalt yollar, ekonomik faaliyetlerin sürdürülmesi, mal ve hizmetlerin etkin taşınması, bölgesel kalkınma farklarının azaltılması ve toplumsal refahın artırılması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Gelişmiş ulaşım ağları; tarım, sanayi, ticaret ve turizm sektörlerinin büyümesini destekleyerek sürdürülebilir kalkınmanın gerçekleşmesine doğrudan katkı sağlar. Ayrıca asfalt yollar, güvenli ve konforlu seyahat imkânı sunarak

¹ Doç. Dr., Bingöl Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-2418-9472

² Dr. Öğretim Üyesi., Bingöl Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-9153-8644

bireylerin yaşam kalitesini artırmakta ve acil durum hizmetlerine hızlı erişim olanağı sağlamaktadır.

Bununla birlikte, asfalt kaplama yüzeyleri zamanla trafik yükleri, sıcaklık değişimleri, donma-çözülme döngüleri ve malzeme yorgunluğu gibi çeşitli etkenlere bağlı olarak bozulmalara maruz kalmaktadır. Bu bozulmaların en yaygın türlerinden biri ise çatlak oluşumudur. Asfalt çatlakları, yol yüzeyinin bütünlüğünü zayıflatarak yapısal dayanımı düşürmekte, suyun alt tabakalara sızmasına neden olarak ilerleyen dönemlerde daha ciddi deformasyonlara yol açmaktadır (Deng et al., 2021). Bu durum, yolun hizmet ömrünü kısaltmakta, bakım-onarım maliyetlerini artırmakta ve ulaşım güvenliğini olumsuz etkilemektedir (Saberironaghi & Ren, 2024). 2006 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir çalışma, standart altı yol koşullarının neden olduğu kazaların 217,5 milyar ABD dolarına ulaşan ciddi ekonomik etkisini belirtmektedir (Zaloshnja & Miller, 2009). Bu asfalt çatlakların zamanında onarılmaması, daha ciddi hasarlara yol açabilir. Hem trafik güvenliğini hem de yolların dayanıklılığını tehlikeye atabilir ve kazalarla kaynak israfına neden olabilir (Baduge et al., 2023). Yol kullanımı arttıkça bu riskler büyür ve sonuçlar ölümlere varabilir. Dolayısıyla asfalt yollarda çatlakların oluşum nedenlerinin araştırılması ve uygun önleyici bakım stratejilerinin geliştirilmesi, altyapı yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır (Gong et al., 2024).

Asfalt çatlaklarının tespitinde, geleneksel manuel yöntemler uzun yıllar boyunca altyapı denetimlerinin temelini oluşturmuştur. Ancak bu yöntemler, günümüzde artan trafik yoğunluğu, bakım gereksinimleri ve güvenlik standartları karşısında yetersiz kalmaktadır. Manuel denetimler genellikle düşük verimlilikle sonuçlanmakta, trafik akışını aksatmakta ve saha personeli için potansiyel güvenlik riskleri oluşturmaktadır. Ayrıca bu süreçler hem zaman alıcı hem de insan hatasına açık olduklarından, özellikle geniş

karayolu ağlarında sürdürülebilir bir çözüm sunamamaktadır (Saberironaghi, 2023).

Bu sorunlar doğrultusunda, otomatik çatlak tespiti sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması büyük önem taşımaktadır. Otomatik sistemler, gelişmiş görüntü işleme ve yapay zekâ teknikleri sayesinde yol yüzeylerindeki çatlakları hızlı, doğru ve tutarlı bir şekilde belirleyebilmektedir. Böylece uzmanların üzerindeki manuel inceleme yükü önemli ölçüde azalmakta, bakım ve onarım süreçleri daha verimli hale gelmektedir (Zhang et al., 2016). Ayrıca bu sistemler, trafik akışına müdahale edilmeden uzaktan veya hareket halindeki araçlar üzerinden veri toplanmasını sağlayarak güvenliği artırmaktadır.

Asfalt Çatlak Tespit Yöntemleri

Son dönemlerdeki literatür çalışmalarında, asfalt çatlaklarının tespiti geleneksel yaklaşımlar ve derin öğrenme destekli yaklaşımlar olmak üzere iki ana başlıkta ele alınmaktadır.

- Geleneksel asfalt çatlak tespit yöntemleri

Geleneksel çatlak tespit yöntemleri, mühendislik yapılarında ve çeşitli malzemelerde meydana gelen hasarların erken aşamada belirlenmesi açısından büyük öneme sahiptir. Özellikle altyapı sistemlerinin güvenliğinin artırılması, bakım maliyetlerinin azaltılması ve yapıların hizmet ömürlerinin uzatılması hedefleri doğrultusunda, bu alanda uzun yıllardır yoğun araştırmalar sürdürülmektedir. Mevcut çalışmalar, çatlakların görüntü tabanlı analizlerle tespitine odaklanmış olup, kullanılan yöntemler genellikle beş ana grupta toplanmaktadır (Saberironaghi & Ren, 2024): Dalgacık Analizi, Görüntü Eşikleme, Manuel Özellik Çıkarma ve Sınıflandırma, Sınır Tespit Teknikleri ve En Kısa Yol Yaklaşımları.

Dalgacık analizi, bir görüntünün farklı frekans bileşenlerini ayrıştırarak hem düşük frekanslı genel yapıyı hem de yüksek frekanslı detayları ortaya koyma kabiliyeti sayesinde, çatlak gibi ince detayların tespitinde oldukça etkili bir yöntemdir (Kapela et al., 2015). Bu yaklaşım, gürültüye karşı dayanıklılığı ve çok ölçekli analiz yeteneği nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir.

Görüntü eşikleme yöntemleri, hesaplama açısından basit olmalarına karşın oldukça verimli sonuçlar sunar. Bu yöntem, piksellerin yoğunluk değerlerine göre sınıflandırılması esasına dayanır ve özellikle yüksek kontrastlı çatlak görüntülerinde başarılıdır (Peng et al., 2015). Ancak, aydınlatma koşullarındaki değişkenlik veya yüzey dokusundaki karmaşıklık gibi faktörler, yöntemin doğruluğunu olumsuz yönde etkileyebilir.

Manuel özellik çıkarma ve sınıflandırma tekniklerinde, çatlaklara özgü kenar uzunluğu, yönelme ve parlaklık değişimi gibi özellikler uzmanlar tarafından belirlenir, ardından bir sınıflandırıcı yardımıyla çatlak bölgeler tanımlanır. Bu yöntemin en önemli dezavantajı, yüksek düzeyde insan müdahalesine ihtiyaç duyması ve bu nedenle öznel değerlendirmelere açık olmasıdır.

Sınır tespit teknikleri, görüntüdeki ani yoğunluk değişimlerini analiz ederek çatlak sınırlarını belirlemeye odaklanır. Bu kapsamda, Canny veya Sobel gibi kenar tespit algoritmaları yaygın olarak kullanılır (Ayenu-Prah & Attah-Okine, 2008). Bu yöntemler, çatlakların geometrik özelliklerini ortaya çıkarmada etkili olsa da karmaşık yüzey dokularında yanlış pozitif sonuçlara yol açabilir.

En kısa yol teknikleri, bir görüntü üzerindeki olası çatlak yollarını grafik tabanlı bir yapı üzerinden modelleyerek, en düşük maliyetli (dolayısıyla en olası çatlak) yolun bulunmasına dayanır. Bu yaklaşım, özellikle çatlakların sürekliliğini izleme ve haritalama gibi görevlerde önemli avantajlar sunar.

Geleneksel asfalt çatlak tespit yöntemleri temelde olarak bir görüntüdeki renk, gri ton, şekil, kenar ve frekans gibi yüzeysel özellikleri analiz ederek çatlakların tespit edilmesini sağlar. Bu yöntemler, temel düzeyde öznitelik çıkarımı yaklaşımlarına dayanır ve çoğunlukla basit eşikleme, kenar belirleme veya morfolojik işlemler gibi klasik algoritmalarından yararlanır (Jiang et al., 2021). Bu tekniklerin en önemli avantajı, nispeten düşük hesaplama maliyetleri ve kolay uygulanabilir olmalarıdır. Ancak söz konusu yöntemlerin başarısı büyük ölçüde kullanıcı tarafından belirlenen parametrelere, özellikle de optimum eşik değerlerinin seçimine bağlıdır. Bu durum, elde edilen sonuçlara insan öznelliğini dahil eder ve güvenilirlik açısından belirsizlik oluşturur. Ayrıca, görüntüdeki ışık koşullarının değişimi, yüzey dokusundaki farklılıklar veya gürültü gibi çevresel etkiler, bu yöntemlerin performansını önemli ölçüde düşürebilir (Ritto & Rochinha, 2021). Analiz edilen sahnedeki değişiklikler, çoğunlukla algoritmanın yeniden tasarlanmasını veya parametrelerde önemli ayarlamalar yapılmasını gerektirir. Bu durum, görüntü işleme temelli yaklaşımların esneklik ve genelleme açısından sınırlı kaldığını göstermektedir. İnsan beyninin algılama ve öğrenme mekanizmalarıyla kıyaslandığında, bu yöntemler yalnızca yüzeysel görsel bilgiyi kullanmakta ve yapısal karmaşıklığı tam olarak kavrayamamaktadır. İnsan, çeşitli morfolojik özellikler arasında ilişki kurarak çatlakları kolaylıkla ayırt edebilirken, klasik algoritmalar bu beceriye sahip değildir.

Bu noktada, makine öğrenmesi yaklaşımları insan beyninin öğrenme süreçlerinden ilham alarak daha gelişmiş çözümler sunar. Makine öğrenmesi, mevcut verilerden anlamlı özellikleri otomatik olarak çıkarma ve bu özellikler arasındaki ilişkileri kullanarak tahminlerde bulunma kapasitesine sahiptir. Böylece algoritmalar, yalnızca önceden tanımlanmış kurallara değil, veriden öğrenilen modellere dayanarak çatlak tespitini gerçekleştirir. Ancak, günümüzde kullanılan birçok makine öğrenmesi yöntemi hâlâ

manuel özellik seçimine veya sezgisel yaklaşımlara bağlı olduğundan, yüzeysel yöntemlerin sınırlılıklarından tamamen kurtulamamaktadır. Geleneksel yöntemler ile çatlakların tespit edilmesinin giderek güçleşmesi, araştırmacıları yeni çatlak tespit yöntemleri geliştirmeye yöneltmektedir (Gong et al., 2024).

- Derin öğrenme tabanlı asfalt çatlak tespiti

Bilgisayarlı görme, son yıllarda yapay zekâ araştırmalarının en hızlı gelişen ve en geniş uygulama alanına sahip dallarından biri hâline gelmiştir. Bu ilerlemenin temelinde, derin öğrenme algoritmalarının ortaya çıkışı ve gelişimi yer almaktadır. Derin öğrenme, makine öğrenme algoritmaları gibi yalnızca verileri sınıflandırmasını değil, aynı zamanda bu verilerin içsel örüntülerini, temsillerini ve bağlamsal ilişkilerini kavramasını sağlar. Böylece makinelerin metin, görüntü ve konuşma gibi farklı veri türlerini anlama biçiminde köklü bir paradigma değişimi yaşanmıştır (Hou et al., 2021).

Derin öğrenmenin temel hedefi, insan bilişine benzer şekilde öğrenebilen sistemler geliştirerek makinelerin veriyi yorumlama yetisini güçlendirmektir. Bu yaklaşım, klasik makine öğrenmesi yöntemlerinin gerektirdiği manuel özellik çıkarımı sürecini ortadan kaldırır; bunun yerine modelin, veriden özellikleri otonom biçimde öğrenmesine olanak tanır. Bu sayede, modeller verilerdeki karmaşık ve soyut ilişkileri daha yüksek doğrulukla temsil edebilmekte, bu da bilgisayarlı görme sistemlerinin performansını önemli ölçüde artırmaktadır (Maeda et al., 2018).

Özellikle evrişimli sinir ağları (Convolutional Neural Networks – CNN), derin öğrenmenin bilgisayarlı görme alanındaki en dikkat çekici örneklerinden biridir. CNN mimarileri, çok katmanlı yapıları sayesinde görüntü verilerindeki kenar, doku ve karmaşık şekil örüntülerini farklı düzeylerde algılayarak soyut temsiller oluşturur. Bu özellik, görüntü sınıflandırma, nesne tespiti, yüz

tanıma ve otonom araç teknolojilerinde olağanüstü başarıların elde edilmesini sağlamıştır (Aslan, 2022). Örneğin, şehir içi altyapı analizlerinde kullanılan kaldırım bozulması tespit sistemlerinde, CNN tabanlı modeller insan müdahalesine gerek kalmadan çevresel deformasyonları yüksek doğrulukla belirleyebilmektedir (Ren et al., 2021). Derin öğrenme yaklaşımları ile asfalt çatlaklarının tespitine yönelik son dönemlerde yapılan bazı çalışmalar aşağıda detaylandırılmıştır.

Zou ve diğ., asfalt çatlaklarının tespiti için üç katmanlı bir CNN modeli önermiştir. Önerilen modelin performansını değerlendirmek için CrackForest veri seti kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, veri setindeki görüntüler çatlaklı ve çatlak olmayan olarak sınıflandırılmış ve %91 doğruluk oranı elde edilmiştir (Cha et al., 2017).

Cha ve diğ., asfalt yüzeylerindeki çatlakları piksel düzeyinde tespit etmek amacıyla SegNet tabanlı bir derin öğrenme modeli geliştirmiştir. CrackForest veri seti üzerinde yürüttükleri deneylerde, tespit doğruluğu %90, IoU (Intersection over Union) değeri ise %82 olarak rapor edilmiştir (Cha et al., 2017).

Yang ve diğ., çatlakların konum ve biçimini daha hassas belirlemek için U-Net++ mimarisini kullanarak piksel düzeyinde segmentasyon gerçekleştirmiştir. SDNET2018 veri seti üzerinde yapılan deneyler sonucunda, %93 F1-skoru ve %84 IoU değeri elde edilmiştir (Dung & Anh, 2019).

Li ve diğ., çatlak tespitinde konvolüsyonel ağların yerel özellik çıkarma gücünü Transformer (CrackFormer) yapısıyla birleştirerek hibrit bir model önermiştir. SDNET2018 veri seti üzerinde yürütülen çalışmada, önerilen yöntem %96 F1-skoru ve %88 IoU değeri elde ederek geleneksel CNN tabanlı yöntemlerden daha yüksek başarı göstermiştir (Liu et al., 2023).

Bu kapsamda yapılan çalışmalara rağmen, gerçek zamanlı asfalt çatlaklarının tespitine yönelik, hafif ve gömülü sistemlerde çalışabilecek CNN modelleri literatürde oldukça sınırlıdır. Bu alandaki araştırmaların azlığı, önemli bir araştırma boşluğuna işaret etmektedir. Bu çalışmada önerilen hafif CNN modeli, asfalt çatlaklarını yüksek doğrulukla tespit ederek literatürdeki bu önemli boşluğun doldurulmasına katkı sağlayacaktır.

Materyal ve Metot

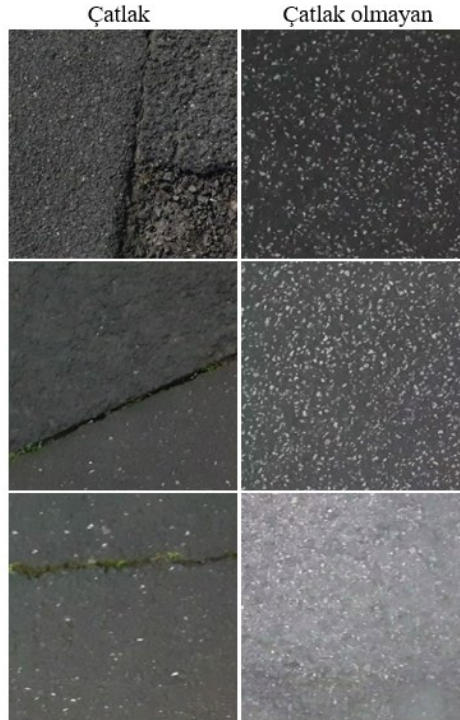
Veri Seti

SUT-Crack veri seti, Sharif University of Technology (SUT) bünyesindeki araştırma ekibi tarafından oluşturulmuştur (Sabouri & Sepidbar, 2023). Bu çalışmada kullanılan veri seti, odak uzaklığı 5,4 mm ve sensör boyutu 7,3×5,4 mm olan SAMSUNG Galaxy S20 FE akıllı telefon kamerası ile elde edilmiştir. Araştırmacılar, veri setinin oluşturulması sürecinde tüm görüntülerin aynı ölçekte ve karşılaştırılabilir nitelikte olmasını sağlamak amacıyla kamera konumu, yüksekliği, görüş alanı ve çekim mesafesini sabit tutmuştur. Böylece atlak genişlikleri ve uzunluklarının doğru şekilde değerlendirilmesi mümkün hale gelmiştir. Veri toplama süreci için, kamerayı dış etkenlerden koruyacak ve sabit bir çekim açısı sağlayacak özel bir muhafaza sistemi tasarlanmıştır. Kameranın araç hareketi sırasında güvenli bir şekilde sabit kalması için sistem ticari bir bisiklet taşıyıcısına monte edilmiştir.

Kamera, 1440×1440 piksel çözünürlükte ve 30 fps kare hızında çalışacak biçimde ayarlanmıştır. Görüntü kalitesini korumak ve dış etkenlerden kaynaklanabilecek titreşim veya düşme riskini azaltmak amacıyla, sistemin alt kısmına şeffaf pleksiglas bir koruma ekranı entegre edilmiştir. Bu sayede kamera, aşağıya doğru engelsiz bir görüş açısıyla çekim yapabilmıştir. Bu teknik düzenek sayesinde yüksek çözünürlüklü ve standardize edilmiş görüntüler elde edilmiş, veri setinin bilimsel analizler için güvenilirliği artırılmıştır.

Orijinal veri seti 1440 x 1440 çözünürlüğe sahip, çatlak içeren ve içermeyen 2000 adet asfalt görüntüsü bulunmaktadır. Veri setini oluşturan araştırmacılar, bu görüntülerden yola çıkarak veri setinin boyutunun daha verimli analiz ve modelleme süreçlerine uyum sağlaması amacıyla çözünürlük yeniden düzenlenmiştir. Bu işlem sonucunda, her biri 720 x 720 piksel çözünürlüğünde 1699 çatlaklı ve 1699 çatlak içermeyen görüntü elde edilmiştir. Böylece toplamda 3398 asfalt görüntüsünden oluşan dengeli bir veri seti oluşturulmuştur. Veri setine ait bazı örnek görüntüler Şekil 1’de görülmektedir.

Şekil 1 Veri seti örnek görüntüleri



Evrişimli Sinir Ağları

Evrişimsel Sinir Ağları (CNN), derin öğrenme alanında son yılların en önemli gelişmelerinden biri olarak kabul edilmektedir.

Özellikle görüntülerin, videoların ve diğer uzamsal olarak yapılandırılmış verilerin analizi için tasarlanan ESA'lar, görsel verilerdeki karmaşık örüntüleri ve ilişkileri öğrenme konusundaki üstün yetenekleri sayesinde bilgisayarla görme alanında çığır açmıştır (Haykin & Kosko, 2010). Geleneksel sinir ağlardan farklı olarak ESA'lar, uzamsal hiyerarşileri etkili bir biçimde tanıyabilir ve bu sayede görüntü sınıflandırma, nesne tespiti ve segmentasyon gibi görevlerde olağanüstü başarılar elde etmiştir (Simonyan et al., 2015).

CNN'lerin yapısal temelinde, insan ve diğer memelilerin görsel korteksindeki biyolojik süreçler örnek alınmıştır (Gao et al., 2025). Bu biyolojik esin, ağın giriş verilerini katmanlar halinde işleyerek giderek daha soyut temsiller oluşturmalarını sağlamaktadır. Bir CNN'nin temel mimarisi genellikle bir girdi katmanı, çeşitli evrişim katmanları, havuzlama (pooling) katmanları, tam bağlantılı katmanlar ve bir çıktı katmanından oluşur (Krois et al., 2019), (Zhou et al., 2025).

Evrişim katmanı, bir filtre (çekirdek) kullanarak girdi görüntülerinden uzamsal özellikleri çıkarmak için tasarlanmış temel bir bileşendir (Soylu et al., 2025). Filtre, girdi görüntüsü üzerinde hareket ederek her konumdaki noktasal çarpımı hesaplayarak kenarlar, dokular ve şekiller gibi düşük seviyeli desenlerden giderek daha karmaşık gösterimlere doğru ilerleyen bir öğrenme süreci oluşur (Abdulsattar & Hussain, 2022). Matematiksel olarak, özellik haritasındaki (i, j) koordinatlarına karşılık gelen çıktı genellikle Denklem (1) ile tanımlanır.

$$T(i, j) = (G * K) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m K(n, m) \cdot G(n + i, m + j) \quad (1)$$

Denklem (1)'deki, $T(i, j)$, elde edilen özellik haritasının, $K(m, n)$, filtresinin (m, n) konumundaki ağırlık değerini, G ise girdi görüntüsünü ifade eder. Evrişim işleminden sonra, modelin sadece

doğrusal ilişkileri değil, aynı zamanda karmaşık, doğrusal olmayan ilişkileri de öğrenebilmesini için evrişim sonucu bir aktivasyon fonksiyonu uygulanır. Sigmoid, tanjant, doğrultulmuş doğrusal birim (ReLU) gibi birçok aktivasyon olmakla birlikte en yaygın kullanılan aktivasyon fonksiyondur. ReLU aktivasyon fonksiyonu matematiksel bağıntısı Denklem (2)'de verilmiştir.

$$ReLU = \max(0, x) \quad (2)$$

ReLU, negatif değerleri sıfıra kırparak seyreklik etkisi oluşturur, kaybolan gradyan sorununu hafifletir ve eğitim sürecini hızlandırır; böylece modelin doğrusal olmayan karar sınırlarını temsil etme yeteneğini artırır.

Havuzlama katmanı, özellik haritalarının (feature maps) boyutunu küçülterek hem hesaplama maliyetini azaltır hem de modelin genelleme kapasitesini artırır. Böylece model, verilerdeki temel paternleri daha etkin biçimde yakalayabilir ve öğrenilen temsillerin daha soyut, gürültüden arındırılmış bir hale gelmesini sağlar. Uzamsal boyutların küçülmesi, modelin parametre sayısını ve dolayısıyla hesaplama maliyetini azaltarak ağı daha hızlı eğitilmesini ve donanımsal kaynakların daha verimli kullanılmasını mümkün kılar (Bayar & Stamm, 2017).

Havuzlama işlemi genellikle belirli bir pencere (örneğin 2x2 veya 3x3) aracılığıyla özellik haritaları üzerinde gezinerek gerçekleştirilir. Bu pencere içerisindeki değerlere belirli bir istatistiksel işlem uygulanır. Ortalama ve maksimum gibi havuzlama yöntemleri bulunmakla birlikte, en yaygın kullanılan yöntem maksimum havuzlama (max pooling) olup seçilen bölgedeki en yüksek değeri temsil eder (Hu et al., 2015). Maksimum havuzlama ait matematiksel bağıntı Denklem (3)'de görülmektedir.

$$MaxPol = \max(x) \quad (3)$$

Tam bağlantılı katmanlar (FC), CNN mimarisinin sonunda yer alır ve bir tam bağlantılı katmanın çıktısı Denklem (4) ile ifade edilir. Bu katmanların temel işlevi, önceki katmanlarda öğrenilen özellikleri bir araya getirerek nihai sınıflandırma veya regresyon çıktısını üretmektir. Son evrişim veya havuzlama katmanından elde edilen çıktı, tek boyutlu bir vektöre dönüştürülür ve ardından genellikle softmax gibi aktivasyon fonksiyonları kullanan bir veya daha fazla FC katmanına aktarılır. Bu katmanlar, sınıflandırma görevleri için olasılık değerleri üretir (Purwono et al., 2023). Bu yapı, CNN'in ağ boyunca biriken özellikleri kullanarak daha bilinçli tahminler yapmasını sağlar.

$$Y = W \cdot f + b \quad (4)$$

Burada, b önyargı vektörü, f giriş vektörü, W ağırlık matrisi ve Y çıkış vektörünü temsil etmektedir.

CNN modellerin temelleri, LeCun ve diğerleri tarafından geliştirilen LeNet-5 (1998) modeli ile atılmıştır (LeCun et al., 1998). LeNet-5, elle yazılmış rakamların tanınması için geliştirilmiş olup, katman tabanlı hiyerarşik bir özellik çıkarımı yaklaşımıyla CNN mimarisinin potansiyelini göstermiştir. Ancak bu dönemde donanımsal kısıtlamalar ve büyük ölçekli veri eksikliği, CNN'lerin yaygın kullanımını sınırlamıştır.

Derin öğrenmenin yeniden canlanması ise Krizhevsky ve diğerleri tarafından geliştirilen AlexNet modeli ile gerçekleşmiştir (Krizhevsky et al., 2017). 2012 ImageNet yarışmasında elde ettiği üstün başarı sayesinde, AlexNet yalnızca performans açısından değil, yöntemsel açıdan da bir dönüm noktası olmuştur. Model, derin katmanlı yapısı, ReLU aktivasyon fonksiyonu ile doğrusal olmayan dönüşümlerden verimli şekilde yararlanması, dropout gibi düzenleştirme teknikleriyle aşırı öğrenmeyi önlemesi ve GPU kullanımıyla eğitimin hızlandırılması açısından çığır açmıştır. AlexNet, derin ağların pratikte başarılı olabileceğini kanıtlamış ve

CNN'leri ana akıma taşımıştır. Bu çalışmadan 2 yıl sonra Oxford Üniversitesinden Simonyan ve Zisserman'ın geliştirdikleri Visual Geometry Group (VGG) mimarisi, ağ derinliğinin artmasının performans üzerindeki pozitif etkisini sistematik olarak ortaya koymuştur (Simonyan et al., 2015). VGG, küçük boyutlu (3x3) evrişim çekirdeklerini ardışık katmanlarda kullanarak hem mimariyi basitleştirmiş hem de derinliği artırmıştır. Bu yaklaşım, daha öngörülebilir ve modüler ağ yapılarının tasarlanabileceğini göstermiştir. Ancak bu derinlik, parametre sayısının artmasıyla birlikte hesaplama maliyetini de yükseltmiştir.

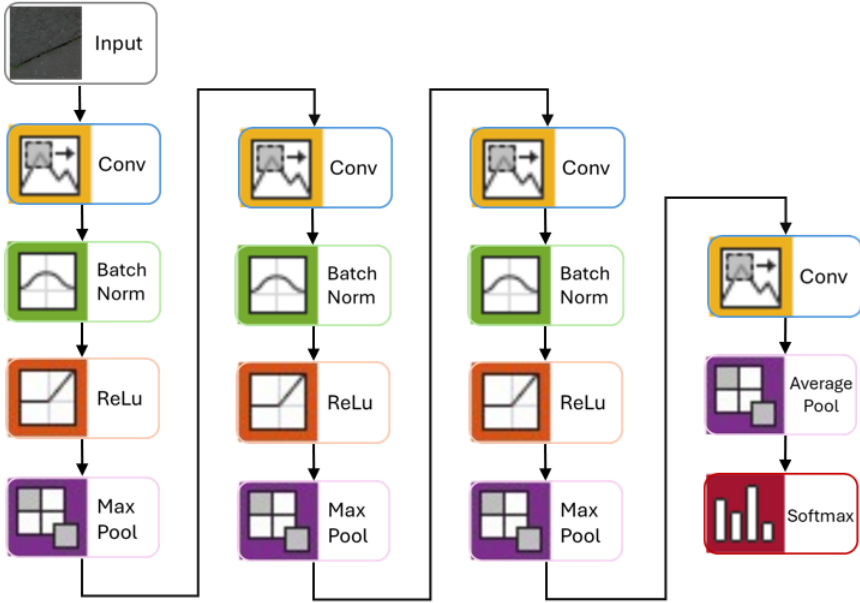
Szegedy ve diğerleri ise bu hesaplama maliyet soruna farklı bir bakış açısı getirmiştir (Szegedy et al., 2015). Inception modülü olarak bilinen bu yenilikçi yapı, farklı boyutlardaki evrişim filtrelerinin paralel olarak uygulanmasıyla çok ölçekli özellik çıkarımını sağlamıştır. Bu sayede ağ hem daha derin hem de hesaplama açısından daha verimli hale gelmiştir. Bu yaklaşım, CNN mimarilerinin yalnızca katman sayısını artırmak yerine, bilgi akışını ve hesaplama maliyetini optimize edecek şekilde tasarlanabileceğini göstermiştir.

Önerilen CNN mimarisi

Bu çalışmada, asfalt çatlaklarının otomatik tespiti için yeni bir CNN modeli önerilmektedir. Modelin mimarisi, 20 katmandan oluşan derin bir yapıya sahiptir ve giriş katmanının ardından çok ölçekli özellik çıkarımına olanak tanıyacak şekilde beş evrişim katmanı ile yapılandırılmıştır. Bu katmanlarda sırasıyla 48, 96, 160, 96 ve 128 filtre kullanılarak hem düşük seviyeli kenar ve doku bilgileri hem de yüksek seviyeli soyut görsel örüntüler yakalanmaktadır. Her evrişim işleminden sonra uygulanan ReLU aktivasyon katmanları, doğrusal olmayan dönüşümler sağlayarak modelin temsil gücünü artırmakta ve aynı zamanda öğrenme sürecinin kararlılığını desteklemektedir.

Ağ yapısında yer alan üç maksimum havuzlama ve bir ortalama havuzlama katmanı, özellik haritalarının boyutunu kontrol altında tutarken aşırı öğrenmeyi önleme ve gürültüye karşı dayanıklılığı artırma işlevi görmektedir. Bu havuzlama işlemleri, mekânsal bilgiyi özetleyip gereksiz ayrıntıları azaltırken sınıflar arasındaki ayırt edici nitelikleri korumaya yardımcı olmaktadır.

Şekil 2 Önerilen CNN modelinin genel yapısı



Modelin son aşamasında, evrimsel katmanlardan elde edilen özellik haritaları bir tam bağlantılı katman aracılığıyla sınıf olasılıklarına dönüştürülmektedir. Ardından kullanılan softmax katmanı, iki sınıflı problem yapısına uygun bir şekilde nihai sınıflandırma kararını üretmektedir. Böylece ağ, asfalt yüzeyinin “çatlak” veya “çatlak yok” şeklinde iki temel kategoriye ayrılmasını sağlamaktadır.

Genel olarak, önerilen CNN mimarisi, çok katmanlı ve dengeli tasarımı sayesinde hem düşük seviyeli hem de yüksek seviyeli temsil kabiliyetini etkili biçimde birleştirerek otomatik

çatlak tespitinde yüksek performans potansiyeli sunmaktadır. Modelin genel yapısı, Şekil 2’de özetlendiği üzere, modern derin öğrenme yaklaşımlarının temel ilkeleri doğrultusunda yapılandırılmıştır.

Model performansını değerlendirme metrikleri

Önerilen modelin performansı, derin öğrenme tabanlı sınıflandırma problemlerinde sıklıkla başvuru standart değerlendirme metrikleri aracılığıyla kapsamlı bir biçimde analiz edilmiştir. Bu metrikler arasında doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), geri çağırma (recall) ve F1 skoru yer almaktadır. Her bir metrik, modelin farklı yönlerden ne derece başarılı olduğunu ortaya koymakta; dolayısıyla genel performansın çok boyutlu bir bakış açısıyla değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

- Doğruluk, modelin tüm sınıflar üzerindeki genel tahmin başarısını ölçmekte ve matematiksel bağıntısı Denklem (5)’te verilmiştir.

$$Accuracy = \frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)} \quad (5)$$

- Kesinlik, bir sınıfa ait olarak tahmin edilen örneklerin gerçekten o sınıfa ait olma oranını göstermektedir ve matematiksel bağıntısı Denklem (6)’da verilmiştir.

$$Precision = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (6)$$

- Geri çağırma, bir sınıfa ait gerçek örneklerin ne kadarının model tarafından doğru bir şekilde tespit edildiğini ifade eder ve matematiksel bağıntısı Denklem (7)’de verilmiştir.

$$Recall = \frac{TP}{(TP + FN)} \quad (7)$$

- F1 skoru, kesinlik ve geri çağırma değerlerini dengeleyen birleşik bir performans göstergesidir ve özellikle dengesiz veri setlerinde model başarısını daha doğru biçimde temsil etmektedir ve matematiksel bağıntısı Denklem (8)'de verilmiştir.

$$F1 - Score = 2 \times \frac{(Precision \times Recall)}{(Precision + Recall)} \quad (8)$$

Bu metriklerin hesaplanmasında temel referans noktası olarak, her sınıf için doğru ve hatalı tahmin oranlarını ayrıntılı biçimde gösteren Şekil 3'te verilen karmaşıklık matrisi kullanılmaktadır. Karmaşıklık matrisi, her bir sınıfın model tarafından nasıl sınıflandırıldığını net biçimde ortaya koyarak, olası karışıklıkların ve hatalı sınıflandırmaların analiz edilmesine imkan tanımaktadır. Bu analiz, modelin güçlü olduğu sınıfların yanı sıra iyileştirme gerektiren alanların da belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

Şekil 3 Karmaşıklık matrisi

		Gerçek Etiket	
		Pozitif	Negatif
Tahmin edilen Etiket	Pozitif	TP	FP
	Negatif	FN	TN

Şekil 3'teki karmaşıklık matrisi aşağıdaki durumları göstermektedir;

- True Positive (TP): Pozitif (+) örneklerin doğru biçimde tanımlandığı durumların sayısıdır.
- False Negative (FN): Pozitif (+) örneklerin yanlışlıkla negatif (-) olarak sınıflandırıldığı durumların sayısıdır.
- True Negative (TN): Negatif (-) örneklerin doğru biçimde tanımlandığı durumların sayısıdır.
- False Positive (FP): Negatif (-) örneklerin yanlışlıkla pozitif (+) olarak sınıflandırıldığı durumların sayısıdır.

Uygulama ve Sonuçları

Bu çalışmada, asfalt çatlaklarının tespiti için CNN tabanlı bir ağ önerilmektedir. Deneysel çalışmalar MATLAB 2021b ortamında gerçekleştirilmiş olup, tüm işlemler Intel i7-4700HQ işlemci ve 16 GB RAM'e sahip bir bilgisayar üzerinde yürütülmüştür. Veri seti, $720 \times 720 \times 3$ boyutlarında RGB asfalt yüzey görüntülerinden oluşmakta olup, önerilen CNN model girişine uygunluk sağlamak amacıyla tüm görüntüler $224 \times 224 \times 3$ boyutlarına yeniden ölçeklendirilmiştir. Bu işlem, modelin eğitim sürecini hızlandırmak ve hesaplama yükünü azaltmak açısından önem taşımaktadır.

Modelin eğitimi için veri seti rastgele %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test olmak üzere üç alt kümeye ayrılmıştır. Bu oranlar, modelin öğrenme kabiliyetini artırmak ve genelleme performansını nesnel biçimde değerlendirmek amacıyla belirlenmiştir. Eğitim sürecinde, öğrenme oranı, optimizasyon algoritması, mini-batch boyutu ve epoch sayısı gibi temel hiperparametreler sistematik biçimde ayarlanarak Tablo 1'de detaylandırılmıştır.

Tablo 1 Önerilen CNN modele ait hiperparametreler

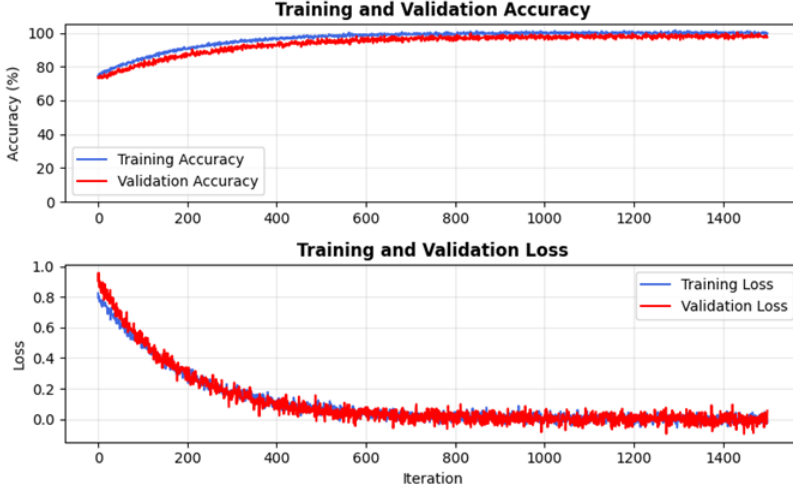
Parametre	Değer
Mini-batch size	32
Learning rate	0.003
Optimizer	Adam
L2 Regularization	0.0005

Hiperparametre seçimi, modelin kararlılığını sağlamak ve doğrulama sonuçlarına göre aşırı uyum (overfitting) riskini en aza indirmek için özenle gerçekleştirilmiştir. Bu yapılandırma sonucunda, eğitim süreci yalnızca istikrarlı biçimde sürdürülmemiş, aynı zamanda doğrulama ve test aşamalarında da tutarlı ve tekrarlanabilir performans elde edilmiştir.

Önerilen CNN modelinin eğitimi, asfalt yüzey görüntülerinin girdi olarak kullanıldığı bir öğrenme süreciyle gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, modelin başarısının değerlendirilmesinde en önemli ölçütlerden biri olan doğruluk (accuracy) ve kayıp (loss) değerlerinin değişimi dikkatle izlenmiştir. Bu metrikler, modelin öğrenme kapasitesi, genelleme yeteneği ve aşırı öğrenme (overfitting) riskine dair önemli bilgiler sunmaktadır.

Şekil 4'te verilen doğruluk ve kayıp grafikleri incelendiğinde, modelin başlangıçta yaklaşık %70–75 aralığında bir performans sergilediği, ancak eğitim ilerledikçe doğruluk oranının hızla artarak %97–99 seviyelerine ulaştığı görülmektedir. Bu artış, modelin verilerdeki örüntüleri etkin biçimde öğrenmeye başladığını ve sınıflandırma hatalarının belirgin şekilde azaldığını göstermektedir. Ayrıca, eğitim ve doğrulama doğruluk eğrilerinin birbirine oldukça yakın seyretmesi, modelin yalnızca eğitim verisine aşırı uyum sağlamadığını, aynı zamanda doğrulama verilerinde de yüksek performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

Şekil 4 CNN modelinin eğitim ve kayıp grafikleri

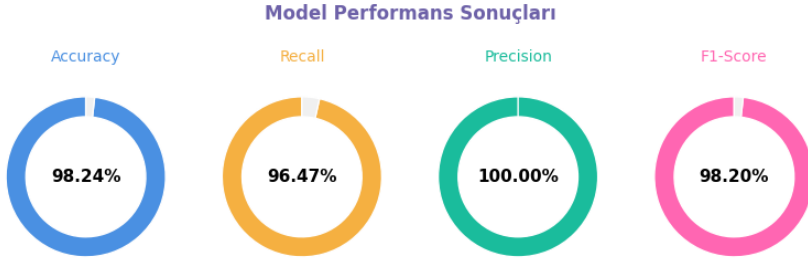


Benzer biçimde, kayıp (loss) grafiğinde de paralel bir seyir gözlemlenmektedir. Başlangıçta 0.8 seviyelerinde olan kayıp değeri, eğitim süreci ilerledikçe yaklaşık 0.05'e kadar düştüğü görülmektedir. Bu da modelin tahmin hatalarının önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Eğitim ve doğrulama kayıp eğrilerinin paralel biçimde azalması, modelin her iki veri setinde de dengeli bir performans sergilediğini ve overfitting riskinin ortaya çıkmadığını göstermektedir. Bu durum, modelin güçlü bir genelleme kapasitesine sahip olduğunu ve overfitting probleminin önüne geçildiğini kanıtlamaktadır. Eğrilerin son iterasyonlarda yatay hale gelmesi ise modelin denge noktasına (convergence) ulaştığını, yani öğrenme sürecinin büyük ölçüde tamamlandığını göstermektedir.

Eğitim süreci tamamlandıktan sonra, test veri kümesi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, Şekil 5'te modelin performans değerlendirme metrikleri açısından oldukça yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Hesaplanan performans oranları şu şekildedir: Doğruluk (Accuracy) %98,24, Geri çağırma (Recall) %96,47, Kesinlik (Precision) %100,00 ve F1 skor (F1-Score)

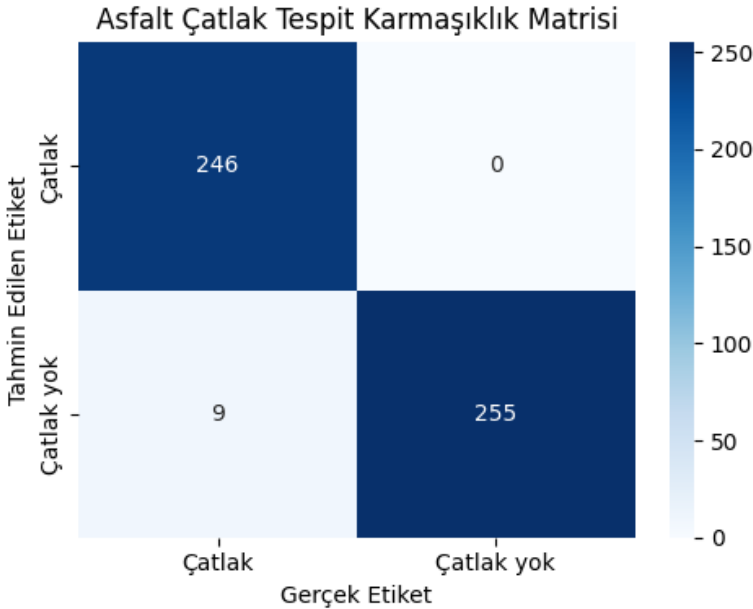
%98,20. Bu sonuçlar, modelin geri çağırma, doğruluk ve F1 skor metrikleri açısından dengeli ve güvenilir bir sınıflandırma performansı sergilediğini ortaya koymaktadır.

Şekil 5 CNN modelinin test performans sonuçları



Modelin sınıflandırma performansını kapsamlı bir biçimde değerlendirmek amacıyla, doğruluk ve hata dağılımları Şekil 6'da gösterilen karmaşıklık matrisi aracılığıyla görselleştirilmiştir.

Şekil 6 CNN modelinin test performans sonuçları



Asfalt çatlak tespitine ait karmaşıklık matrisine bakıldığında, modelin oldukça başarılı bir performans sergilediği görülmektedir. Model, toplam 246 adet “Çatlak” örneğini doğru şekilde “Çatlak” olarak sınıflandırırken, 255 adet “Çatlak yok” örneğini de doğru biçimde “Çatlak yok” olarak tahmin etmiştir. Sadece 9 örnek hatalı biçimde “Çatlak yok” olarak etiketlenmiş ve bu durum az sayıda yanlış pozitif sonuca yol açmıştır. Ayrıca, modelde hiç yanlış pozitif (FP=0) bulunmaması, yani gerçek “çatlak yok” olup da tespit edilemeyen hiçbir örneğin olmaması, yüksek duyarlılığın açık bir göstergesidir. Bu sonuçlar, modelin hem çatlak hem de sağlam yüzeyleri güvenilir şekilde ayırt edebildiğini ve genel doğruluk oranının %98,24 olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, sistemin asfalt yüzeylerindeki çatlakları tespit etmede güçlü bir genelleme yeteneğine sahip olduğu ve pratik uygulamalarda güvenle kullanılabileceğini göstermektedir.

Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, farklı aydınlatma koşulları altında çekilen asfalt görüntülerinde çatlakların güvenilir biçimde tespiti için derin öğrenme tabanlı bir sınıflandırma modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen CNN modeli, basit ancak güçlü katman dizilimi sayesinde hem yüksek doğruluk hem de iyi genelleme başarısı sağlayacak şekilde optimize edilmiştir.

Deneyssel bulgular, önerilen modelin yüksek doğruluk oranlarıyla başarılı bir sınıflandırma gerçekleştirdiğini ve özellikle yanlış pozitif üretmeme konusunda üstün bir performans sergilediğini göstermektedir. Elde edilen %98,24 doğruluk, %96,47 duyarlılık, %100,00 kesinlik ve %98,20 F1-skoru değerleri, modelin hata oranını minimumda tutarken çatlak tespiti açısından güvenilir bir çözüm sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Karmaşıklık matrisi analizleri, modelin çatlak sınıfına ait örnekleri büyük oranda doğru tanımladığını ve çatlak olmayan görüntülerin tamamını

eksiksiz biçimde sınıflandırdığını göstermektedir. Bu durum, sistemin pratik uygulamalarda sahadan elde edilen verilerle tutarlı biçimde çalışabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, geliştirilen modelin yüksek doğruluk, güvenilirlik ve genelleme kapasitesi sayesinde asfalt yüzeylerinde çatlak tespitine yönelik mevcut yöntemlere güçlü bir alternatif sunduğu söylenebilir. Ayrıca, söz konusu modelin yol bakım ve altyapı izleme sistemlerine entegre edilmesi hem iş gücü ihtiyacını azaltabilir hem de bakım süreçlerinin verimliliğini artırabilir. Gelecek çalışmalarda, farklı ortam koşulları ve yüzey tipleri üzerinde yapılacak testlerle modelin genelleme kabiliyetinin daha da güçlendirilmesi, saha uygulamalarında sistemin uzun vadeli başarısını destekleyecektir.

Referanslar

Abdulsattar, N. S., & Hussain, M. N. (2022). Facial expression recognition using HOG and LBP features with convolutional neural network. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 11(3), 1350–1357. <https://doi.org/10.11591/eei.v11i3.3722>

Aslan, M. (2022). CoviDetNet: A new COVID-19 diagnostic system based on deep features of chest x-ray. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 32(5), 1447–1463. <https://doi.org/10.1002/ima.22771>

Awny, E. (2020). Deep Learning-based Self Organizing Map for Content-based Image Retrieval Applications. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 9(4), 5663–5669. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/217942020>

Ayenu-Prah, A., & Atttoh-Okine, N. (2008). Evaluating Pavement Cracks with Bidimensional Empirical Mode Decomposition. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008(1), 861701. <https://doi.org/10.1155/2008/861701>

Baduge, S. K., Thilakarathna, S., Perera, J. S.,

Ruwanpathirana, G. P., Doyle, L., Duckett, M., Lee, J., Saenda, J., & Mendis, P. (2023). Assessment of crack severity of asphalt pavements using deep learning algorithms and geospatial system. *Construction and Building Materials*, 401, 132684. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132684>

Bayar, B., & Stamm, M. C. (2017). Design Principles of Convolutional Neural Networks for Multimedia Forensics. *Electronic Imaging*, 29(7), 77–86. <https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2017.7.MWSF-328>

Cha, Y., Choi, W., & Büyüköztürk, O. (2017). Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(5), 361–378. <https://doi.org/10.1111/mice.12263>

Deng, S., Ren, J., Wei, K., Ye, W., Du, W., & Zhang, K. (2021). Fatigue damage evolution analysis of the CA mortar of ballastless tracks via damage mechanics-finite element full-couple method. *Construction and Building Materials*, 295, 123679. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123679>

Dung, C. V., & Anh, L. D. (2019). Autonomous concrete crack detection using deep fully convolutional neural network. *Automation in Construction*, 99, 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.028>

Gao, G., Wang, J., Liu, X., Du, J., Bian, J., & Yang, H. (2025). Improving Laser Direct Writing Overlay Precision Based on a Deep Learning Method. *Micromachines*, 16(8), 871. <https://doi.org/10.3390/mi16080871>

Gong, H., Liu, L., Liang, H., Zhou, Y., & Cong, L. (2024). A state-of-the-art survey of deep learning models for automated pavement crack segmentation. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 13, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2023.11.005>

Haykin, S., & Kosko, B. (2010). GradientBased Learning Applied to Document Recognition. In *Intelligent Signal Processing*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/9780470544976.ch9>

Hou, Y., Li, Q., Zhang, C., Lu, G., Ye, Z., Chen, Y., Wang, L., & Cao, D. (2021). The State-of-the-Art Review on Applications of Intrusive Sensing, Image Processing Techniques, and Machine Learning Methods in Pavement Monitoring and Analysis. *Engineering*, 7(6), 845–856. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.07.030>

Hu, W., Huang, Y., Wei, L., Zhang, F., & Li, H. (2015). Deep Convolutional Neural Networks for Hyperspectral Image Classification. *Journal of Sensors*, 2015, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2015/258619>

Jiang, F., Ma, L., Broyd, T., & Chen, K. (2021). Digital twin and its implementations in the civil engineering sector. *Automation in Construction*, 130, 103838. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103838>

Kapela, R., Sniatala, P., Turkot, A., Rybarczyk, A., Pozarycki, A., Rydzewski, P., Wyczalek, M., & Bloch, A. (2015). Asphalt surfaced pavement cracks detection based on histograms of oriented gradients. *2015 22nd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits & Systems (MIXDES)*, 579–584. <https://doi.org/10.1109/MIXDES.2015.7208590>

Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2017). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*, 60(6), 84–90. <https://doi.org/10.1145/3065386>

Krois, J., Ekert, T., Meinhold, L., Golla, T., Kharbot, B., Wittemeier, A., Dörfer, C., & Schwendicke, F. (2019). Deep Learning for the Radiographic Detection of Periodontal Bone Loss. *Scientific Reports*, 9(1), 8495. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44839-3>

LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., & Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278–2323. <https://doi.org/10.1109/5.726791>

Liu, H., Yang, J., Miao, X., Mertz, C., & Kong, H. (2023).

CrackFormer Network for Pavement Crack Segmentation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(9), 9240–9252. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3266776>

Maeda, H., Sekimoto, Y., Seto, T., Kashiyaama, T., & Omata, H. (2018). Road Damage Detection and Classification Using Deep Neural Networks with Smartphone Images. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(12), 1127–1141. <https://doi.org/10.1111/mice.12387>

Mahmoud, Mahmoud M.; Nasser, A. R. (2021). Dual Architecture Deep Learning Based Object Detection System for Autonomous Driving. *Iraqi Journal of Computer, Communication, Control and System Engineering*, 36–43. <https://doi.org/10.33103/uot.ijccce.21.2.3>

Peng, L., Chao, W., Shuangmiao, L., & Baocai, F. (2015). Research on Crack Detection Method of Airport Runway Based on Twice-Threshold Segmentation. *2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, 1716–1720. <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2015.364>

Purwono, P., Ma'arif, A., Rahmانيar, W., Fathurrahman, H. I. K., Frisky, A. Z. K., & Haq, Q. M. ul. (2023). Understanding of Convolutional Neural Network (CNN): A Review. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 2(4), 739–748. <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v2i4.888>

Ren, J., Ye, W., Deng, S., Du, W., & Zhang, K. (2021). Influence of the strain rate on the dynamic damage of cement-asphalt mortar in prefabricated slab tracks. *Construction and Building Materials*, 299, 123944. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123944>

Ritto, T. G., & Rochinha, F. A. (2021). Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 155, 107614. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107614>

Saberironaghi, A. (2023). *Deep learning models for defect and*

anomaly detection on industrial surfaces.
<https://ontariotechu.scholaris.ca/items/af692a29-1113-40c8-905e-8472ae3b656a>

Saberironaghi, A., & Ren, J. (2024). DepthCrackNet: A Deep Learning Model for Automatic Pavement Crack Detection. *Journal of Imaging*, 10(5), 100. <https://doi.org/10.3390/jimaging10050100>

Sabouri, M., & Sepidbar, A. (2023). SUT-Crack: A comprehensive dataset for pavement crack detection across all methods. *Data in Brief*, 51, 109642. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109642>

Simonyan, K., Zisserman, A., Karen, S., Andrew, Z., Simonyan Karen, & Zisserman Andrew. (2015). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015 - Conference Track Proceedings*, 14. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>

Soylu, E., Gül, S., Koca, K. A., Türkoğlu, M., Terzi, M., & Şengür, A. (2025). Speech signal-based accurate neurological disorders detection using convolutional neural network and recurrent neural network based deep network. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 149, 110558. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110558>

Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., Erhan, D., Vanhoucke, V., & Rabinovich, A. (2015). Going deeper with convolutions. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 07-12-June*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298594>

Zaloshnja, E., & Miller, T. R. (2009). Cost of crashes related to road conditions, United States, 2006. *Annals of Advances in Automotive Medicine. Association for the Advancement of Automotive Medicine. Annual Scientific Conference*, 53, 141–153. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20184840>

Zhang, L., Yang, F., Daniel Zhang, Y., & Zhu, Y. J. (2016). Road crack detection using deep convolutional neural network. *2016*

IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 3708–3712. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2016.7533052>

Zhou, C., Zhang, F., Nacpil, E. J. C., Wang, Z., & Xu, F.-X. (2025). Driver Steering Intention Prediction for Human-Machine Shared Systems of Intelligent Vehicles Based on CNN-GRU Network. *Sensors*, 25(10), 3224. <https://doi.org/10.3390/s25103224>

Zhu, W., Qiu, Q., Calderbank, R., Sapiro, G., & Cheng, X. (2022). Scaling-Translation-Equivariant Networks with Decomposed Convolutional Filters. *Journal of Machine Learning Research*, 23(1), 2–22.

BÖLÜM 13

Karayollarında Üstyapı Yönetim Sistemi: Türkiye Uygulamaları, Mevcut Durum ve Değerlendirmeler

Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU¹

Mustafa AKPOLAT²

İhsan GÜZEL³

GİRİŞ

Türkiye’de karayolu ulaşımı, yolcu ve yük taşımacılığında sahip olduğu yüksek pay nedeniyle ulaştırma sisteminin temel bileşeni konumundadır. Son yirmi–yirmi beş yıllık dönemde artan nüfus, ekonomik faaliyetlerin genişlemesi ve taşımacılığın yoğunlaşması, karayolu altyapısına yönelik yatırımların hız kazanmasına neden olmuştur. Bu süreçte Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından yürütülen çalışmalar sonucunda bölünmüş yol uzunluğunda ve bitümlü sıcak karışım (BSK)

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bingöl/Türkiye, Orcid: 0000-0003-0863-6436, meceloglu@bingol.edu.tr

² Doç. Dr., Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tunceli/Türkiye, Orcid: 0000-0002-7070-3217, mustafaakpolat@munzur.edu.tr

³ Dr. Öğr. Üyesi, Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bingöl/Türkiye, Orcid: 0000-0002-0746-070X, iguzel@bingol.edu.tr

kaplamalı yolların toplam ağı içindeki payında önemli artışlar gerçekleşmiştir (KGM, 2023; KGM, 2025). Bu hızlı genişleme, karayolu altyapısının yalnızca inşa edilmesini değil, aynı zamanda etkin ve sürdürülebilir biçimde yönetilmesini de zorunlu hale getirmiştir.

Üstyapıların servis ömrü boyunca performanslarının korunması, kamu kaynaklarının verimli kullanılması ve bakım-onarım faaliyetlerinin bilimsel temellere dayandırılması, gelişmiş yol yönetiminin temel unsurları arasında yer almaktadır. Özellikle yüksek standartlı BSK kaplamaların yaygınlaşması ve ağır taşıt trafiğinin artması, bakım kararlarının sistematik ve veriye dayalı olarak alınmasını gerekli kılmaktadır. Etkin bir üstyapı yönetimi, sistematik ve bütüncül bir yaklaşımın benimsenmesini gerektirdiği gibi, faaliyetlerin planlanan zamanda ve düzenli biçimde yürütülmesini de amaçlamaktadır. En geniş anlamıyla üstyapı yönetimi; planlama, tasarım, yapım, bakım, onarım ve yenileme süreçlerinin tümünü kapsayan bir yönetim çerçevesi sunmaktadır.

Üstyapı Yönetim Sistemi (ÜYS), belirli bir zaman dilimi içinde karar vericilere en uygun bakım ve onarım programının oluşturulmasında kullanılacak yöntem ve araçların belirlenmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca ÜYS, kurum içi ve kurumlar arası koordinasyonu destekleyerek karar alma süreçlerinin tutarlılığını artırmakta ve farklı yönetim düzeylerinde alınan kararların uyumlu biçimde uygulanmasını sağlamaktadır (Morova, 2013).

Karayolu üstyapıları, servis ömrü boyunca trafik yükleri, iklimsel etkiler ve malzeme yaşlanması nedeniyle zamanla performans kaybına uğramaktadır. Türkiye gibi farklı iklim bölgelerine ve yüksek ağır taşıt yoğunluklarına sahip ülkelerde bu bozulma süreci daha belirgin ve hızlı olabilmektedir. Bu nedenle üstyapıların servis ömrü, yalnızca ilk yapım aşamasında alınan tasarım ve malzeme kararlarına değil, işletme sürecinde uygulanan

bakım ve onarım stratejilerine de doğrudan bağlı bulunmaktadır. Plansız veya gecikmiş müdahaleler hem yol kullanıcı maliyetlerinin artmasına hem de kamu bütçeleri üzerinde ek yükler oluşmasına neden olabilmektedir. Önleyici bakım uygulamalarının ekonomik etkinliği, fayda-maliyet temelli analizlerle literatürde açık biçimde ortaya konulmuştur (Prozzi & Madanat, 2004).

Uluslararası düzeyde ÜYS uygulamaları, 1970’li yıllardan itibaren özellikle gelişmiş ülkelerde sistematik biçimde uygulanmaya başlanmıştır. Amerika Birleşik Devletleri’nde AASHTO ve FHWA rehberleri, Avrupa’da PIARC çalışmaları ve çeşitli ulusal standartlar, PMS yaklaşımının kurumsal bir yapıya kavuşmasını sağlamıştır. Japonya, Kanada ve Avustralya gibi ülkelerde ÜYS, altyapı yönetiminin ayrılmaz bir parçası haline gelmiş; sistematik veri toplama, performans modellemesi ve yaşam döngüsü maliyet analizi (Life Cycle Cost Analysis-LCCA) sayesinde bakım stratejileri uzun vadeli olarak planlanabilmektedir (Haas et al., 1994; AASHTO, 2012; PIARC, 2018).

Türkiye’de ise ÜYS kavramı, 2000’li yıllardan itibaren artan yol yatırımlarıyla birlikte daha fazla önem kazanmaya başlamıştır. Bu kapsamda Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından geliştirilen Üstyapı Yönetim Sistemi (ÜYS) Rehberi, Türkiye karayolu ağının iklimsel, coğrafi ve malzeme özelliklerini dikkate alarak ÜYS yaklaşımını ulusal koşullara uyarlayan temel doküman niteliği taşımaktadır (KGM, 2024). KGM’nin sahip olduğu üstyapı envanteri, performans ölçüm sistemleri (IRI, FWD ve görsel incelemeler) ile oluşturulan veri tabanları, ülke genelinde ÜYS uygulamalarının etkinliğini artırmaktadır.

Bu kitap bölümünde, uluslararası ÜYS uygulamalarına genel hatlarıyla değinilmekte; sistemin sağladığı teknik ve ekonomik faydalar çerçevesinde Türkiye’de Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yürütülen ÜYS çalışmalarının mevcut durumu ele

alınarak etkin kullanımına ilişkin değerlendirmeler yapılmaktadır. Böylece, karayolu üstyapılarının servis seviyesinin korunması, yaşam döngüsü maliyetlerinin azaltılması ve kamu kaynaklarının etkin kullanımına katkı sağlayacak bir yönetim yaklaşımının önemi ortaya konulmaktadır.

ÜSTYAPI YÖNETİM SİSTEMİNİN TANIMI VE TEMEL İLKELERİ

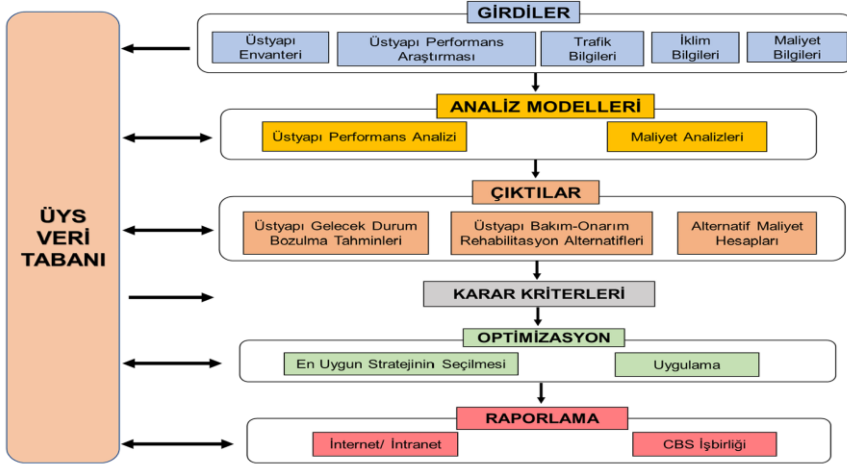
Üstyapı Yönetim Sistemi (YS), karayolu ağının mevcut durumunun sistematik olarak izlenmesi, performansının değerlendirilmesi ve bakım-onarım kararlarının teknik, ekonomik ve çevresel kriterler çerçevesinde optimize edilmesi amacıyla geliştirilen bütünleşik bir yönetim yaklaşımıdır. Uluslararası literatürde Pavement Management System (PMS) olarak adlandırılan bu sistem, yol üstyapılarının tüm servis ömrü boyunca karşılaşacağı bozulmaları öngörmeyi ve sınırlı kaynakların en etkin biçimde kullanılmasını hedeflemektedir (Haas et al., 1994; AASHTO, 2012).

YS'nin temel amacı, bakım-onarım faaliyetlerinin önleyici ve planlı bir çerçevede ele alınmasına dayanmaktadır. Geleneksel uygulamalarda bakım kararları çoğu zaman gözleme dayalı veya acil ihtiyaçlar doğrultusunda alınmaktadır. YS yaklaşımı ise ölçülebilir performans göstergeleri ve tahmin modelleri aracılığıyla karar süreçlerini daha etkin hale getirmektedir. Bu sayede yol ağının hizmet seviyesi korunmakta, ani ve yüksek maliyetli ihtiyaçların önüne geçilmesi sağlanmaktadır. YS, tasarım, yapım, bakım ve rehabilitasyon süreçlerini bütüncül bir varlık yönetimi anlayışı içerisinde ele alan disiplinler arası bir yaklaşımdır (Hudson et al., 2001).

Üstyapı yönetim sistemleri genel olarak dört ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar veri toplama, performans değerlendirme ve modelleme, bakım-onarım stratejilerinin belirlenmesi ve karar

destek süreçleridir. Üstyapı yönetim sisteminin temel bileşenleri ve karar döngüsü Şekil 1’de görülmektedir.

Şekil 1 Üstyapı yönetim sisteminin temel bileşenleri ve işleyişi



Kaynak: Karayolları Genel Müdürlüğü Üstyapı Yönetim Sistemi Rehberi (2024)

Bu bileşenler birbirleriyle etkileşim hâlinde çalışmakta ve sistemin sürekliliğini sağlayan bir geri besleme döngüsü oluşturmaktadır. Veri toplama aşamasında yol ağının geometrik, yapısal ve yüzeysel özelliklerine ilişkin bilgiler düzenli aralıklarla elde edilmektedir. Bu veriler, sistemin güvenilirliği açısından ÜYS’nin en kritik girdilerini oluşturmaktadır.

Performans değerlendirme aşamasında, toplanan veriler kullanarak üstyapıların mevcut durumu ve bozulma düzeyi analiz edilmektedir. Bu kapsamda uluslararası düzeyde en yaygın kullanılan göstergeler arasında düzgünlük indeksi (International Roughness Index – IRI), taşıma gücü (Falling Weight Deflectometer-FWD ölçümleri), yüzey bozulmaları ve çatlak oranları yer almaktadır. Üstyapı performans değerlendirmesinde kullanılan temel göstergeler Tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1 Üstyapı performans değerlendirmesinde kullanılan temel göstergeler

Gösterge	Açıklama	Ölçüm Yöntemi
IRI	Yüzey düzgünlüğü	Lazer profilometre
FWD	Taşıma gücü	Düşen ağırlık
Çatlak oranı	Yüzey bozulması	Görsel inceleme
Tekerlek izi	Kalıcı deformasyon	Profil ölçümü

Kaynak: (FHWA, 2019; PIARC, 2018)

Bu göstergeler, üstyapının servis seviyesi, yapısal yeterliliği ve kullanıcı konforu hakkında ölçülebilir bilgiler sunmaktadır (FHWA, 2019; PIARC, 2018).

Yapılan çalışmalar düzgünsüzlük ve yüzey profili ölçümlerinin üstyapının hizmet yeteneği hakkında % 95 civarında bilgi verdiğini ortaya koymuştur. Tekerlek izi oluşumu, çatlak ve yama gibi diğer faktörlerin tahminlerde daha az etkili olduğu belirlenmiştir (Carey & Irick, 1960).

Performans modelleme aşaması, üstyapının zaman içerisindeki bozulma eğilimini tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Bu modeller, trafik yükleri, iklim koşulları, malzeme özellikleri ve geçmiş bakım uygulamalarını dikkate alarak üstyapı performansının gelecekteki seyrini öngörmektedir.

Uluslararası literatürde yaygın olarak kullanılan Highway Development and Management Model – Version 4 (HDM-4), Türkiye’de Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından geliştirilen Üstyapı Yönetim Sistemi kapsamında da performans modelleme ve ekonomik değerlendirme amacıyla kullanılan temel araçlardan biri olarak yer almaktadır (KGM, 2024). Özellikle HDM-4 tabanlı yaklaşımlar, farklı bakım senaryolarının uzun vadeli etkilerini değerlendirmede yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sayede bakım-

onarım müdahalelerinin zamanlaması ve türü bilimsel temellere dayandırılmaktadır. Bakım ve onarım stratejilerinin belirlenmesi aşamasında, performans değerlendirme ve modelleme sonuçları kullanılarak farklı müdahale alternatifleri oluşturulmaktadır. Bu alternatifler; rutin bakım, periyodik bakım ve yapısal rehabilitasyon gibi farklı seviyelerde sınıflandırılmaktadır. ÜYS yaklaşımı, üstyapının henüz ciddi performans kaybına uğramadığı erken aşamalarda yapılacak müdahalelerin, toplam yaşam döngüsü maliyetlerini önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır. Bu durum, önleyici bakım anlayışının ÜYS içerisindeki merkezi rolünü açıkça göstermektedir (Haas et al., 1994).

Karar destek süreci, ÜYS'nin en stratejik bileşenlerinden biridir. Bu aşamada teknik performans göstergeleri ile ekonomik değerlendirmeler bir araya getirilerek bakım-onarım öncelikleri belirlenmektedir. Yaşam döngüsü maliyet analizi (Life Cycle Cost Analysis-LCCA), farklı bakım senaryolarının bugünkü değer üzerinden karşılaştırılmasına olanak tanımakta; böylece sınırlı bütçe koşulları altında en yüksek faydayı sağlayacak müdahalelerin seçilmesi mümkün olmaktadır. Bazı gelişmiş ÜYS uygulamalarında kullanıcı maliyetleri ve çevresel etkiler de karar sürecine dâhil edilmektedir. ÜYS'nin etkinliği, güvenilir ve düzenli veri toplama süreçlerinin karar destek mekanizmalarıyla bütünleştirilmesine bağlıdır (Flintsch & Bryant, 2006).

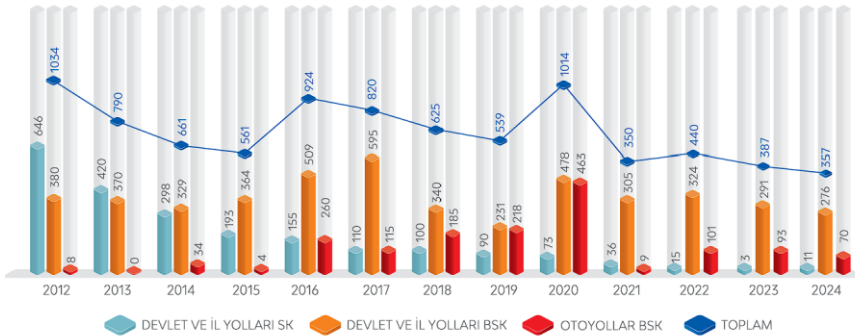
Türkiye'de Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından geliştirilen ÜYS yaklaşımı, bu temel ilkeler doğrultusunda şekillendirilmiştir. KGM ÜYS Rehberi'nde veri toplama yöntemleri, performans göstergeleri, değerlendirme kriterleri ve karar süreçleri ulusal koşullar dikkate alınarak tanımlanmaktadır. Türkiye'nin farklı iklim bölgeleri, trafik karakteristikleri ve üstyapı tipleri göz önüne alındığında, ÜYS'nin esnek ve güncellenebilir bir yapıda kurgulanması büyük önem taşımaktadır. Bu yönüyle ÜYS, yalnızca teknik bir analiz aracı değil, aynı zamanda uzun vadeli yol varlık

yönetimini destekleyen bütüncül bir sistem olarak değerlendirilmektedir.

TÜRKİYE KARAYOLU AĞI VE ÜSTYAPI YÖNETİM SİSTEMİ

Türkiye karayolu ağı, uzunluk, kaplama türü ve hizmet seviyesi bakımından son yirmi-yirmi beş yılda önemli bir dönüşüm geçirmiştir. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) sorumluluğunda bulunan devlet ve il yollarında özellikle bölünmüş yol uygulamaları ve bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamalar ön plana çıkmıştır. Bu dönüşüm, trafik güvenliği ve sürüş konforu açısından belirgin kazanımlar sağlamakla birlikte, bakım-onarım planlamasını daha karmaşık ve önemli hale getirmiştir. KGM yol ağı istatistikleri incelendiğinde, bölünmüş yol uzunluğunun yıllar içerisinde istikrarlı bir artış eğilimi gösterdiği, BSK kaplamalı yolların toplam ağ içindeki payının ise belirgin biçimde yükseldiği görülmektedir. Bu durum, yüksek standartlı üstyapıların yaygınlaşmasıyla beraber üstyapı performansının sürekliliğinin sağlanması için sistematik yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Yıllara göre devlet, il yolları ve otoyollarda BSK ve satıh kaplama uzunluklarının değişimleri Şekil 2’de görülmektedir.

Şekil 2 Yıllara göre devlet, il yolları ve otoyollarda BSK ve satıh kaplama uzunluklarının değişimi



Kaynak: KGM Karayolları İstatistik Yıllıkları / KGM Faaliyet Raporları (2024).

Türkiye karayolu ağında üstyapı türleri dağılımı değerlendirildiğinde, BSK kaplamaların baskın olduğu, sathi kaplamaların ise daha çok düşük trafik hacmine sahip kesimlerde bulunduğu görülmektedir. Beton yol uygulamaları ise özellikle otoyol ve ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu kesimlerde tercih edilen bir üstyapı türü olarak değerlendirilmektedir. Üstyapı türlerindeki bu çeşitlilik, ÜYS kapsamında farklı performans göstergelerinin ve bakım stratejilerinin birlikte ele alınmasını gerekli kılmaktadır. Türkiye karayolu ağının üstyapı kaplama türlerine göre mevcut güncel durumu Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2 Türkiye karayolu ağında üstyapı türlerine göre dağılım

SATI H CİNSİNE GÖRE YOL AĞI (KM.)

Road Network According To Surface Types (km)

(01.01.2025)

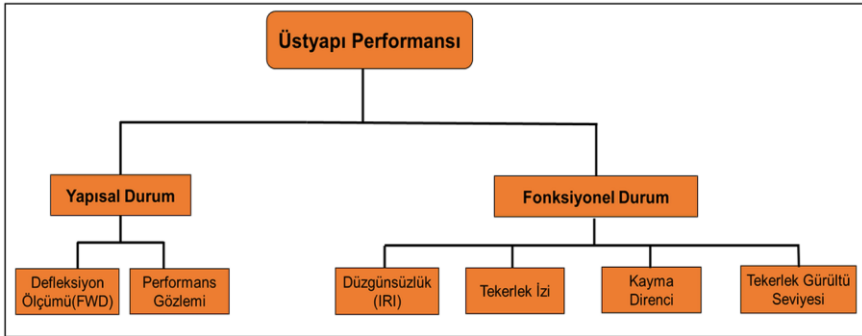
YOL SINIFI Road Types	ASFALT BETONU Asphaltic Concrete	SATHİ KAPLAMA Surface Treatment	PARKE Stone Block	STABİLİZE Stabilized	TOPRAK Earth	GEÇİT VERMEZ Primitive	TOPLAM UZUNLUK Total Length
OTOYOLLAR(*) Motorways	3796	--	--	--	--	--	3796
DEVLET YOLLARI State Highways	20575	9952	43	22	0	233	30825
İL YOLLARI Provincial Roads	6354	24904	216	245	318	1959	33996
TOPLAM Total	30725	34856	259	267	318	2192	68617

Kaynak: KGM Devlet ve İl Yolları Envanteri / Satih Cinsine Göre Yol Ağı tabloları (2025).

Türkiye’de karayolu üstyapılarının performansı; trafik yükleri, ağır taşıt oranı, iklimsel koşullar ve malzeme özellikleri gibi birçok faktöre bağlı olmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık farklarının görüldüğü bölgelerde tekerlek izi ve yüzey bozulmaları ön plana çıkarken, soğuk iklim koşullarının hâkim olduğu bölgelerde çatlak oluşumu ve taşıma gücü kayıpları gibi bozulmalar daha yaygın olarak gözlemlenmektedir. Bu bölgesel farklılıklar, ÜYS’nin tek tip bir yaklaşım yerine uyarlanabilir ve esnek bir yapıda kurgulanmasını gerekli kılmaktadır.

Bu çerçevede KGM tarafından geliştirilen Üstyapı Yönetim Sistemi, Türkiye’ye özgü iklim ve trafik koşullarını dikkate alan bir yapı sunmaktadır. ÜYS kapsamında yol ağının belirli kesimlerinde düzenli olarak düzgünsüzlük (IRI) ölçümleri, taşıma gücü (FWD) testleri ve yüzey bozulmasının görsel incelemeleri gerçekleştirilmektedir. Elde edilen veriler, merkezi bir veri tabanında toplanmakta ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile entegre edilerek analiz edilmektedir. Bu sayede, farklı yol kesimleri arasında karşılaştırılabilir performans değerlendirmeleri yapılabilir. Temel üstyapı yapısal ve fonksiyonel durum tespit yöntemleri Şekil 3’de gösterilmektedir.

Şekil 3 Üstyapı Yapısal ve Fonksiyonel Durum Tespit Yöntemleri



Kaynak: KGM Üstyapı Yönetim Sistemi Rehberi (2024).

KGM ÜYS uygulamalarında, üstyapı performansının değerlendirilmesi ve geleceğe yönelik tahminlerin yapılmasında Highway Development and Management Model-Version 4 (HDM-4) tabanlı yaklaşımlardan yararlanılmaktadır. Bu modelleme yaklaşımı ile farklı bakım-onarım senaryolarının uzun vadeli etkilerinin değerlendirilmekte ve performans göstergeleri ile ekonomik analizlerin birlikte ele alınması sağlanmaktadır. Böylece, bakım kararlarının yalnızca mevcut duruma değil, yaşam döngüsü perspektifine dayandırılması mümkün olmaktadır.

ÜYS'nin Türkiye'deki uygulama düzeyi değerlendirildiğinde, veri toplama ve envanter oluşturma aşamalarında önemli ilerlemeler kaydedildiği görülmektedir. Bununla birlikte, performans modelleme sonuçlarının bakım programlarına ve bütçe planlamasına daha güçlü biçimde entegre edilmesi, sistemin etkinliğini artırabilecek temel gelişim alanları arasında yer almaktadır. Özellikle ağ düzeyinde önceliklendirme, bütçe analizi ve kullanıcı maliyetlerinin karar süreçlerine dâhil edilmesi, ÜYS'nin stratejik katkısını güçlendirecek unsurlar olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, Türkiye karayolu ağının büyüklüğü ve üstyapı özellikleri dikkate alındığında, ÜYS uygulamalarının yaygınlaştırılması ve derinleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. KGM tarafından yürütülen mevcut çalışmalar, ÜYS'nin kurumsal bir yapı kazandığını göstermekte; ancak sistemin etkin kullanımının artırılması, üstyapıların servis ömrünün uzatılması ve kamu kaynaklarının daha verimli kullanılması açısından kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, ÜYS'nin karar destek kapasitesinin güçlendirilmesi, sonraki bölümlerde ele alınacak bakım-onarım stratejileri ve ekonomik değerlendirmeler için sağlam bir zemin oluşturmaktadır.

ÜSTYAPI PERFORMANS MODELLEMESİ VE YAŞAM DÖNGÜSÜ MALİYET ANALİZİ (YDMA)

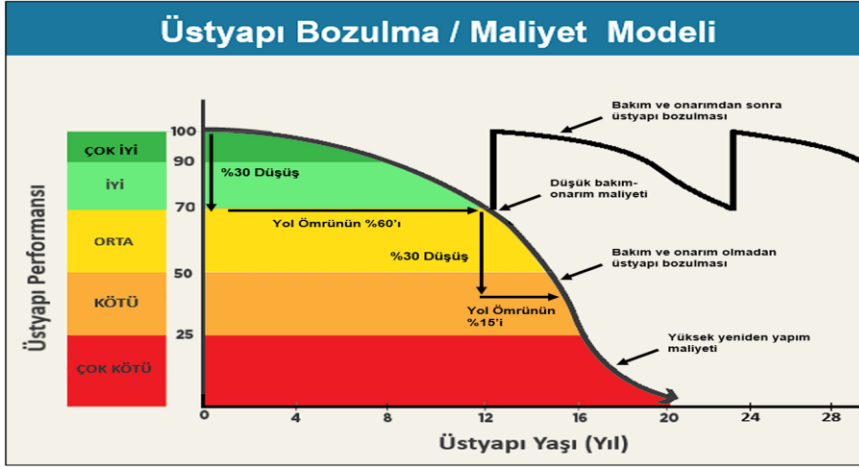
Üstyapı yönetim sistemlerinin etkinliği, büyük ölçüde üstyapı performansının zaman içerisindeki değişiminin doğru biçimde modellenmesine ve bu modellere dayalı ekonomik değerlendirmelerin yapılabilmesine bağlıdır. Performans modellemesi, üstyapının mevcut durumu ile gelecekte ulaşacağı servis seviyeleri arasındaki ilişkiyi ortaya koyarak, bakım-onarım müdahalelerinin zamanlaması ve türü hakkında tahmin yapmayı sağlamaktadır. Bu yaklaşım, karar süreçlerinin yalnızca mevcut

koşullara değil, uzun vadeli performans hedeflerine dayandırılmasını mümkün kılmaktadır.

Üstyapı performansı, trafik yükleri, ağır taşıt oranı, iklimsel koşullar, malzeme özellikleri ve geçmiş bakım uygulamaları gibi çok sayıda değişkene bağlı olarak şekillenmektedir. Bu nedenle performans modellemesinde tek bir parametreye dayalı değerlendirmeler yeterli olmamakta; birden fazla performans göstergesinin birlikte ele alınması gerekmektedir. Uygulamada en yaygın kullanılan göstergeler arasında yüzey düzgünlüğünü temsil eden International Roughness Index (IRI), yapısal kapasiteyi yansıtan FWD ölçümleri, yüzey bozulmaları ve kalıcı deformasyon göstergeleri yer almaktadır. Bu göstergeler, üstyapının hem yapısal yeterliliği hem de kullanıcı konforu hakkında toptan bir değerlendirme sunmaktadır.

Performans modelleme sürecinde, üstyapının zamanla maruz kaldığı bozulmalar matematiksel veya ampirik ilişkiler yardımıyla ifade edilmektedir. Bozulma eğrileri olarak adlandırılan bu modeller, belirli bir yol kesiminin servis seviyesinin zaman içerisindeki değişimini göstermekte ve bakım müdahalelerinin gecikmesi durumunda performans kaybının ne ölçüde hızlanacağını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda performans modellemesi, bakım-onarım faaliyetlerinin önleyici mi yoksa düzeltici mi olması gerektiğine ilişkin temel verileri sağlamaktadır. Bir yol kesimine zamanında ve doğru yöntemle yapılan bir müdahale hem bozulma artış hızını düşürmekte hem de üstyapı performansını üst seviyeye taşımaktadır. Geç kalınmış bir müdahale ise vaktinde yapılan bir müdahaleye göre daha fazla maliyet artışına neden olmaktadır. Bozulma durumu düşük olan yollarda zamanında uygulanan bakım ve onarım müdahaleleri ile bakımın geciktirilerek daha ileri bozulma seviyelerine ulaşılmasına izin verilmesi durumunda ortaya çıkan maliyet büyüklüklerinin karşılaştırılması Şekil 4’de görülmektedir.

Şekil 4 Üstyapıya farklı zamanlarda yapılan müdahalelerin ortaya çıkardığı maliyet büyüklüklerinin karşılaştırılması



Kaynak: KGM Üstyapı Yönetim Sistemi Rehberi (2024).

Uluslararası uygulamalarda performans modellemesi ve ekonomik değerlendirmelerin birlikte ele alındığı en yaygın araçlardan biri Highway Development and Management Model-Version 4 (HDM-4) olarak öne çıkmaktadır. HDM-4, yol üstyapılarının fiziksel bozulma süreçlerini, kullanıcı maliyetlerini ve bakım-onarım müdahalelerinin etkilerini bütünlük bir çerçevede değerlendiren bir karar destek modelidir. Model, farklı bakım senaryolarının uzun vadeli performans ve maliyet sonuçlarını karşılaştırmaya olanak tanımakta; bu yönüyle ağ düzeyinde stratejik planlamada etkin bir araç olarak kullanılmaktadır.

HDM-4 tabanlı yaklaşımlarda, bakım-onarım alternatifleri belirli bir analiz periyodu boyunca değerlendirilmekte ve her bir senaryonun yol performansı üzerindeki etkisi tahmin edilmektedir. Bu süreçte yalnızca üstyapının fiziksel durumu değil, aynı zamanda yol kullanıcı maliyetleri, işletme giderleri ve bakım maliyetleri de dikkate alınmaktadır. Böylece karar süreci, teknik performans göstergelerinin ötesine geçerek ekonomik gerçeklik temelinde

şekillenmektedir. Bu kapsamda HDM-4 modeli, performans tahmini ve ekonomik değerlendirmelerin bütüncül biçimde ele alınmasına olanak tanıyan yaygın bir araç olarak kullanılmaktadır (World Bank, 2013).

Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi (YDMA), üstyapı yönetiminde karar süreçlerinin ekonomik boyutunu güçlendirmektedir. YDMA yaklaşımı, bir üstyapının hizmet süresi boyunca karşılaşacağı tüm maliyetleri bugünden değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu maliyetler; ilk yapım maliyetleri, bakım-onarım giderleri, rehabilitasyon maliyetleri ve bazı uygulamalarda kullanıcı maliyetlerini kapsamaktadır.

YDMA'nın temel amacı, en düşük ilk yapım maliyetine sahip alternatifi değil, en düşük toplam yaşam döngüsü maliyetini sağlayan çözümü tespit etmektir. Bu yaklaşım, özellikle kamu kaynaklarının etkin kullanımı açısından büyük önem taşımaktadır. Önleyici bakım stratejilerinin ilk aşamada ek maliyet oluşturmalarına rağmen, uzun vadede ağır rehabilitasyon ihtiyacını azaltarak toplam maliyetleri düşürdüğü birçok çalışmada ortaya konulmuştur. Bu durum, ÜYS içerisinde ekonomik değerlendirmelerin neden çok önemli bir bileşen olduğunu göstermektedir.

Türkiye'de KGM tarafından geliştirilen Üstyapı Yönetim Sistemi kapsamında, performans modelleme ve ekonomik değerlendirme yaklaşımlarının giderek daha fazla önem kazandığı görülmektedir. ÜYS Rehberi'nde performans göstergeleri ve bakım stratejileri tanımlanmakta; modelleme sonuçlarının bakım programlarına girdi oluşturmaları hedeflenmektedir. Ancak uygulamada, performans modelleme çıktılarının bütçe planlaması ve önceliklendirme süreçlerine daha sistematik biçimde entegre edilmesi, sistemin etkinliğini artırabilecek önemli bir gelişim alanı olarak öne çıkmaktadır. ÜYS performans modellemesi ve YDMA, ÜYS'nin teknik ve ekonomik yapısını oluşturmaktadır. Bu iki yaklaşımın birlikte kullanılması, bakım-onarım kararlarının kısa

vadeli ihtiyaçlar yerine uzun vadeli performans ve maliyet dengesi gözetilerek alınmasını sağlamaktadır. Yaşam döngüsü maliyet analizinin bakım stratejilerinin değerlendirilmesindeki önemi, farklı ülke uygulamalarında da vurgulanmaktadır (World Bank, 2019).

ÜSTYAPI YÖNETİM SİSTEMİNİN SERVİS ÖMRÜ, EKONOMİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN DEğERLENDİRİLMESİ

Üstyapı yönetim sistemlerinin temel çıktılarından biri, yol üstyapılarının servis ömrünün uzatılmasına yönelik kararların bilimsel temellere dayandırılmasıdır. Performans modelleme ve yaşam döngüsü maliyet analizi sonuçları, bakım-onarım müdahalelerinin zamanlamasının üstyapı davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Özellikle bozulma düzeyi düşük olan styapılarda zamanında gerçekleştirilen önleyici bakım uygulamaları, performans kaybının yavaşlatılmasını sağlamakta ve yeniden yapım ihtiyaını geciktirmektedir. Bu yaklaşım, servis ömrünün etkin biçimde yönetilmesine olanak tanımaktadır.

Servis mr kavramı, yalnızca üstyapının fiziksel dayanımı ile sınırlı olmayıp, yolun belirlenen hizmet seviyesini hangi süre boyunca koruyabildiğini de kapsamaktadır. YS yaklaşımı, üstyapının kullanılamaz hale gelmesini beklenmeden müdahale edilmesini esas almakta; böylece yol kullanıcıları açısından konfor ve güvenlik düzeyinin sürekliliği hedeflenmektedir. Bu durum, özellikle yoğun trafik hacmine sahip kesimlerde servis seviyesindeki ani düşüşlerin önlenmesi açısından önem taşımaktadır.

Bütçe etkinliği açısından değerlendirildiğinde, YS'nin sağladığı en önemli katkı, sınırlı kaynakların doğru yol kesimine, doğru zamanda ve doğru müdahale türüyle yönlendirilmesini sağlamasıdır. Geleneksel anlamda, bakım-onarım kararları çoğu zaman kısa vadeli ihtiyaçlara göre şekillenmektedir. Buna karşılık YS, ağ düzeyinde yapılan değerlendirmeler sayesinde bakım

önceliklerinin gerçekçi biçimde belirlenmesini ve bütçenin uzun vadeli hedeflerle uyumlu olarak planlanmasını desteklemektedir.

Yaşam döngüsü maliyet analizleri, önleyici bakım stratejilerinin ilk bakışta ek maliyet oluşturmalarına rağmen, uzun vadede toplam maliyetleri azalttığını göstermektedir. Erken aşamada yapılan düşük maliyetli müdahaleler, ilerleyen dönemlerde ortaya çıkabilecek yüksek maliyetli yapısal müdahale ihtiyaçlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu durum, kamu kaynaklarının etkin kullanımı açısından ÜYS yaklaşımının stratejik önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca bakım-onarım faaliyetlerinin daha planlı yürütülmesi, acil müdahalelerin neden olduğu mali belirsizlikleri de azaltmaktadır.

Üstyapıların servis ömrünün uzatılması, yol yapım ve onarım faaliyetlerinin sıklığını azaltarak doğal kaynak tüketimini ve enerji kullanımını düşürmektedir. Özellikle bitümlü üstyapılarda daha az sıklıkta gerçekleştirilen büyük ölçekli müdahaleler, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu yönüyle ÜYS, çevresel sürdürülebilirlik hedefleriyle de uyumlu bir yönetim yaklaşımı getirmektedir. Bitümlü üstyapılarda bakım ve rehabilitasyon sıklığının azaltılması, çevresel etkilerin ve karbon ayak izinin düşürülmesine katkı sağlamaktadır (EAPA, 2022).

Bakım-onarım faaliyetlerinin sık ve plansız yapılması trafik akışı üzerinde olumsuz etkiler doğurmaktadır. Plansız veya sık tekrarlanan yol çalışmaları, kullanıcı gecikmelerini artırmakta ve dolaylı ekonomik kayıplara neden olmaktadır. ÜYS kapsamında planlanan müdahaleler ise, uygun zamanlama ve önceliklendirme sayesinde trafik üzerindeki olumsuz etkilerin en aza indirilmesini amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, yol kullanıcı memnuniyetinin artırılmasına ve ulaşım sisteminin genel verimliliğinin korunmasına katkı sağlamaktadır.

Türkiye’de Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yürütülen ÜYS uygulamaları, servis ömrü yönetimi ve bütçe etkinliği açısından önemli bir potansiyel barındırmaktadır. Mevcut veri toplama altyapısı ve performans değerlendirme çalışmaları, ÜYS’nin karar destek kapasitesini güçlendirecek niteliktedir.

Üstyapı Yönetim Sistemi; servis ömrünün etkin yönetimi, bütçe kaynaklarının doğru kullanımı ve çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesi açısından kapsamlı ve çok yönlü bir çerçeve sunmaktadır. Önleyici bakım anlayışının uygulanması, kamu yatırımlarının uzun vadeli verimliliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu yönüyle ÜYS, karayolu altyapısının yalnızca bugünkü ihtiyaçlarını değil, gelecekteki gereksinimlerini de gözetken stratejik bir yönetim aracı olarak değerlendirilmektedir.

ULUSLARARASI ALANDA ÜSTYAPI YÖNETİM SİSTEMİ UYGULAMALARI

Üstyapı yönetim sistemleri, farklı ülkelerde yol ağlarının ölçeği, kurumsal yapı ve finansman modellerine bağlı olarak çeşitlilik göstermekle birlikte, temel olarak büyük ölçüde benzer bir yaklaşım benimsemektedir. Uluslararası uygulamalarda ÜYS, bakım-onarım kararlarının verilere dayalı, şeffaf ve uzun vadeli hedeflerle uyumlu biçimde alınmasını amaçlamaktadır.

OECD’ye üye ülkelerde uygulanan üstyapı yönetim sistemleri ve bu sistemlerde esas alınan değerlendirme ölçütleri incelendiğinde bazı ortak yaklaşımlar öne çıkmaktadır. Buna göre, üstyapı yönetim sistemlerinin temel ilkeleri ve sorumluluk paylaşımı, her ülkenin kurumsal yapısı ve yerel koşulları dikkate alınarak belirlenmektedir.

Üstyapı performansının değerlendirilmesinde, karar süreçlerini sadeleştirmek amacıyla genellikle tek bir bütünleşik performans indeksinin kullanılması tercih edilmektedir. Üstyapı durumuna ilişkin parametrelerin belirlenmesinde ise ileri teknolojik

ölçüm donanımlarına sahip araçlardan yararlanılmakta; yüzey bozulmaları, düzgünsüzlük, tekerlek izi, çatlaklar, defleksiyon, kayma direnci ve trafik yükleri gibi göstergeler birlikte değerlendirilmektedir. Ayrıca bakım maliyetleri, taşıma kapasitesi ve yol kullanıcı maliyetleri de karar sürecinde dikkate alınan önemli unsurlar arasında yer almaktadır. Bu parametrelere dayalı olarak geliştirilen tahmin modelleri aracılığıyla, uygun bakım ve müdahale düzeyleri belirlenmektedir (İyınam vd., 2004).

Amerika Birleşik Devletleri'nde ÜYS uygulamaları, belirlenen çerçeveler doğrultusunda eyaletler tarafından yürütülmektedir. Federal Highway Administration (FHWA) ve American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) tarafından yayımlanan rehberler, ÜYS uygulamalarının standartlaştırılmasında belirleyici rol oynamaktadır. ABD'de ÜYS, yalnızca teknik performansın izlenmesine yönelik bir araç olarak değil, aynı zamanda bütçe tahsisi ve yatırım önceliklendirmesi süreçlerini destekleyen stratejik bir karar mekanizması olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, ağ düzeyinde bakım programlarının oluşturulmasını ve farklı durumların ekonomik sonuçlarının değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır (Hergüner, 2009).

Avrupa ülkelerinde ÜYS uygulamaları, genellikle ulusal yol idareleri tarafından yürütülmekte ve ortak bir yöntem içinde şekillenmektedir. World Road Association (PIARC) tarafından geliştirilen teknik dokümanlar ve uygulama örnekleri, farklı ülke deneyimlerinin paylaşılmasına katkı sağlamaktadır. Avrupa'daki ÜYS yaklaşımlarında, performans göstergeleri ile bakım stratejileri arasındaki ilişkinin yanı sıra, çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik hedefleri de giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Özellikle bakım-onarım müdahalelerinin çevresel açıdan karbon izinin azaltılması, ÜYS kapsamındaki karar süreçlerine doğrudan etki etmektedir.

Kanada, Avustralya ve Japonya gibi ülkelerde ÜYS uygulamaları, uzun dönemli planlama anlayışı ile öne çıkmaktadır. Bu ülkelerde üstyapı performans verileri, uzun yıllara dayanan düzenli ölçümlerle desteklenmekte ve bozulma eğilimlerinin güvenilir biçimde modellenmesine olanak tanımaktadır. Elde edilen bu veriler, bakım stratejilerinin yalnızca kısa vadeli ihtiyaçlara göre değil, servis ömrü boyunca beklenen performans hedefleri doğrultusunda şekillendirilmesini sağlamaktadır. Böylece, ani ve yüksek maliyetli müdahalelerin azaltılması amaçlanmaktadır.

Uluslararası uygulamaların ortak noktalarından biri, ÜYS'nin kurumsal karar alma süreçleriyle güçlü biçimde ilişkilendirilmesidir. Birçok ülkede ÜYS çıktıları, doğrudan bütçe planlaması, performansa dayalı sözleşmeler ve yol varlık yönetimi politikaları ile entegre edilmektedir. Bu sayede, teknik analiz sonuçları ile üst düzey yönetsel kararlar arasında uyum sağlanmakta ve kaynak kullanımı verimli yönetilebilmektedir.

Uluslararası uygulamalar incelendiğinde ÜYS'nin yalnızca gelişmiş ülkeler için değil, hızla büyüyen karayolu ağlarına sahip ülkeler için de kritik bir sistem olduğu görülmektedir. Özellikle yeni yatırımların yoğun olduğu dönemlerde, ÜYS'nin etkin biçimde kullanılması, mevcut altyapının korunmasını ve yapılan yatırımların uzun vadede değerini kaybetmemesini sağlamaktadır. Bu durum, ÜYS'nin bakım odaklı bir sistem olmasının yanında, yatırımın sürdürülebilirliğini de garanti altına alan bir yönetim yaklaşımı sunduğunu ortaya koymaktadır. Yerel ve ulusal düzeyde uygulanan ÜYS yaklaşımlarının, kaynak tahsisinde kurumsal karar süreçlerini desteklediği belirtilmektedir (Zimmerman & Wolters, 2004).

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, uluslararası ÜYS uygulamaları önemli referanslar sunmaktadır. Ancak bu uygulamaların birebir kopyalanması yerine, temel ilkelerin Türkiye'nin kurumsal yapısı, iklimsel koşulları ve trafik özellikleriyle uyumlu biçimde yorumlanması gerekmektedir. Bu

bağlamda uluslararası uygulamalar, Türkiye’de KGM tarafından yürütülen ÜYS çalışmalarını tamamlayıcı ve yol gösterici bir çerçeve olarak ele alınmalıdır.

Uluslararası deneyimler, ÜYS’nin yol varlıklarının uzun vadeli yönetiminde karar destek aracı olarak yaygın biçimde kullanıldığını göstermektedir (OECD, 2015).

TÜRKİYE KARAYOLU AĞI İÇİN ÜSTYAPI YÖNETİM SİSTEMİNE İLİŞKİN DEĞERLENDİRMELER VE ÖNERİLER

Türkiye’de karayolu ağının son yıllarda hızla genişlemesi ve üstyapı standartlarının yükselmesi, Üstyapı Yönetim Sistemi’nin (ÜYS) stratejik önemini daha da artırmıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından geliştirilen ÜYS altyapısı, veri toplama ve performans izleme açısından önemli bir birikime sahiptir. Bu birikim, sistemin karar destek kapasitesini güçlendirecek nitelikte olup, doğru yönlendirmelerle daha yüksek fayda üretme potansiyeli taşımaktadır.

Mevcut uygulamalar değerlendirildiğinde, ÜYS kapsamında toplanan performans verilerinin teknik açıdan yeterli olduğu, ancak bu verilerin bakım-onarım önceliklendirme ve bütçe tahsisi süreçlerine entegrasyonunun daha sistematik hale getirilmesi gerektiği görülmektedir. ÜYS’den elde edilen çıktıların, yıllık bakım programlarının yanı sıra uzun vadeli yatırım planlarıyla ilişkilendirilmesi, sistemin stratejik etkisini artırabilecek temel adımlardan biridir. Bu yaklaşım, bakım kararlarının kısa vadeli ihtiyaçlara göre değil, uzun vadeli performans hedefleri doğrultusunda alınmasına katkı sağlayacaktır.

Türkiye’de ÜYS’nin etkinliğini artırmaya yönelik bir diğer önemli husus, önleyici bakım anlayışının kurumsal düzeyde güçlendirilmesidir. Uygulamada, üstyapılardaki ileri derece bozulmalara yönelik gerçekleştirilen maliyetli iyileştirme müdahaleleri hâlen önemli bir paya sahiptir. Buna karşın performans

verileri ve yaşam döngüsü maliyet analizleri, erken dönemde yapılan düşük maliyetli müdahalelerin toplam maliyetleri önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Bu nedenle ÜYS çıktılarının, önleyici bakım uygulamalarını teşvik edecek biçimde karar süreçlerine yansıtılması büyük önem taşımaktadır.

Kurumsal açıdan bakıldığında, ÜYS'nin yalnızca teknik bir sistem olarak değil, yönetsel bir karar destek aracı olarak yerleşmesi ve düşünülmesi gerekmektedir.

Uluslararası uygulamalar değerlendirildiğinde, Türkiye için önemli bir diğer gelişim alanı, ÜYS çıktılarının şeffaflık ve hesap verebilirlik ilkeleriyle ilişkilendirilmesidir. Performans göstergelerine dayalı karar alma süreçleri, kamu kaynaklarının kullanımının gerekçelendirilmesini kolaylaştırmakta ve yatırım önceliklerinin teknik temellere dayandırılmasını sağlamaktadır. Bu durum, ÜYS'nin yalnızca teknik değil, aynı zamanda kurumsal yönetim açısından da katkı sağlayan bir araç haline gelmesine olanak tanımaktadır.

ÜYS'nin uzun vadeli başarısı açısından, sistemin dinamik bir yapıda tutulması da kritik öneme sahiptir. Trafik hacimlerindeki değişimler, iklimsel koşullar ve yeni üstyapı teknolojileri, performans değerlendirme kriterlerinin ve modelleme yaklaşımlarının düzenli olarak gözden geçirilmesini gerektirmektedir. Bu nedenle ÜYS'nin belirli aralıklarla güncellenmesi ve yeni veri türleriyle desteklenmesi, sistemin güncelliğini ve etkinliğini korumasını sağlayacaktır.

Türkiye'de Üstyapı Yönetim Sistemi uygulamaları sağlam bir teknik altyapıya sahiptir ve önemli bir potansiyel barındırmaktadır. Bu potansiyelin tam anlamıyla hayata geçirilebilmesi için, ÜYS çıktılarının karar alma süreçlerine daha güçlü biçimde entegre edilmesi, önleyici bakım yaklaşımının kurumsal düzeyde benimsenmesi ve sistemin stratejik bir yönetim

aracı olarak konumlandırılması gerekmektedir. Bu adımlar, karayolu üstyapılarının servis ömrünün uzatılmasına, bütçe kaynaklarının etkin kullanılmasına ve sürdürülebilir bir yol yönetimi anlayışının yerleşmesine katkı sağlayacaktır.

SONUÇLAR

Bu kitap bölümünde, karayolu üstyapılarının etkin ve sürdürülebilir biçimde yönetilmesinde Üstyapı Yönetim Sistemi'nin (ÜYS) rolü ele alınmıştır. Çalışmada, ÜYS'nin kavramsal temelleri, performans modelleme ve yaşam döngüsü maliyet analizi yaklaşımları ile Türkiye'de Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yürütülen mevcut uygulamalar birlikte değerlendirilmiştir. Bu kapsamda ÜYS'nin, yalnızca teknik bir izleme aracı değil, aynı zamanda stratejik bir karar destek sistemi olduğu ortaya konulmuştur.

Türkiye'de son yıllarda karayolu ağında yaşanan hızlı genişleme ve üstyapı standartlarının yükselmesi, bakım-onarım faaliyetlerinin planlı ve veri temelli yürütülmesini zorunlu hale getirmiştir. Çalışma kapsamında yapılan değerlendirmeler, üstyapı performansının düzenli olarak izlenmesi ve bozulma eğilimlerinin öngörülmesi sayesinde, bakım müdahalelerinin doğru zamanda ve uygun düzeyde gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Bu yaklaşım, üstyapıların servis ömrünün uzatılmasına ve beklenmeyen, yüksek maliyetli iyileştirme ihtiyaçlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

ÜYS'nin yaşam döngüsü maliyet analizi ile kullanılması, bakım-onarım kararlarının ekonomik boyutunu güçlendirmektedir. Önleyici bakım stratejilerinin, uzun vadede toplam maliyetleri azalttığı ve kamu kaynaklarının daha etkin kullanılmasını sağladığı, literatür ve uygulama örnekleriyle desteklenmiştir. Bu durum, kısa vadeli bütçe kısıtları yerine uzun vadeli performans ve maliyet

dengesi gözeten bir yönetim anlayışının önemini ortaya koymaktadır.

Uluslararası uygulamalara ilişkin genel değerlendirmeler, ÜYS'nin farklı ülkelerde benzer çerçevede benimsendiğini ve karar alma süreçleriyle güçlü biçimde ilişkilendirildiğini göstermektedir. Uluslararası uygulamaların incelenmesi Türkiye'de yürütülen ÜYS çalışmalarının geliştirilmesi açısından yol gösterici nitelik taşımaktadır. Ancak uluslararası örneklerin birebir aktarılması yerine, Türkiye'nin iklim, trafik ve kurumsal şartlarına uygun biçimde uyarlanmasını gerektirmektedir.

Sonuç olarak, ÜYS'nin etkin biçimde uygulanması; karayolu üstyapılarının servis seviyesinin korunmasına, bakım-onarım bütçelerinin doğru biçimde planlanmasına ve sürdürülebilir bir yol yönetimi anlayışının benimsenmesine katkı sağlamaktadır. Türkiye'de mevcut ÜYS altyapısının, karar destek kapasitesi güçlendirilerek ve önleyici bakım yaklaşımı kurumsal düzeyde benimsenerek geliştirilmesi, yapılan karayolu yatırımlarının uzun vadeli değerini koruyacak önemli bir adım olacaktır. Bu yönüyle ÜYS, karayolu altyapısının bugünkü gereksinimlerinin yanı sıra gelecekteki ihtiyaçlarını da gözeten stratejik bir yönetim aracı olarak değerlendirilmektedir.

Kaynakça/References

AASHTO. (2012). *Pavement management guide* (2nd ed.). Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Carey, W. N., & Irick, P. E. (1960). *The pavement serviceability–performance concept*. Washington, DC: Highway Research Board.

EAPA. (2022). *Environmental product declaration for asphalt pavements*. Brussels: European Asphalt Pavement Association.

FHWA. (2019). *Pavement management guide* (FHWA-HIF-19-044). Washington, DC: Federal Highway Administration.

Flintsch, G. W., & Bryant, J. W. (2006). *Asset management data collection for supporting decision processes*. Transportation Research Record, 1944, 11–19. <https://doi.org/10.1177/0361198106194400102>

Haas, R., Hudson, W. R., & Zaniewski, J. (1994). *Modern pavement management*. Malabar, FL: Krieger Publishing Company.

Hergüner, A. T. (2009). *Türkiye otoyol ağı için üstyapı yönetim sistemi* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Hudson, W. R., Haas, R., & Uddin, W. (2001). *Infrastructure management: Integrating design, construction, maintenance, rehabilitation, and renovation*. New York, NY: McGraw-Hill.

İyınam, Ş., İyınam, A. F., & Ergün, M. (2004). Üstyapı yönetim sistemi ve Türkiye karayolu açısından kullanılabilirliği. 4. *Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildiriler Kitabı* içinde (ss. 281–291). Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü, Yollar Türk Milli Komitesi, ASMÜD.

Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM). (2023). *Karayolları istatistik yılı*. Ankara: KGM Yayınları.

Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM). (2024). *Üstyapı yönetim sistemi rehberi*. Ankara: KGM Yayınları.

Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM). (2025). *Devlet ve il yolları envanteri*. Erişim tarihi:10 Ocak 2025, <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Istatistikler/DevletveIIYolEnvanteri.aspx>

Morova, N. (2013). *Coğrafi bilgi sistemleri ile gerçek zamanlı üstyapı yönetim sistemi geliştirilmesi* (Doktora tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

OECD. (2015). *Road infrastructure management: Practices and challenges*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.

PIARC. (2018). *Pavement management systems: An international overview*. Paris: World Road Association.

Prozzi, J. A., & Madanat, S. (2004). *Incremental benefit-cost analysis of pavement preservation activities*. Transportation Research Record, 1889, 175–183. <https://doi.org/10.3141/1889-20>

World Bank. (2013). *HDM-4: Highway development and management model – Volume 6: Analytical framework and model description*. Washington, DC: World Bank.

World Bank. (2019). *Life-cycle cost analysis in road asset management*. Washington, DC: World Bank.

Zimmerman, K. A., & Wolters, A. (2004). *Local government pavement management systems*. Transportation Research Record, 1889, 163–174.

BÖLÜM 14

KURAKLIK ANALİZİNDE YAĞIŞ, ETKİLİ YAĞIŞ VE EVAPOTRANSPIRASYON VERİLERİNE DAYALI KURAKLIK İNDİSLERİNİN KULLANIMI

FEVZİYE AYÇA SARAÇOĞLU¹

Giriş

(Mishra & Singh, 2010), iklim ve sosyoekonomik koşullardaki değişkenlik ile bölgelere göre değişen su talebinin öngörülemez olmasının, kuraklığın net bir şekilde tanımlanmasını zorlaştırdığını belirtmektedir. Kuraklık, büyük bölgeleri ve çok sayıda insanı etkileyen, aşırı hava olayları arasında etkileri en yaygın ancak tanımı ve sınırları en karmaşık olan doğal olaylardan biridir (Wilhite, 2000).

Kuraklık, hem yüzeysel su kaynaklarını hem de yeraltı suyu rezervlerini etkileyerek su arzında azalmaya, su kalitesinde bozulmaya, tarımsal üretimde düşüşe ve enerji üretiminde aksamalara neden olabilmektedir. Bu etkiler, bölgesel ölçekte ekonomik faaliyetleri ve toplumsal yaşamı önemli ölçüde olumsuz etkileme potansiyeline sahiptir (Riebsame, Changnon, & Karl, 1991).

¹ Dr.Öğr.Üyesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü , Orcid: 0000-0002-9626-7652.

(Shah, Bharadiya, & Manekar, 2015) ve (Zarch, Sivakumar, & Sharma, 2015); kuraklığı, meteorolojik hidrolojik, tarımsal ve sosyoekonomik kuraklık olmak üzere dört ana başlık altında sınıflandırmaktadır. Literatürde (Wilhite & Glantz, 1985), (Dai, 2011), (Potop ve diğerleri, 2014) (Montaseri & Amirataee, 2017) (Mouatadid ve diğerleri, 2018)) meteorolojik kuraklık; yağışların uzun dönem ortalamasının altına düşmesi sonucu görülen kuraklık türü olarak tanımlanırken, hidrolojik kuraklık ise hidrolojik çevrimdeki dengesizlikler sonucunda akım, göl ve yeraltı suyu seviyelerinde gözlenen azalmalarla ilişkilendirilmektedir. Uzun süreli ve şiddetli meteorolojik kuraklıklar, hidrolojik ve tarımsal kuraklığa yol açmaktadır (Suliman ve diğerleri, 2020)

Meteorolojik kuraklık, atmosferik su döngüsündeki eksikliklerin yağış, sıcaklık ve evapotranspirasyon bileşenlerinde ortaya çıkmasıyla tanımlanan ve genellikle kuraklık sürecinin ilk aşamasını oluşturan kuraklık türüdür. Kuraklık sıklığının ve şiddetinin, hâlihazırda kuraklığa eğilimli bölgelerde—Akdeniz, Orta Avrupa, Güney Amazon ve Güney Afrika gibi—artması beklenmektedir. Bu değişikliklerin ekosistemleri, gıda güvenliğini ve sera gazı akışları dâhil olmak üzere arazi süreçlerini etkilemesi muhtemeldir (Shukla, ve diğerleri, 2022). Ayrıca uygun olmayan arazi yönetimi uygulamaları ve hızlı kentleşme süreçleri, doğrudan kentlerin üzerinde ya da rüzgâr altındaki bölgelerde aşırı yağış olaylarının artmasına katkıda bulunmaktadır (Shukla, ve diğerleri, 2022). Böylece kuraklık etkilerinin şiddetlenmesine dolaylı olarak katkı sağlayabilmektedir.

Kuraklığın izlenmesi için bölgeye ve mevsime göre değişen, kuraklık süreçlerinin başlangıcını, süresini ve şiddetini nicel olarak ifade edebilen çeşitli kuraklık indisleri geliştirilmiştir (WMO, 2016), (Mishra & Singh, 2010). Bu indisler; yağış, sıcaklık, akım, evapotranspirasyon, toprak nemi, yeraltı su seviyesi ve rezervuar kapasitesi gibi hidro-meteorolojik verileri temel almaktadır (Soylu

Pekpostalıcı, ve diğerleri, 2023a). İndislerin performansı çalışma alanının iklim özellikleri, kuraklık türü ve erişilebilir veri setlerinin niteliğine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir.

Literatürde meteorolojik kuraklık indisleri olarak; Standart Yağış İndisi (SPI), Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndisi (SPEI), Normalin Yüzdesi İndisi (PNI), Çin Z-İndisi (CZI), Modifiye Çin Z-İndisi (MCZI), Erinç Kuraklık İndisi (EDI), Palmer Kuraklık Şiddeti indisi (PDSI), Palmer Hidrolojik Kuraklık İndisi (PHDI), De Martonne Kuraklık indisi (DMI), De Martonne-Gotmann İndisi (DMGI), Yağış Anomali İndisi (RAI), Keşif Kuraklık İndisi (RDI), İstatistiksel Z-Score İndisi (ZSI) gibi çok sayıda indis geliştirilmiş ve farklı bölgelerde uygulanmıştır.

Türkiye ölçeğinde gerçekleştirilen çalışmalar, kuraklık olaylarının sıklığında ve süresinde artış eğilimi bulunduğunu ortaya koymaktadır. (Soylu Pekpostalıcı, ve diğerleri, 2023a), 2010-2022 yılları arasındaki araştırmalardan yaptıkları derleme çalışmalarında, meteorolojik ve hidrolojik kuraklık periyotlarının gelecekte artabileceğini ve bu durumun su kaynakları yönetimi açısından önemli riskler barındırdığını belirtmişlerdir. Benzer şekilde, (Dabanlı, Mishra, & Şen, 2017), 1931–2010 dönemine ait 250 meteoroloji istasyonundan elde edilen verilerle gerçekleştirdikleri çalışmada, Türkiye genelinde farklı zaman ölçeklerinde yaygın kuraklık olaylarının yaşandığını ortaya koymuştur.

Akdeniz iklim kuşağında yer alan bölgelerde gerçekleştirilen güncel çalışmalar, meteorolojik kuraklığın sıklığı ve şiddetinde belirgin bir artış eğilimi bulunduğunu ortaya koymaktadır. (Soylu Pekpostalıcı, Tur, & Mehr, 2023b)'de Türkiye'nin Akdeniz Bölgesi için 1971–2021 dönemine ait uzun süreli yağış verileri kullanılarak yapılan kapsamlı bir analizde, Standart Yağış İndisi (SPI) temelinde orta, şiddetli ve aşırı kuraklık olaylarının özellikle 1990'lı yılların ortalarından itibaren belirgin biçimde arttığı ve bu artışın mekânsal olarak bölgenin farklı alt havzalarında değişkenlik gösterdiği

belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, meteorolojik kuraklığın yalnızca yağış eksikliğine bağlı olarak değil, bölgesel iklim özellikleri, topoğrafik farklılıklar ve zaman ölçeği etkileriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu durum, kuraklık analizlerinde farklı hidro-meteorolojik bileşenleri dikkate alan indislerin birlikte kullanılmasının önemini ortaya koymaktadır (Soylu Pekpostalcı, Tur, & Mehr, 2023b).

Bu nedenlerle, meteorolojik kuraklığın izlenmesi ve nicel olarak değerlendirilmesi amacıyla geliştirilen indisler, yalnızca yağış verisini kullanan yöntemlerden, potansiyel evapotranspirasyon (PET) ve etkili yağış (P_e) gibi bileşenleri içeren daha kapsamlı yaklaşımlara doğru evrilmiştir. Bu gelişim, özellikle iklim değişikliği koşullarında kuraklık süreçlerinin daha gerçekçi biçimde temsil edilmesini mümkün kılmaktadır.

Bu çalışmada, meteorolojik kuraklık analizinde yaygın olarak kullanılan ve farklı veri bileşenlerine dayanan ve literatürde en çok kullanılan beş temel kuraklık indisinin (SPI, SPEI, RDI, aSPI ve eRDI) kavramsal temelleri ele alınmaktadır. Bu indisler yalnızca yaygın kullanımları nedeniyle değil, yağıştan tarımsal kullanılabilir suya uzanan metodolojik bir sürekliliği temsil etmeleri nedeniyle seçilmiştir. Böylece, klasik yağış temelli yaklaşımlar ile tarımsal kuraklığı daha iyi yansıtan modern indisler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir.

2. Sadece Yağış Temelli İndisler

Standart Yağış İndisi (SPI-Standardized Precipitation Index)

SPI, (McKee, Doesken, & Kleist, 1993) tarafından geliştirilmiş olup yalnızca yağış verisini kullanarak belirli bir zaman ölçeğinde yağış anomalilerini standartlaştıran ve meteorolojik kuraklığın değerlendirilmesinde literatürde en yaygın kullanılan indislerden biridir.

Basit yapısı, düşük veri gereksinimi ve farklı iklim bölgelerinde karşılaştırılabilir sonuçlar üretmesi, SPI'nın ulusal ve uluslararası birçok kurum tarafından standart yöntem olarak benimsenmesini sağlamıştır.

SPI, uzun dönemli yağış serilerinin olasılık temelli bir dağılıma uydurulması esasına dayanır. Literatürde, iklimsel yağış serilerinin dağılımını temsil etmede iki parametrelili Gamma dağılımının uygun olduğu gösterilmiştir (Thom, 1958), (Edwards & McKee, 1997). Bu kapsamda, belirli bir zaman ölçeği için yağış serisi önce Gamma dağılımına uydurulmakta, ardından elde edilen kümülatif olasılıklar ortalaması sıfır ve standart sapması bir olan normal dağılıma dönüştürülmektedir (McKee, Doesken, & Kleist, 1993). Bu dönüşüm sayesinde, farklı bölgeler ve farklı zaman ölçekleri için elde edilen SPI değerleri doğrudan karşılaştırılabilir hâle gelmektedir.

Gamma dağılımı frekans veya olasılık yoğunluk fonksiyonu ile aşağıdaki denklemdeki gibi tanımlanır:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, \quad x > 0 \text{ için} \quad (1)$$

Burada α , şekil parametresi; β , ölçek parametresi; x , yağış miktarı; $\Gamma(\alpha)$ ise gama fonksiyonunu temsil etmektedir. Buradaki α ve β parametreleri, her istasyon ve her zaman ölçeği için aşağıdaki denklemler hesaplanmaktadır.

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (3)$$

Buradaki A ise aşağıdaki denklem (4) ile tanımlanmakta olup, n ölçüm sayısını ifade etmektedir:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (4)$$

Gamma fonksiyonu $x=0$ için tanımsız olduğundan, yağış zaman serilerinde sıfır değerlerin bulunması durumu dikkate alınarak kümülatif olasılık fonksiyonu şu şekilde tanımlanır:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (5)$$

Burada q , sıfır yağış olasılığını, $G(x)$ ise eksik gama fonksiyonuna ait kümülatif olasılığı ifade etmektedir. m sıfır yağış sayısı ve n toplam gözlem sayısı olmak üzere, $q=m/n$ şeklinde hesaplanmaktadır. Elde edilen kümülatif olasılık değeri $H(x)$, standart normal değişkene dönüştürülür (Abramovitz & Stegun, 1965a), bu değer SPI olarak tanımlanmaktadır.

(Tsakiris & Vangelis, 2004)' e göre, aylık yağış serileri normal dağılım göstermediğinden, SPI'nın hesaplanmasında bu tür bir dönüşüm zorunludur. Bu bağlamda SPI, gözlenen yağış değerinin uzun dönem ortalamadan kaç standart sapma uzaklaştığını ifade eden boyutsuz bir göstergedir.

Pozitif SPI verileri, medyandan daha fazla yağış olan nemli koşulları, negatif SPI değerleri ise medyandan daha az yağış alan kuru koşulları temsil etmektedir. SPI'ye göre kuraklık olayı, indisin ardışık zaman aralıklarında -1 veya daha düşük bir değere ulaşmasıyla başlamaktadır. SPI'nın pozitif değerlere ulaşmasıyla birlikte kuraklık olayı sona ermektedir. Dolayısıyla her kuraklık olayının, başlangıcı, süresi ve şiddeti ile tanımlanabilmektedir (Hayes, Alvord, & Lowrey, 2007).

Kuraklık büyüklüğü, kuraklık süresi boyunca her zaman adımındaki SPI değerlerinin mutlak toplamı olarak ifade edilmekte ve bu büyüklük kuraklık olayının etkisini nicel olarak ortaya koymaktadır.

Tablo 1'de NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration-ABD Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi) (NOAA, 2025) ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM, 2025) tarafından kullanılan, SPI sınıflandırmaları görülmektedir.

Tablo 1 SPI Kuraklık Sınıflandırması

SPI Değerleri	Sınıflandırma	NOAA Sınıfı
$SPI \geq 2$	Olağanüstü Nemli	W4
$1.60 \leq SPI \leq 1.99$	Aşırı Nemli	W3
$1.30 \leq SPI \leq 1.59$	Çok Nemli	W2
$0.80 \leq SPI \leq 1.29$	Orta Nemli	W1
$0.51 \leq SPI \leq 0.79$	Hafif Nemli	W0
$-0.50 \leq SPI \leq 0.50$	Normal	-
$-0.51 \geq SPI \geq -0.79$	Hafif Kurak	D0
$-0.80 \geq SPI \geq -1.29$	Orta Kurak	D1
$-1.30 \geq SPI \geq -1.59$	Şiddetli Kurak	D2
$-1.6 \geq SPI \geq -1.99$	Çok Şiddetli Kurak	D3
$SPI \leq -2$	Olağanüstü Kurak	D4

Kaynak : (NOAA, 2025), (NOAA-CPC, 2025), (MGM, 2025))

SPI'nın başlıca avantajları; hesaplamasının görece kolay olması, 1 aydan 24 aya ve daha uzun zaman ölçeklerinde uygulanabilirliği ve sınırlı veri gereksinimidir. Bu özellikleri sayesinde SPI, uzun yıllardır NOAA, MGM gibi kurumlar tarafından standart meteorolojik kuraklık göstergesi olarak kullanılmaktadır. (Tigkas, Vangelis, & Tsakiris, 2019) 'a göre sadece yağış verisini kullandığı için dünyada en yaygın kullanılan kuraklık indisi.

Bununla birlikte SPI, yalnızca yağış verisine dayalı bir indis olduğundan, evapotranspirasyon süreçlerindeki değişimleri ve artan atmosferik su talebini doğrudan dikkate almamaktadır. Özellikle sıcaklıkların arttığı iklim değişikliği koşullarında, yalnızca yağış temelli yaklaşımların bazı durumlarda yetersiz kalmasına neden olabilmektedir. Bu sınırlılık PET ve etkili yağış bileşenlerini içeren daha gelişmiş indislerin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır.

3. Yağış ve Evapotranspirasyon Temelli İndisler

Meteorolojik kuraklık analizlerinde yalnızca yağış verisine dayalı yaklaşımlar, atmosferik su talebindeki değişimleri doğrudan temsil edememektedir. Özellikle sıcaklık artışlarının belirginleştiği iklim değişikliği koşullarında, aynı yağış miktarı altında dahi daha şiddetli

kuraklık koşulları ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle yağış ile birlikte potansiyel evapotranspirasyonun (PET) dikkate alındığı kuraklık indisleri geliştirilmiştir.

Standart Yağış Evapotranspirasyon İndisi

(SPEI-Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)

SPEI’de aylık yağış ile potansiyel evapotranspirasyon (PET) arasındaki farkı temel alan ve su dengesi yaklaşımına dayalı bir kuraklık indisi (Vicente-Serrano, Beguería, & López-Moreno, 2010). SPEI’nin hesaplamasının ana parametre, yağış ile atmosferik su talebi arasındaki farkı ifade eden su açığı (D) değeridir ve bu ilişki aşağıdaki şekilde ifade tanımlanmaktadır:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (6)$$

Burada D_i , i’inci ay için su eksikliğini; P_i , yağışı ve PET ise potansiyel evapotranspirasyonu göstermektedir. Bu yaklaşım SPEI’nin yağış eksikliğinin yanı sıra sıcaklık ve buharlaşma etkilerini de dolaylı olarak yansıtmalarını sağlamaktadır.

SPEI’nin ayrıntılı matematiksel tanımlaması ve standartlaştırma süreci (Vicente-Serrano, Beguería, & López-Moreno, 2010) ve (Dayal, Deo, & Apan, 2018)’de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Log-Logistic dağılıma ait olasılık dağılım fonksiyonu $F(x)$ aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (7)$$

Burada α , β ve γ ; ölçek, şekil ve başlangıç parametreleridir (Mouatadid, Raj, Deo, & Adamowski, 2018). Uydurulan dağılım fonksiyonu (Abramowitz & Stegun, 1965b) yaklaşımı kullanılarak standart normal değişkene dönüştürülmekte ve SPEI değerleri elde edilmektedir (Adnan, ve diğerleri, 2018).

$$SPEI = W_i - \frac{C_0 + C_1 W_i + C_2 W_i^2}{1 + d_1 W_i + d_2 W_i^2 + d_3 W_i^3} \quad (8)$$

Burada W_i değeri standart normal dönüşümde kullanılan ara değişken olup aşağıdaki ifadelerle hesaplanmaktadır:

$$p \leq 0.5 \text{ için, } W_i = \sqrt{-2 \ln(p)} \quad (9a)$$

$$p > 0.5 \text{ için, } W_i = \sqrt{-2 \ln(1 - p)} \quad (9b)$$

Burada verilen D_i için, p aşılma olasılığını ifade eder. $p > 0.5$ olması durumunda elde edilen SPEI değerinin işareti ters çevrilir. $C_0, C_1, C_2, d_1, d_2, d_3$ sabit katsayıları sırasıyla 2.515517, 0.802853, 0.010328, 1.43278, 0.189269 olarak verilmiştir (Mehr, Sorman, Kahya, & Afshar, 2020).

Bu dönüşüm sonucunda elde edilen SPEI değerleri, ortalaması sıfır ve standart sapması bir olan boyutsuz bir değişken olup, farklı zaman ölçekleri ve bölgeler arasında karşılaştırılabilir niteliktedir.

SPEI'nin hesaplama yöntemi, SPI ile benzer bir standartlaştırma mantığına sahip olmakla birlikte PET bileşeninin eklenmesiyle atmosferik su talebindeki değişimlere duyarlı hale gelmektedir (Vishwakarma, Choudhary, & Chauhan, 2022). Bu özellik SPEI'yi özellikle sıcaklık artışlarının belirgin olduğu dönemlerde iklim değişikliği çalışmalarında yaygın olarak kullanılan bir indis haline getirmiştir.

PET'in hesaplama dahil edilmesi, aynı yağış koşulları altında farklı sıcaklık rejimlerinin kuraklık şiddeti üzerindeki etkilerinin ayrıştırılmasına olanak tanımaktadır.

Başlangıçta SPEI yaklaşımında (Vicente-Serrano, Beguería, & López-Moreno, 2010) PET hesaplaması için (Thorntwaite, 1948) yöntemi önerilmiş, normalize etmek için ise log-logistic dağılım kullanılmıştır. Ancak daha sonraki çalışmalarda, PET hesaplama yönteminin SPEI serilerindeki uzun dönemli eğilimleri

etkileyebileceği gösterilmiştir. (Beguería, Vicente-Serrano, Reig, & Latorre, 2014). Bu doğrultuda veri mevcudiyetinin uygun olduğu durumlarda Penman-Monteith (Allen ve diğerleri, 1998) yönteminin tercih edilmesi, gerekli meteorolojik verilerin bulunmadığı durumlarda ise Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985) ve Thornthwaite denklemlerinin tercih edilmesi ifade edilmiştir.

(Stagge, 2015), PET hesaplamasında modifiye Penman-Monteith denklemini (Vanderlinde, Giraldez, & Van Meirvenne, 2008) (Ahmadalipour, Moradkhani, & Demirel, 2017), indisin normalize edilmesinde ise genelleştirilmiş aşırı değer dağılımı gibi alternatif yöntemlerin uygulanmasını önermiştir. Buna karşılık, (Jiang ve diğerleri, 2015) Thornthwaite ve Penman–Monteith yöntemleriyle hesaplanan PET değerleri arasında belirgin farklılıklar bulunmasına rağmen, bu iki farklı PET tahminine dayalı olarak hesaplanan SPEI değerlerinin birbirine oldukça benzer olduğunu belirtmiştir.

SPI/SPEI hesaplamaları için minimum veri uzunluğu 30 yıl olarak kabul edilmekle birlikte, aşırı kuraklıkların daha doğru tahmin edilebilmesi için 50 yılın (hatta 80 yılın) üzerindeki veri setlerinin kullanılması önerilmektedir (Wu, Hayes, Wilhite, & Svoboda, 2005).

SPEI, SPI’da olduğu gibi çoklu zaman ölçeklerinde (1-48 ay hesaplanabilmektedir. Kısa zaman ölçekleri (3 ve 6 ay), kuraklığın toprak nemi üzerindeki etkisini yansıtırken; daha uzun zaman ölçekleri (12 ve 24 ay) rezervuarlar, göller ve yeraltı suyu gibi su kaynakları üzerindeki etkileri temsil etmektedir (Bazrafshan, 2017). SPEI için kuraklık sınıflandırması (Liu, Yang, Yang, & Wang, 2020) Tablo 2’deki gibi verilmiştir.

Tablo 2 SPEI ve RDI Kuraklık Sınıflandırması

SPEI ve RDI	Sınıflandırma
≥ 2	Aşırı Nemli
1.5 ile 1.9	Çok Nemli
1 ile 1.49	Orta Nemli
-0.99 ile 0.99	Normal
-1 ile -1.49	Orta Kurak
-1.5 ile -1.99	Çok Kurak
≤ -2	Aşırı Kurak

Kaynak : (Liu, Yang, Yang, & Wang, 2020), (Khalili ve diğerleri, 2011), (Zarch ve diğerleri, 2011)

Keşif Kuraklık İndisi (RDI-Reconnaissance Drought Index)

RDI, yağış (P) ve Potansiyel evapotranspirasyon (PET) verilerini birlikte kullanarak, bir hidrolojik sistemdeki girdi (su arzı) ve çıktı (atmosferik talep) arasındaki dengeyi değerlendirmeyi amaçlayan bir kuraklık indisidir. İlk olarak (Tsakiris G. , 2004)’de tanımlanan RDI, daha sonra (Tsakiris & Vangelis., 2005), Tsakiris ve diğerleri, 2006) çalışmalarında daha ayrıntılı biçimde geliştirilmiştir.

RDI’nin temel yaklaşımı, belirli bir dönem için toplam yağışın toplam potansiyel evapotranspirasyona oranlanmasına dayanmaktadır. Bu yaklaşım, yağış eksikliğinin yanı sıra atmosferik talebin etkisini de dikkate alarak, özellikle yarı kurak ve kurak iklim koşullarında meteorolojik kuraklığın daha gerçekçi biçimde temsil edilmesini amaçlamaktadır.

RDI hesaplamasında kullanılan başlangıç değeri (α_0), i’ inci yıl için aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır:

$$\alpha_0 = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{ij}} \quad (10)$$

Burada P_{ij} ve PET_{ij} , sırasıyla i’inci yılın j’nci ayındaki yağış ve potansiyel evapotranspirasyon değerlerini göstermektedir. RDI uygulamalarında, özellikle Akdeniz iklim kuşağında, hidrolojik

süreçleri daha temsil etmesi sebebiyle su yılı kullanımının tercih edildiği belirtilmektedir (Tsakiris, Pangalou, & Vangelis., 2007).

RDI'nin en önemli avantajlarından biri, PET bileşenini doğrudan hesaba katması sayesinde sıcaklık artışlarının ve atmosferik su talebindeki değişimlerin kuraklık şiddeti üzerindeki etkilerini yansıtabilmesidir. Bu özellik, RDI'nin özellikle iklim değişikliğinin etkilerinin belirgin olduğu bölgelerde SPI'ya kıyasla daha duyarlı sonuçlar üretmesini sağlamaktadır.

RDI hesaplamasında kullanılan PET değeri, SPEI'de olduğu gibi farklı yöntemler (Thorntwaite, Hargreaves ve Blaney-Criddle yöntemleri) kullanılarak tahmin edilebilmektedir. Bununla birlikte, (Vangelis, Tigkas, & Tsakiris, 2013) RDI'nin, PET hesaplama yöntemine bağlı olmadığını belirtmiştir. Literatürde RDI hesaplamalarında en yaygın kullanılan PET yöntemi, fiziksel temeli daha güçlü olması nedeniyle Penman-Montieth yöntemidir (Khalili ve diğerleri, 2011), (Zarch ve diğerleri, 2011).

RDI'nin hesaplanmasında bir sonraki adım mevcut verilere dayalı (α_0) değerlerinin aritmetik ortalaması olan ($\bar{\alpha}_0$) kullanılarak normalleştirilmiş RDI'nin (RDI_n) hesaplanmasıdır:

$$RDI_n^i = \frac{\alpha_0^{(i)}}{\bar{\alpha}_0} - 1 \quad (11)$$

Daha sonra standartlaştırılmış RDI değeri olan RDI_{st} değeri, SPI'nin hesaplamasına benzer olarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$RDI_{st(k)}^i = \frac{y_k^{(i)} - \bar{y}_k}{\hat{\sigma}_{y_k}} - 1 \quad (12)$$

Burada $y_k = \ln(\alpha_0^{(i)})$; $\bar{y}_k$, aritmetik ortalama; $\hat{\sigma}_{y_k}$, ise standart sapma olarak verilmiştir. Buradaki α_0 değerlerinin en uygun dağılım olduğu belirtilen log-normal dağılım gösterdiği belirtilmiştir (Tsakiris, Pangalou, & Vangelis., 2007).

(Tsakiris, Pangalou, & Vangelis., 2007), RDI_{st} 'nin SPI'ye benzer davrandığı için SPI ile benzer sınırların kullanılabileceğini belirtmiştir. RDI indisinin kuraklık sınıflandırması Tablo 2'de verilmiştir (Khalili ve diğerleri, 2011), (Zarch ve diğerleri, 2011).

Literatürde gerçekleştirilen karşılaştırmalı çalışmalar, RDI'nin kurak ve yarı kurak iklim koşullarında güçlü performans sergilediğini ortaya koymaktadır. (Zarch ve diğerleri, 2011), SPI ve RDI arasındaki ilişkinin kurak iklimlerde nemli iklimdekine göre daha yüksek korelasyon gösterdiğini belirtmiştir. Benzer şekilde (Adnan, ve diğerleri, 2018), Pakistan için yürüttükleri çalışmada 15 farklı kuraklık indisini karşılaştırmış, SPI, SPEI ve RDI indislerinin bölge için en uygun kuraklık göstergeleri olduğunu ifade etmiş, PET bileşeni içeren SPEI ve RDI indislerinin, yalnızca yağış temelli yaklaşımlara kıyasla daha gerçekçi sonuçlar sunduğunu vurgulamıştır.

Bununla birlikte, RDI'nin performansı da kullanılan PET hesaplama yöntemine ve veri mevcudiyetine bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle RDI, tek başına mutlak bir kuraklık göstergesi olarak değil, diğer meteorolojik kuraklık indisleri ile birlikte değerlendirildiğinde daha anlamlı sonuçlar sunmaktadır.

4. Etkili Yağış Temelli İndisler

Yağışın tamamının yüzeye ulaşarak kullanılabilir suya dönüşmediği bilinmektedir; özellikle tarımsal sistemlerde infiltrasyon, yüzey akışı ve toprak tutma kapasitesi gibi süreçler yağışın etkili kısmını belirlemektedir. Bu nedenle etkili yağış (P_e) kullanılarak geliştirilen indisler, tarımsal kuraklık ve toprak suyu açısından daha gerçekçi bir yaklaşım sunmaktadır.

Etkili Yağış Kavramı

Etkili yağış, toprak nemindeki değişimlerin lizimetrelerle ölçülmesi veya su dengesi modelleri kullanılarak su hareketinin

simülasyonu gibi farklı yöntemlerle belirlenebilmektedir (Ebrahimpour ve diğerleri, 2015), (Feddes ve diğerleri, 2015), (Patwardhan, Nieber, & Johns, 1990).

Bu yöntemler yüksek doğruluğa sahip olsa da, çok sayıda veri ve ölçüm altyapısı gerektirdikleri için genellikle deneysel veya yerel ölçekte kullanılabilir. Bu nedenle, kuraklık analizinde gerekli olan uzun süreli ve düzenli veri setleri için pratik değildir. Bu sebeple literatürde, yalnızca aylık yağış verilerini kullanarak etkili yağışın tahmin edilmesine olanak sağlayan ampirik yöntemler tercih edilmektedir (Tigkas, Vangelis, & Tsakiris, 2019).

Aylık yağış verileri ile etkili yağışın hesaplanması için dört farklı yöntem kullanılmaktadır: Bunlar; USBR, USDA-SCS CROPWAT, USDA-SCS-Simp., ve FAO metodu olarak sıralanabilir (Tigkas, Vangelis, & Tsakiris, 2019), (Tigkas, Vangelis, Proutsos, & Tsakiris, 2022).

Tarımsal Standart Yağış İndisi

(aSPI-Agricultural Standardized Precipitation Index)

aSPI, SPI'nın klasik yapısına etkili yağış (P_e) verisinin entegrasyonu ile oluşturulmuş bir varyanttır. Bu yaklaşım sayesinde, tarımsal suyu temsil eden veriler kullanılarak meteorolojik kuraklığın zamanlaması ve şiddeti daha gerçekçi biçimde tahmin edilebilmektedir. Özellikle tarım alanlarında kısa süreli kuraklıkların değerlendirilmesinde aSPI'nın performansının daha yüksek olduğu önceki çalışmalarda (Tigkas, Vangelis, & Tsakiris, 2019) bildirilmiştir.

SPI'da toprak-bitki-atmosfer etkileşimlerini doğrudan temsil eden bir bileşen bulunmadığından, bu indisin bitki örtüsüyle ilgili çalışmalardaki kullanımını sınırlı kılmaktadır. Toplam yağış yerine etkili yağışın (P_e) kullanılmasıyla aSPI, tarımsal kuraklıkların tanımlanması ve bunların bitki örtüsü üzerindeki etkilerinin

değerlendirilmesi için daha elverişli bir gösterge hâline gelmektedir (Tigkas, Vangelis, & Tsakiris, 2019).

aSPI, mevcut etkili yağış değerlerinin uzun dönem ortalamasından sapmalarını ölçmekte ve bu değerleri standartlaştırarak farklı dönemler ve bölgeler arasındaki karşılaştırmaları kolaylaştırır. Etkili yağış (P_e), dışarıdan ilave bir su kaynağı olmaksızın bitki gelişimi için yararlanılabilir yağış miktarını ifade etmektedir (Tigkas, Vangelis, & Tsakiris, 2019). Tarımsal koşullar dikkate alınarak geliştirilen aSPI, yağışın bitki verimliliğini nasıl etkilediğini inceleyerek kuraklığın şiddetini belirlemektedir. aSPI, yağış eksikliklerinin bitkiler ve bitki örtüsü üzerindeki etkilerini özellikle dikkate aldığı için tarımsal kuraklığın değerlendirilmesi ve izlenmesinde önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir.

aSPI'nın hesaplanması, etkili yağış zaman serisine uygun bir istatistiksel dağılımın uydurulması ve bu dağılımın, SPI hesaplamasında da kullanılan (Abramovitz & Stegun, 1965a) yaklaştırma yöntemine dayalı aşağıdaki denklemler (Denk. 13 ve 14) aracılığıyla normal dağılıma dönüştürülmesiyle gerçekleştirilir (Tigkas, Vangelis, & Tsakiris, 2019):

$$aSPI = -\left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right), \quad 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (13)$$

$$aSPI = t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}, \quad 0.5 < H(x) \leq 1 \quad (14)$$

Burada x , etkili yağış değerini, $H(x)$ etkili yağışın olasılık fonksiyonunu göstermektedir. t ise aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$t = \sqrt{\ln(1/H(x)^2)} \quad 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (15)$$

$$t = \sqrt{\ln(1/[1 - H(x)^2])} \quad 0.5 < H(x) \leq 1 \quad (16)$$

Buradaki C_0 , C_1 , C_2 , d_1 , d_2 , d_3 sabit katsayıları SPI ve SPEI indisindeki gibi sırasıyla 2.515517, 0.802853, 0.010328, 1.43278, 0.189269 olarak verilmiştir.

aSPI için kuraklık sınıflandırması ise SPI, SPEI ve RDI ile benzer olarak Tablo 3'teki gibi verilmiştir.

Tablo 3 aSPI Kuraklık Sınıflandırması

aSPI	Sınıflandırma
≥ 2	Aşırı Nemli
1.5 ile 1.9	Çok Nemli
1 ile 1.49	Orta Nemli
0 ile 0.99	Normal civarı (hafif nemli)
0 ile -0.99	Normal civarı (hafif kurak)
-1 ile -1.49	Orta Kurak
-1.5 ile -1.99	Çok Kurak
≤ -2	Aşırı Kurak

Kaynak : (Tigkas, Vangelis, & Tsakiris, 2019)

(Vishwakarma, Choudhary, & Chauhan, 2022) aSPI ile SPEI, SPI indislerini karşılaştırmış, aSPI'nın tarihsel kuraklık olaylarının belirlenmesi ve FAO'nun önerdiği SPI ile olan yüksek korelasyonu açısından bölgede diğer indislerden daha başarılı performans gösterdiğini belirtmiştir. (Omar, ve diğerleri, 2022), kurak ve yarı kurak iklimlerde etkili yağışı kullanan indislerin daha yüksek duyarlılık göstermeleri nedeniyle hesaplanmasının büyük önem taşıdığını belirtmiştir.

Etkili Keşif Kuraklık İndisi

(eRDI -Effective Reconnaissance Drought Index)

eRDI, RDI'nin etkili yağış temelli türevidir ve su arzını etkili yağış (P_e), atmosferik talebi ise PET üzerinden tanımlamaktadır. Toplam yağışın etkili yağış ile değiştirilerek, özellikle tarımsal kuraklığın belirlenmesi için geliştirilmiştir. RDI'nin, özellikle yağışa dayalı tarım koşullarında ürün verimi üzerindeki kuraklık etkilerinin değerlendirilmesinde başarıyla kullanılabildiği daha önce ortaya

konmuş olsa da (Tigkas, Vangelis, & Tsakiris, 2015); eRDI, P_e 'nin kullanımı sayesinde bitkiler tarafından fiilen kullanılabilen su miktarını daha doğru temsil ettiği literatürde ifade edilmiştir. Bu yaklaşım, tarımsal kuraklığın tanımlanmasına yönelik olarak indisin kavramsal açıdan geliştirilmesini sağlamaktadır (Tigkas, Vangelis,, & Tsakiris, 2017).

eRDI'nın kuraklık şiddeti ile tarımsal üretimdeki azalma arasındaki ilişkiyi güçlendirdiği ve özellikle yağışa dayalı (sulanmayan) tarım koşullarında, kuraklığın tarımsal sistemler üzerindeki etkilerinin değerlendirmesinde daha uygun olduğu belirtilmiştir. Ayrıca etkili yağışın basit ampirik yöntemlerle tahmin edilebilmesi ile bu indisin RDI'nın sağladığı basit yapı ve düşük veri gereksinimi avantajlarını da korumasını sağlamaktadır (Tigkas, Vangelis,, & Tsakiris, 2017).

eRDI'nın hesaplanması için önerilen referans dönemleri, incelenen tarımsal sisteme bağlı olarak ve tarımsal ürünlerin gelişim evreleri dikkate alınarak belirlenmektedir (Tigkas, Vangelis, Proutsos, & Tsakiris, 2022). Kuraklığın etkilerinin değerlendirilmesi için tüm ürün gelişim döneminin ele alınması yeterli kabul edilirken, tarımsal kuraklığın izlenmesi ve belirli ürünler üzerindeki kuraklık etkilerinin erken tahmini amacıyla daha kısa dönemler de kullanılabilir. Mekânsal kuraklık analizlerinde tutarlılığı sağlamak amacıyla, aynı P_e hesaplama yönteminin kullanılması önerilmektedir (Tigkas, Vangelis,, & Tsakiris, 2017). İndisin değiştirilmiş başlangıç formu (α_0), aşağıdaki denklem esas alınarak hesaplanmaktadır:

$$\alpha_{e(k)} = \frac{\sum_{j=1}^{j=k} P_{ej}}{\sum_{j=1}^{j=k} PET_j} \quad (22)$$

Burada P_{ej} , j'inci aydaki aylık efektif yağışı göstermektedir. Bu indisin normalize edilmiş (eRDI_n) ve standartlaştırılmış (eRDI_{st})

formları, RDI için daha önce tanımlanan prosedürlere benzer şekilde hesaplanmaktadır.

eRDI ve aSPI için kullanılan kuraklık sınıflandırması Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4 aSPI ve eRDI indislerinin kuraklık sınıflandırmaları

aSPI	Sınıflandırma
≥ 2	Aşırı Nemli
1.5 ile 1.9	Çok Nemli
1 ile 1.49	Orta Nemli
0.50 ile 0.99	Hafif Nemli
-0.49 ile 0.49	Normal
-0.50 ile -0.99	Hafif Kurak
-1 ile -1.49	Orta Kurak
-1.5 ile -1.99	Çok Kurak
≤ -2	Aşırı Kurak

Kaynak : (Tigkas, Vangelis, Proutsos, & Tsakiris, 2022)

(Zarei, Moghimi, & Bahrami, 2019), iklim koşullarına bağlı olarak RDI ve eRDI indislerinin performansının değiştiğini belirtmiştir. Çalışmalarında, aşırı kurak ve kurak bölgelerde RDI'nin eRDI ile değiştirilmesini önermişler; ancak yarı nemli ve nemli bölgelerde RDI ile eRDI arasında yüksek benzerlik bulunduğu için, etkili yağış hesaplamasına gerek duyulmaması avantajı nedeniyle RDI indisinin kullanılmasının daha uygun olduğunu ifade etmişlerdir.

(Saraçoğlu & Kaynar, 2025), Türkiye'nin nemli bir bölgesinde farklı etkili yağış (P_e) hesaplama yöntemlerinin kuraklık indisleri üzerindeki etkisini incelemiş, USDA-Simplified yönteminin tüm ölçeklerde en yüksek doğruluğu sağladığını, FAO yönteminin ise özellikle kısa ölçeklerde zayıf performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Çalışma, nemli iklimlerde bile uygun P_e yönteminin seçiminin önemli olduğunu ve aSPI ile eRDI'nin USDA-Simplified yöntemiyle en güvenilir sonuçları verdiğini göstermiştir.

(Syed ve diğeri, 2022) etkili yağış kullanan indisler ile birlikte altı farklı kuraklık indisi çalışmış, kurak yılların belirlenmesi açısından anlamlı bir fark belirleyememiştir. Yağış ve etkili yağış temelli indislerde elde edilen kuraklık sonuçlarının çalışma alanının genelinde neredeyse aynı olduğunu belirlemiştir.

Literatürde kurak ve yarı kurak bölgelerde aSPI ve eRDI'nin daha uygun olduğu yönünde bulgular bulunmakla birlikte, bu çalışmanın sonuçları, aşırı kurak koşullar altında yağış temelli ve etkili yağış temelli indisler arasında belirgin bir ayrışma olmayabileceğini göstermektedir. Bu durum, indis performansının iklim tipi ve çalışma ölçeğine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada ele alınan beş kuraklık indisi, meteorolojik kuraklığın farklı bileşenlerini ve etkilerini temsil etmektedir. SPI, yalnızca yağış verisini dikkate alan temel bir gösterge olup uzun ve kesintisiz veri serilerinin bulunduğu çalışmalarda kararlı ve karşılaştırılabilir sonuçlar sunmaktadır. SPEI ve RDI ise sıcaklık ve PET etkilerini yansıtarak, özellikle atmosferik su talebindeki artışın belirgin olduğu iklim değişikliği koşullarında daha gerçekçi değerlendirmelere olanak tanımaktadır. aSPI ve eRDI indisleri ise, tarımsal kullanılabilir suyu temsil eden etkili yağış bileşenini içermeleri nedeniyle, bitki gelişim dönemleri ve toprak suyu koşulları açısından yani tarımsal olarak daha duyarlı göstergeler sunmaktadır.

Uygun kuraklık indisinin seçimi; iklim bölgesi, arazi kullanımı, veri kalitesi ve çalışmanın amacına bağlı olarak değişmektedir. Nemli bölgelerde P_e temelli indislerin (aSPI ve eRDI) daha tutarlı kuraklık sinyalleri üretebildiği görülmektedir. Buna karşılık atmosferik su talebinin yüksek olduğu yarı kurak ve kurak bölgelerde, PET bileşenini içeren SPEI ve RDI indisleri daha avantajlı olabilmektedir. Bu durum, tek bir indisin tüm iklim ve

uygulama koşulları için ideal olmasının beklenmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Literatürde, kurak ve yarı kurak bölgelerde aSPI ve eRDI'nin daha uygun göstergeler sunduğuna işaret eden bulgular bulunmakla birlikte, bazı çalışmalarda yağış temelli ve etkili yağış temelli indisler arasında belirgin bir ayrışma gözlenmeyebildiği de rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, indis performansının yalnızca kullanılan girdi türüne değil, aynı zamanda iklim tipi, zaman ölçeği ve analiz edilen kuraklık sürecinin özelliklerine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, meteorolojik kuraklığın değerlendirilmesinde yağış, etkili yağış ve buharlaşma-terleme süreçlerini birlikte dikkate alan yaklaşımların önemi giderek artmaktadır. SPI'nın tarihsel olarak baskın konumu devam etse de, PET ve P_e bileşenlerinin eklenmesiyle geliştirilen SPEI, RDI, aSPI ve eRDI gibi indisler, iklim değişikliği ve tarımsal su yönetimi bağlamında daha bütüncül bir değerlendirme imkânı sunmaktadır. Bu indislerin birlikte ve tamamlayıcı biçimde kullanılması, farklı kuraklık bileşenlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayarak, hem bilimsel çalışmalarda hem de su kaynakları yönetimine yönelik karar alma süreçlerinde güçlü ve esnek bir metodolojik çerçeve oluşturmaktadır.

Kaynakça

- Abramovitz, M., & Stegun, I. (1965a). *Handbook of mathematical functions*. Washington, D.C: National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series-55,.
- Abramowitz, M., & Stegun, A. (1965b). *Handbook of mathematical formulas, graphs, and mathematical tables*. Dover, New York.

- Adnan, S., Ullah, K., Shuanglin, L., Gao, S., Khan, A., & Mahmood, R. (2018). Comparison of various drought indices to monitor drought status in Pakistan. *Clim Dyn*, 51:1885–1899.
- Ahmadalipour, A., Moradkhani, H., & Demirel, M. (2017). *Journal of Hydrology*, 553, 785–797.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Vol 300*. Rome, Italy: FAO.
- Bazrafshan, J. (2017). Effect of Air Temperature on Historical Trend of Long-Term Droughts in Different Climates of Iran. *Water Resour Manage*, 31:4683–4698.
- Beguería, S., Vicente-Serrano, S., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int J Climatol*, 34:3001–3023.
- Dabanlı, İ., Mishra, A., & Şen, Z. (2017). Long-term spatio-temporal drought variability in Turkey. *Journal of Hydrology*, 552: 779-792.
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1): 45-65.
- Dayal, K., Deo, R., & Apan, A. (2018). Investigating Drought Duration-Severity-Intensity Characteristics Using the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index: Case Studies in Drought-Prone Southeast Queensland. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23 (1).

- Ebrahimpour, M., Rahimi, J., Nikkhah, A., & Bazrafshan, J. (2015). Monitoring agricultural drought using the standardized effective precipitation index. *J Irrig Drain Eng*, 141(1).
- Edwards, D., & McKee, T. (1997). *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales., Climatology report number 97-2*. Fort Collins,: Colorado State University.
- Feddes, R., Kabat, P., V. B., Bronswijk, J., & Halbertsma, J. (1988). Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone—state of the art. *J Hydrol*, 100(1):69–111.
- Fung vd., K. H. (2020). Assessing drought conditions through temporal pattern, spatial characteristic and operational accuracy indicated by SPI and SPEI: Case analysis for Peninsular Malaysia. *Nat Hazards*, 103:2071–2101.
- Hargreaves, G., & Samani, Z. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl Eng Agric*, 1:96–99.
- Hayes, M., Alvord, C., & Lowrey, J. (2007). Drought indices. *Feature Article IntWest Clim Summ*, 3(6):2–6.
- Jiang, R., Xie, J., He, H., Luo, J., & Zhu, J. (2015). Use of four drought indices for evaluating drought characteristics under climate change in Shaanxi, China: 1951-2012. *Nat. Hazards*, 75: 2885–2903.
- Khalili, Farnoud, T., Jamshidi, ., Kamgar-Haghighi, A., & Zand-Parsa, S. (2011). Comparability Analyses of the SPI and RDI Meteorological Drought Indices in Different Climatic Zones. *Water Resour Manage*, 25:1737–1757.
- Liu, C., Yang, C., Yang, Q., & Wang, J. (2020). Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index

- (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. *Sci Rep*, 11:1–24.
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scale. In *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology* (s. 179-184). Anaheim, CA, USA: American Meteorological Society.
- Mehr, A., Sorman, A., Kahya, E., & Afshar, M. (2020). Climate change impacts on meteorological drought using SPI and SPEI: case study of Ankara, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, VOL. 65, NO. 2, 254–268.
- MGM. (2025). *Kuraklık Analizi - Meteoroloji Genel Müdürlüğü*. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/kuraklik-analizi.aspx?d=yontemsinif#sfB> adresinden alındı
- Mishra, A., & Singh, V. (2010). A review of drought concepts. *J. Hydrol.*
- Montaseri, M., & Amirataee, B. (2017). Comprehensive stochastic assessment of meteorological drought indices. *Int. J. Climatol. Int. J. Climatol.*, 37: (998-1013).
- Mouatadid vd., S. R. (2018). Input selection and data-driven model performance optimization to predict the Standardized Precipitation and Evaporation Index in a drought-prone region. *Atmospheric Research*, 212:130-149.
- Mouatadid, S., Raj, N., Deo, R., & Adamowski, J. (2018). Input selection and data-driven model performance optimization to predict the standardized precipitation and evaporation index in a drought-prone region. *Atmospheric Research*, 212:130-149.

- NOAA. (2025). *NOAA-Drought.gov.tr*.
<https://www.drought.gov/data-maps-tools/global-gridded-standardized-precipitation-index-spi-cmorph-daily>
adresinden alındı
- NOAA-CPC. (2025). *Drought Indices: Standardized Precipitation Index*.
<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/Drought/Monitoring/spi.shtml> adresinden alındı
- Omar, L., Mariano, N., Alberto, G., E. P., Jorge, M., & Enrique, T. (2022). Sensitivity of Four Indices of Meteorological Drought for Rainfed Maize Yield Prediction in the State of Sinaloa, Mexico. *Agriculture*, 12: 525.
- Patwardhan, A., Nieber, J., & Johns, E. (1990). Effective Rainfall Estimation Methods. *J Irrig Drain Eng*, 116(2):182–193.
- Potop, V., Možný, M., Boroneanț, C., Štěpánek, P., & Skalák, P. (2014). Observed spatiotemporal characteristics of drought on various time scales over the Czech Republic. *Theoretical and Applied Climatology*, 115 (3-4): 563-581.
- Riebsame, W. E., Changnon, S. A., & Karl, T. R. (1991). *Drought and Natural Resource Management in the United States: Impacts and Implications of the 1987-1989 Drought*. Boulder, CO: Westview Press.
- Saraçoğlu, F. A., & Kaynar, Y. A. (2025). Assessment of Drought Indices Based on Effective Precipitation: A Case Study from Çanakkale, a Humid Region in Türkiye. *Sustainability*, 17 (22).
- Shah, R., Bharadiya, N., & Manekar, V. (2015). Drought Index Computation using Standardized Precipitation Index (SPI)

- Method for Surat District, Gujarat. *Aquatic PROcedia*, 4:1243-1249.
- Shukla, P., Skea, J., Slade, R., van Diemen, R. E., Malley, J., Pathak, M., & Portugal Pereira, J. (2022). *Technical Summary. In Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*; Cambridge, UK.: Cambridge University Press.
- Soylu Pekpostalcı, D., R. T., A., D. M., V. G., D. D., & V., N. (2023a). Drought Monitoring and Forecasting across Turkey: A Contemporary Review,. *Sustainability*, 15:6080.
- Soylu Pekpostalcı, D., Tur, R., & Mehr, A. (2023b). Spatiotemporal Variations in Meteorological Drought Across the Mediterranean Region of Turkey. *Pure Appl. Geophys.*, 180 : 3089–3104.
- Stagge, J. (2015). Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35 (13), 4027–4040.
- Suliman, A., Awchi, T., Al-Mola, M., & Shahid, S. (2020). Evaluation of remotely sensed precipitation sources for drought assessment in Semi-Arid Iraq. *Atmospheric Research*, 242:105007.
- Syed, F. S., Adnan, S., Zamreeq, A., & Ghulam, A. (2022). Identification of droughts over Saudi Arabia and global teleconnections. *Natural Hazards*, 112: 2717-2737.
- Thom, H. (1958). A note on the gamma distribution. *Mon Weather Rev*, 86:117–122.

- Thornthwaite, C. (1948). An approach toward a rational classification of. *Geogr Rev*, 38:55–94.
- Tigkas, D., V. H., & Tsakiris, G. (2017). An Enhanced Effective Reconnaissance Drought Index for the Characterisation of Agricultural Drought. *Environ. Process*, 4 (Suppl 1):S137–S148.
- Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2015). DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. *Earth Science Informatics*, 8: 697–709.
- Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2019). Drought characterisation based on an agriculture-oriented standardised precipitation index. *Theor. Appl. Climatol*, 135: 1435–1447.
- Tigkas, D., Vangelis, H., Proutsos, N., & Tsakiris, G. (2022). Incorporating aSPI and eRDI in Drought Indices Calculator (DrinC) Software for Agricultural Drought Characterization and Monitoring. *Hydrology*, 9, 100.
- Tsakiris vd, G. ., (2006). *Drought Indicators Report*. Report made for the needs of the European Research Program MEDROPLAN (Mediterranean Drought Preparedness and Mitigation Planning).
- Tsakiris, G. (2004). *Meteorological Drought Assessment. the European Research Program MEDROPLAN (Mediterranean Drought Preparedness and Mitigation Planning)*,. Zaragoza, Spain.
- Tsakiris, G., & Vangelis, H. (2004). Towards a drought watch system based on spatial SPI. *Water Resour Manag*, 18(1):1–12.

- Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis., H. (2007). Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resour Manage*, 21:821–833.
- Tsakiris., G., & Vangelis., H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *Eur Water 9-10*, 3-11.
- Vanderlinde, K., Giraldez, J., & Van Meirvenne, M. (2008). Spatial Estimation of Reference Evapotranspiration in Andalusia, Spain. *Journal of Hydrometeorology*, 9: 242–255.
- Vangelis vd, H. T. (2013). The effect of PET method on reconnaissance drought index (RDI) calculation. *J Arid Environ*, 88:130–140.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Clim*, 23, 1696–1718.
- Vishwakarma, A., Choudhary, M., & Chauhan, M. (2022). Non-parametric trend and the validity of a newly developed drought indicator for agricultural application over the central India region. *Arab. J. Geosci*, 15, 365.
- Wilhite, D. (2000). *Drought as a natural hazard: Concepts and definitions*. Abingdon, UK: Drought Mitigation Center Faculty Publications.
- Wilhite, D., & Glantz, M. (1985). Understanding: the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3):111-120.
- WMO. (2016). *World Meteorological Organization (WMO) ve Global Water Partnership (GWP),2016: Handbook of Drought Indicators and Indices (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme*

(IDMP), *Integrated Drought Management Tools and Guidelines Seri*. Geneva.

- Wu, H., Hayes, M., Wilhite, D., & Svoboda, M. (2005). The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation. *Int J Climatol*, 25(4):505–520.
- Zarch, M. A., Sivakumar, B., & Sharma, A. (2015). Droughts in a warming climate: A global assessment of standardized precipitation index (SPI) and reconnaissance drought index (RDI). *Journal of Hydrology*, 526:183-195.
- Zarch, M., Malekinezhad, H., Mobin, M., Dastorani, M., & Kousari, M. (2011). Drought Monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran. *Water Resour Manage*, 25:3485–3504.
- Zarei, A., Moghimi, M., & Bahrami, M. (2019). Comparison of reconnaissance drought index (RDI) and effective reconnaissance drought index (eRDI) to evaluate drought severity. *Sustain. Water Resour. Manag*, 5, 1345–1356.

BÖLÜM 15

DEPREM SONRASI KAMU BİNALARININ TOPLU BARINMA VE KOORDİNASYON MERKEZİ OLARAK KULLANIMINA DAİR DEĞERLENDİRMELER

HAKAN AKBABA¹
HALİL NOHUTCU²

Giriş

Ülkemizde ve dünyada telafisi mümkün olmayan can kayıpları ve yaralanmaların yanı sıra toplum için kalkınma hedeflerinin gerilemesine, büyük ekonomik kayıplara, yapıli ve doğal çevrenin tahrip olmasına neden olan doğal afetlerin başında deprem gelmektedir. Deprem özellikle ilk anda insanlarda panik, korku, endişe ve çaresizlik hissi uyandırır. Depremi hemen ardından, ilk şoku atlatarak kendisinin ve aile fertlerinin iyi olduğunun anlaşılması akabinde güvenli bir yer arama gayreti içine giren insanoğlu, özellikle devlet ve hükümet yetkililerinin açıklamaları ile yönlendirmelerine ihtiyaç duyar. Ortaya çıkan bu

¹ Öğr. Gör. Dr. Uşak Üniversitesi, Banaz MYO, İnşaat Bölümü, ORCID:0000-0003-4894-2067

² Doç.Dr. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ORCID:0000-0003-2894-9544

durum afet yönetimi açısından değerlendirildiğinde, depremin büyüklüğü, etkilediği alan ve nüfus yoğunluğuna göre değişiklik göstermektedir.

Bu çalışmada, ülkemizde yüz yılın felaketi olarak ifade edilen 6 Şubat 2023 tarihinde merkez üssü Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Elbistan (Kahramanmaraş) olan Mw: 7.7 ve Mw: 7.6 büyüklüğündeki depremler sonrasında Hatay ve Kahramanmaraş illerinde yapılan saha araştırmaları sırasında yapılan gözlemler ile bölgede depremi yaşayan kamu bina yöneticileriyle yapılan görüşmelerden elde edilen bilgilere dayalı çıkarımlar yapılmıştır. Depremin hemen ardından kamu binaların işlevi, toplu barınma ve koordinasyon merkezi olarak kullanımına dair değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Afetler "bir toplumun veya topluluğun faaliyetlerini önemli ölçüde aksatan, insan, ekonomik veya çevresel zararlara yol açan ve bu zararların toplumun kendi kaynaklarıyla başa çıkma kapasitesini aşan ani ve yıkıcı bir olay" olarak tanımlanır. Doğal afetler arasında yer alan depremler, günümüzde toplumsal hayatı ve insan yaşamını en çok etkileyen doğa olayları arasında ilk sırada yer almaktadır. Ansızın gerçekleşen ve toplumsal yaşamı kesintiye uğratarak, derinden etkileyen büyük deprem olayları akabinde, bölgede bulunan tüm insanlar korku ve endişenin yanı sıra, barınma, beslenme gibi temel ihtiyaçlar başta olmak üzere birçok gereksinime ihtiyaç duyarlar. Bahse konu bu ihtiyaçlar en temel düzeyde olmasına rağmen afetzedelerin bu ihtiyaçları dışardan destek almak (devlet yetkilileri, yardım kuruluşları vb.) suretiyle ancak giderebilmektedir (Ceren, 2021; Erkan, 2010; Güler, 2008; Gökçekuş ve ark. 2018).

Yıkıcı sonuçları olan şiddetli bir depremin yaşandığı bölgede, sosyal etkileşimler önemli ölçüde kesintiye uğrar, bireyler sayısız zorlukla karşılaşır ve dış yardıma ihtiyaç duyulur. Bu durumda, kamu kurumları ve hizmetleri, uluslararası insani yardım

kuruluşları, sivil toplum örgütleri, belediyeler ve gönüllüler, depremzedelerin ilk ve acil ihtiyaçlarını karşılayarak, felaketten etkilenen bireylere kapsamlı yardım ve kolektif hizmetler sunmaktadır. Afetler insan varlığını ve toplumsal yapıyı önemli ölçüde etkileyen olaylardır ve bu nedenle bunlarla başa çıkmak için etkili bir strateji oluşturmak büyük önem taşır. Afet yönetimi sürecinde, kamu kurumları hem ulusal hem de yerel düzeyde hayati sorumluluklar üstlenir (Altınkesen, 2025; Özgölet, 2024; Duruel, 2023).

Ülkemizde meydana gelebilecek afet ve acil durumlara karşı önlem almak, hazırlık yapmak, afetin gerçekleşmesi durumunda, afetzedeler için özellikle ilk ve acil ihtiyaçların karşılanması, gerekli önlemlerin alınarak afet sonrası iyileştirme çalışmalarının yürütülmesi amacıyla kurulan Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı veya kısa adıyla AFAD görevlendirilmiştir. Bu konuda alınan kararlardan biri de ülkemizde yaşanabilecek her tür ve ölçekteki afet ve acil durumda etkin müdahale edilebilmesi için görev alacak kamu kurumlar, özel sektör, sivil toplum kuruluşları ve gerçek kişiler Türkiye Afet Müdahale Planı (TAMP) kapsamında belirlenmiş olmasıdır. Afet öncesinde hazırlanan bu planların amacı, mevcut kaynakların etkin kullanımını sağlamak ve afet müdahalesi için koordinasyon kapasitesini artırmaktır. Böylece, afet ve acil durumlara ilgili koordinasyon birimlerinin rolleri ve sorumlulukları tanımlanarak, afet öncesinde, sırasında ve sonrasında uygulanacak müdahale planlamasının uygulama prosesleri belirlenmiş olur (Gazete, R. 2013; AFAD, 2020).

Barınma ihtiyacı, insanlığın en temel gereksinimlerinden biridir. Maslow'un ihtiyaçlar hiyerarşisinin en alt basamağında fizyolojik ihtiyaçlar bulunmakta olup, bu fizyolojik ihtiyaçlar içerisinde "barınma ihtiyacı" da yer almaktadır. Afet durumlarında barınma gereksinimi büyük sorun teşkil ederek ihtiyaçların başında yer alır. Deprem felaketinin büyüklüğü ve

hasarın boyutu, ayrıca ortaya çıkan barınma ihtiyacının büyüklüğü, bu konuda hızlı ve etkili önlemler alma yeteneğini zorlaştırmaktadır. Barınma ihtiyacı sadece konutla sınırlı değildir. Özellikle deprem, sel, yangın, savaş, göç veya diğer kriz durumları gibi afetler nedeniyle bireyler aniden evlerini terk etmek ve güvenli bir yerde sığınmak zorunda kalabilirler (Url-1 ; Özmen ve ark. 2024; Efe, 2023).

Büyük yıkım, can kaybı ve yaralanmalara neden olan depremler sonrası durumlar genellikle yoğun baskı altında sınırlı kaynaklar ile problemlerin ivedi olarak çözümüne yönelik iyileştirme ihtiyacının aciliyeti nedeniyle genellikle yetersiz çözümlerin yanı sıra memnuniyetsizliklerle sonuçlanabilmektedir. Bu nedenle afet sonrası acil ve geçici barınma merkezleri ile koordinasyon hizmetlerinde kullanılacak yapıların önceden planlanarak, olası afet durumlarına göre gerekli hazırlıkların yapılması gerekir. Afet sonrası oluşabilecek kaos ortamında bahse konu barınma, yardım ve koordinasyon amacıyla kullanılacak yapıların oluşturularak işler hale getirilmesi oldukça zordur (Çınar ve ark. 2018; Yılmaz, 2021).

Afet sonrası barınma türleri, afet olayının meydana geldiği mevsim ve zamana göre değişiklik gösterir. Barınma aşamaları acil durum barınakları (çadırlar), geçici barınaklar (konteynerler), geçiş barınakları (prefabrik barınaklar) ve ilerleyici barınaklar (kalıcı afet evleri) olarak sınıflandırılır (IFRC (2013)). Deprem felaketinin ardından, yapıyı çevre eski haline dönene kadar geçici yerleşim yerleri kurulması gerekebilir; bu, toplumsal ve sosyal hayatın normale dönüşünü kolaylaştırmayı amaçlar. Geçici yerleşim yerlerinin niteliği, depremin şiddetine ve yeniden yapılanma aşamasının uzunluğuna bağlı olarak değişiklik gösterir. Deprem etkilerinin sınırlı ve yeniden yapılanma süresinin kısa olduğu durumlarda, geçici barınma ihtiyacının kamuya ait yurt, misafirhane ve diğer kamu binaları ile mevsimsel şartlara bağlı olarak çadır,

konteyner vb. karşılanması mümkündür. Ancak depremin şiddeti ve meydana gelen etkilerinin tahmin edilenden çok daha büyük olması durumunda okulların yanı sıra, spor tesisleri, spor salonları, toplum merkezleri, kültür merkezleri, hastaneler, sağlık merkezleri, stadyumlar, oteller, çocuk bakım merkezleri, belediye salonları, dini tesisler, büyük toplantı salonları, askeri kışlalar, kapalı oyun alanları, boş (terk edilmiş, tamamlanmamış) binalar, fabrikalar (terk edilmiş veya kullanımda), depolar, parklar ve özel olarak inşa edilmiş barınaklar (siklon, kasırğa, fırtına, sel), afet ve acil durumlarda ortak barınma merkezleri olarak kullanılabilir (İdemen, 2022; İrem ve ark. 2022; Artantaş, 2024; Sağır, 2024).

Deprem Sonrası Barınma İhtiyacı

Birçok yapının yıkılmasına veya önemli ölçüde hasar görmesine yol açan şiddetli depremler sonrası, depremden etkilenen bireyler için acil barınma ihtiyacı oluşur. Ülkemizde afet olayları sonrası ortaya çıkan barınma sorununa yönelik yaklaşımlar 3 aşamada ele alınmaktadır.

- Acil yardım faaliyetleri aşamasında barınma,
- Rehabilitasyon faaliyetleri aşamasında barınma,
- Yeniden yapım faaliyetleri aşamasında barınma,

Acil Yardım Aşaması: Bu aşama öncelikle evleri yıkılmış ailelere acil barınma sağlamaya odaklanır. Bu aşama birkaç hafta sürer. Kişisel ve sosyal ihtiyaçlar geçici çözümlerle karşılanabilir.

Rehabilitasyon Aşaması: Bu aşama, afetten birkaç hafta sonra başlar ve kalıcı konut onayı alınana kadar devam eder. Bu aşamada, üç farklı şekilde ek düzenlemeler yapılır: geçici yerleşimler, afet bölgesinde toplu geçici barınaklar ve geçici konutlar.

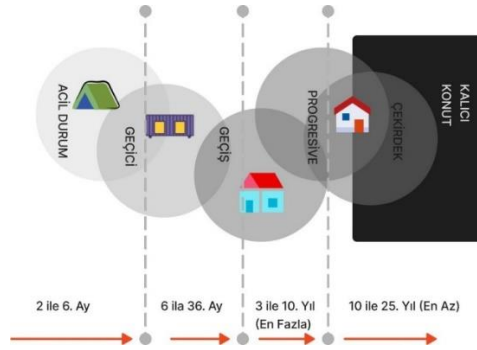
Yeniden İnşa Aşaması: Bu aşama, rehabilitasyon aşamasından sonra başlar ve afetzedelere mümkün olan en kısa sürede kalıcı konut sağlanana kadar devam eder. Afet sonrası kalıcı konutların önemli bir özelliği, yıkılanların yerine inşa edilen yeni evlerin oldukça kısa bir ömre sahip olmasıdır (Efe, 2023; Limoncu, 2024; Limoncu, ve Bayülgen, 2005; Özata & Limoncu, 2014).

Acil Yardım Aşamasında Kamu Binaları

Yıkıcı depremin yol açtığı can kayıpları ve yaralanmalar, mağdurlar üzerinde kalıcı travmatik etkiler bırakmıştır. Bu etkiler fiziksel engellerin ötesine uzanarak, zihinsel ve sosyal refahı da derinden etkileyebilir. Bu durum depremzedelerin psikososyal durumları ile yaşam kalitesini ciddi şekilde etkileyebilir.

Afetlerden etkilenen bireylerin, felaketin ardından kalıcı konuta acil erişime ihtiyaçları vardır; bu ihtiyaç şu anda geçici konut çözümleriyle karşılanmaktadır. Kalıcı konut seçenekleri geliştirilirken, geçici konaklama yerleri sadece afetzedelere barınak sağlamakla kalmamalı, aynı zamanda iyileşmelerini kolaylaştırmalı ve normal yaşamlarına dönmelerine yardımcı olmalıdır (Süzer & Yamaçlı, 2024).

Afet sonrası barınma ihtiyacının çözümüne yönelik literatürde bir süreç modeli bulunmaktadır (IFRC, 2013; Url-2). Ancak yaşanan depremler sonrası pratikte görülen acil barınma ihtiyaçlarının öncelikle kamu kurum ve kuruluşlarına ait başta okul bina ve bahçeleri olmak üzere, spor tesisleri, spor salonları, toplum merkezleri, kültür merkezleri, stadyum vb. alanların kullanıldığı gözlemlenmektedir. Özellikle büyük ölçekli afet olaylarında acil yardım sonrası, ikinci aşama olarak adlandırılan rehabilitasyon aşamasına geçmek uzun zaman alabilmektedir.



Şekil 1. Afet sonrası toplu barınma süreci (IFRC, 2013)

Geçici konaklama süreci boyunca, ailelere sunulan yaşam ortamlarının, sadece fiziksel alanları değil, aynı zamanda günlük rutinlerin ve sosyal etkileşimlerin sürdürülmesini kolaylaştıran altyapı, olanaklar, hizmetler ve ortak alanları da kapsadığı kabul edilmektedir. Bu nedenle, geçici konaklama birimlerinin çevresindeki dış mekanların iyi bir şekilde tasarlanması ve düzenlenmesi gerekmektedir (Caia ve ark. 2010; Neşe & Yılmaz, 2024).

Geçici barınaklar için planlama ve yer seçimi yapılırken birkaç önemli faktör dikkate alınmalıdır. Bu faktörler arasında su kaynaklarına yakınlık, ulaşım ağlarına erişim, bölgenin morfolojik özellikleri, iklim koşulları, hidrografik özellikler, toprak bileşimi, bitki örtüsü ve çevredeki mevcut yapıların varlığı yer almaktadır (Odası, 2023; Maral, 2016). Geçici barınak aşamasında dünya genelinde ve Türkiye'de en yaygın olarak kullanılan geçici barınma çözümü çadırlar olarak ön plana çıkmaktadır. Afet çadırları hafif olmaları, kolay depolanabilir, kurulum ile söküm işlemlerinin basitliği vb. nedeniyle başlıca tercih sebebidir.



Şekil 2. 6 Şubat 2023 tarihli depremler sonrası kurulan geçici barınma merkezleri.

Eğitim kurumları, deprem gibi doğal afetlerden hemen sonra kritik işlevler yerine getirebilir. Bu nedenle, okul binalarının dayanıklı olacak şekilde inşa edilmesi zorunludur (Kadıoğlu, 2008; Bilgehan, 2023). Deprem sonrası yeterli erişilebilir ve kullanılabilir yapı bulunmadığı durumlarda acil barınma ve yardım vb. koordinasyon hizmetlerinin yürütülmesinde kamu binalarının kullanılması çok önemli hale gelir (Yalçın, 2023)



Şekil 3. 6 Şubat 2023 tarihli depremler sonrası kurulan merkezleri.

Ülkemizde ve dünyada yaşanan büyük depremlerin yol açtığı yıkımlar öncelikle barınma sorununa neden olmaktadır. Depremden sonra vatandaşlar korku, panik veya ihtiyati tedbirler nedeniyle evlerini terk etmek zorunda kalırlar; bu da barınma ihtiyaçlarını karşılamak için nispeten daha güvenli binalara olan ihtiyacı doğurur. Yıkıcı bir depremin ardından kamu binaları, barınma, koordinasyon ve yardım gibi acil ihtiyaçları karşılamak için kullanılacak başlıca güvenli yapılar arasındadır (Kartal, 2024).

Türkiye Cumhuriyeti Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından hazırlanan On İkinci Kalkınma Planı'nda, eğitim ve sağlık başta olmak üzere kamu hizmetlerinin sunulduğu yapıların afet ve olağanüstü durumlara karşı hazır hale getirilmesi amacıyla bahse konu binaların güçlendirilmesine öncelik verilerek, olası bir deprem sonrasında can ve mal kaybının en az seviyede tutulabilmesi hedeflenmiştir (Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028)).

Ülkemizde, toplam 1.013.922.329 m² alanı kapsayan, hazineye kayıtlı 159.430 kamu binası bulunmaktadır. Bu binaların olası afet durumlarında ayakta kalabilen ,güvenli binalar arasında yer alması, söz konusu kamu binalarının, depremden hemen sonra yerel halk için acil barınma ve yardım kuruluşlarının koordinasyon merkezleri olarak hizmet vererek, olası bir depremi az veya hiç hasar görmeden atlatabilmesi son derece önemlidir. Ayrıca, kamu binaları arasında okullar ve hastaneler ayrıca değerlendirilmesi gereken en önemli yapılar olarak kabul edilmelidir (Çatakçı, 2018; Gündoğay, 2017).

Materyal ve Yöntem

6 Şubat 2023depremlerinin büyüklüğü, neden olduğu can kayıpları ve yaralanmalar ile yapıları çevreye verdiği hasar tahminlerin çok daha ötesindedir. Bu depremler büyük bir yıkıma sebep olmakla birlikte, afeti yaşayan bireyler üzerinde de, hem fiziki hem de ruhsal açıdan derin etkiler bırakmaktadır.

Dünya üzerinde bulunan aktif fay hatlarına yakın bölgeleri etkisine alan büyük depremler, insanlar için en zararlı ve ölümcül doğal afetlerin başında gelir. Son birkaç yılda, meydana gelen yıkıcı depremlerde binlerce insan hayatını kaybetmiş, yaralanmış ve sayısız binanın hasar görmesine veya çökmesine neden olmuştur. Ülkemizde Deprem denildiğinde ilk akla gelen ve yüz yılın felaketi

olarak ifade edilen 6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye saati ile 04:17'de ve 13:24'te merkez üssü Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Elbistan (Kahramanmaraş) olan Mw: 7.7 ve Mw: 7.6 büyüğündeki depremler sonucu resmi rakamlara göre 53 bin 537 kişi hayatını kaybetmiş, 107 bin 213 kişi yaralanmış ve 2023 TBMM Deprem Araştırma Komisyonu'nun raporuna göre depremlerin toplam maliyeti Türkiye'de 148.8 milyar dolar olmuştur. Doğı Anadolu Fay Hattı üzerinde gerçekleşen bu depremler Hatay, Kahramanmaraş, Adıyaman illeri başta olmak üzere 10 ilimizi etkilemiş, çok sayıda binanın yıkılarak enkaz haline gelmesine neden olmuştur.

Bu çalışma; yüz yılın felaketi olarak ifade edilen 6 Şubat depremlerinin yoğun olarak hasara neden olduğı Hatay ve Kahramanmaraş illerinde deprem sonrası saha araştırmaları sırasında yapılan gözlemler ile bölgede depremi yaşayan kamu bina yöneticileriyle yapılan görüşmelerden elde edilen bilgilere dayalı çıkarımlar yapılarak, depremin hemen ardından kamu binaların işlevi, toplu barınma ve koordinasyon merkezi olarak kullanımına dair, tespit ve değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Bölgede yapılan çalışmalar kapsamında Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, Yatırım İzleme ve Koordinasyon Başkanlığı, İl ve İlçe Milli Eğitim Müdürlüklerinde görevli yönetim kadrosu ve Okul Müdür/Müd. Yardımcısı pozisyonundaki yönetici kadrosundaki personeller ile görüşme fırsatı bulunmuştur. Depremlerden hemen sonara bulundukları kamu binalarının işlevleri ile toplu barınma ve koordinasyon merkezi olarak kullanımına dair bilgilerine başvurulmuştur.

Görüşme yapılan kamu bina yöneticilerinden edinilen bilgiler özetlenerek, genel bir değerlendirme yapılmıştır. Buna göre;

Deprem felaketini yaşayan kamu bina yöneticileri ilk etapta aileleri ve yakınları için endişelenmişlerdir. Kendilerinin ve

evrelerindekiilerin yaşadıkları korku, panik ve travmanın etkilerini dış yardımlar gelene kadar atlatamamış olduklarını ifade etmişlerdir.

İlk şokun atlatılmasıyla kamu yöneticilerinin kendi kamu binalarıyla ilgili gözlemsel hasar tespitleri yaparak, bağlı oldukları st birimlere bildirimlerde bulundukları anlaşılmaktadır.

Depremden hemen sonrası süreçte, özellikle şiddetli artçı sarsıntılar devam ederken, mevcut binalara girilmesi, gzlemselde olsa tespitlerin yapılabilmesi fevkalade zor bir süreç olarak belirtilmiştir.

Deprem bölgesine gönderilen yardımların ve hasar tespit çalışmaları için başka illerden görevlendirilen teknik personelin bölgeye ulaşmasıyla bahse konu kamu binalarına ait hasar tespit çalışmaları ancak gerçekleştirilebilmiştir.

Hasar almayan ve kullanılabilir durumda olan kamu kurum ve kuruluşları bulundukları bölgeler için sığınma, yardımlara ulaşabilme ve koordinasyon amacıyla kullanıldığı bilgisine ulaşılmıştır.

Özellikle okul binaları acil yardım, barınma ve koordinasyon hizmetleri için, geçici bir süreliğine de olsa ilk akla gelen binalardandır. 6 şubat'ta Kahramanmaraş depremlerinde okul binaları ve bahçeleri, başta AFAD'a ait koordinasyon merkezleri olmakla beraber her türlü barınma ve yardım faaliyetlerinin yürütülmesinde aktif olarak kullanılmıştır.



Şekil 4. Yaşanan depremler sonrası okul bina bahçesi görünümü.

Sonuç ve Öneriler

Dünyanın çeşitli bölgelerinde yaşanan doğal afetlerin sebep olduğu zararlar ülkeleri, toplumları ve bireyleri büyük ölçüde etkisi altına alarak, telafisi mümkün olmayan can ve mal kayıplarına neden olmaktadır. Deprem gibi doğal afetlerin oluşmasını engellemek mümkün değildir. Bu nedenle yapılabilecekler, zararlarının azaltılmasına yönelik politika ve stratejilerin geliştirilerek, etkin müdahale, kamu kaynaklarının kullanımı, afet sonrası koordinasyon ve planlama, vb. çalışmalar ile depreme hazır hale gelebilmek olmalıdır. Afetlere hazırlık aşamaları, ulusal ve uluslararası standartlarda belirtilen (Sphere Projesi, Afetle Mücadelede Asgari Standartlar ve İnsani Yardım Sözleşmesi) birtakım kıstaslara uygun olarak yürütülmelidir.

6 Şubat 2023 tarihinde merkez üssü Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Elbistan (Kahramanmaraş) olan Mw: 7.7 ve Mw: 7.6 büyüklüğündeki depremler sonrası bölgede yapılan tespitlere dayanarak;

- Depremin ağır hasar ve yıkıma sebep olduğu bölgelerde, genel olarak kamu yapılarının çoğunluğunun beklendiği gibi

depremi nispeten daha az hasarlı olarak atlattığı anlaşılmaktadır.

- Özellikle depremden önce güçlendirilen binaların depremi hafif hasarlı veya hasarsız olarak atlatabildikleri gözlemlenmiştir.
- Depremin hemen ardından vatandaşların ihtiyaç duyduğu, acil barınma, temel destek gereksinimleri, yardımların dağıtımı ve koordinasyon amaçlı olarak, hasarsız kamu bina ve bahçelerinin kullanıldığı belirlenmiştir.
- Ayrıca, deprem etkilerinin çok büyük ve toplumsal hayatın durma noktasına geldiği 6 Şubat 2023 depremi gibi afet olaylarında, yukarıda bahsedilen acil ve temel ihtiyaçların karşılanması, devlete ait binaların işler vaziyette faal halde olması, toplumda bir nebze de olsa moral, güven ve olumlu psikolojik etkilere sebep olduğu depremi yaşayan kamu yöneticileri tarafından iletilmiştir.

Ülkemizde birçok bölge deprem tehlikesi altında bulunmakla birlikte, yoğun nüfus oranına da sahiptir. Bu bölgelerde olası deprem etkilerinin azaltılması, deprem sonrası toparlanma sürecinin hızlanması adına, kamu binaları kritik öneme sahiptir. Bahse konu kamu binaların deprem öncesi performans analizleri yapılarak, gerekli güçlendirme çalışmalarının tamamlanması son derece önemlidir.

Kaynakça

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (Afad) (2020). Türkiye Afet Müdahale Planı. <https://www.afad.gov.tr/turkiye-afet-mudahale-planı>, 02.02.2021.

Altınkesen, Ö. (2025). Afet Yönetiminde Kamu Kurumlarının Rolü ve Kapasitesi. İksad Dergisi , 9 (I36), 136-153.

Artantaş, E., & Gürsoy, H. (2024). Depremın Yıkıcı ve Ekonomik Etkilerini Azaltmaya Yönelik Stratejiler ve Türkiye'nin Deprem Deneyimlerinden Çıkarılacak Dersler, Kahramanmaraş ve Gölcük Depremleri Örneği. Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakóltesi Dergisi, 17(2), 192-214.

Bilgehan, M. (2023). Kentsel Dönüşümde Afetlere Dirençli Yapılar. Çevre Şehir ve İklim Dergisi, 2(4), 282-301.

Caia, G., Ventimiglia, F., & Maass, A. (2010). Container vs. dacha: The psychological effects of temporary housing characteristics on earthquake survivors. Journal of environmental psychology, 30(1), 60-66.

Ceren, A. (2021). Afetler ve İnsani Yardım Faaliyetleri Üzerine Bir Değerlendirme. Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakóltesi Dergisi, 23(2), 289-312.

Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028)

Çatakçı, S. (2018). Çevreye Duyarlı, Enerji Etkin Kamu Binalarının Sürdürülebilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Çınar, A. K., Akgün, Y., & Maral, H. (2018). Afet Sonrası Acil Toplanma ve Geçici Barınma Alanlarının Planlanmasındaki Faktörlerin İncelenmesi: İzmir-Karşıyaka Örneği. Planlama, 28(2), 179-200.

Duruel, M. (2023). Afet Yönetiminde Yerel Yönetimlerin Etkinliği: 6 Şubat Depremi Hatay Örneği. International Journal Of Social And Humanities Sciences Research (Jshsr), 10(99), 2404-2418.

Efe, B. (2023). Afet Sonrası Geçici Barınma Mekanlarını Oluşturan Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi.

Erkan, E. A. (2010). Afet Yönetiminde Risk Azaltma ve Türkiye'de Yaşanan Sorunlar. Dpt Sosyal Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü.

Gazete, R. (2013). Afet ve Acil Durum Müdahale Hizmetleri Yönetmeliği.

Gökçekuş, H., Barlas, C., Almuhsen, M., & Eyni, N. (2018). Doğal ve insan kaynaklı afetler, sonuçları ve afet yönetimi.

Güler, H. H. (2008). Zarar Azaltmanın Temel İlkeleri. Afet Zararlarını Azaltmanın Temel İlkeleri, 1, 35-50.

Gündoğay, A. (2017). Betonarme Okul Binalarının Deprem Güvenliğini Etkileyen Bazı Parametrelerin İncelenmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Konya.

Ifrc (2013). Post-Disaster Shelter: Ten Designs. Ifrc.

İdemen, A. E. (2022). Afet Sonrası Geçici Barınma Amacıyla Kullanılacak Kamusal Yapıların Seçimi İçin Bir Model: Geçici İşlevsel Dönüşüm (Adaptive Reuse).

İrem, C. A. N., & Saka, A. E. (2022). Deprem Sonrası Geçici Barınma Birimleri İçin Alternatif Bir Çözüm Önerisi: Wikigeb. Online Journal Of Art And Design, 10(2).

Kadioğlu, M. (2008). Modern, Bütünleşik Afet Yönetimin Temel İlkeleri. Afet Zararlarını Azaltmanın Temel İlkeleri, 1.

Kartal, M. E., Kaya, Ç. M., & Yavuz, F. (2024). Ege Denizi Depremi Sonrası Barınma Çözümleri: Acil, Geçici ve Kalıcı Barınma Yaklaşımları. Afet ve Risk Dergisi, 7(2), 560-571.

Limoncu, S. (2004). Türkiye’de Afet Sonrası Sürdürülebilir Sistem Yaklaşımı. (Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Limoncu, S. ve Bayülgen, C. (2005). Türkiye’de Afet Sonrası Yaşanan Barınma Sorunları. Megaron Yıldız Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dergisi, 1(1), 18-27.

Limoncu, S., & Bayülgen, C. (2005). Türkiye’de Afet Sonrası Yaşanan Barınma sorunları. Megaron, 1(1), 18.

Maral, H. (2016). Afet Sonrası Geçici Yerleşim Yerlerinin Planlanmasında Üst Ölçekli Planlama: Karşıyaka Örneği, Yayınlanmamış YI Tezi, Gediz Üni., Fbe, Kentsel Yenileme Anabilim Dalı, İzmir

Neşe, G. E. N. Ç., & Yılmaz, G. (2024). Deprem Sonrası Rehabilitasyon Sürecinde Geçici Rekreasyon Alanlarının Önemi. International Journal Of Holistic Health, Sports And Recreation, 3(1), 17-38.)

Odası, T. Ş. P. (2023). Geçici Barınma Alanları Yer Seçimi ve Yerleşimi Nasıl Olmalıdır.

Özata, Ş., & Limoncu, S. (2014). 16. ve 20. Yy. Arası İstanbul ve Yakın Çevresinde Meydana Gelen Deprem Sonrası Barınma Uygulamalarının İncelenmesi. Megaron, 9(3).

Özgölet, B. M. (2024). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremlerinin Yıkıcı Etkisiyle Başa Çıkmada Etkili Olan Faktörler. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi.

Özmen, F., Gültek, M., & Sarıcıoğlu, P. (2024). Deprem Sonrası Geçici Barınma Alanları: Deprem Bölgelerinde Acil Barınmaya Yönelik Yapı Stüdyosu Önerileri. Turkish Studies (Elektronik), 19(1).

Sağır, M., & Guzelgorur, F. (2024). Deprem Neden Olduğu Kaosun Yönetimine İlişkin Okul Yönetici Görüşlerinin İncelenmesi. *Asya Studies*, 8(28), 1-14.

Süzer, A., & Yamaçlı, R. (2024). Afet Sonrası Sürdürülebilir Geçici Konut Tasarımı, Analiz ve Öneriler. *YdÜ Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 6(1), 68-85.

Url-1: <https://Www.Simplypsychology.Org/Maslow.Html>

Url-2 : <https://Kenthali.Org/Barinmacozumleri/>

Yalçın, E., (2023), 8 Derslikli Tip Okul Binalarının Farklı Malzeme Özellikleri Dikkate Alınarak Güçlendirme Maliyetlerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Konya.

Yılmaz, S. (2021). Afet Sonrası Geçici Barınmanın Çevresel Ekonomik ve Sosyal Sürdürülebilirliğinin Değerlendirilmesi (Master's Thesis, Bursa Uludag University (Turkey)).

BÖLÜM 16

İNŞAAT SEKTÖRÜNDE ÇALIŞAN İNŞAAT TEKNİKERİ VE İNŞAAT MÜHENDİSLERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇEVRE VE YEŞİL BİNA SERTİFİKASYON SİSTEMİ FARKINDALIKLARI

Mehmet Anıl KIZILASLAN¹

Giriş

İnşaat sektörü, küresel ölçekte çevresel etkileri en yüksek alanlardan biri olarak kabul edilmektedir. Enerji tüketimi, sera gazı emisyonları, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve atık üretimi gibi unsurlar, sektörü sürdürülebilirlik tartışmalarının merkezine yerleştirmektedir (Ding, 2008; Häkkinen & Belloni, 2011). Uluslararası kuruluşların raporlarına göre, binalar küresel enerji tüketiminin yaklaşık %40'ını ve karbon emisyonlarının %30'dan fazlasını oluşturmaktadır (UNEP, 2020). Bu nedenle, sürdürülebilir çevre anlayışının geliştirilmesi ve yapı sektöründe çevreye duyarlı uygulamaların benimsenmesi, yalnızca çevresel değil aynı zamanda ekonomik ve toplumsal açıdan da kritik bir gereklilik haline gelmiştir.

Son yıllarda, bu gerekliliğin bir yansıması olarak yeşil bina kavramı ön plana çıkmıştır. Yeşil binalar; enerji verimliliği, su kaynaklarının korunması, atık yönetimi, kullanıcı sağlığı ve konforu

¹ Dr. Öğr Üyesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, Çanakkale/Türkiye, Orcid: 0000-0002-0621-4646, makizilaslan@comu.edu.tr

gibi çok boyutlu kriterleri içermekte, geleneksel yapı anlayışından farklı olarak çevresel etkileri en aza indirmeyi amaçlamaktadır (Kibert, 2016). Bu bağlamda geliştirilen yeşil bina sertifikasyon sistemleri (LEED, BREEAM, DGNB, EDGE, ÇEDBİK vb.), projelerin sürdürülebilirlik kriterleri açısından ulusal ve uluslararası standartlara uygunluğunu ölçmeyi ve belgelenebilir hale getirmeyi sağlamaktadır (Darko et al., 2017). Ancak, bu sistemlerin uygulanabilirliği, büyük ölçüde sektördeki profesyonellerin farkındalık ve bilgi düzeyine bağlıdır.

Türkiye’de yeşil bina uygulamaları son yıllarda artış göstermesine rağmen, ulusal sertifikasyon sistemlerinin sınırlı bilinirliğe sahip olduğu, uluslararası sertifikaların ise genellikle büyük ölçekli projelerde tercih edildiği belirtilmektedir (Çetiner, 2019; Göçer & Hua, 2018). Bu durum, sektör çalışanlarının konuyla ilgili farkındalık düzeylerinin kritik bir araştırma alanı haline gelmesine yol açmıştır. Özellikle inşaat teknikerleri ve inşaat mühendisleri, projelerin farklı aşamalarında aktif rol alan iki temel meslek grubunu oluşturmaktadır. Mühendislerin tasarım, planlama ve denetim süreçlerindeki karar verici konumları; teknikerlerin ise uygulama ve saha yönetimindeki etkinlikleri dikkate alındığında, her iki grubun da sürdürülebilirlik ve yeşil bina sertifikasyon sistemleri konusundaki bilgi ve farkındalık düzeyleri, sektördeki dönüşümün başarıları için belirleyici bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

Literatürde yapılan çalışmalar, sürdürülebilirlik farkındalığının cinsiyetten ziyade eğitim düzeyi ve mesleki deneyimle daha güçlü ilişkilere sahip olduğunu göstermektedir (Zhang et al., 2018). Benzer şekilde, mühendislik tabanlı eğitimlerde sürdürülebilirlik temalarının daha fazla yer bulduğu, teknikerlerin ise bu konularda saha deneyimine dayalı öğrenmeler geliştirdiği belirtilmektedir (Ding, 2008). Bununla birlikte, ulusal düzeyde farkındalığın halen sınırlı olduğu ve bilgilendirme faaliyetlerinin yetersiz kaldığı da vurgulanmaktadır (Çetiner, 2019; Düzenli & Yıldız, 2020).

Bu araştırma, inşaat sektöründe çalışan inşaat teknikerleri ve mühendislerinin sürdürülebilir çevre anlayışı ile yeşil bina sertifikasyon sistemlerine yönelik farkındalıklarını incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın bulguları, sektörde mevcut bilgi düzeyinin belirlenmesine katkı sunarken, aynı zamanda mesleki eğitim programları ve politika geliştirme süreçleri için önemli veriler sağlayacaktır. Böylelikle hem akademik alana hem de sektörel uygulamalara yönelik yol gösterici bir perspektif ortaya koyulması hedeflenmektedir.

Kuramsal Çerçeve

Sürdürülebilirlik ve inşaat sektörü

İnşaat sektörü; enerji tüketimi, malzeme kullanımı ve emisyon üretimi bakımından çevresel etkileri yüksek bir alandır. Bu nedenle sürdürülebilirlik ilkelerinin sektöre entegrasyonu; yaşam döngüsü düşüncesi, kaynak verimliliği ve çevresel etki azaltımı gibi kavramların tasarım-yapım-kullanım-yıkım evrelerinde bütüncül olarak ele alınmasını gerektirir (Ding, 2008; UNEP, 2020).

Yeşil Bina ve sertifikasyon sistemleri

LEED, BREEAM, DGNB ve ulusal sistemler (Türkiye’de B.E.S.T.) gibi yeşil bina sertifikasyonları; enerji, su, malzeme, iç hava kalitesi ve arsa kullanımı başlıklarında ölçülebilir performans kriterleri sunar. Bu sistemler piyasa aktörleri için ortak bir dil ve karşılaştırılabilirlik sağlar (Kibert, 2016; UNEP, 2020). Türkiye’de LEED uygulamalarının maliyet-fayda boyutu ve geri ödeme süreleri ile B.E.S.T.’in yapısal özellikleri literatürde ayrıntılandırılmıştır (Uğur & Leblebici, 2018; Halıcıoğlu & Yılmaz, 2020).

Farkındalık, tutum ve davranış

Sürdürülebilir çevre ve yeşil bina farkındalığı; bilgi (kavramsal/uygulamalı), tutum (değerler/algılar) ve davranışa dönüşüm (uygulama/benimseme) boyutlarının etkileşimiyle şekillenir. Mesleki eğitim, kurumsal teşvikler ve düzenleyici çerçeve farkındalık düzeylerini belirleyen temel girdilerdir (Darko ve ark., 2017; Häkkinen & Belloni, 2011).

Mesleki roller: inşaat teknikeri ve inşaat mühendisi

Proje teslim zincirinde inşaat teknikerleri şantiye organizasyonu, kalite kontrol ve uygulama süreçlerinde; mühendisler ise tasarım koordinasyonu, hesap ve yönetim kararlarında belirleyici aktörlerdir. Farkındalık düzeylerindeki farklılıklar, malzeme seçimi, enerji verimliliği kararları ve saha uygulamalarının niteliğine doğrudan yansır (UNEP, 2020; Kibert, 2016).

Literatür Taraması

Küresel eğilimler: Yeşil bina uygulamalarının benimsenmesinde itici güçler; enerji maliyetlerinin düşürülmesi, kurumsal imaj, kullanıcı sağlığı/konforu ve düzenleyici baskılardır. Buna karşılık başlıca engeller; başlangıç maliyeti algısı, bilgi eksikliği ve piyasa/teşvik yetersizlikleridir (Darko ve ark., 2017; Häkkinen & Belloni, 2011). Ayrıca gelişmekte olan ülke bağlamlarında politika rehberliği ve paydaş farkındalığının düşüklüğü uygulamayı yavaşlatmaktadır (Zhao, He & Johnson, 2019).

Türkiye bağlamı: Türkiye’de LEED sertifikalı projelerde ek yapım maliyetleriyle enerji tasarrufu ve geri ödeme süreleri deneyimsel verilerle raporlanmıştır (Uğur & Leblebici, 2018). Ulusal B.E.S.T. sistemi; enerji kriter ağırlıkları ve sistem mimarisi açısından LEED/BREEAM ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Halıcıoğlu

& Yılmaz, 2020). Son dönem çalışmalar, Türkiye’de yeşil bina üretiminde tasarım-yapım süreçlerinde karşılaşılan kurumsal ve teknik bariyerleri; bilgi/farkındalık eksikliği ve teşvik mekanizmalarının sınırlılığı ile ilişkilendirmektedir (UNEP, 2020; ilgili ulusal çalışmalar).

Farkındalığı etkileyen faktörler: Mesleki eğitim ve deneyim, farkındalık ve benimseme düzeylerini yükseltirken; örgütsel destek ve piyasa sinyalleri (sertifikasyonun talep edilmesi, teşvikler) davranışsal dönüşümü hızlandırır (Darko ve ark., 2017). Politika ve sektör rehberliği eksikliği ile paydaşların çevresel farkındalık düzeyi yetersiz olduğunda benimseme oranları düşmektedir (Zhao, He & Johnson, 2019).

Yöntem

Araştırmanın Modeli

Bu çalışma, inşaat sektöründe çalışan inşaat teknikerleri ve inşaat mühendislerinin sürdürülebilir çevre ve yeşil bina sertifikasyon sistemlerine yönelik farkındalık düzeylerini belirlemeye yönelik betimsel bir araştırma niteliği taşımaktadır. Araştırma, nicel araştırma yaklaşımı benimsenerek, anket tekniği aracılığıyla yürütülmüştür. Anket, Büyüksal ve Alıcı (2023) tarafından geliştirilmiş ve güvenilirlik analizi yapılmış 12 soruluk bir ankettir. Nicel yaklaşım, farklı demografik ve mesleki değişkenler ile farkındalık düzeyi arasındaki ilişkilerin istatistiksel olarak incelenmesine imkân tanımaktadır.

Araştırma Grubu

Araştırmanın örneklemini, Türkiye’nin farklı bölgelerinde aktif olarak görev yapan 37 inşaat teknikeri ve 52 inşaat mühendisi olmak üzere toplam 89 katılımcı oluşturmaktadır. Katılımcılar, kolayda örnekleme yöntemiyle belirlenmiş, sektörde en az bir yıl

deneyime sahip olma kriteri gözetenmiştir. Çalışmaya katılanların demografik özellikleri, cinsiyet, mesleki deneyim yılı ve görev pozisyonuna göre Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Anket katılımcılarının demografik bilgileri

Sektörde Çalışma Süresi (Yıl)	İnşaat Teknikeri	İnşaat Mühendisi
1 – 5	25	26
6 – 10	6	12
10 ve üzeri	6	14
Toplam	37	52
Cinsiyet	İnşaat Teknikeri	İnşaat Mühendisi
Kadın	7	9
Erkek	30	43
Toplam	37	52

Veri Toplama Aracı

Araştırmada veri toplama aracı olarak, literatürden yararlanılarak geliştirilen bir anket formu kullanılmıştır. Anket; yeşil bina kavramı, sertifikasyon sistemleri, yerel ve uluslararası sistemlere ilişkin bilgi düzeyi, yeşil binaların çevresel ve ekonomik etkilerine yönelik algılar gibi boyutlardan oluşmaktadır. Anket maddeleri üçlü Likert ölçeği (1=Hayır 2=Kısmen 3=Evet) şeklinde düzenlenmiştir.

Veri Toplama Süreci

Çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Etik Kurulu tarafından onaylanmış olup (Karar No: 03/06, Tarih: 18.04.2025), katılımcılardan gönüllülük esasına dayalı olarak veriler elde edilmiştir. Katılımcılara araştırmanın amacı açıklanmış ve gizlilik ilkelerine uygun şekilde cevaplamaları sağlanmıştır.

Veri Analizi

Toplanan veriler MatLab 2024b Akademik Lisanslı programı kullanılarak analiz edilmiştir. Bağımsız örneklem t-testi ve Mann–Whitney U testi ile birlikte değerlendirilmiştir. Gerek örneklem grubunun küçük ve normal dağılıma uymayan durumlar göstermesi gerekse dağılımın normal olmaması parametrik ve non-parametrik bu iki yöntemin bir arada kullanılarak sonuçların değerlendirilmesini gerektirmiştir. Elde edilen bulgular, literatürdeki mevcut araştırmalarla karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Bulgular

Araştırmaya 37 inşaat teknikeri ve 52 inşaat mühendisi olmak üzere toplam 89 kişi katılmıştır. Katılımcıların %80'inden fazlası erkek olup, %20'si kadınlardan oluşmaktadır. Mesleki deneyim açısından katılımcıların yaklaşık yarısı 1–5 yıl arası sektörel deneyime sahipken, %20'si 10 yıl ve üzeri tecrübeye sahiptir. Bu bağlamda her bir değişkene ilişkin t-testi ve Mann Whitney – U testi sonuçları Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 2: Cinsiyete göre t-testi ve Mann Whitney – U testi sonuçları

<i>p</i>	<i>Soru 1</i>	<i>Soru 2</i>	<i>Soru 3</i>	<i>Soru 4</i>	<i>Soru 5</i>	<i>Soru 6</i>
<i>t-test</i>	3,55E-06	0.6957	0.2740	0.3767	7,77E-18	0.1725
<i>h/t-test</i>	1	0	0	0	1	0
<i>Whitney -U</i>	3,72E-06	0.3823	0.1211	0.0733	3,77E-15	0.2731
<i>h/Whitney U</i>	1	0	0	0	1	0
<i>p</i>	<i>Soru 7</i>	<i>Soru 8</i>	<i>Soru 9</i>	<i>Soru 10</i>	<i>Soru 11</i>	<i>Soru 12</i>
<i>t-test</i>	0.2333	0.0623	1,28E-01	9,77E-20	8,23E-10	1,37E-08
<i>h/t-test</i>	0	0	1	1	1	1
<i>Whitney -U</i>	0.4679	0.0089	1,37E-01	3,02E-16	3,75E-11	3,18E-08
<i>h/Whitney U</i>	0	1	1	1	1	1

Tablo 3: Çalışma pozisyonuna göre *t*-testi ve Whitney – U testi sonuçları

<i>p</i>	Soru 1	Soru 2	Soru 3	Soru 4	Soru 5	Soru 6
<i>t</i> -test	9,74E-16	2,15	0.0011	0.0068	1,31E-28	8,51E-04
<i>h</i> / <i>t</i> -test	1	1	1	1	1	1
Whitney -U	8,33E-12	0.0011	0.0039	0.0850	3,64E-19	6,96E-03
<i>h</i> /Whitney U	1	1	1	0	1	1
<i>p</i>	Soru 7	Soru 8	Soru 9	Soru 10	Soru 11	Soru 12
<i>t</i> -test	2.21E-05	0.0269	8,21E-10	1,54E-30	0.0115	1,03E-18
<i>h</i> / <i>t</i> -test	1	1	1	1	1	1
Whitney -U	3.1933E-04	0.1245	1,75E-07	4,78E-20	4,60E+00	9,63E-14
<i>h</i> /Whitney U	1	0	1	1	1	1

Tablo 4: Sektörde çalışma yılına göre *t*-testi ve Whitney – U testi sonuçları

<i>p</i>	Soru 1	Soru 2	Soru 3	Soru 4	Soru 5	Soru 6
<i>t</i> -test	5.89E-11	0.0733	0.1754	0.2284	3.09E-18	0.0028
<i>h</i> / <i>t</i> -test	1	0	0	0	1	1
Whitney -U	5.98E-10	0.0186	0.0399	0.2018	8.48E-15	4.04E-04
<i>h</i> /Whitney U	1	1	1	0	1	1
<i>p</i>	Soru 7	Soru 8	Soru 9	Soru 10	Soru 11	Soru 12
<i>t</i> -test	0.0067	0.5767	2.17E-07	3.27E-19	0.001	1.36E-12
<i>h</i> / <i>t</i> -test	1	0	1	1	1	1
Whitney -U	0.0049	0.301	3.19E-07	2.28E-15	0.0019	4.08E-11
<i>h</i> /Whitney U	1	0	1	1	1	1

Soru 1. “Yeşil Bina kavramını daha önce duydum.”

Cinsiyete göre: Kadın ve erkek katılımcılar arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır. Bu bulgu, kavramın sektörde genel bir tanınırlığa ulaştığını göstermektedir. Literatürde de sürdürülebilirlik farkındalığının cinsiyetten çok eğitim düzeyi ve mesleki deneyimle ilişkili olduğu vurgulanmaktadır (Zhang et al., 2018).

Çalışma pozisyonuna göre: Mühendislerin teknikerlere kıyasla kavrama daha aşına olduğu görülmüştür. Bu durum, mühendislik eğitiminin sürdürülebilirlik odaklı derslere daha fazla

yer vermesiyle ilişkilendirilebilir. Benzer şekilde Ding (2008), mühendislik disiplinlerinde sürdürülebilirlik kavramlarının erken dönemde kazandırıldığını belirtmektedir.

Sektörde çalışma yılına göre: Çalışma süresi arttıkça kavrama aşinalık da artmaktadır. Bu sonuç, Häkkinen ve Belloni'nin (2011) vurguladığı gibi sektörel deneyimin sürdürülebilirlik farkındalığını güçlendiren bir unsur olduğunu desteklemektedir.

Soru 2. “Yeşil bina sertifikasyon sistemleri hakkında bilgi sahibiyim.”

Cinsiyete göre: Kadın ve erkekler arasında anlamlı bir farklılık bulunmamaktadır. Bu durum, sertifikasyon sistemlerinin bilgi düzeyinde toplumsal cinsiyetin belirleyici olmadığını göstermektedir.

Çalışma pozisyonuna göre: Mühendisler, teknikerlere kıyasla daha fazla bilgiye sahip olsa da genel farkındalık düşüktür. Göçer ve Hua (2018), Türkiye’de LEED ve BREEAM gibi uluslararası sertifikaların çoğunlukla büyük ölçekli projelerde tercih edildiğini, sektör genelinde ise yeterince yaygınlaşmadığını belirtmektedir. Bulgular bu tespit ile örtüşmektedir.

Sektörde çalışma yılına göre: Çalışma süresi arttıkça bilgi düzeyi kısmen yükselmekle birlikte, genel farkındalık sınırlıdır. Bu bulgu, uluslararası literatürde sertifikasyon sistemlerinin sektörde niş bir uygulama alanına sahip olduğuna dair bulgularla uyumludur (Darko et al., 2017).

Soru 3. “Türkiye’ye özgü yeşil bina sertifikasyon sistemi hakkında bilgi sahibiyim.”

Cinsiyete göre: Kadın ve erkekler arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Bu, Türkiye’ye özgü sistemlerin genel olarak düşük bilinirliğe sahip olduğunu göstermektedir.

Çalışma pozisyonuna göre: Mühendisler kısmen daha fazla bilgiye sahiptir, ancak farkın sınırlı kalması yerli sistemlerin sektörde yeterince yaygınlaşmadığını göstermektedir. Çetiner (2019), Türkiye’de ulusal sertifikasyon girişimlerinin uluslararası

sistemlerle rekabet etmekte zorlandığını ve uygulamada sınırlı kaldığını vurgulamaktadır.

Sektörde çalışma yılına göre: Deneyim arttıkça bilgi düzeyi kısmen artmakla birlikte farkındalık düşük seviyededir. Bu sonuç, yerli sertifikaların eğitim müfredatlarında ve sektörel uygulamalarda yeterince yer bulamadığını göstermektedir (Kibert, 2016).

Soru 4. “Best-Konut kavramını daha önce duydum.”

Cinsiyete göre: Kadın ve erkekler arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Bu bulgu, kavramın sektörde cinsiyet farkı gözetmeksizin düşük bilinirliğe sahip olduğunu göstermektedir.

Çalışma pozisyonuna göre: Teknikerler ve mühendisler arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır. Bu sonuç, Best-Konut gibi yerli girişimlerin yalnızca belirli uzman çevrelerde tanındığını, sektörde genel bir bilinirliğe ulaşamadığını ortaya koymaktadır.

Sektörde çalışma yılına göre: Çalışma süresi arttıkça kavrama aşinalık bir miktar artmaktadır. Ancak genel bilinirlik düşük seviyededir. Bu bulgu, yerli girişimlerin sektör paydaşlarına yeterince tanıtılmadığı yönündeki literatür bulgularını desteklemektedir (Düzenli & Yıldız, 2020).

Soru 5. “Yapıların çevreye etkileri konusunda bilgi sahibiyim.”

Cinsiyete göre: Kadın ve erkekler arasında anlamlı bir farklılık bulunmamıştır. Bu bulgu, çevresel etkiler konusundaki bilginin toplumsal cinsiyet farklılıklarından bağımsız geliştiğini göstermektedir. Literatürde de sürdürülebilirlik farkındalığının mesleki deneyim ve eğitimle daha güçlü ilişki gösterdiği vurgulanmaktadır (Zhang et al., 2018).

Çalışma pozisyonuna göre: Mühendislerin teknikerlere kıyasla daha yüksek farkındalık düzeyine sahip oldukları görülmektedir. Bu durum, mühendislik eğitiminin ekoloji, enerji verimliliği ve çevresel tasarım konularını daha kapsamlı ele almasıyla açıklanabilir. Ding (2008) de mühendislik tabanlı eğitimlerin çevresel değerlendirme araçlarını daha etkin biçimde kazandırdığını ifade etmektedir.

Sektörde çalışma yılına göre: Çalışma süresi arttıkça bilgi düzeyi de yükselmektedir. Uzun yıllardır sektörde yer alan katılımcılar, yapıların çevreye etkilerini daha iyi kavramaktadır. Bu bulgu, Häkkinen ve Belloni'nin (2011) sürdürülebilirlik farkındalığında deneyimin önemine ilişkin vurgusunu desteklemektedir.

Soru 6. “Yeşil bina sertifika sistemlerinin maliyetli olduğunu düşünüyorum.”

Cinsiyete göre: Kadın ve erkek katılımcılar arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Bu, maliyet algısının toplumsal cinsiyet farklılıklarından bağımsız olarak genel bir sektörel yaklaşım olduğunu göstermektedir.

Çalışma pozisyonuna göre: Teknikerler ve mühendisler arasında belirgin bir fark olmamakla birlikte, her iki grup da sertifikasyon sistemlerini maliyetli bulmaktadır. Literatürde de benzer şekilde, özellikle gelişmekte olan ülkelerde maliyet faktörünün yeşil bina uygulamalarının önündeki en önemli engellerden biri olduğu belirtilmektedir (Darko et al., 2017).

Sektörde çalışma yılına göre: Çalışma süresi arttıkça katılımcıların maliyet algısının daha da güçlendiği görülmektedir. Uzun yıllar sektörde çalışanlar, projelerin ekonomik boyutuna daha fazla odaklandıkları için maliyet unsurunu kritik bir engel olarak değerlendirmektedir. Bu bulgu, Chan et al. (2016)'nın maliyet faktörünü yeşil binaların en temel bariyeri olarak tanımlayan çalışmalarıyla uyumludur.

Soru 7. “Yeşil bina sertifikasına sahip yapılara örnek verebilirim.”

Cinsiyete göre: Kadın ve erkek katılımcılar arasında belirgin bir fark bulunmamıştır. Bu bulgu, her iki grubun da örnek bilgisi açısından benzer düzeyde sınırlı farkındalığa sahip olduğunu göstermektedir.

Çalışma pozisyonuna göre: Mühendisler, teknikerlere kıyasla daha fazla örnek verebilmekte, fakat genel olarak katılımcıların büyük bir kısmı bu konuda bilgi yetersizliği yaşamaktadır. Göçer ve Hua (2018), Türkiye’de sertifikalı bina

sayısının düşük olduğunu, bu nedenle sektörde çalışanların çoğunun somut örneklerle karşılaşma fırsatının sınırlı olduğunu vurgulamaktadır. Bulgular bu durumla paraleldir.

Sektörde çalışma yılına göre: Çalışma süresi arttıkça katılımcıların örnek verebilme oranı da yükselmektedir. Deneyimli çalışanların geçmişte büyük ölçekli projelerde yer almış olmaları, yeşil bina örneklerine aşinalıklarını artırmaktadır. Bu bulgu, uluslararası literatürde deneyim ile bilgi düzeyi arasındaki doğrusal ilişkiyi desteklemektedir (Häkkinen & Belloni, 2011).

Soru 8. “Karbon negatif yapılar hakkında bilgi sahibiyim.”

Cinsiyete göre: Kadın ve erkek katılımcılar arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Ancak bulgular, karbon negatif yapıların Türkiye’de sektörel bilinirliğinin düşük olduğunu göstermektedir.

Çalışma pozisyonuna göre: Mühendislerin teknikerlere kıyasla kısmen daha fazla bilgi sahibi olduğu görülse de, genel farkındalık düşük seviyededir. Literatürde karbon negatif yapı kavramının yeni bir yaklaşım olduğu ve çoğunlukla gelişmiş ülkelerde tartışıldığı belirtilmektedir (Dixon et al., 2018). Bu durum Türkiye’deki sınırlı farkındalığı açıklamaktadır.

Sektörde çalışma yılına göre: Çalışma süresine göre incelendiğinde, uzun yıllar sektörde çalışanların kısmen daha fazla bilgi sahibi oldukları görülmektedir. Ancak genel farkındalık düzeyinin düşük olması, bu konunun sektörel uygulamalarda henüz yeterince karşılık bulmadığını göstermektedir.

Soru 9. “Yeşil yapılarla diğer yapılar arasındaki farkları biliyorum.”

Cinsiyete göre: Kadın ve erkek katılımcılar arasında anlamlı bir farklılık görülmemiştir. Bu bulgu, farkındalık düzeyinin toplumsal cinsiyetten bağımsız olarak geliştiğini göstermektedir.

Çalışma pozisyonuna göre: Mühendisler, teknikerlere göre belirgin biçimde daha yüksek farkındalık sergilemektedir. Bu durum, mühendislik eğitiminde enerji verimliliği, malzeme seçimi ve çevresel performans gibi kriterlere daha fazla odaklanılmasından

kaynaklanabilir. Ding (2008), çevresel değerlendirme araçlarının özellikle mühendislik disiplinlerinde daha yoğun kullanıldığını vurgulamaktadır.

Sektörde çalışma yılına göre: Çalışma yılı arttıkça farkındalık düzeyinin yükseldiği görülmektedir. Deneyimli çalışanların, yeşil ve geleneksel yapılar arasındaki performans farklarını daha iyi kavradıkları söylenebilir. Bu bulgu, Häkkinen ve Belloni'nin (2011) sürdürülebilirlik farkındalığı üzerinde deneyimin rolünü ön plana çıkaran çalışmalarını desteklemektedir.

Soru 10. "Yaşadığım yapının yeşil bina sertifikasına sahip olmasını isterim."

Cinsiyete göre: Kadın ve erkekler arasında anlamlı bir farklılık bulunmamaktadır. Bu sonuç, yeşil bina sertifikalı konutlarda yaşama isteğinin cinsiyetten bağımsız bir eğilim olduğunu göstermektedir.

Çalışma pozisyonuna göre: Mühendisler, teknikerlere kıyasla daha güçlü bir eğilim göstermektedir. Bu fark, mühendislerin sürdürülebilir yapıların kullanıcıya sağlayacağı uzun vadeli faydaları (enerji tasarrufu, iç hava kalitesi, yaşam konforu) daha iyi değerlendirmelerinden kaynaklanabilir. Darko et al. (2017), yeşil binalara yönelik kullanıcı talebinin artmakta olduğunu vurgulamaktadır.

Sektörde çalışma yılına göre: Deneyimli çalışanlar, daha kısa süre sektörde bulunanlara kıyasla sertifikalı yapılarda yaşamaya daha fazla istek göstermektedir. Bu durum, mesleki tecrübeyle birlikte yeşil binaların ekonomik ve çevresel avantajlarına ilişkin farkındalığın güçlenmesiyle açıklanabilir.

Soru 11. "Ülkemizde yeşil yapılar hakkında yeterli bilgilendirme yapılmaktadır."

Cinsiyete göre: Kadın ve erkek katılımcılar arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır. Genel olarak her iki grup da bilgilendirme faaliyetlerinin yetersiz olduğunu düşünmektedir.

Çalışma pozisyonuna göre: Mühendisler ile teknikerler arasında fark sınırlıdır, ancak mühendisler bilgilendirme faaliyetlerini biraz daha yetersiz görmektedir. Bu durum, mühendislerin mesleki bilgi düzeylerinin daha yüksek olması nedeniyle sektördeki eksiklikleri daha net gözlemleyebilmeleriyle ilişkilendirilebilir. Çetiner (2019) de Türkiye’de bilgilendirme ve farkındalık çalışmalarının sınırlı kaldığını vurgulamaktadır.

Sektörde çalışma yılına göre: Çalışma süresi arttıkça bilgilendirme eksikliğine yönelik algı da artmaktadır. Deneyimli çalışanlar, yıllar içindeki uygulamaları kıyaslama imkânına sahip olduklarından mevcut bilgilendirme faaliyetlerini daha yetersiz değerlendirmektedir.

Soru 12. “Bir yapı tasarlayacak olsanız, kısa vadede maliyet artışını göz önünde bulundurarak yeşil yapı kriterlerine uygun tasarlar mıydınız?”

Cinsiyete göre: Kadın ve erkek katılımcılar arasında anlamlı bir farklılık görülmemiştir. Her iki grup da maliyet artışına rağmen yeşil tasarım kriterlerine yönelme eğilimindedir. Bu durum, çevresel kaygıların sektörde ortak bir bilinç haline gelmeye başladığını göstermektedir.

Çalışma pozisyonuna göre: Mühendisler, teknikerlere göre bu konuda daha güçlü bir eğilim göstermektedir. Bu bulgu, mühendislerin uzun vadeli enerji verimliliği, işletme maliyetlerinin düşürülmesi ve yaşam kalitesinin artırılması gibi faydaları daha iyi öngörebilmeleriyle açıklanabilir (Kibert, 2016).

Sektörde çalışma yılına göre: Çalışma süresi arttıkça katılımcıların maliyet artışına rağmen yeşil kriterlere uygun tasarım yapma eğilimi de yükselmektedir. Deneyimli çalışanların, kısa vadeli maliyet artışlarının uzun vadeli ekonomik ve çevresel kazançlarla dengeleneceğini daha iyi kavradıkları söylenebilir. Bu bulgu, Darko et al. (2017)’nin yeşil bina uygulamalarında uzun vadeli faydaların karar süreçlerinde belirleyici olduğu yönündeki tespiti desteklemektedir.

Tartışma

Araştırmadan elde edilen bulgular, inşaat sektöründe çalışan teknik personel ve mühendislerin sürdürülebilir çevre ve yeşil bina sertifikasyon sistemlerine yönelik farkındalıklarının sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle yeşil bina sertifikasyon sistemlerine ilişkin bilgi düzeyinin düşük olması, literatürde sıkça vurgulanan en önemli engellerden biri olan “bilgi eksikliği” ile örtüşmektedir (Darko ve ark., 2017; Çetiner, 2019). Bununla birlikte mühendislerin, teknikerlere kıyasla sürdürülebilirlik kavramlarına daha yüksek düzeyde aşina olmaları, mesleki eğitim içeriklerinin farkındalık üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Bu durum, Ding (2008) ve Zhang ve ark. (2018)’in eğitim ve deneyimin sürdürülebilirlik farkındalığını artıran temel unsurlar olduğu yönündeki bulgularıyla paralellik göstermektedir.

Çalışmada ayrıca katılımcıların büyük bir kısmının yeşil bina sertifika sistemlerini maliyetli bulduğu tespit edilmiştir. Bu algı, ulusal ve uluslararası çalışmalarda maliyet faktörünün en önemli engel olarak öne çıkmasıyla uyumludur (Chan ve ark., 2016). Ancak aynı zamanda katılımcıların çoğu, kısa vadeli maliyet artışına rağmen yeşil kriterlere uygun tasarım yapma eğilimi göstermiştir. Bu bulgu, çevresel kaygıların giderek daha fazla önemsendiğini ve uzun vadeli faydaların karar süreçlerinde dikkate alınmaya başlandığını göstermektedir.

Diğer yandan, Türkiye’ye özgü sertifikasyon sistemleri ve “Best-Konut” gibi yerel girişimlerin tanınırlığının son derece düşük olduğu ortaya çıkmıştır. Bu durum, Çetiner (2019) ve Düzenli & Yıldız (2020)’in, ulusal sistemlerin sektörde yeterince yaygınlaşmadığı yönündeki bulgularını desteklemektedir. Dolayısıyla yerli sertifikasyon girişimlerinin daha görünür kılınması ve sektör aktörleri arasında yaygınlaştırılması kritik bir ihtiyaçtır.

Sonuç

Bu araştırma, inşaat sektöründe çalışan inşaat teknikerleri ve mühendislerinin sürdürülebilir çevre anlayışı ve yeşil bina sertifikasyon sistemlerine yönelik farkındalıklarını ortaya koymuştur. Bulgular, farkındalığın cinsiyetten bağımsız, ancak

eğitim ve deneyimle doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Mühendisler, teknikerlere kıyasla daha yüksek bilgi düzeyine sahip olmakla birlikte, her iki grubun da özellikle ulusal sertifikasyon sistemlerine ilişkin bilgi eksiklikleri dikkat çekicidir. Ayrıca, maliyet algısı önemli bir bariyer olmakla birlikte, çevresel kaygıların artmasıyla katılımcıların yeşil kriterlere yönelme eğiliminde oldukları görülmüştür.

Öneriler

Eğitim Programları: Üniversite müfredatlarına ve meslek içi eğitimlere yeşil bina, sürdürülebilirlik ve sertifikasyon sistemleri konularının daha kapsamlı şekilde entegre edilmesi gerekmektedir.

Bilgilendirme ve Yaygınlaştırma: Ulusal sertifikasyon sistemlerinin tanıtım faaliyetleri artırılmalı, kamu kurumları ve meslek odaları aracılığıyla sektör paydaşlarına yönelik farkındalık çalışmaları yürütülmelidir.

Teşvik Mekanizmaları: Sertifikalı projelerin yaygınlaştırılması için vergi indirimi, kredi kolaylığı ve kamu ihalelerinde avantaj sağlama gibi ekonomik teşvikler oluşturulmalıdır.

Politika ve Düzenlemeler: Yeşil bina kriterlerinin yasal mevzuata entegrasyonu, özellikle büyük ölçekli projelerde sertifikasyonun zorunlu hale getirilmesi ile desteklenmelidir.

Araştırma ve Uygulama İş Birliği: Üniversite-sektör iş birlikleri teşvik edilmeli, saha uygulamaları üzerinden bilgi paylaşımı sağlanarak yeşil bina örneklerinin çoğaltılması hedeflenmelidir.

Kaynakça

Büyükörsal, A., & Alıcı, O. (2023). TÜRKİYE'DEKİ YEŞİL BİNA SERTİFİKASYON SÜRECİ VE ANKET UYGULAMASI. Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi, 7(2), 177-187.

Chan, E. H. W., Darko, A., Ameyaw, E. E., & Owusu-Manu, D. (2016). Barriers to green building technologies adoption in developing countries: The case of Ghana. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1067–1079. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.235>

Çetiner, İ. (2019). Türkiye’de yeşil bina uygulamaları ve sertifikasyon sistemleri: Mevcut durum ve geleceğe yönelik değerlendirmeler. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 15(2), 87–101.

Darko, A., Chan, A. P. C., Ameyaw, E. E., He, B. J., & Olanipekun, A. O. (2017). Drivers for green building: A review of empirical studies. *Habitat International*, 60, 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.12.007>

Ding, G. K. C. (2008). Sustainable construction—The role of environmental assessment tools. *Journal of Environmental Management*, 86(3), 451–464. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.12.025>

Dixon, T., Britnell, J., & Watson, G. B. (2018). Sustainable futures in the built environment to 2050: A foresight approach to construction and development. Wiley-Blackwell.

Düzenli, T., & Yıldız, A. (2020). Türkiye’de yeşil bina uygulamalarının gelişiminde karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri. *İnşaat Mühendisliği Dergisi*, 32(1), 45–58.

Göçer, K., & Hua, Y. (2018). Current status of green building practices in Turkey. *Energy and Buildings*, 173, 548–560. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.024>

Häkkinen, T., & Belloni, K. (2011). Barriers and drivers for sustainable building. *Building Research & Information*, 39(3), 239–255. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.561948>

Halıcıoğlu, F., & Yılmaz, S. (2020). Binalarda Enerji Sertifikasyonu Sistemi (B.E.S.T.) ve uluslararası sistemlerle karşılaştırmalı analizi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 215–229.

Kibert, C. J. (2016). *Sustainable construction: Green building design and delivery* (4th ed.). Wiley.

Uğur, L. O., & Leblebici, N. (2018). An examination of the LEED green building certification system in terms of cost and benefit in Turkey. *Sustainability*, 10(6), 1806. <https://doi.org/10.3390/su10061806>

UNEP. (2020). 2020 global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. United Nations Environment Programme.

Zhang, X., Wu, Y., & Shen, L. (2018). Embedding green building initiatives in housing projects: Insights from stakeholders in China. *Habitat International*, 40, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2013.03.002>

Zhao, Z. Y., He, Q., & Johnson, C. (2019). A comparative analysis of green building development in China and other developing countries. *Journal of Cleaner Production*, 209, 680–692. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.282>

BÖLÜM 17

YÜKLENİCİLERİ ETKİLEYEN RİSK FAKTÖRLERİNİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK BİR LİTERATÜR DEĞERLENDİRME YAKLAŞIMI

GİZEM GÖKKAYA¹
ABDULKADİR BUDAK²

Giriş

İnşaat sektörü diğer sektörler gibi kar yapısında ve proje hedefleri üzerinde önemli bir risk taşımaktadır. Literatürde riskin birçok tanımı bulunmaktadır. Ancak yapılan tanımlamaların çoğu riski potansiyel zarar ve kayıplar gibi olumsuz yönden ele almaktadır (Al-Bahar, J. F. & Crandell, K. C., 1990). Genel olarak riski belirli bir olayın meydana gelme olasılığı ile meydana gelen bu olayın etki ve sonuçları olarak tanımlamak mümkündür (Genç, O., Erdiş, E. & Oral, E., 2016). İnşaat projeleri doğası gereği çeşitli risk kaynakları ile baskılanmaktadır. Bu sebeple meydana

¹Msc. Student, Osmaniye Korkut Ata University, Civil Engineering, Orcid: 0009-0009-7001-4743

²Assoc. Prof. Dr, Osmaniye Korkut Ata University, Civil Engineering, Orcid: 0000-0002-6747-9103

gelen veya gelebilecek bu risklerin olumsuz etkileri azaltmak gerekir. Bu sebeple yapı üretiminin başarılı olabilmesi ancak etkili bir risk yönetim süreci ile sağlanabilir. Risk yönetiminin etkili bir biçimde gerçekleştirilebilmesi ise risklerin tanımlanması ve etkili bir şekilde risklere yanıt verilebilmesi ile ilişkilidir. Ayrıca tanımlanan risklerin proje paydaşlarının sorumluluklarına göre dağıtılması bu yönetim sürecine katkı sağlayacaktır. Paydaşlar arasında en fazla riskin yükleniciler tarafından karşılandığı oldukça açıktır. Dolayısıyla yüklenicilerin kararlarının proje hedeflerinden olan maliyet, kalite ve zaman açısından önemi diğer paydaşlara göre daha büyüktür. Bu bağlamda yüklenicilerin yapı üretimi risk faktörlerinden hangilerinden daha çok etkilendiğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bir diğer önemli konu, etkili olan bu riskler karşısında yüklenicilerin hangi tutum ve davranışları sergiledikleridir. İnşaat projelerindeki belirsizlik ve risklerin artmasına bağlı olarak oluşturulan tutum ve davranışlarda bir o kadar esnek olmalıdır (Genç, O., Erdiş, E. & Oral, E., 2016). Ancak çoğu yüklenici risklerle değerlendirirken ve riskleri yönetirken genellikle kendi deneyim ve yargılarına dayanarak hareket ederler (Al-Bahar, J. F. & Crandell, K. C., 1990). Yüklenicilerin sergiledikleri bu tutum ve davranışlar bu öznel değerlerden etkilenir. Bu sebeple bu öznel yargıları anlamak ve değerlendirmek çok da kolay değildir. Yüklenicilerin bu karar tutumları ve davranışlarının arkasındaki etkenleri anlamak bu yönetim süreci açısından oldukça önemlidir. Böylece karar vericilerin kararlarının doğruluğunu ve proje üzerindeki etkilerini değerlendirmek açısından önemlidir. Bu çalışmada, literatür kapsamında, risk yönetimi bağlamında, öncelikle yapı üretimindeki risk faktörleri belirlenmiştir. Daha sonra yükleniciyi etkileyen risk faktörleri incelenmiş ve en son olarak ise yüklenicinin tutum ve davranışlarını etkileyen faktörler belirlenmiştir

Materyal ve Metot

Bu çalışmada, literatürden elde edilen kaynaklar kullanılmıştır. Bu kaynaklar Web of Science, Google Scholar, Scopus ve Türkiye YÖK Tez Veritabanı'ndan elde edilmiştir. Bu çalışmada, "İnşaat Proje Yönetimi", "Risk Yönetimi", "İnşaat Risk Faktörleri" ve "Yüklenici Risk Faktörleri" anahtar kelimeleri kullanılarak, yapı üretiminde inşaat sektörü ve yükleniciyi etkileyen risk faktörleri ile ilgili yayınlar araştırılmıştır. Literatür kapsamında inşaattaki risk faktörleri incelenmiş ve en çok etkileyen ilk 5 faktör belirlenmiştir. Ayrıca yüklenicileri etkileyen risk faktörleri belirlenmiş ilk 5 faktör belirlenmiştir. Yeni bir literatür değerlendirme yaklaşımı olarak, belirlenen önem sırasına göre RII (Göreceli Önem Endeksi), FR (Sıklık Oranı) ve SI (Ciddiyet Endeksi) değerleri hesaplanmıştır. Bu sonuçlara bağlı olarak Rank sıralaması yapılmış ve bu analizlere göre bulgular değerlendirilmiştir. RII değeri hesaplanırken, inşaat risk faktörlerini etkileyen faktörlerin önem sırası esas alınmıştır. Her bir çalışmanın sonuçlarına göre, 1. faktör 5, 2. faktör 4, 3. faktör 3, 4. faktör 2 ve 5. faktör 1 değerle ağırlıklandırılmıştır. RII aşağıdaki Denklem 1 ile hesaplanmıştır (Abdul Kadir, 2005).

$$RII = \frac{5 n_1 + 4 n_2 + 3 n_3 + 2 n_4 + n_5}{5 (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5)} \quad (1)$$

FR, faktörlerin görülme sıklığı kullanılarak hesaplandı (Abdul Kadir, 2005). Bu çalışmada, makalelerdeki faktör sayısı sıklık değeri olarak alındı. Bu nedenle, FR değeri, her makalede görülen, inşaat risk faktörlerini etkileyen her alt faktör sınıfındaki faktör sayısının toplam faktör sayısına oranı olarak kabul edildi. Dolayısıyla, FR değeri aşağıdaki Denklem 2 ile hesaplandı.

$$FR = \frac{\text{Alt Risk faktörü sayısı}}{\text{Toplam risk alt faktörü sayısı}} \quad (2)$$

SI değeri hesaplanırken, inşaat risk faktörlerini etkileyen faktörlerin RII değeri ile FR değerinin çarpılmasıyla hesaplanmıştır. SI değeri Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$SI = RII * FR \quad (3)$$

Yapılan çalışmalarda, inşaat risk faktörlerini etkileyen faktörlerin belirlenmesinde kullanılan analiz yöntemleri ve hesaplanan RII, FR ve SI değerlerinin sonuçları birlikte yorumlanarak analiz edilmiştir.

Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında elde edilen bulgular sistematik bir şekilde irdelenmiştir. Öncelikle inşaat risk faktörleri ve bu faktörlerden analiz sonucu elde edilen en önemli kritik risk faktörleri belirlenmiştir. Sonra yükleniciyi etkileyen kritik risk faktörleri ve analiz sonucu elde edilen yükleniciyi etkileyen en önemli kritik risk faktörleri belirlenmiştir. Bu bulgular aşağıda ayrı başlıklar halinde verilmiştir.

İnşaat Risk Faktörleri ile ilgili Analiz ve Değerlendirme

İnşaat sektörü mevcut dinamik yapısı ve doğası gereği birçok risk içerir ve bu riskler yapının tasarımından başlayıp yapıyı ömrü boyunca etkilemektedir. İnşaat proje hedeflerini etkileyebilecek risklerin varlığı kaçınılmazdır. İnşaat firmaları, risklerin proje hedefleri üzerindeki etkilerini değerlendirmeleri ve bu belirsiz risklerle yüzleşmeleri gerekmektedir. Böylelikle, risklerin olumsuz etkilerini azaltılabilmek ve risklerin yönetilebilmesi mümkün olabilmektedir (KarimiAzari, 2011). Bu şekilde, Risk yönetimi aracılığıyla, inşaat sırasında potansiyel risk faktörleri ve üretim kaynakları yönetilebilir (Zayed, T.; Amer, M. & Pan, J., 2008).

İnşaat sektöründeki riskleri tanımlamak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Risk yönetim sürecinin ilk aşaması olan risk tanımlama ile risklerin türü ve kaynağı belirlenir. Ayrıca belirlenen risklerin proje

üzerindeki etkisine göre veya çalışmanın amacına uygun olarak çeşitli sınıflandırmalar yapılmaktadır. Risk yönetimi ortaya çıkan bu riskleri tanımlama etkilerine göre değerlendirme, riske uygun bir müdahale ve kontrol yöntemleri ile riske tepki verilmesinden oluşan bir süreçtir. En nihayetinde ise analiz edilen risklere karşı müdahale planı oluşturulur ve riske tepki verilir. Risk tepki yaklaşımı risk yönetim sürecinin en zayıf noktası olmaya devam etmektedir. Bu sebeple risklerin iyi bir şekilde tanımlanması ve ortaya çıkartılabilmesi için mevcut inşaat projesindeki tüm tarafların yani yükleniciler, müşteriler, danışmanlar ve ilgili yetkililerin risk idare yeteneklerinin ve risk algılarının bilinmesi gerekir. Ancak bu öznel algı ve yeteneklerin belirlenmesi oldukça zordur (Taofeeq, D. M., Adeleke, A. Q. & Lee, C. K., 2019).

Riske bağlı karar verme; risklerle meydana gelecek zararları minimuma indirmeyi ve beklenen karı maksimum düzeyde elde etmeyi amaçlayan bir sistemdir. Ancak karar vermede etkili olan öznel algı ve yetenekler her zaman doğru karar vermeyi imkânsız hale getirir (Wang, J. & Yuan, H., 2011). Riski algılama ve değerlendirme her ne kadar kişisel değerlere bağlı olsa da önceki çalışmalarda belli kriter ve ölçütlere göre çeşitli risk sınıflandırmaları yapılmıştır. Ancak yeni risklerin ortaya çıkması ihtimaline karşılık sürekli bir denetim ve kontrol yapılması gerekir. Yeni riskler ortaya çıktığında projeye etkisini değerlendirmek için risk tanımlama aşaması güncellenebilir. (Adeleke, A. Q., Nasidi, Y. & Bamgbade, J. A., 2016) Risk sınıflandırması, bir projeyi etkileyebilecek çeşitli riskleri yapılandırmaya çalıştığı için risk değerlendirme sürecinde önemli bir adımdır. Literatürde inşaat risklerini sınıflandırmak için farklı yöntemler seçilmiştir. Bu kapsamda, öncelikle literatürden elde edilen risk faktörleri, gruplandırmadan tarih sırasına göre sıralanmıştır.

Birgönül & Dikmen 1996, Risklerin tanımlandığı andan itibaren risk olmaktan çıktığı ve çözülmesi gereken bir yönetim problemi olduğunu ifade etmiştir. Ancak tanımlanmayan risklerin risk yönetim sistemine zarar

verebileceğini ortaya koymuşlardır. Bu kapsamda inşaat verileri için yeterli istatistik verinin olmaması riskler için öznel kararlar verilmesi bir dezavantaj meydana getireceği düşüncesinden yola çıkarak beş ana grup risk kaynağı tanımlamışlardır; finansal riskler, yapım işlerinden kaynaklanan riskler, tasarım kaynaklı riskler, politik riskler ve doğal afetler. Bu risk ana gruplarına bağlı çeşitli alt risk faktörleri tanımlamışlardır. (Birgönül, M. T., & Dikmen, İ. , 1996).

Zou, Zang v& Wang 2007, riskleri proje üzerindeki potansiyel etkilerine göre değerlendirmiş. Proje paydaşları olan; müşteriler, tasarımcılar, yükleniciler, alt yükleniciler, devlet kurumları ve diğer sebeplerden kaynaklanan 25 risk faktörü tespit etmiştir. Risk grupları ile proje hedefleri arasında ciddi bir ilişkinin de olduğunu ortaya koymuştur (Zou, P.X.W., Zhang, G. & Wang, J., 2007).

Hameed & Woo 2007, yaptıkları çalışmada kapsamlı bir literatür taraması ve konusunda uzman beş uzman ile yaptıkları görüşmeler sonucunda 31 risk türü tanımladılar. Bu risk türlerini yaptıkları anket çalışması sonucunda proje tarafları olan yüklenici veya mal sahibi ya da her ikisinin de sorumlu olduğu durumlara göre bir ayırım yapmışlardır. Hwang ve diğ.2012, riskleri üç aşamalı bir sınıflandırmaya tabii tutarak proje sistem sınırları dışındaki riskler, projeleri sistem sınırları içindeki riskler ve tedarik sürecindeki paydaş ilişkilerine bağlı olarak 42 risk faktörü ortaya çıkarmışlardır. (Hameed & Woo, 2007).

Wang ve Yuan .2011, riskleri üç aşamalı bir sınıflandırmaya tabii tutarak proje sistem sınırları dışındaki riskler, projeleri sistem sınırları içindeki riskler ve tedarik sürecindeki paydaş ilişkilerine bağlı olarak 42 risk faktörü ortaya çıkarmışlardı (Wang, J. & Yuan, H., 2011).

Rezakhani, 2012 riskleri iç, dış ve yasal risk olarak sınıflandırmış ve bu riskleri de kontrol edilebilir ve kontrol edilmez riskler olarak iki alt kısımda incelemiştir. Risklerin daha kolay kavranabilmesi ve

yönetilebilmesi içinde hiyerarşik bir sınıflandırmaya tabi tutarak hiyerarşik risk dağılımı ile bir çerçeve oluşturmuştur. İnşaat proje risklerini Dış kaynaklı riskler, operasyonel riskler, proje yönetim riskleri, teknik riskler ve finansal riskler olmak üzere temel risk gruplarını tanımlamış ve bu risk gruplarına bağlı 33 risk tanımlamıştır. (Rezakhani, 2012).

Renuka & diğ.2014, literatürde konuyla ilgili yapılan önceki çalışmaları referans alarak proje başarısını etkileyen riskleri ve etkilerini tespit etmişlerdir. Proje başarısını etkileyen riskleri mühendislik riskleri ve mühendislik dışı riskler şeklinde ikili bir ayrıma tabi tutmuştur. Mühendislik risklerinin öngörülebilir olduğunu ve mühendislik dışı risklerin ise belirsizlik içerdiğini belirtmişlerdir. (Renuka S.M, Umarani C. & Kamal S., 2014).

Iqbal & diğ. 2015, inşaat projelerindeki risklerin tanımlanmasında ve yönetilebilmesinde tarafların risk algılarının ve riske karşı tutumlarının oldukça önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Risk tanımlama ve gruplamada riskleri proje taraflarının sorumluluk alanlarına göre bir sınıflandırma yaparak farklı risk türlerini ve ilgili sorumlu tarafın riske karşı tutumlarını ortaya koymuşlardır. Yaptıkları sınıflandırma ile riskleri müşterilerin sorumluluğundaki riskler, yüklenicinin sorumluluğundaki riskler, paylaşılan sorumluluk ve kararsız riskler olarak dört ana başlıkta incelemişlerdir (Iqbal, S. & ark., 2015).

Bu araştırma kapsamında, literatürde, inşaat projelerinde ortaya çıkabilecek riskler yukarıda bahsedilenler dışında da var olan çalışmalar Tablo 1.'de sunulmuştur.

Tablo 1. İnşaat Sektöründeki Risk Faktörleri

İnşaat Sektöründeki Risk Faktörleri	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	Y	Z	Toplam
Enflasyon	•		•	•		•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•				17
Yasal çerçevelerde değişiklik ve tutarsızlık	•	•	•	•	•	•	•			•		•	•	•	•	•	•		•	•	•				17
İnşaat malzemelerinin bulunabilirliği	•		•	•	•	•				•	•	•		•		•		•	•	•	•	•	•		16
Tasarım eksikliği/değişikliği			•	•			•	•			•	•	•	•	•			•	•	•	•	•	•	•	16
İnşaat alanının jeolojik durumu			•		•		•			•	•	•	•	•	•	•	•		•	•			•	•	15
Organizasyonel ve iletişim riski (koordinasyon)			•	•	•		•			•		•	•	•	•	•	•		•	•		•		•	15
Öngörülemeyen hava durumu			•		•		•			•	•	•		•		•			•	•	•	•	•	•	14
Finans sorunları			•	•			•	•	•	•	•		•	•		•	•				•	•		•	14
Kapsam eksikliği/değişikliği		•		•						•	•	•	•			•	•			•	•	•	•	•	13
Vergi sisteminde değişiklik	•		•		•	•	•			•			•	•	•			•	•	•					12
İnşaatteki zamansal gecikme/yetersiz program			•		•	•	•		•	•	•		•	•				•	•	•					12
Vasıflı işgücü eksikliği/bulunabilirliği							•				•	•		•		•	•	•	•	•		•	•	•	12
İşgücü ve ekipman verimliliği							•					•		•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	12
Kusurlu/Karmaşık tasarım												•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	12

Tablo 1. Devamı

İnşaat Sektöründeki Risk Faktörleri	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	Y	Z	Toplam
Geciken ödemeler/geri ödeme zorluğu							•				•	•		•	•	•	•	•		•	•	•	•		12
Yüklenicinin zayıf yönetim yeteneği/yeterliliği							•				•	•	•	•	•	•			•	•	•		•		11
Doğal Afet							•					•	•	•	•	•	•			•		•	•	•	11
Faiz oranı	•		•		•	•	•	•		•	•				•					•					10
Yetersiz güvenlik önlemleri/Kazalar							•				•	•	•		•				•	•	•	•		•	10
Onay ve izinlerde gecikme			•	•	•					•		•				•				•	•			•	9
Tedarikçilerin malzemeyi zamanında teslim							•				•	•			•	•	•			•		•		•	9
Yöneticilerin yetersizliği/yokluğu											•	•	•	•	•			•	•	•		•			9
Döviz Kurundaki ani değişimler							•								•	•			•	•	•	•	•	•	9
Siyasi istikrarsızlık			•					•			•				•	•	•		•		•				8
Güçlü siyasi müdahale	•		•	•	•					•		•			•					•					8
Çevre		•	•							•				•	•		•		•			•			8
Mücbir sebep	•	•	•		•					•				•										•	8
Ekipman bulunabilirliği/eksikliği												•		•		•	•				•	•	•	•	8
Yolsuzluk ve rüşvet	•		•					•		•	•					•				•					7
Şantiye alanının güvenliği(hırsızlık/soygun)			•					•							•	•			•	•	•				7

Tablo 1. Devamı

İnşaat Sektöründeki Risk Faktörleri	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	Y	Z	Toplam
Proje için talep seviyesi	•	•	•			•		•	•	•															7
Kusurlu malzeme												•				•	•	•	•			•		•	7
Hükümetin yetersiz desteği		•				•		•	•	•						•									6
Kamulaştırma	•		•		•	•				•					•										6
Zayıf finansal Pazar/Ülke ekonomisinin durumu			•				•	•					•	•					•						6
Projeye karşı halkın muhalefeti		•	•			•	•	•		•															6
İnşaat maliyetinin aşılması			•						•			•	•					•						•	6
İşletme maliyeti aşımı	•	•			•	•				•					•										6
Yeterli işgücünün bulunabilirliği							•	•								•			•		•			•	6
Esnek olmayan proje programı							•				•	•		•								•			5
							•				•								•	•	•				5
İnşaat faaliyetinden kaynaklanan hava/gürültü/su kirliliği																									
Alt yüklenicilerin yetersizliği											•		•		•	•			•						5
Hükümet onaylarında aşırı prosedür							•				•	•	•				•								5
İşçilerin/çalışanların uyumsuzluğu							•					•					•				•			•	5
Anlaşmazlıkların çözümünde gecikme							•					•					•				•	•			5

Tablo 1. Devamı

İnşaat Sektöründeki Risk Faktörleri	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	Y	Z	Toplam
Teknolojik değişiklikler							•							•						•			•	•	5
Malzeme ve ekipmana gelebilecek zararlar/arıza							•								•	•			•	•					5
Sözleşmesel anlaşmazlıklar							•								•				•		•	•			5
Şantiyeye erişim							•											•		•	•			•	5
Sipariş değişikliği							•										•				•	•		•	5
Malzeme fiyatlarındaki artış							•	•											•			•		•	5
Kalitesiz işçilik			•								•	•			•										4
İnşaat sözleşmesindeki şartların sürekli değişmesi			•				•													•		•			4
İşçilerle ilgili sorunlar ve grevler															•	•					•			•	4
Kullanılan inşaat tekniğinin hatalı olması/ilk defa kullanılması/İnşaat yöntemi														•	•				•		•				4
Üçüncü taraf gecikmeleri															•	•	•				•				4
Hükümet politikalarında değişiklik/Devlet bürokrasisi											•								•		•			•	4
Hatalı/ kusurlu iş							•													•	•			•	4

Tablo 1. Devamı

İnşaat Sektöründeki Risk Faktörleri	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	Y	Z	Toplam
Proje ekibinin deneyimi							•													•	•			•	4
Bakım maliyetinin yüksekliği ve sürekli bakım			•															•		•					3
Terörizm ve savaş tehdidi																•	•			•					3
Proje yönetimi için yeteri kadar idari personelin olmaması/değişiklik							•											•				•			3
Teknik şartnamelerin yerine getirilmemesi																		•					•	•	3
Şantiye çevresinde kalabalık/Tıkanıklık /Öngörülemeyen koşullar																				•	•			•	3
Çalışma saatlerinde kısıtlamamalar							•													•		•			3
Düşük kaliteli malzeme							•									•								•	3
Taraflar arasındaki taahhüt eksikliği			•		•																				2
Alt yüklenicilerin belirlenen süre ve maliyetleri aşması															•						•				2
Proje çizimlerinde gecikme																•	•								2
Yetersiz teknoloji																•	•								2
Proje programının doğruluğu																•	•								2

Tablo 1. Devamı

İnşaat Sektöründeki Risk Faktörleri	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	Y	Z	Toplam
Kadro yapısının tanımlanmaması																		•					•		2
Yüklenicinin işçi ücretlerini zamanında ödeyememesi							•											•							2
Yabancı işçi çalıştırma yasağı																		•					•		2
İşçinin özen eksikliği																		•						•	2
Koordineli olmayan tasarım							•															•			2
İşin özellikleri dikkate alınmadan en düşük fiyatları teklif etme							•															•			2
Yeterli nakliye tesislerinin mevcudiyeti							•																•		2
Yetersiz program planlaması							•	•																	2
Müşteri tarafından değişiklikler											•														1
Eksik veya yanlış maliyet tahmini											•														1
Önemli ekipmanları sigortasız satın alma											•														1
Çalışanlar için güvenlik sigortasının olmaması											•														1
Sosyal etkiler														•											1
Sözleşmedeki risk dağılımının uygun olmaması																•									1

Tablo 1. Devamı

İnşaat Sektöründeki Risk Faktörleri	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	Y	Z	Toplam
Danışman ve yüklenici tarafından kararlaştırılan şartnamelerin uygulanmaması																		•							1
Projede kullanılan malzemeler için düzenli testlerin yapılmaması																		•							1
Temel kaynakların bulunamaması																		•							1
Şirketlerdeki kadroların istikrarsızlığı																		•							1
Projenin gerektiği gibi denetlenmemesi																		•							1
Malzeme tekeli																				•					1
Sözleşme türü																				•					1
Proje boyutu																				•					1
Öngörülemeyen şantiye koşulları																					•				1
Tasarım ekibinin yetersizliği																						•			1
Proje hedefleri üzerinde müşterinin gerçekçi olmayan beklentileri																						•			1
Rekabetçi ihaleler/piyasa																						•			1

Tablo 1. Devamı

İnşaat Sektöründeki Risk Faktörleri	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	Y	Z	Toplam
Uygun olmayan kaynak yönetimi																						•			1
Yerel vergiler																							•		1
Gümrük ve ithalat kısıtlamaları																							•		1
Yerel koşullara aşına olmama																							•		1
Sevkiyat/depolama sırasında hasar																								•	1
İşçiler koruyucu donanımları kullanmaz/güvenlik önlemleri uygulanmaz																								•	1

Kaynak: A: (Kumaraswamy & Zhang, 2001), B: (Grimsey & Lewis, 2002), C: (Li & ark., 2005), D: (Shen L. P., 2006), E: (Loosemore & Ng, 2007), F: (Estache, Juan & Trujillo, 2007),

G: (Medda, 2007.), H: (Zou, Wang & Fang, 2008)I: (Thomas, Kalidindi & Ananthanarayanan, 2003), J: (Xu & ark., 2010), K: (Zou, Zhang & Wang, 2007), L: (Kartam & Kartam, 2001),

M: (Renuka, Umarani & Kamal, 2014), N: (Rezakhani, 2012),O: (Birgönül & Dikmen, 1996), P: (Iqbal & ark., 2015), Q: (Hameed & Woo, 2007),

R: (Abbasi, Abdel-Jaber & Abu-Khadejeh, 2005), S: (Chileshe, 2014), T: (Abdel-Karim & ark., 2015), U: (Acar & Göç, 2011), V: (Tayeh B.A., 2020),

Y (Ehsan, 2011):, Z: (Taofeeq, D. M., Adeleke, A. Q. & Lee, C. K., 2019)

Yükleniciyi Etkileyen Risk Faktörleri

İnşaat sektöründeki risk, proje paydaşlarının sayısı, projenin büyüklüğü, zorluğu ve karmaşıklığı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Proje paydaşlarının her birinin risk algıları birbirinden farklıdır. En fazla risk alan taraf genellikle yükleniciler olarak kabul edilir (Zou, P.X.W., Zhang, G. & Wang, J., 2007). Ayrıca, farklı türde risklerle karşı karşıya kalınmasına ek olarak, yüklenicilerin riske yanıt vermek için benimsedikleri yöntemler, yeni risk faktörleri oluşturarak inşaat projelerini daha karmaşık ve zor bir hale getirmektedir (Tah J.H.M. & Carr V.A., 2001). Bu sebeple yüklenicilerin projelerini başarılı bir şekilde bitirmeleri için maruz kalacakları bu proje risklerini analiz etmeleri ve değerlendirmeleri gerekmektedir. Yüklenicilerin bu aşamada riskleri yönetmek için genellikle istatistiksel verilerden uzak ve kararlarını subjektif olarak vermeleri eleştirilmektedir (Birgönül, M. T., & Dikmen, İ. , 1996). Bu nedenle, bu çalışmada detaylı bir inceleme sonucunda yüklenicileri etkileyen risk faktörleri literatür kapsamında incelenmiş ve Tablo 2’ de sunulmuştur.

Tablo 2. Yükleniciyi Etkileyen Risk Faktörleri

Yükleniciyi Etkileyen Risk Faktörleri	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Toplam
Yüklenicinin teknik yeterliliği/deneyimi		•	•		•	•	•	•	•	7
İnşaat sırasındaki kazalar/Güvenlik		•		•	•		•	•	•	6
İşçilik, malzeme ve ekipman bulunabilirliği		•		•	•			•	•	5
İşçilerin uyuşmazlığı veya grev riski		•		•	•			•	•	5
İşin kalitesi		•			•		•	•		4
Kusurlu malzeme		•		•	•			•		4
Eski/Yetersiz teknoloji			•	•		•	•			4
İşgücü ve ekipman verimliliği		•			•			•	•	4
İnşaat alanındaki farklı koşullar		•			•			•	•	4
Yeterli sayıda kalifiye işçinin olmaması	•			•				•		3

Tablo 2. Devamı

Yükleniciyi Etkileyen Risk Faktörleri	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Toplam
Taşıeronlarla koordinasyon		•		•	•					3
Olumsuz hava koşulları		•		•	•					3
Etkin olmayan/Hatalı proje Planlama ve çizelgeleme			•	•	•					3
Üçüncü taraf gecikmeleri		•		•	•					3
Taşıeronların zayıf performansı/yetersizliği				•			•	•		3
Doğal afet		•		•	•					3
Terör ve savaş tehdidi		•		•	•					3
Hatalar nedeniyle yeniden çalışma			•			•				3
Siparişlerde değişiklik		•			•					3
Finansal başarısızlık		•			•				•	3
Yüklenicinin zayıf yönetim yeteneği	•						•			2
Yeterli profesyonel ve yöneticinin olmaması	•						•			2
İnşaat faaliyetleri nedeniyle hava/su/gürültü kirliliği	•				•					2
Proje programının doğruluğu		•						•		2
Uygun olmayan inşaat uygulamaları /Kusurlu iş			•				•			2
Döviz ve enflasyon				•	•					2
Politik istikrarsızlık				•	•					2
Yetersiz güvenlik önlemleri	•								•	2
İş miktarının boyutu		•							•	2
Enflasyon		•							•	2
Sözleşmeden doğan sorunları çözmede gecikme					•				•	2
Yüklenicinin geri ödeme zorluğu	•									1
İşçinin zayıf yetkinliği	•									1
Büyük ekipmanlar için sigortasız satın alma	•									1
Çalışanlar için güvenlik sigortasının olamaması	•									1
Güvenli olmayan işlemler	•									1
İnşaat atıklarının yasadışı bertarafı nedeniyle sıkıntılar	•									1
Taşıeronların sıklıkla değişmesi			•							1

Tablo 2. Devamı

Yükleniciyi Etkileyen Risk Faktörleri	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Toplam
Proje ekibinin yetersizliği			•							1
Proje paydaşları ile zayıf iletişim ve koordinasyon			•							1
İnşaat alanının yönetim ve denetim eksikliği			•							1
Güvenilmez taşeronlar			•							1
Kalitesiz ekipman ve malzeme				•						1
Sahadaki malzeme hırsızlığı/ yağma				•						1
Tesis ve ekipman sıkıntısı				•						1
Tesis ve ekipmanların düşük verimliliği				•						1
Malzeme sağlamada sıkıntı/gecikme				•						1
İşçilerin zayıf yetkinliği ve verimliliği				•						1
İş sahibi ile anlaşmazlık riski				•						1
Sözleşmesel anlaşmazlıklar				•						1
Şantiyedeki rüşvet ve yolsuzluk				•						1
Yasal sürecin maliyeti					•					1
Hükümet düzenlemelerinde değişiklik					•					1
Taşeron sayısı						•				1
Yüklenici itibarı/saygınlığı						•				1
Yüklenicinin mevcut proje sayısı						•				1
Çalışma koşulları							•			1
Taşeronların sözleşmeyi ihlal etmesi ve uyuşmazlık								•		1
Tedarikçilerin malzemeyi zamanında getirmemesi								•		1
İzin ve onaylar								•		1
Şantiyeye erişim								•		1
Tazminat								•		1

Kaynak: A: (Zou, Zhang & Wang, 2007), B: (Kartam & Kartam, 2001), C: (Gündüz, Nielsen & Özdemir, 2013)

D: (Iqbal & ark., 2015), E: (Hameed & Woo, 2007), F: (Abdel-Karim & ark., 2015), G: (Musarat & Ahad, 2016)

H: (El-Sayegh, 2007) I: (Loosemore & McCarty, 2008)

İnşaat Risk Faktörleri ile İlgili Analiz ve Değerlendirme

Kapsamlı bir literatür çalışması ile inşaattaki risk faktörleri incelenmiş ve Tablo 1.de sunulmuştur. Ancak projelerdeki bütün olası risklerin tanımlanması hem oldukça zor hem de proje başarısı açısından gerekli olmayabilir. Önemli olan kritik risk faktörlerinin belirlenmesi ve kontrol edilmesidir (El-Sayegh, 2007).Bir diğer husus, benzer risk faktörlerin farklı isimlerle ifade edilmiş olmasıdır. Bu amaçla bu çalışmada inşaat projelerini etkileyen kritik risk faktörleri 4 aşamada değerlendirildi. İlk aşamada her bir çalışmaya ait kritik risk faktörlerinden ilk beş faktör tespit edildi. İkinci aşamada, risk faktörleri önem derecesine göre ve riskin kaynağına bağlı olarak sınıflandırıldı. Böylece her bir risk kaynağının beş dereceli önem sınıfında hangi düzeyde ne kadar etkili olduğu tespit edildi. Üçüncü aşamada ise, analiz sonuçları dikkate alınarak ve birbirine benzeyen kritik risk faktörleri, tek bir isim altında birleştirilerek Tablo 3’te en önemli kritik risk faktörleri olarak sunulmuştur. Dördüncü aşamada ise gruplandırılan bu risk kaynaklarının önem endeksi, frekans ve ciddiyet endeksi hesaplanmıştır ve Tablo 4’ de sunulmuştur.

Tablo 3. Kritik Risk Faktörleri

Kritik Risk Kaynakları	Risk Alt Faktörleri
Finansal Riskler	Proje finansman problemi Malzeme fiyatlarındaki dalgalanma Sözleşmedeki ödemelerin gecikmesi Ülke ekonomisinin durumu
Teknik Riskler	Döviz kuru ve enflasyon Kusurlu tasarım İnşaattaki zamansal gecikme Kapsam ve tasarım değişikliği Yanlış program Kalite ve performans kontrolü
Çevresel Riskler	Müşteri tarafından değişiklikler Bilinmeyen jeolojik durum
Güvenlik Riskleri	Kazaların meydana gelmesi ve zayıf güvenlik prosedürleri
Politik Riskler	Siyasi belirsizlik Hükümet politikalarındaki değişiklik
Yasal Riskler	Kanunlar ve yönetmelikler

Tablo 3. Devamı

Kritik Risk Kaynakları	Risk Alt Faktörleri
Çalışan ve Ekipman Riski	Malzeme, işçilik ve ekipman bulunabilirliği
Yönetim Riski	Alt yüklenici ile koordinasyon Alt Yüklenicinin yeterliliği

Analiz sonuçlarına göre olan finansal riskler önem derecesi sıralamasında 0,61’lik değeri ile ikinci sırada ve meydana gelme sıklığında (frekans) 0,29 ile birinci olarak ciddiyet endeksi sıralamasında 17,36 ile birinci sırada yer alarak en kritik risk kaynağı olmuştur. Ciddiyet endeksinde ikinci sırada yer alan teknik risklerdir. Ancak teknik riskler önem bakımından beşinci sırada olmasına rağmen frekansı yüksek olduğu için ikinci kritik risk kaynağı olmuştur. Teknik risklerin ciddiyet endeksi 9,45 değerindedir. Birinci sırada yer alan finansal riskler ile arasında ciddi bir fark vardır. Bu açıdan finansal riskler açık ara en kritik risktir. Ciddiyet endeksinde üçüncü sırada yer alan politik risklerdir. Politik riskler önem sıralamasında üçüncü ve frekansı da dördüncü sırada yer almıştır. Böylece politik riskler 5,71’lik değeri ile en kritik üçüncü risk kaynağı olmuştur. Ayrıca çevresel riskler önem endeksi sıralamasında birinci olmasına rağmen frekansının düşük olmasından dolayı ciddiyet endeksi yedinci sırada olmuştur. Çevresel riskler kritiklik bakımından son sıralar da yer almıştır.

Tablo 4. İnşaattaki kritik risk faktörlerinin RII, FR, SI ve RANK değerleri

İnşaat Kritik Risk Faktör Grupları	EnÖnemli 1.faktör sayısı	En Önemli 2.faktör sayısı	En Önemli 3.faktör sayısı	En Önemli 4.faktör sayısı	En Önemli 5.faktör sayısı	Topla m	RII	Rank RII	FR	Rank FR	SI	Rank SI
Finansal Riskler	5	8	3	3	7	26	0,61	2	0,29	1	17,36	1
Teknik Riskler	2	3	4	1	7	17	0,51	5	0,19	2	9,45	2
Politik Riskler	2	1	3	0	3	9	0,58	3	0,10	4	5,71	3
Yasal Riskler	1	2	0	3	2	8	0,53	4	0,09	5	4,62	4
Çalışan ve Ekipman Riski	0	1	3	2	3	9	0,44	6	0,10	4	4,40	5
Yönetim Riski	0	0	2	3	5	10	0,34	8	0,11	3	3,74	6
Çevresel Riskler	2	0	1	1	1	5	0,64	1	0,05	7	3,52	7
Güvenlik ile ilgili Riskler	1	0	1	1	4	7	0,40	7	0,08	6	3,08	8

Tablo 5. Yükleniciyi etkileyen kritik risk faktörlerinin RII, FR, SI ve RANK değerleri

Yükleniciyi Etkileyen Kritik Risk Faktör Grupları	En Önemli 1.faktör sayısı	En Önemli 2.faktör sayısı	En Önemli 3.faktör sayısı	En Önemli 4.faktör sayısı	En Önemli 5.faktör sayısı	Topla m	RII	Rank RII	FR	Rank FR	SI	Rank SI
Teknik Riskler	1	4	0	0	5	10	0,52	5	0,24	1	12,38	1
Politik Riskler	1	0	4	2	1	8	0,55	4	0,19	3	10,48	2
Çalışan, malzeme ve ekipman Riski	0	2	2	2	3	9	0,47	6	0,21	2	10,00	3
Çevresel ve Güvenlik Riski	2	2	0	0	1	5	0,76	2	0,12	5	9,05	4
Yönetim Riski	1	0	3	2	0	6	0,60	3	0,14	4	8,57	5
Finansal Riskler	3	0	0	1	0	4	0,85	1	0,10	6	8,10	6

Yüklenici Etkileyen Risk Faktörleri ile İlgili Analiz ve Değerlendirme

Tablo 2.'de kapsamlı bir şekilde yükleniciyi etkileyen risk faktörleri sunulmuştur. Ancak yükleniciyi etkileyen aynı risk faktörleri, literatürdeki her bir çalışmada farklı bir ifade ile oluşturulmuştur. Bu nedenle, ilgili çalışmalardan yararlanılarak daha önemli olan risk faktörleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla bu çalışmada yükleniciyi etkileyen kritik risk faktörleri dört aşamada değerlendirildi. 1. Aşamada; her bir çalışmaya ait kritik risk faktörlerinden ilk beş faktörler çıkarıldı. 2. aşamada ise; kritik risk faktörleri önem derecesine göre ve riskin kaynağına bağlı olarak sınıflandırıldı. 3. aşamada ise; Gruplandırılan bu risk kaynaklarının önem endeksi, frekans ve ciddiyet endeksi gibi temel istatistik analizleri yapılmıştır ve Tablo 5' de sunulmuştur. 4. aşamada ise; yükleniciyi etkileyen kritik risk faktörleri birbirine benzeyenler dikkate alınarak tek bir isim altında birleştirilerek Tablo 6' da sunulmuştur. Yapılan analiz sonucuna göre ciddiyet endeksine göre en kritik olan risk kaynağı teknik riskler olmuştur. Teknik riskler önem endeksinde düşük bir değer (0,52) alarak mevcut risk kaynakları içinde altıncı sırada yer almasına rağmen frekans değeri bakımından (0,24) analiz edilen risk kaynakları içinde en sık tekrar eden risk kaynağı olmuştur. Ciddiyet endeksi analize dahil olan risk kaynakları içinde 12,38'lik değeri ile en kritik risk kaynağı olmuştur. Politik riskler en kritik ikinci risk kaynağı olmuştur. Politik risklerde önem değeri (0,55) bakımında beşinci sırada yer almasına rağmen frekansı/meydana gelme sıklığı (0,19) açısından üçüncü sırada yer almıştır. Ciddiyet endeksi 10,48 ile politik riskler analize dahil olan risk kaynakları içinde en kritik ikinci risk kaynağı olmuştur. Çalışan, malzeme ve ekipman riski en kritik üçüncü risk kaynağı olmuştur. Çalışan, malzeme ve ekipman riski önem endeksi bakımından (0,47) yedinci sırada yer alarak mevcut risk kaynakları içinde önem bakımından sonuncu olmuştur. Ancak bu risk kaynağının frekansı

(0,21) sıralamada ikici sırada yer almış ve en çok karşılaşılan ikinci risk kaynağı olmuştur. En nihayetinde ciddiyet endeksi bakımından 10,00 değeri ile en kritik üçüncü risk kaynağı olmuştur. Finansal riskler önem bakımından tablodaki risk kaynakları içinde 0,85 ile en önemli risk kaynağı olmuştur. Ancak bu risk kaynağının meydana gelme sıklığı yine tablodaki risk kaynakları içinde 0,10'luk değeri ile en sonda yer almıştır. Ciddiyet endeksi bakımından da 8,10 değeri ile en sonda yer almıştır. Anketi cevaplayanlar açısından düşünüldüğünde finansal riskler ilk beş faktör içinde birinci sırada en çok tercih edilen faktördür. Ancak ilk beş faktör içinde en az tercih edilen faktör olduğu için de cevaplayanların bu riskli çok da dikkate almadığı gözlemlenmiştir. Bunun en önemli kanıtı RI değerine göre 1. sırada yer almasına rağmen finansal değerler SI değerine göre 6. sırada yer almasıdır. Yükleniciler kendi müdahale alanlarında olmayan riskleri daha riskli görürken, müdahale edebildikleri riskleri daha az riskli görmüşlerdir

Tablo 6 Yükleniciyi Etkileyen Kritik Risk Faktörleri

Yükleniciyi Etkileyen Kritik Risk Faktörleri
• Finansman bulma zorluğu • Yüklenici yeterliliği • Yüklenici deneyimi • Yeterli profesyonel ve yöneticinin olmaması • Yeteri sayıda kalifiye işçinin olmaması • İşçi ve ekipman verimliliğinin düşük olması • İşçilik, malzeme ve ekipman bulunabilirliği • Düşük kaliteli malzeme ve ekipman • Alt yüklenici ve diğer taraflarla zayıf iletişim ve koordinasyon • Farklı şantiye koşulları • Yürütme plan/programının doğruluğu • İnşaat alanının yönetiminin ve denetiminin yetersizliği • Kazaların meydana gelmesi ve zayıf güvenlik prosedürleri • Tedarikçiler malzeme sağlamada gecikmesi

Sonuçlar ve Öneriler

İnşaat sürecinin bütün aşamaları karmaşık ve dinamik bir yapıya sahip olduğu için çok fazla belirsizlik ve risk içermektedir.

Bu durum, inşaat sektörünün diğer sektörlerin çoğundan daha riskli kabul edilmektedir (Taofeeq, D. M., Adeleke, A. Q. & Lee, C. K., 2019). Ayrıca inşaat projelerindeki belirsizlikler ve teknolojiyle birlikte farklılaşan ve değişen proje hedefleri birleşerek çeşitli risk koşullarının oluşmasına neden olmaktadır (Jayasudha K., 2014). Bu sebeple bu risklerin olumsuz etkilerini azaltmak için etkili bir risk yönetim süreci gerekmektedir (KarimiAzari, 2011). Riskleri yönetmek için öncelikle riskleri tanımlamak gerekir. Ancak projelerdeki bütün risklerin tanımlanması hem oldukça zahmetli hem de proje başarısı açısından gerekli olmayabilir. Önemli olan proje için kritik risk faktörlerinin belirlenmesidir (El-Sayegh, 2007). Ancak belirli bir riskin önemi bir projeden diğerine göre değiştiğinden (Hameed & Woo, 2007), inşaat projelerindeki riskler projeye göre farklılaşabilmektedir. İnşaat projelerindeki riskler projeye göre farklılaşabilmektedir. Bu sebeple inşaat projelerini etkileyen kritik risk faktörleri için bir standart ortaya koymak oldukça zordur. Bu çalışmada genel bir kapsam sağlayabilecek kritik risk faktörleri önceki yapılan çalışmalardan faydalananarak ortaya konmuştur. Elde edilen kritik riskler riskin kaynağına göre sınıflandırılarak sekiz ana başlık altında toplanmıştır. Risk kaynakları; finansal riskler, teknik riskler, çevresel riskler, güvenlik riskleri politik riskler, yasal riskler, çalışan ve ekipman riski ve yönetim riski olarak tanımlanmıştır. Risk faktörlerini yönetmek için bir diğer önemli husus projede etkili olan risk faktörünün proje paydaşları içinde ilgili olan tarafa tahsis etmektir. Böylece riskler sorumlu oldukları taraflarca yönetilebilir ve riskin olumsuz etkisinin en aza indirilmesi için daha pratik hale gelebilir. Risk tahsisi ile ilgili yapılan çalışmaların çoğunda risklerin büyük bir çoğunluğunun yüklenicilerin sorumluluğunda olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple bu çalışmada yüklenicilere tahsis edilen kritik risk faktörleri irdelenmiştir. Önceki çalışma verilerinden elde edilen verilere göre risklerin büyük bir çoğunluğu yüklenicilerin sorumluluğunda olmasına rağmen kritik risk faktörlerindeki sorumluluklarında diğer

proje paydaşları ile ortak sorumluluğa sahip oldukları görölmektedir. Projelerdeki etkili olan bu risk faktörlerine karşı yüklenicilerin tepki yaklaşımı risk yönetimi açısından önemli olan bir diğer faktördür. Risk tepki yaklaşımı risk yönetim sürecinin en zayıf noktasıdır. Risklerin iyi bir şekilde yönetilebilmesi için mevcut inşaat projesindeki tüm tarafların yani yükleniciler, müşteriler, danışmanlar, mal sahipleri ve ilgili yetkililerin risk idare yeteneklerinin, risk tutumlarının ve risk algılarının iyice anlaşılması gerekir. Ancak bu algı, tutum ve yetenekler bireyseldir ve tespit edilmesi oldukça zordur. Önceki çalışmalar ve yukarıda yaptığımız çıkarımlar sonucunda risklerin büyük bir çoğunluğundan etkilenen tarafın yükleniciler olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla yüklenicilerin tutum ve davranışları risk yönetimini daha fazla etkileyecektir. Bu sebeple yüklenicilerin risklere karşı tepkileri, tutum ve davranışlarının incelenmesi risk yönetimin bu zayıf noktasına destek olacaktır. Ancak yüklenicilerin risklere karşı verecekleri bu tepkileri anlayabilmek için öncelikle risk tutum ve davranışlarını etkileyen faktörlerin incelenmesi gerekir. Literatürde yüklenicilerin risk tutum ve davranışını etkileyen faktörlerle ilgili oldukça az çalışma bulunmaktadır. Bu çalışma; inşaat projelerindeki kritik risk faktörleri, yükleniciyi etkileyen kritik risk faktörleri olarak iki başlık altında incelemiştir. Yapılan bu çalışma ile inşaat projelerinin proje hedeflerini başarılı bir şekilde yerine getirilmesi ve yüklenicilerin kendi sorumluluğundaki riskler hakkında fikir sahibi olması açısından önemlidir. Ayrıca proje yönetiminin en zayıf aşaması olan risk tepki yaklaşımında yüklenicinin risklere karşı tepkisini etkileyen risk faktörleri anlaması ve bu öznel alanın yapılan çalışmalarla nesnel bir tabana oturtulabilmesi açısından önemlidir. Dolayısıyla, bu çalışmanın inşaat sektöründeki yükleniciler, işverenler, mühendisler, danışmanlar, diğer proje paydaşları ve ilgililer için faydalı olması umulmaktadır.

Kaynakça

1. Abbasi G. Y., A.-J. M.-K. (2005). Risk Analysis For The Major Facyors Affecting the Constructin Industry in Jordan . *Emirates Journal for Engineering Research*, 10 (1), 41-47 .
2. Abdul Kadir, M. R. (2005). Factors affecting construction labor productivity for Malaysian residential projects. *Structural Survey*, 23(1),, 42–54.
3. Acar E., Göç Y. (2011). Prediction of risk perception by owners' psychological traits in small building contractors. *Construction Management and Economics*, vol. 29(8) 841-852.
4. Adeleke, A. Q., Nasidi, Y., &Bamgbade, J. A. . (2016). Assessingthe Extent of Effective Construction Risk Management in Nigerian Construction Companies. *Journal of Advanced Research in Business and Management Studies*, 3(1) , 1-10.
5. Al-Bahar, J. F., &Crandell, K. C. (1990). Systematic risk managementapproachforconstructionprojects. *Journal of Construction Engineeringand Management*, 116(3), 533–546.
6. Birgönül, M. T., & Dikmen, İ. . (1996). İnşaat Projelerinin Risk Yöntemi. *Teknik Dergi* , 7(34).
7. Chileshe, N. J. (2014). Critical success factors for implementation of risk assessment and management practices within the Tanzanian construction industry . *Engineering, Construction and Architectural Management*, 21(3), 291-319.

8. Ehsan, Dr. Nadeem. (2011). Risk Management in construction industry. *Indian Journal of Applied Research*.
9. El-Sayegh, S. M. (2007). Risk assessment and allocation in UAE construction industry. *International Journal of Project Management* 26(4), 431–438.
10. Estache, A., Juan, E., Trujillo, L.,. (2007). *Public–Private Partnerships in Transport*. The World Bank.
11. Genç, O., Erdiş, E. ve Oral, E. (2016). İnşaat İşlerinde Yüklenici Riskleri ve Risk Tutumları. *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC)*, (s. 1191-1195.). Adana/Turkey.
12. Grimsey, D., Lewis, M.K., . (2002). Evaluating the risks of public private partnerships for infrastructure projects. *International Journal of Project Management* 20 (2, 107–118.
13. Gündüz M., Nielsen Y., Özdemir M. (2013). Quantification of Delay Factors Using the Relative Importance Index Method for Construction Projects in Turkey. *Journal of Management in Engineering*, 29(2);133-139.
14. Hameed, A., & Woo, S. (2007). Risk importance and allocation in Pakistan construction industry: a contractor's perspective. *KSCE Journal of Civil Engineering* 11(2), 73–80.
15. Iqbal, S. C. (2015). Risk management in construction projects . *Technological and Economic Development of Economy*, 21(1), 65–78.
16. Jayasudha K., D. B. (2014). A Study on Risk Assessment in Construction Projects . *IJMER*, (4);20-23.

17. KarimiAzari, A. M. (2011). Risk assessment model selection in construction industry . *Expert Systems with Applications*, 38(8), 9105-9111.
18. Kartam N, Kartam S. (2001). Risk and its management in the Kuwaiti construction industry: a contractors' perspective. *International Journal of Project Manage*, 19(6);325–335.
19. Kumaraswamy, M.M., Zhang, X., (2001). Governmental role in BOT-led infrastructure development. *International Journal of Project Management* 19 (4), 195–205.
20. Li, B., Akintoye, A., Edwards, P., Hardcastle, C., (2005). The allocation of risk in PPP/PFI construction projects in the UK. *International Journal of Project Management* 23 (1), 25–35.
21. Loosemore M., McCarty C.S. (2008). Perceptions of Contractual Risk Allocation in Construction Supply Chains. *Journal Of Professional Issues In Engineering Education And Practice ASCE*, 134;95-105.
22. Loosemore, M., Ng, A., (2007). Risk allocation in the private provision of public infrastructure. *International Journal of Project Management* 25 (1), 66–76.
23. M.S.B.A. AbdEl-Karim et al. (2015). Identification and assessment of risk factors affecting construction projects. *HBRC Journal*, 202-216.
24. Medda, F. (2007.). A game theory approach for the allocation of risks in transport public private partnerships. *International Journal of Project Management* 25 (3, 213–218.
25. Musarat, M. A., & Ahad, M. Z. . (2016). Factors affecting the success of construction projects in Khyber Pakhtunkhwa,

Pakistan. *journal of Construction Engineering and Management*, 6,1-6.

26. Renuka S.M, Umarani C., Kamal S. (2014). A Review on Critical Risk Factors in the Life Cycle of Construction Projects. *Journal of Civil Engineering Research* , 4(2A): 31-36.
27. Rezakhani, P. (2012). Classifying key risk factors in construction projects. *Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Secția Construcții. Arhitectură*, 58(2),, 83-93.
28. Shen, L. P. (2006). Role of public private partnerships to manage risks in public sector projects in Hong Kong. *International Journal of Project Management* 24 (7), 587–594.
29. Shen, L. P. (2006). Role of public private partnerships to manage risks in public sector projects in Hong Kong. *International Journal of Project Management* 24 (7), 587–594.
30. Tah J.H.M, Carr V.A. (2001). A knowledge-based approach to construction project risk managemen. *ASCE J Comput Civil Engineering*, 15(3) 170-177.
31. Taofeeq, D. M. (2019). The Moderating Role of Government Policy on Contractors' Risk Attitudes in Malaysia Construction Companies. *Social Science and Humanities Journal*, 1261-1280.
32. Taofeeq, D. M., Adeleke, A. Q., & Lee, C. K. (2019). Individual factors influencing contractors' risk attitudes among Malaysian construction industries: the moderating role of government policy. *International Journal of Construction Management*, 1-20.

33. Tayeh B.A., S. T. (2020). Risk Factors Affecting the Performance of Construction Projects in Gaza Strip. *The Open Civil Engineering Journal*, 1874-1495/20.
34. Thomas, A.V., Kalidindi, S.N., Ananthanarayanan, K.,. (2003). Risk perception analysis of BOT road project participants in India. *Construction Management and Economics* 21 (4), 393–407.
35. Wang, J., & Yuan, H. (2011). Factors affecting contractors' risk attitudes in construction projects: a Case study from China. *International Journal of Project Management*, 29(2), 209-219.
36. Xu, Y. Y. (2010). Developing a risk assessment model for PPP projects in China—a fuzzy synthetic evaluation approach. *Automation in Construction* 19 (7), 929–943.
37. Zayed, T.; Amer, M.; Pan, J. . (2008). Assessing risk and uncertainty inherent in Chinese high way projects using AHP. *International Journal of Project Management* 26,, 408–419.
38. Zou, P.X.W., Wang, S., Fang, D., . (2008). A life-cycle risk management frame work for PPP infrastructure projects. *Journal of Financial Management of Property and Construction* 13 (2), 123–142.
39. Zou, P.X.W., Zhang, G., Wang, J. (2007). Understanding the key risks in construction projects in China. *International Journal of Project Management* 25 (6), 601–61.

GEÇİCİ KAPAK

*Kapak tasarımı
devam ediyor.*