İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE AKADEMİK ARAŞTIRMALAR

Editör:
Doç. Dr. Eray ÖZBEK



BİDGE Yayınları

İnşaat Mühendisliğinde Akademik Araştırmalar

Editör: Doç. Dr. Eray ÖZBEK

ISBN: 978-625-5057-48-8

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-10-25
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, insanlık tarihinin en köklü disiplinlerinden biridir. Bilimdeki gelişmeler ve sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda da sürekli kabuk değiştirmektedir. Günümüz dünyasında inşaat mühendisliğinin hedefi sadece güvenli yapılar inşa etmek olmayıp aynı zamanda bu yapıların olumsuz çevresel etkilerini en aza indirmeyi, kaynakları optimum düzeyde kullanmayı ve geleceğin akıllı şehirlerine altyapı hazırlamayı da amaçlamaktadır. Bu dönüşümün ve yeniliklerin üretim merkezinde ise hiç şüphesiz akademik araştırmalar yer almaktadır.

Yayınlanan bu kitap; yapı, zemin, hidrolik ve ulaştırma mühendisliğinden, yapı yönetimi ile malzeme teknolojilerine kadar geniş bir yelpazede yürütülen güncel çalışmaları ve bilimsel bulgularını içermektedir.

Bu eserin ortaya çıkmasında, bilimsel birikimlerini ve çalışmalarını paylaşarak kitaba değer katan tüm yazarlara ve hakemlik süreçlerinde katkı sağlayan kıymetli meslektaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Doç. Dr. Eray ÖZBEK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

YAMAÇ BÖLGELERDEKİ İNŞAAT PROJELERİNDE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ 1
ENES ÖĞMEN, TARKAN AKDERYA

KOHEZYONLU TABANLARDA YAN SAVAK ETRAFINDAKİ AKIM-SEDİMENT ETKİLEŞİMİ: MEKANİZMALAR VE BELİRLEYİCİ PARAMETRELER ... 15
FEVZİYE AYÇA SARAÇOĞLU, HAYRULLAH AĞAÇCIOĞLU

GÖMÜLÜ BORULARDA DEFORMASYON VE TASARIM YAKLAŞIMLARININ KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRMESİ 42
RIFAT ENES BİTKİN

YAPISAL ÇELİK YORULMA ANALİZİ İÇİN KILAVUZ VE MİNER YÖNTEMİ İLE UYGULAMA ÖRNEKLERİ 72
İBRAHİM UTKU DEMİRBAŞ, ERAY ÖZBEK

SÜRDÜRÜLEBİLİR KENTSEL SU YÖNETİMİ İÇİN BİLGİ YÖNETİM SİSTEMLERİ VE VERİ TABANLARI: VERİ YÖNETİMİ, TEMEL KAVRAMLAR VE KAZANIMLAR 88
SALİH YILMAZ, MAHMUT FIRAT

İÇMESUYU DAĞITIM SİSTEMLERİNDE SIZINTILARIN AZALTILMASI VE SÜRDÜRÜLEBİLİR YÖNETİMİ İÇİN BASINÇ KONTROL YÖNETİMİ: TEMEL KAVRAMLAR, UYGULAMA ESASLARI VE KAZANIMLAR 106
MAHMUT FIRAT, SALİH YILMAZ

BETONARME YAPILARDA DOLGU DUVARLARIN ANALİZ YÖNTEMLERİ 124
ERTUĞRUL ÇAMBAY

GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARINDA İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ: TEHLİKE MEKANİZMALARI,

İÇİNDEKİLER

KRİTİK SAHA UYGULAMALARI VE 58 MADDELİK MEKANİZMA TEMELLİ BÜTÜNCÜL ÖNLEME ÇERÇEVESİ 162

ATİLA DEMİRÖZ, MUSTAFA ONÜÇYILDIZ, RAMAZAN ÇİVİCİ

HARÇ DOLGULU VE TAMAMI ÇELİK BURKULMASI ÖNLENMİŞ ÇAPRAZLARIN SÜRDÜRÜLEBİLİR DEPREM MÜHENDİSLİĞİ AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI 211

BARIŞ SERİN, MEHMET BAKIR BOZKURT

GELENEKSEL AMPİRİK YAKLAŞIMLARDAN YAPAY ZEKAYA YER HAREKETİ TAHMİN MODELLERİNİN (GMPE) GELİŞİMİ 230

MEHMET ALPYÜRÜR

BÖLÜM 1

YAMAÇ BÖLGELERDEKİ İNŞAAT PROJELERİNDE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ

1. Enes ÖĞMEN[1]
2. Tarkan AKDERYA[2]

Giriş

Yaşamak için temel ihtiyaçlardan biri işe sahip olmaktır. Bununla birlikte, yapılan her işte iş sağlığı ve güvenliği konusu karşımıza çıkmaktadır. Bütün sektörlerde iş yerlerinde iş kazası yaşanması istenmese bile, hayatımızda her zaman iş kazası riski vardır. İş sağlığı ve güvenliği kuralları uygulanmadığı sürece iş kazaları kaçınılmazdır. İnşaat sektörü, iş kazalarının sık yaşandığı ve gerçekleşme ihtimalinin yüksek olduğu sektörlerden biridir. Bir iş kazası gerçekleştiğinde, çalışan iş göremez hale gelebilir ya da hayatını kaybedebilir. Bununla birlikte, çalışanın ailesi, çalıştığı işyeri, sigorta şirketleri ve ilgili idareler gibi birçok kişi bundan olumsuz etkilenmektedir. Diğer sektörlere kıyasla inşaat sektöründe yaşanan ölümlü ya da yaralanmalı iş kazası sayısı oldukça yüksektir. Bu konuyla ilgili Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, İzmir Bakırçay Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Orcid: 0009-0000-5117-1385
[2] Doçent Doktor, İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0001-6459-386X

- WHO) ve Uluslararası Çalışma Örgütü (International Labour Organization - ILO) gibi kurumların aldığı kararlara göre, işçi sağlığının çalışanın yetenekleri, özverisi, psikolojisi ve aile yapısı gibi etkenlere bağlı olduğu belirtilmiştir. İş yerinde verilecek görev tanımı, bu etkenlere dikkat edilerek verilmelidir; böylece iş esnasında çalışanın yorgunluk ve stres seviyesinin düşük olması ve işiyle uyum içinde çalışması hedeflenir (Dedeler, 2008).

Türkiye'de iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili ilk kanun 1930 yılında "Umumi Hıfzıssıhha Kanunu" olarak çıkmıştır. Yeni güncellemelerle bu kanun iptal edilmiş ve 25.08.1971 tarihinde 1475 sayılı İş Kanunu çıkarılmıştır. 2003 yılında ise yeniden güncellenerek yerini günümüzde hâlâ yürürlükte olan 4857 sayılı İş Kanunu'na bırakmıştır. Bu şekilde İş Kanunu'nun üç defa değiştirilmesinin nedeni, geçmişten bugüne yaşanan iş kazaları, yaralanmalar ve can kayıplarının çok fazla olmasıdır. İlerleyen teknoloji sayesinde günümüzde iş sağlığı ve güvenliği ekipmanları oldukça gelişmiştir. İş sağlığı ve güvenliği eğitimleri ile gelecek dönemlerde iş kazalarını, yaralanmaları, ölümleri minimuma indirmek hedeflenmiştir (Gümüş, 2005).

Bu çalışmada iş sağlığı ve güvenliği kurallarının farklı çalışma ortamlarında ve farklı yapı elemanı imalatlarında nasıl şekillendiğinin açıklanması amaçlanmaktadır. Çalışmada nitel araştırma yöntemlerinden gözlem tekniği kullanılmıştır. Bununla birlikte, çalışma yöntemi yerinde ve sahada uygulanan işlerin getirdiği risklere göre belirlenmiştir. İş sahasında oluşan riskler değerlendirildiğinde, çalışacak personelin iş kazası yaşamaması için işe başlamadan önce gerekli iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerini almış olması ve işe eğitimli bir şekilde başlaması gerektiği; bu bulguların neticesinde iş kazası yaşama olasılığının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Yamaç Bölgelerde Uygulanması Gereken İş Güvenliği Yöntemleri

Yüksek ve eğimli arazilerde, toprak kayması, kaya düşmesi veya kaya yuvarlanması riski bulunan alanlarda, kazı işleri teknik şartnamesindeki yöntemler esas alınarak kazı sırasında kayma ve göçmeye karşı iş sağlığı ve güvenliği sağlanmalıdır. Kayma ihtimali olan arazilerde çelik ağ ve tel sistemleri ile kaplanarak, yüzeyde kayma, yuvarlanma ve göçme gibi durumlar önlenmelidir. Bu uygulamaların şev stabilizasyonunu sağlayabilmek için shotcrete beton püskürtme uygulamalarına uygun şekilde yapılmış olması gerekir.

Şev Stabilizasyonu için Shotcrete Beton Püskürtme Uygulaması

Shotcrete beton püskürtme işleminin sağlıklı olabilmesi için yapıştığı yüzeyden dökülmemesi gerekmektedir. Bunun için öncelikle yüzey çelik ağlar ve tellerle kaplanmalıdır. Çeliğin çekme dayanımı, betonun dağılmaması için önemli bir etken olup, uygulamada arazinin şekline ve eğimine göre belirlenmelidir. Yatayda yapılan uygulamalara göre, şevli arazilerde uygulanan çelik ağ ve tel sistemlerinin işçilikleri oldukça farklıdır. Yüzeyin şeklini aldığı sürece mukavemet dayanımı artar, kayma ve göçme gibi ihtimaller azalır.

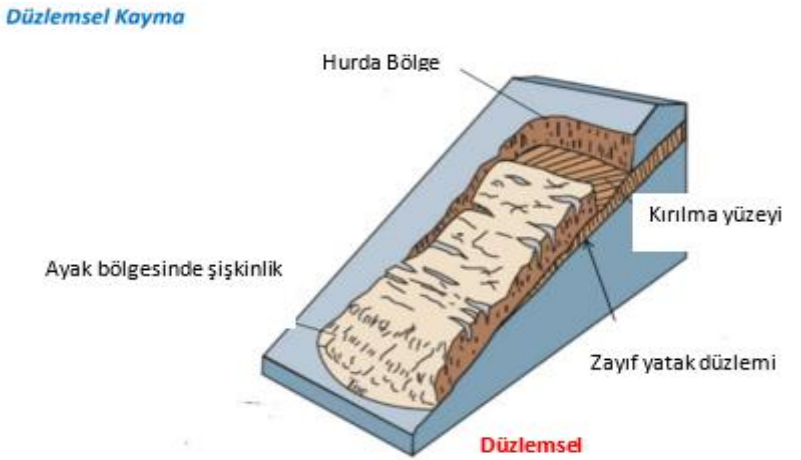
Şekil 1 Şevli yamaç arazilerde shotcrete uygulaması



Kaynak: Natural zemin, fore kazık & taahhüt (Erişim Tarihi: 17.10.2026)

Şekil 1'de görüldüğü gibi, arazinin göçmesini ve kaymasını önlemek için shotcrete uygulaması yapılmıştır. Shotcrete, hazır betona göre yüzeye daha yüksek basınçla püskürtülür. Basınçlı püskürtme sayesinde yüzeyde kalıp betonun içerisindeki katkı malzemesi ile erken priz alarak dayanıklılığa erken ulaşmaktadır (Topçu, 2006). Şekil 2'de şevli arazilerde düzlemsel kaymaya, Şekil 3'te ise kazı sahasında iş makinesinin düzlemsel kaymaya engel olacak şekilde kazılmasına ilişkin görseller verilmiştir.

Şekil 2 Şevli arazilerde düzlemsel kayma



Kaynak: Özcan, 2026

Şekil 3 Kazı sahasında iş makinesinin düzlemsel kaymaya engel olacak şekilde çalışması



Kaynak: Öğmen, 2026

Yüksek Eğimli Arazilerde İstinat Duvarlarının Tasarlanması

Yapıların yerden yükseltilmesi ve arkasında yük taşıyabilmesi için istinat duvarları yapılmıştır. Şevli arazilerde toprağın kaymasını önlemek için de kullanılır. İstinat duvarları üretilirken çok büyük iş istihdamı sağlanmakta ve bununla birlikte iş kazası riski ortaya çıkmaktadır. İstinat duvarı üretilirken de toprak kayması yaşanabilmektedir. İstinat duvarı yapılmadan önce yetkili mühendisin çizdiği proje üzerinden bazı analizler yapması zorunludur. Türkiye'de binalarda deprem yönetmeliğine göre, 2018 itibarıyla devrilme tahkiki, kayma tahkiki ve taşıma gücü tahkiki yapılmalıdır. Şekil 4'te tahrikleri yapılmış istinat duvarı verilmiştir.

Şekil 4 Tahkikleri yapılmış istinat duvarı



Kaynak: Öğmen, 2026

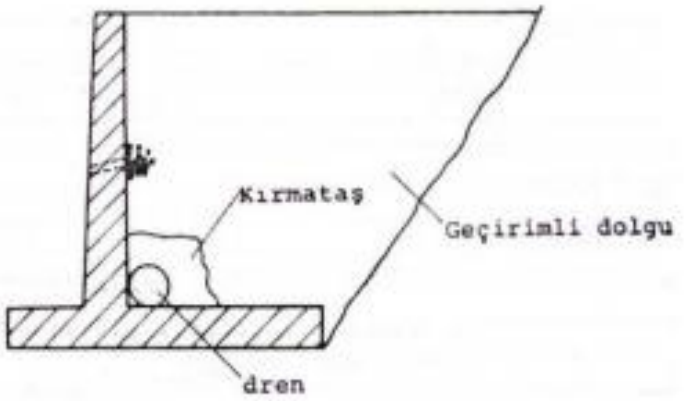
Şekil 5 Yüksek istinat duvarlarında soğuk demirci ustaları için kurulan iskeleler



Kaynak: Öğmen, 2026

Şekil 5'te istinat duvarının yüksekliği 5 metre olup, bu yükseklikte yapılacak imalatlar için iskele kurulması gerekmektedir. İskele kurulmadığı takdirde, donatıların güvenli bir şekilde bağlanamaması ve işçilerin üzerine devrilme riski oluşur. Bu tür uygulamalarda gerekli önlemler alınmadığı takdirde iş kazaları kaçınılmazdır.

Şekil 6 İstinat duvarlarının arkalarının geçirimli dolgu ile doldurulması



Kaynak: Öğmen, 2026

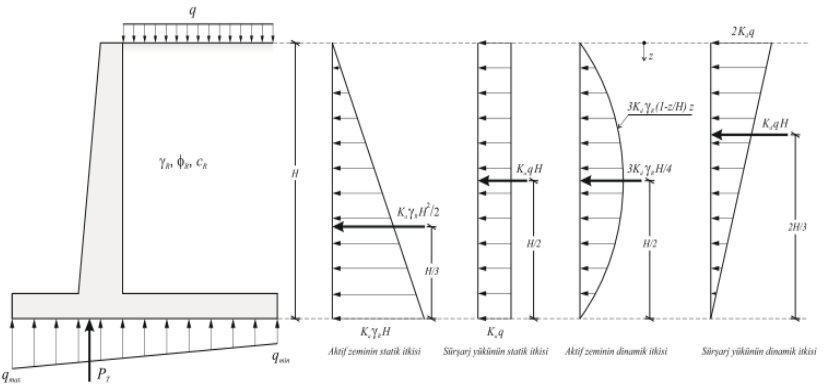
İstinat duvarları üretilirken tahkikleri yapılmış, projesine uygun yapılmış olsa bile, sonrasında duvarı koruyabilmek çok önemlidir. Doğru yalıtım ve dolgular yapılmadığı takdirde, duvarın arkasında oluşacak yanal yükler duvarı devirebilir ve facialara yol açabilir. İstinat duvarlarının arkasının geçirimli dolgu ile doldurulmasına yönelik görsel Şekil 6'da verilmiştir.

İstinat Duvarlarına Etki Eden Yanal Basınçlar

- Duvarın kendi ağırlığı
- Duvar arkasındaki aktif itki
- Duvar önündeki pasif etki
- Yeraltı suyu etkisi
- Deprem etkisi
- Sürşarj yükleri

İstinat duvarına etki eden statik ve dinamik yükler Şekil 7'de, sürme yalıtımı yapılmış istinat duvarına drenaj levhasının kaplanmasına dair görsel ise Şekil 8'de gösterilmiştir.

Şekil 7 Konsol istinat duvarlara etkiyen statik ve dinamik yükler



Kaynak: Temür & Bekdaş, 2018

Şekil 8 Sürme yalıtım yapılmış istinat duvarına drenaj levhasının kaplanması



Kaynak: Öğmen, 2026

Şekil 9 Geçirimli malzeme ile dolgu yapılmış istinat duvarı



Kaynak: Öğmen, 2026

Şekil 9'da görüldüğü üzere 1. binanın arkasında doğal taştan duvar örülerek geçirimli dolgu yapılmıştır. 1.binanın arkasındaki dolgu kendi ağırlığını taşıyabilecek potansiyele sahip olduğu için yanal yükler daha az itki uygulamaktadır. Üstteki 2.bina ise oturmaya direnç göstermektedir. Bu taş duvarın önüne daha sonra istinat duvarı yapılarak taşların da akmasının önüne geçilmiştir (Öğmen, 2026).

Şekil 10 Geçirimli dolgu ve gerekli drenajın olmamasından kaynaklı yıkılan istinat duvarı



Kaynak: Ünal, 2024

11.09.2024 tarihinde İzmir'in Menderes ilçesinde yıkılan bir istinat duvarı, yağış nedeniyle yanal basınca dayanamayıp devrilmiştir (Şekil 10). Drenaj sisteminin ve geçirimli dolgunun ihmali bu tür kazalara ve devrilmelere yol açar. Böyle facialar sonucunda oradan geçen vatandaşlar yaralanabilir veya hayatını kaybedebilir. Orada bulunan taşıtlar zarar görerek maddi hasar oluşabilir. Böyle şeylerin önüne geçebilmek için istinat duvarları fen ve mühendislik kurallarına göre yapılmalıdır.

Kişisel Koruyucu Donanımın Tanıtımı

İş yerleri, çalışanlarının iş sahasında karşılaşabilecekleri tehlikelere göre personeline kişisel koruyucu ekipman sağlamak zorundadır. Çalışılan işin tehlikesine göre eldiven, gözlük, emniyet

kemeri, ayakkabı, yelek, baret, maske, kulaklık gibi birçok ekipman seçilmelidir (Şekil 11).

Şekil 11 Kişisel koruyucu ekipmanların tanıtılması



Kaynak: Öğmen, 2026

Genel Değerlendirme ve Sonuç

Yapılan uygulamalara göre toprak kayması veya göçmesi gibi facialarının önüne geçebilmek için çeşitli yapı elemanları ile doğru imalatlar çerçevesinde çalışmalar yapılmalıdır. Bu çalışmaları gerçekleştirirken iş sağlığı ve güvenliği önlemleri bu çalışmalara uygun şekilde alınmalıdır. Kullanılacak ekipman, personelin çalıştığı birime ve lokasyona uygun mu; bunlar öngörülerek planlanmalıdır.

Kaynakça

Dedeler, H. (2008). *Bir işletmede işyeri fiziksel risk etmenlerinin çalışanların sağlığına olan etkisinin saptanması ve değerlendirilmesi.* YL. Tezi Trakya Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Halk Sağlığı Anabilim Dalı.

Gümüş, A. (2005). Diyarbakır Bölgesinde Mermer Ocağı İşletmeciliğinde İş Güvenliği ve İş Kazalarının Doğurduğu Sonuçlar. Doğu ve Güneydoğu Anadolu Maden Kaynaklarının Değerlendirilmesi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 21-23.

Natural zemin fore kazık & taahhüt . https://naturalzemin.com/hizmetler/shotcrete (erişim tarihi:17.10.2026)

Öğmen, E. (2026). *Yamaç bölgelerde yapılan inşaat projelerinde iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması.* YL Tezi. İzmir Bakırçay Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı.

Özcan, K. Yamaç ve şevlerin stabilitesi: Temel kavramlar https://www.kursatozcan.com/ders_notlari/toprak_mekanigi/ik/20_yamac_sevlerin_stabilitesi_temel_kavramlar.pdf (erişim tarihi: 17.10.2026)

Temür, R., & Bekdaş, G. (2018). Betonarme konsol istinat duvarlarının optimum tasarımı. Pamukkale Üniversitesi *Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24(6)*, 1043-1050 . https://dergipark.org.tr/en/pub/pajes/article/498366

Topçu, İ. B., & Beton, T. M. M. O. B. (2006). İnşaat Mühendisleri Odası Eskişehir Şubesi, Yayın No: 2.

Ünal, Z. (2024). “İzmir Menderes’te sağanak sonrası istinat duvarı çöktü”. https://www.egedeyenigun.com/izmir-mendereste-saganak-sonrasi-istinat-duvari-coktu

BÖLÜM 2

KOHEZYONLU TABANLARDA YAN SAVAK ETRAFINDAKİ AKIM-SEDİMENT ETKİLEŞİMİ: MEKANİZMALAR VE BELİRLEYİCİ PARAMETRELER

FEVZİYE AYÇA SARAÇOĞLU[1]
HAYRULLAH AĞAÇCIOĞLU[2]

Giriş

Yan savaklar, ana kanalın yan duvarına yerleştirilerek akımın bir kısmını yanal yönde uzaklaştıran yapılardır. Kanaldaki fazla suyu atmak ya da bir yan kanala gerekli debiyi vermek için kullanılmaktadır. Sulama ve drenaj kanallarında, kanalizasyon sistemlerinde, hidroelektrik tesislerinin iletim kanallarında ve taşkın kontrolünde sıkça karşılaşılan yapılardır (Ağaççıoğlu, 1995; Önen, 2004). Dikdörtgen, üçgen, trapez veya dairesel kesitli olarak inşa edilebilen yan savakların hidrolik davranışı, savak tipine göre farklılık göstermektedir (Ağaççıoğlu, 1995).

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-9626-7652.
[2] Prof. Dr, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-1860-9848

Yan savak boyunca ana kanaldaki debi sürekli azalmaktadır. Bu nedenle yan savak akımı uzaysal olarak değişen akım olarak ele alınmaktadır. Bu akımın çözümünde en yaygın kullanılan yaklaşım (De Marchi, 1934) tarafından geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda savak boyunca özgül enerjinin sabit kaldığı kabul edilmektedir. Sonraki çalışmalarda yaklaşım farklı akım koşulları ve kanal geometrileri için geliştirilmiştir (Subramanya & Awasthy, 1972; Ranga Raju vd., 1979; Hager, 1987; Borghei vd., 1999). Yan savaklar üzerine yapılan ilk çalışmalar ağırlıklı olarak savak debi katsayısı ve su yüzü profili üzerinde durmuştur. Bu çalışmalardaki deneylerin büyük kısmı sabit tabanlı kanallarda gerçekleştirilmiştir.

Doğal akarsu yataklarında ise taban genellikle hareketlidir. Yan savak, ana kanaldaki hız dağılımını değiştirmekte ve savak önünde yanal akım ile ikincil akımların oluşmasına neden olmaktadır. Bu değişim taban üzerindeki kayma gerilmesini artırmakta ve savak çevresinde yerel oyulmaya yol açabilmektedir. Hareketli tabanlı kanallarda yan savak etrafındaki oyulmaya ilişkin ilk çalışmalarda kum gibi kohezyonsuz taban malzemeleri kullanılmıştır (Önen, 2004), Önen & Ağaççıoğlu, 2007b; Ağaççıoğlu vd., 2007; Rosier, 2007).

Hidrolik yapılar etrafındaki oyulma, yapının temelini zayıflatabildiği için yapı güvenliği açısından önemli bir problemdir. Bu alandaki çalışmalar uzun yıllar boyunca ağırlıklı olarak kohezyonsuz malzemeler üzerinde yürütülmüştür. Kil veya kil-kum karışımı tabanlarda ise oyulma süreci farklı bir davranış göstermektedir. Kohezyonlu malzemede oyulma yalnızca akımın şiddetine bağlı değildir. Kil mineralinin türü, kil ve su muhtevası, konsolidasyon durumu ve suyun kimyasal özellikleri de süreci etkilemektedir (Partheniades, 2009; Grabowski vd., 2011) . Etkili parametre sayısının fazla olması, kohezyonlu tabanlardaki oyulma davranışının genellenmesini zorlaştırmaktadır. Kohezyonlu tabanlarda yapılan deneysel çalışmalar daha çok köprü ayakları

çevresinde yoğunlaşmıştır (Molinas & Hosny, 1999; Ting, vd., 2001; Briaud vd., 2004; Debnath & Chaudhuri, 2010). Yan savak etrafında kil-kum karışımı tabanlarda oluşan oyulma deneysel olarak incelenmiştir (Saraçoğlu, 2015).

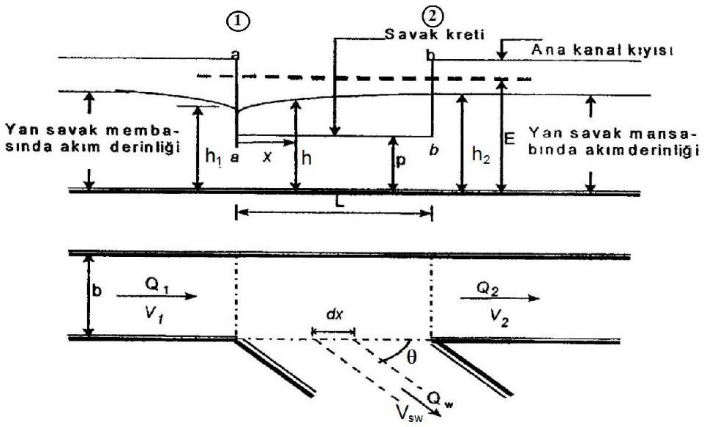
Bu bölümde, kohezyonlu tabanlarda yan savak çevresinde gelişen akım ile taban malzemesi arasındaki etkileşim ele alınmıştır. Oyulma sürecini kontrol eden mekanizmalar ve bu süreçte etkili olan parametreler tartışılmıştır. Bölümün ikinci kısmında yan savakların hidrolik davranışı, üçüncü kısmında yan savak çevresinde oluşan akım yapıları özetlenmiştir. Dördüncü ve beşinci kısımlarda kohezyonlu tabanların özellikleri ve bu tabanlardaki oyulma mekanizmaları açıklanmıştır. Altıncı kısımda hareketli tabanlı kanallarda yan savak etrafındaki oyulmaya ilişkin çalışmalar değerlendirilmiş, yedinci kısımda etkili parametreler incelenmiştir. Sekizinci kısımda deneysel bulgular özetlenmiş, son kısımda ise sonuçlar mühendislik uygulamaları açısından değerlendirilerek öneriler sunulmuştur.

Yan Savakların Hidrolik Davranışı

Yan savak akımının temel özellikleri

Yan savak, ana kanalın yan duvarında belirli bir kret yüksekliğine (p) sahip bir eşik şeklinde inşa edilmektedir. Ana kanaldaki su seviyesi kret yüksekliğini aştığında, akımın bir kısmı savak üzerinden yanal yönde savaklanmaktadır. Savak kreti genellikle kanal eksenine paralel olarak yerleştirilmektedir (Ağaççıoğlu, 1995). Dikdörtgen kesitli bir kanala yerleştirilmiş dikdörtgen yan savağın planı ve en kesiti Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 1 Dikdörtgen yan savak akımının planı ve en kesiti.



Kaynak: Ağaçcıoğlu (1998)

Burada h_1, yan savak membasında ana kanal eksenindeki su derinliği (m); h_2, yan savak mansabında ana kanal eksenindeki su derinliği (m); h, herhangi bir kesitteki su derinliği (m); Q_1, ana kanaldaki debi (m^3/s); Q_2, yan savaktan sonraki ana kanal debisi (m^3/s); Q_w, yan savaktan savaklanan debi (m^3/s); V_1, yan savak membasında ortalama akım hızı (m/s); V_2, yan savak mansabında ortalama akım hızı (m/s); V_{sw} , yan savaktan savaklanan akım hızı (m/s); b, ana kanal genişliği (m); L, yan savak uzunluğu (m); θ, savaklanma (sapma) açısı; p, yan savak kret yüksekliği (m); x, yan savağın herhangi bir noktasının yan savak başlangıcına olan mesafesi olarak verilmiştir.

Debi savak boyunca membadan mansaba doğru azaldığından akım derinliği ve ortalama hız da değişmektedir. Bu nedenle yan savak akımı, uzaysal olarak değişen ve azalan debili bir akım olarak tanımlanmaktadır (Chow, 1973). Bu tür akımların analizinde enerji ve momentum yaklaşımları kullanılmaktadır. Chow (1973), azalan debili akımlarda savaklanan suyun ana kanaldaki akımın enerji yükünü değiştirmediğini belirtmiştir. Bu nedenle problemin

çözümünde enerji denkleminin kullanılmasını daha uygun bulmuştur.

Enerji yaklaşımı ilk olarak De Marchi (1934) tarafından geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda ana kanalda kararlı akım olduğu, kanalın prizmatik olduğu ve savak kretinin kanal tabanına paralel olduğu kabul edilmektedir. En önemli kabul ise özgül enerjinin savak boyunca sabit kalmasıdır. Savağın birim uzunluğundan savaklanan debi, normal savak formülüne benzer şekilde aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$q = \frac{dQ_w}{dx} = -\frac{dQ}{dx} = C_d\sqrt{2g}\,(h-p)^{3/2} \quad (1)$$

Burada Q_w yan savaktan savaklanan debi, C_d debi katsayısı, h ana kanaldaki akım derinliği, p kret yüksekliği ve g yerçekimi ivmesidir. (h − p) terimi savak kreti üzerindeki yükü göstermektedir. Sabit özgül enerji (E) kabulüyle dikdörtgen kesitli bir kanalda herhangi bir kesitteki debi şöyle yazılabilmektedir:

$$Q = bh\sqrt{2g(E-h)} \quad (2)$$

Enerji çizgisi eğiminin kanal taban eğimine eşit olduğu kabul edildiğinde, savak boyunca su yüzü profilinin diferansiyel denklemi elde edilmektedir:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{AQ}{bQ^2 - gA^3}\frac{dQ}{dx} \quad (3)$$

Burada A akım kesit alanı, b kanal genişliğidir (De Marchi, 1934; Chow, 1973). Borghei vd. (1999), savak boyunca enerji seviyesindeki azalmanın yaklaşık %3,7 düzeyinde kaldığını göstermiştir. Bu sonuca göre sabit özgül enerji kabulü önemli bir hataya yol açmamaktadır. Buna karşılık Yüksel (2004), savak boyunca debide büyük değişimler olduğunda bu kabulden belirgin sapmalar oluştuğunu belirlemiştir.

Su yüzü profilleri

Yan savak boyunca oluşan su yüzü profili, savak kesitindeki akım rejimine bağlıdır. Bir kanalda üç farklı profil tipi oluşabilmektedir. Nehir rejiminde akım mansap kontrollüdür ve su seviyesi savak boyunca mansaba doğru yükselmektedir. Akımda bir süreksizlik varsa savak kesitinde sel rejiminden nehir rejimine geçiş hidrolik sıçrama ile gerçekleşmektedir. Akım derinliği kritik derinliğe yakınsa ya da kanal eğimi büyükse sel rejimi oluşmakta ve su seviyesi savak boyunca azalmaktadır (Naudascher, 1992; Rosier, 2007). Tasarımda genellikle nehir rejimli akım koşulları tercih edilmektedir (Borghei vd.,1999).

Yan savak boyunca debi azaldığı için Denklem (3)'teki dQ/dx terimi negatiftir. Nehir rejiminde $gA^3 > bQ^2$ olduğundan payda da negatif değer almakta, dolayısıyla dh/dx pozitif olmakta ve su yüzü savak boyunca yükselmektedir. Sel rejiminde ise payda pozitif olduğundan su yüzü alçalmaktadır. Deneysel gözlemler de bu sonucu desteklemektedir. Ağaççıoğlu (1995), nehir rejiminde su derinliğinin savak başlangıcında en küçük değerine ulaştığını belirlemiştir. Su derinliği bu noktadan sonra savak ortasına kadar hızla yükselmekte, savak sonuna doğru ise neredeyse yatay hale gelmektedir. Collinge (1957), enerji kayıpları nedeniyle ölçülen su yüzü profillerinin teorik profillerden daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Debi katsayısı ile savak uzunluğu ve kret yüksekliğinin etkisi

Yan savağın tasarımında debi katsayısının bilinmesi gerekmektedir. Boyut analizi ile yan savak debi katsayısının aşağıdaki boyutsuz parametrelere bağlı olduğu gösterilmiştir:

$$C_D = f\left(Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gh_1}}, \frac{L}{b}, \frac{h_1}{L}, \frac{p}{h_1}\right) \tag{4}$$

Burada Fr_1 yan savak membasındaki akımın Froude sayısı, h_1 savak membasındaki akım derinliği ve L savak uzunluğudur. Subramanya

& Awasthy (1972), debi katsayısını etkileyen en önemli parametrenin Fr_1 olduğunu belirtmiştir. Nehir rejimli akımlar için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir:

$$C_d = 0{,}407\sqrt{1 - \frac{3Fr_1^2}{Fr_1^2+2}} \quad (5)$$

Borghei vd. (1999), debi katsayısının Froude sayısı ve p/h_1 oranı arttıkça azaldığını, L/b oranı arttıkça ise bir miktar arttığını göstermiştir. Ranga Raju vd. (1979), kanal taban eğiminin ve sürtünmenin de savaklanan debiyi etkilediğini belirlemiştir.

Kret yüksekliği ve savak uzunluğu, savaklanan debiyi belirleyen başlıca geometrik büyüklüklerdir. Aynı akım koşullarında kret yüksekliğinin azalması savak üzerindeki yükü artırmakta, dolayısıyla savaklanan debi de artmaktadır. Savak uzunluğunun artması da savaklanan debiyi artırmaktadır. Savaklanan debinin ana kanal debisine oranı (Q_w/Q_1) savaklanma oranı olarak tanımlanmaktadır (El-Khashab, 1975). Bu oran, savak çevresindeki yanal akımın şiddetini gösteren bir büyüklüktür. Froude sayısı, kret yüksekliği ve savak uzunluğu, savak çevresindeki akım yapısını da doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle aynı parametreler, hareketli tabanlı kanallarda oluşan oyulmanın incelenmesinde de temel değişkenler olarak kullanılmaktadır.

Yan Savak Etrafında Gelişen Akım Yapıları

Yan savak çevresindeki akım üç boyutlu bir yapıya sahiptir. Hager & Volkart (1986), nehir rejiminde yan savak bulunan bir kanaldaki akımı beş bölgede tanımlamıştır. Savak membasındaki birinci bölgede hız dağılımı üniforma yakın, su yüzü ise yataydır. Savak girişindeki ikinci bölgede akım hızlanmakta, potansiyel enerji kinetik enerjiye dönüşmekte ve akım çizgileri savağa doğru eğrilmektedir. Savağın karşı kıyısındaki üçüncü bölgede yanal akıma katılamayan su kütlesi düşük hızlarla hareket etmektedir. Savağın hemen mansabındaki dördüncü bölgede akım çizgilerinin bir kısmı

ana akımdan ayrılmakta ve ters akımla birlikte ikinci bir ayrılma bölgesi oluşmaktadır (Neary vd.,1999). Beşinci bölgede ise akım savak mansabında yeniden düzenlenmektedir (Rosier, 2007).

Nehir rejiminde yan savağın mansap yarısında ters akım ve durgunluk bölgesi oluştuğu birçok araştırmacı tarafından gözlenmiştir (Subramanya & Awasthy, 1972; El-Khashab, 1975; Ağaççıoğlu & Yüksel, 1998; Coşar & Ağaççıoğlu, 2004; Önen, 2004). Ayrılma bölgesinin yeri ve büyüklüğü, savak membasındaki Froude sayısına ve savak uzunluğuna bağlıdır (Hager & Volkart, 1986; Önen & Ağaççıoğlu, 2007a). El-Khashab & Smith (1976), savaklanma oranının 0,70 civarında olduğu durumda savak sonuna doğru ana kanaldaki hızın belirgin şekilde azaldığını ve bir durgunluk bölgesi oluştuğunu belirtmiştir. Rosier (2007) ise 0,04–0,37 aralığındaki savaklanma oranlarında bu bölgeyi tespit edememiştir. Buna göre durgunluk bölgesinin oluşumu büyük ölçüde savaklanma oranına bağlıdır.

Yanal akım, kanal en kesitinde ikincil (sekonder) akımların oluşmasına da neden olmaktadır. El-Khashab (1975), savak kreti seviyesinin üzerindeki su kütlesinin doğrudan savağa yöneldiğini göstermiştir. Kret seviyesinin altındaki su kütlesinin üst kısmı da yanal akıma katılmaktadır. Bu kısım kret yüksekliğinin yaklaşık üçte biri kadardır. Alt kısımdaki su kütlesi ise kanal tabanına doğru yönelmektedir. Savağın ikinci yarısında ikincil akımın etkisi belirginleşmekte, taban yakınındaki düşük enerjili akışkan karşı kıyıya doğru sürüklenmektedir. İkincil akımın şiddeti savak boyunca artmakta ve savak sonundan yaklaşık kanal genişliği kadar bir mesafe sonra azalmaktadır. Kret yüksekliği ve savak uzunluğu sabit tutulduğunda, savaklanma oranı arttıkça ikincil akımın şiddeti de artmaktadır (El-Khashab, 1975). Rosier (2007), ikincil akımın şiddetini yüzeye ve tabana yakın enine hızlar arasındaki farkla tanımlamış ve bu farkın savaklanma oranıyla birlikte arttığını göstermiştir. Taban yakınında savağa ve tabana yönelen bu akımlar,

savak çevresindeki taban kayma gerilmesinin dağılımını değiştirmektedir. Bu nedenle hareketli tabanlı kanallarda oyulmanın yeri ve şiddeti, yan savağın oluşturduğu akım yapısıyla yakından ilişkilidir.

Kohezyonlu ve Karışık Sedimentli Tabanların Özellikleri

Kohezyonlu (ince taneli) malzeme, silt ve kil boyutundaki tanelerden oluşmaktadır. Tane boyutu küçüldükçe tanenin birim kütlesine düşen yüzey alanı artmakta, buna bağlı olarak kohezyonun etkisi de belirginleşmektedir. Yaklaşık 40 μm'den büyük taneler pratikte kohezyonsuz davranırken, 2 μm'den küçük kil tanelerinde kohezyon belirleyici hale gelmektedir (Mehta & Lee, 1994). Kil taneleri ince plakalar şeklindedir ve yüzeylerinde elektrik yükleri bulunmaktadır. Bu yükler nedeniyle tane yüzeyleri adsorbe bir su tabakası ile kaplanmakta, taneler arasında elektriksel çekme ve itme kuvvetleri oluşmaktadır (Özaydın, 2011). Kohezyonlu sedimentlerin hareketi bu nedenle yalnızca sürükleme ve kaldırma gibi hidrodinamik kuvvetlerle değil, elektrokimyasal ve biyolojik kuvvetlerle de kontrol edilmektedir (Black vd., 2002).

İnce taneli zeminlerin mühendislik davranışı büyük ölçüde su muhtevasına bağlıdır. Su muhtevasındaki değişime bağlı olarak zemin katı kıvamdan viskoz sıvı kıvamına kadar geniş bir aralıkta davranış gösterebilmektedir. Bu değişim likit limit (w_L) ve plastik limit (w_p) gibi kıvam limitleriyle tanımlanmaktadır. Zeminin mevcut su muhtevasının kıvam limitlerine göre konumu likitlik indisi ile ifade edilmektedir. Likitlik indisi 1'den küçük olan zeminler erozyona karşı daha dirençli iken, 1'den büyük olan zeminler kolayca erozyona uğramaktadır (Özaydın, 2011). Başlıca kil mineralleri kaolin, illit ve montmorillonittir. Kaolinden montmorillonite doğru tane boyutu küçülmekte, katyon değişim kapasitesi ve fizikokimyasal aktivite ise artmaktadır. Kaolin, en büyük tane boyutuna ve en düşük katyon değişim kapasitesine sahip olan,

dolayısıyla elektrokimyasal aktivitesi en düşük kil mineralidir (Grim, 1962; Partheniades, 2009).

Kohezyonsuz malzemede kritik kayma gerilmesi esas olarak tane çapına bağlıdır. Kohezyonlu malzemede ise kritik kayma gerilmesi çok sayıda faktörün ortak etkisiyle belirlenmektedir. Heinzen (1976), kohezyonlu zeminin oyulabilirliğini kilin tipi ve miktarı, boşluk suyunun kimyasal bileşimi, organik madde varlığı, tane boyut dağılımı, zeminin gerilme geçmişi, sıcaklık, pH ve su muhtevası ile ilişkilendirmiştir. Briaud vd. (2004), zeminin birim hacim ağırlığı ve plastisite indisi arttıkça oyulabilirliğin azaldığını, boşluk oranı, şişme ve sıcaklık arttıkça ise oyulabilirliğin arttığını belirtmiştir. Grabowski vd. (2011), bu faktörleri fiziksel, kimyasal ve biyolojik olmak üzere üç grupta ele almış ve bunların birbirinden bağımsız olmadığını vurgulamıştır.

Doğal akarsu yataklarında taban malzemesi çoğunlukla kum, silt ve kilin karışımından oluşmaktadır. Kum tabana kil eklenmesi, tabanın erozyona karşı direncini artırmaktadır (Mitchener & Torfs,1996). Düşük kil oranlarında kil tanecikleri kum taneleri arasındaki boşlukları doldurmakta ve daha düzgün bir yüzey oluşturmaktadır (Lick vd., 2004). Kil oranı arttıkça taban malzemesinin yapısı kum tanelerinin oluşturduğu bir iskeletten kil matrisine dönüşmekte ve malzeme kohezyonlu davranış göstermeye başlamaktadır (Van Ledden vd., 2004; Winterwerp & van Kesteren, 2004). Molinas & Hosny (1999), kumlu tabanlarda kil oranının %40'a kadar artmasıyla oyulma derinliğinin ve oyulma hacminin azaldığını belirlemiştir.

Su muhtevası ve birim hacim ağırlık birbiriyle ters orantılıdır. Her ikisi de kohezyonlu tabanın konsolidasyon derecesini yansıtmaktadır. Konsolidasyon ilerledikçe tabanın birim hacim ağırlığı ve kayma mukavemeti artmaktadır. Birim hacim ağırlığı yüksek olan tabanlarda oyulma oranlarının, daha düşük olan tabanlara göre yüz kata kadar daha az olabildiği gösterilmiştir (Jepsen vd., 1997; Lick & McNeil, 2001). Bazı araştırmacılar ise

kohezyonlu tabanın oyulma davranışını belirleyen asıl parametrenin, kilin mekanik özelliklerini doğrudan etkilediği için su muhtevası olduğunu ileri sürmüştür (Van Ledden vd., 2004; Winterwerp & van Kesteren, 2004). Bu özellikler, kohezyonlu tabanlarda oyulmanın kohezyonsuz tabanlardan farklı bir süreç izlemesine neden olmaktadır.

Kohezyonlu Tabanlarda Oyulma Mekanizmaları

Oyulma, akım ile taban malzemesi arasındaki etkileşimin bir sonucudur. Akımın taban üzerinde oluşturduğu kayma gerilmesi (τ) kritik kayma gerilmesini (τ_{kr}) aştığında taban malzemesi harekete geçmektedir (Ahmad vd., 2011). Tabanın stabilitesi, sınır tabakası kayma gerilmesi ve türbülans gibi erozyona neden olan kuvvetler ile ağırlık, sürtünme, adezyon ve kohezyon gibi erozyona karşı koyan kuvvetler arasındaki dengeye bağlıdır (Winterwerp & van Kesteren, 2004). Kohezyonsuz malzemede harekete başlama koşulu Shields (1936) diyagramı ile tanımlanmaktadır. Kum ve çakılda kritik kayma gerilmesi ortalama tane çapı ile ilişkilidir ve genellikle 0,1–5 N/m² aralığında değişmektedir (Briaud vd., 2001). Kohezyonlu malzemede ise bu ilişki geçerli değildir. Shields diyagramı kohezyonlu tabanlara uygulandığında kritik kayma gerilmesi düşük, erozyon miktarı ise yüksek tahmin edilmektedir (Hanson & Simon, 2001). Farklı çalışmalarda kohezyonlu zeminler için ölçülen kritik kayma gerilmeleri 0,02 N/m² ile 100 N/m² arasında geniş bir aralıkta değişmektedir (Jowett & Elliot, 2009). Kohezyonlu tabanlarda oyulmanın başladığı anın belirlenmesi de güçtür. Bazı araştırmacılar suyun bulanıklaşmasını ölçüt olarak alırken, bazıları kritik değeri kayma gerilmesi ile oyulma oranı arasındaki ilişkiden ekstrapolasyonla belirlemektedir.

Kohezyonlu malzemenin oyulabilirliği, oyulma oranı ile akımın oluşturduğu kayma gerilmesi arasındaki ilişki olarak tanımlanmaktadır. Bu ilişki erozyon fonksiyonu olarak

adlandırılmaktadır (Briaud vd., 2004). Erozyon oranı genellikle aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir (Hanson & Simon, 2001; Sanford & Maa, 2001):

$$E = M(\tau - \tau_{kr})^n \quad (6)$$

Burada E erozyon oranı, M ve n ise zemin özelliklerine bağlı deneysel katsayılardır. Konsolide olmuş killerde kayma gerilmesi ile erozyon oranı arasındaki ilişki yaklaşık olarak doğrusaldır. Doğrusallıktan sapmalar ise zeminin özelliklerine ve derinlikle değişen konsolidasyon derecesine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır (Jowett & Elliot, 2009).

Kohezyonsuz tabanlarda oyulma tane tane gerçekleşmektedir. Kohezyonlu tabanlarda ise taneler arasındaki elektrokimyasal kuvvetler nedeniyle malzeme tane tane koptuğu gibi topaklar halinde de kopabilmektedir (Briaud vd., 2004). Uygulanan kayma gerilmesi kritik kayma gerilmesini aştığında yüzey erozyonu, zeminin mukavemetini aştığında ise tabaka veya bloklar halinde kütle erozyonu oluşmaktadır (Raudkivi, 1990). Navarro (2004), düşük kayma gerilmelerinde yüzey erozyonunun, yüksek kayma gerilmelerinde ise kütle erozyonunun baskın olduğunu deneysel olarak göstermiştir.

Kohezyonlu ve kohezyonsuz tabanlardaki oyulmanın en belirgin farkı oyulma hızıdır. Briaud vd. (2001), kohezyonlu zeminlerdeki erozyon oranının kohezyonsuz zeminlere göre bin kata kadar daha yavaş olabildiğini belirtmiştir. Kil ve kumda köprü ayakları etrafında yapılan deneylerde, kildeki oyulma derinliğinin 200 saat sonra bile artmaya devam ettiği gözlenmiştir (Briaud vd., 2002). Briaud vd. (2004), kohezyonlu zeminlerin kritik kayma gerilmesinin kohezyonsuz zeminlerle aynı mertebede olabildiğini belirtmiştir. Buna göre denge oyulma derinlikleri de birbirine yakın olabilmekte, asıl fark kritik kayma gerilmesi aşıldıktan sonraki oyulma oranında ortaya çıkmaktadır. Kohezyonsuz tabanda temiz su oyulması

koşullarında da dengeye ulaşma süresi oldukça uzundur. Melville & Chiew (1999), köprü ayakları etrafında denge oyulma derinliğinin %50'sine denge süresinin %0,1–10'unda, %80'ine ise %5–40'ında ulaşıldığını belirlemiştir. Kohezyonlu tabanlarda erozyon belirli bir süre sonra durabilmektedir. Bu durum, zeminin erozyona karşı direncinin derinlikle ve zamanla arttığını göstermektedir (Partheniades, 2009).

Hareketli Tabanlı Kanallarda Yan Savak Etrafında Oyulma

Yan savak etrafındaki taban değişimlerine ilişkin ilk çalışmalardan birinde Fares (1995), sabit tabanlı bir kıvrımlı kanal modelinde yanal savaklanma bölgesindeki taban kayma gerilmesinin azaldığını göstermiştir. Bu azalma düşük savaklanma oranlarında %37'ye, yüksek savaklanma oranlarında ise %82'ye ulaşmıştır. Azalmanın nedeni olarak yanal akımın oluşturduğu ayrılma ve durgunluk bölgeleri gösterilmiştir. Fares (2000), doğal bir akarsuda yan savağın mansabında akım yönüne uzanan bir yığılma, savağın önünde ise bir oyulma çukuru oluştuğunu belirlemiştir. Yığılmanın ve oyulma çukurunun büyüklüğünün savaklanma oranına (Q_w/Q_1) ve rölatif savak yüküne (h_1/p) bağlı olduğu belirtilmiştir.

Önen (2004), kohezyonsuz malzeme tabanlı doğrusal ve 180°'lik kıvrımlı kanallarda yaklaşık 900 deney gerçekleştirmiştir. Boyut analizi sonucunda rölatif denge oyulma derinliğinin (H_d/p) yaklaşım hızının kritik hıza oranına (V_1/V_{kr}), h_1/p ve L/b oranlarına bağlı olduğu belirlenmiştir. Deneylerde $V_1/ V_{kr} < 0,45$ olduğunda oyulma oluşmamıştır. Temiz su oyulması koşullarında H_d/p, V_1/V_{kr} ile yaklaşık doğrusal olarak artmış ve $V_1/ V_{kr} = 0,95–1$ aralığında en büyük değerine ulaşmıştır. Hareketli taban oyulmasında ise yanal akımın zayıflaması ve membadan gelen taban dalgalarının oyulma çukurunu doldurması nedeniyle H_d/p azalmıştır. Ağaççıoğlu vd. (2007), kıvrımlı kanalın 30°'lik kesitine yerleştirilen yan savak için benzer sonuçlar elde etmiştir. Söz konusu çalışmada $V_1/ V_{kr} < 0,55$

değerlerinde oyulma oluşmamış ve en büyük oyulma derinliği $V_1/V_{kr} = 1$ değerinde gözlenmiştir.

Yan savak etrafındaki oyulmanın temel nedeni, savak boyunca gelişen ikincil akımdır. Yan savağın ikinci yarısında yüksek hızlı bölge ile durgunluk bölgesi arasında oluşan hız süreksizliği şiddetli bir ikincil akım meydana getirmekte ve oyulma çukuru bu bölgede gelişmektedir (Önen, 2004). Kret yüksekliği arttıkça savaktan savaklanan debi azalmakta, ana kanalda mansaba doğru devam eden akımın kinetik enerjisi ise artmaktadır. Bu durum ikincil akımın şiddetini azaltmakta ve daha küçük oyulma derinliklerine yol açmaktadır. Buna karşılık savak uzunluğu ve savaklanma oranı arttıkça ikincil akımın şiddeti ve buna bağlı olarak rölatif denge oyulma derinliği artmaktadır (Önen, 2004).

Önen & Ağaççıoğlu (2007b), savak yakınında bir oyulma çukuru gelişirken savak mansabında kanal ortasında kum biriktiğini gözlemiştir. Denge oyulma derinliğini etkileyen en önemli parametrelerin yaklaşım hızı ve su yükü oranı $[(h_1 - p)/h_1]$ olduğu belirlenmiştir. Ağaççıoğlu vd. (2007), en büyük oyulmanın yan savak kesitinin mansap tarafında oluştuğunu ve akım şiddeti arttıkça bu noktanın mansaba doğru ilerlediğini göstermiştir. Rosier (2007), yan savak kesitinde tabana yakın enine hızların akım yönündeki hızlardan büyük olduğunu ölçmüş ve bunu taban malzemesinin savağa doğru taşınmasıyla açıklamıştır.

Kohezyonsuz tabanda temiz su oyulması koşullarında oyulma derinliği başlangıçta hızla artmakta, daha sonra asimptotik olarak denge değerine yaklaşmaktadır. Önen (2004), denge süresinin %10'unda denge oyulma derinliğinin %40–70'ine, %50'sinde ise %90–95'ine ulaşıldığını belirlemiştir. Bu sonuçlar, köprü ayakları için verilen zaman ölçekleriyle uyumludur (Melville & Chiew, 1999).

Yukarıda özetlenen çalışmaların tamamı kohezyonsuz taban malzemesiyle yapılmıştır. Kohezyonlu tabanlarda da savak çevresindeki akım yapısı aynı şekilde gelişmektedir. Ancak tabanın akıma karşı direnci, kohezyonlu tabanların özellikleri ve oyulma mekanizmaları açıklanırken belirtildiği gibi kil muhtevası, su muhtevası ve konsolidasyon gibi malzeme özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle kohezyonlu tabanlarda oyulmanın başlangıcı, gelişim hızı ve denge derinliği kohezyonsuz tabanlardan farklılık göstermektedir. Kohezyonlu tabanda yan savak etrafında elde edilen deneysel bulgular aşağıda deneysel bulgular kısmında özetlenmiştir.

Etkili Parametreler

Hareketli tabanlı bir kanalda yan savak etrafında oluşan oyulmayı etkileyen değişkenler beş grupta toplanabilir:

- *Kanala ait değişkenler:* kanal genişliği (b) ve taban eğimi (J_o).
- *Akışkana ait değişkenler:* özgül kütle (ρ), dinamik viskozite (μ), yüzey gerilmesi (σ) ve yerçekimi ivmesi (g).
- *Akıma ait değişkenler:* savak membasındaki akım derinliği (h_1), ortalama hız (V_1) ve akımın savağa sapma açısı (θ).
- *Yan savağa ait değişkenler:* kret yüksekliği (p) ve savak uzunluğu (L).
- *Taban malzemesine ait değişkenler:* kohezyonlu tabanda bu grupta tanelerin özgül kütlesi (ρ_s) ve medyan çapı (d_{50}) ile birlikte kil muhtevası (C), başlangıç su muhtevası (W_c) ve tabanın kayma mukavemeti (τ_s) de yer almaktadır.

Yüzey gerilmesi ve taban eğiminin etkisi küçük olduğundan ihmal edilebilmektedir. Yerçekimi ivmesi, akışkanın özgül kütlesi ve h_1 tekrarlanan değişkenler olarak seçildiğinde, sapma açısı, tane özgül kütlesi ve tane çapının sabit olduğu durumda rölatif oyulma derinliği

aşağıdaki boyutsuz parametrelere bağlı olarak ifade edilmektedir (Saraçoğlu, 2015); Saraçoğlu & Ağaçcıoğlu, 2022):

$$\frac{H_d}{h_1} = f\left(Fr, \frac{p}{h_1}, \frac{L}{b}, C, W_c, \frac{\tau_s}{\rho.g.h_1}\right) \quad (7)$$

Burada Hd oyulma derinliğidir. Denklem (7)'deki parametreler hidrolik, geometrik ve zemine bağlı parametreler olarak üç grupta değerlendirilebilir.

Hidrolik parametre olan Fr_1, savağa yaklaşan akımın şiddetini temsil etmektedir. Kohezyonsuz tabanlarda yapılan çalışmalarda akım şiddeti genellikle yaklaşım hızının kritik hıza oranı (V_1/V_{kr}) ile ifade edilmiştir (Önen, 2004). Kohezyonsuz malzemede kritik hız tane çapına bağlı olarak belirlenebilmektedir. Kohezyonlu malzemede ise daha önce açıklandığı gibi kritik koşul tane çapıyla tanımlanamamaktadır. Bu nedenle kohezyonlu tabanlarda akım şiddetinin Froude sayısı ile ifade edilmesi daha uygun olmaktadır.

Geometrik parametreler olan p/h_1 ve L/b, savaktan savaklanan debiyi ve savak çevresindeki ikincil akımın şiddetini belirlemektedir. Kohezyonsuz tabanlarda kret yüksekliğinin artmasıyla oyulma derinliğinin azaldığı, savak uzunluğunun artmasıyla ise arttığı belirlenmiştir (Önen, 2004).

Zemine bağlı parametreler, kohezyonlu tabanı kohezyonsuz tabandan ayıran büyüklüklerdir. Kil-kum karışımı tabanlarda köprü ayakları etrafında yapılan çalışmalar, kil muhtevası ve su muhtevasının oyulmayı belirleyen en önemli parametreler olduğunu göstermiştir (Molinas & Hosny, 1999; Ansari vd.,2002). Boyutsuz kayma mukavemeti ($\tau_s/\rho g h_1$) ise tabanın konsolidasyon derecesini yansıtmaktadır. Konsolidasyon süresi arttıkça kayma mukavemeti de artmaktadır.

Bu parametrelerin laboratuvarda elde edilen değerlerinin doğal akarsulara aktarılmasında bazı sınırlamalar bulunmaktadır.

Laboratuvar çalışmalarında genellikle kaolin gibi tek tip ve ticari olarak elde edilen killer kullanılmaktadır. Doğal akarsu tabanlarında ise farklı kil mineralleri, organik madde ve biyolojik etkiler birlikte bulunmaktadır. Bu nedenle laboratuvar sonuçları, doğal tabanlarda oluşabilecek oyulmanın büyüklüğünden çok genel eğilimi göstermektedir (Grabowski vd., 2011).

Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Genel Bulgular

Kohezyonlu tabanlarda yapılan deneysel çalışmaların büyük kısmı köprü ayakları çevresindeki oyulma üzerinedir. Molinas & Hosny (1999), kumlu tabana kil eklenmesinin oyulma derinliğini azalttığını ve bu azalmanın kil muhtevası %40'a ulaşıncaya kadar sürdüğünü belirlemiştir. Daha yüksek kil muhtevalarında ise kompaksiyon derecesi ve su muhtevası daha belirleyici hale gelmektedir. Aynı çalışmada başlangıç su muhtevası azaldıkça oyulma derinliğinin ve hacminin azaldığı, oyulma çukurunun kenar eğimlerinin ise dikleştiği gözlenmiştir. Debnath & Chaudhuri (2010), düşük su muhtevalarında kil muhtevası arttıkça oyulma derinliğinin azaldığını göstermiştir. Yüksek su muhtevalarında ise oyulma derinliği belirli bir kil muhtevasına kadar azalmakta, bu değerden sonra artmaktadır. Ting vd. (2001) ve Briaud vd. (2004) ise kil tabandaki oyulmanın daha yavaş geliştiğini, ancak denge oyulma derinliğinin kum tabandakine yakın olabildiğini belirtmiştir. Ansari vd. (2002) de kohezyonlu tabandaki oyulma derinliğinin kohezyonsuz tabandakinden küçük veya büyük olabileceğini, belirleyici parametrenin su muhtevası olduğunu vurgulamıştır. Bu farklı sonuçlar, kohezyonlu tabanlarda oyulmanın malzeme özelliklerine ne kadar duyarlı olduğunu göstermektedir.

Yan savak etrafında kohezyonlu tabanda oluşan oyulma, 0,40 m genişliğinde dikdörtgen kesitli bir kanalda deneysel olarak incelenmiştir. Taban malzemesi kaolin kili ile kilin kuru ağırlığının %31'i oranında kumun karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Başlangıç su

muhtevası %20 ± 2 düzeyinde tutulmuş, malzeme 2,16 kPa basınç altında konsolide edilmiştir. Deneyler 25, 40 ve 50 cm uzunluğunda, 7, 10 ve 12 cm kret yüksekliğindeki dikdörtgen yan savaklarla, nehir rejiminde ve serbest savaklanma koşullarında yürütülmüştür. (Saraçoğlu, 2015; Saraçoğlu & Ağaççıoğlu, 2022).

Yalnızca kaolin kullanılarak hazırlanan tabanda, deney düzeneğinin izin verdiği en yüksek akım hızlarında bile oyulma oluşmamıştır (Saraçoğlu & Ağaççıoğlu, 2015). Kum oranının %5, 7 ve 10 olduğu karışımlarda da sonuç değişmemiştir (Saraçoğlu, 2015).

Bulguların bir kısmı kohezyonsuz tabanlardaki davranışla benzerlik göstermektedir. Oyulma derinliği başlangıçta hızla artmış, daha sonra asimptotik olarak denge değerine yaklaşmıştır. Dengeye ulaşma süresi Froude sayısı arttıkça uzamış, ancak büyük Froude sayılarında oyulmanın büyük kısmı bu sürenin ilk %20'lik bölümünde gerçekleşmiştir (Saraçoğlu, 2015). Bütün savak boyutlarında boyutsuz denge oyulma derinliği Fr_1 arttıkça artmıştır (Saraçoğlu & Ağaççıoğlu, 2022). Kret yüksekliğinin artmasıyla ise boyutsuz denge oyulma derinliği azalmıştır (Saraçoğlu & Ağaççıoğlu, 2015). Savak uzunluğu arttıkça oyulmanın dengeye ulaşması uzamış, ancak oyulmanın büyük kısmı deney süresinin ilk %20–35'lik bölümünde gerçekleşmiştir (Saraçoğlu & Ağaççıoğlu, 2022).

Kohezyonlu tabana özgü bulgular ise taban malzemesinin direnciyle ilgilidir. Konsolidasyon süresi arttıkça tabanın kayma mukavemeti artmış ve oyulma derinliği azalmıştır. Başlangıç su muhtevasındaki ±%3 gibi küçük değişimler bile denge oyulma derinliğini belirgin şekilde etkilemiştir (Saraçoğlu & Ağaççıoğlu, 2022).Aynı savak boyutları için yapılan karşılaştırmada, kohezyonlu tabanda daha yüksek Froude sayılarında çalışılmasına rağmen oyulma derinlikleri kohezyonsuz tabandakinden daha küçük kalmıştır. Denge süresine oranla değerlendirildiğinde oyulma kohezyonlu tabanda daha geç gelişmiştir. Buna karşılık denge oyulma derinliğine ulaşma süresi

kohezyonlu tabanda daha kısa olmuş, bu durum karışımdaki kum oranıyla açıklanmıştır (Saraçoğlu, 2015; Saraçoğlu & Ağaççıoğlu, 2022). Kohezyonsuz tabanda denge süresinin %10'unda denge derinliğinin %40–70'ine ulaşılırken, kohezyonlu tabanda bu oran %10–70 aralığında kalmıştır. Denge süresinin %50'sinde ise kohezyonsuz tabanda %90–95'e, kohezyonlu tabanda %50–95'e ulaşılmıştır (Önen, 2004; Saraçoğlu, 2015). Bu bulgulara dayanarak kohezyonlu taban için boyutsuz denge oyulma derinliğini veren bir regresyon bağıntısı önerilmiştir (Saraçoğlu & Ağaççıoğlu, 2022).

Oyulma çukurunun geometrisi de kohezyonsuz tabandakinden farklıdır. Çukurun memba tarafı neredeyse düşey, mansap tarafı ise daha yatıktır. Çukurun savak boyunca uzunluğu zamanla belirgin şekilde artarken, savağa dik doğrultudaki genişliği az değişmiş ve 1–2 saat içinde dengeye ulaşmıştır (Saraçoğlu, 2015). Elde edilen sonuçlar, kil-kum karışımı tabanlarda kohezyonun oyulmayı sınırlayıcı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu sonuç Molinas & Hosny (1999) bulgularıyla uyumludur. Kil ve kumda denge derinliklerinin benzer olduğunu belirten çalışmalarla (Ting vd., 2001; Briaud vd., 2004) arasındaki farkın, taban malzemesindeki kum oranından kaynaklandığı düşünülmektedir (Saraçoğlu & Ağaççıoğlu, 2022).

Sonuçlar ve Öneriler

Yan savak boyunca akım uzaysal olarak değişmekte, debi azalırken savak önünde yanal akım ve ikincil akımlar gelişmektedir. Bu akım yapısı taban kayma gerilmesinin dağılımını değiştirmekte ve hareketli tabanlı kanallarda savak çevresinde yerel oyulmaya neden olmaktadır. Oyulmanın büyüklüğü başlıca savağa yaklaşan akımın şiddetine, kret yüksekliğine ve savak uzunluğuna bağlıdır. Kret yüksekliği arttıkça savaklanan debi ve ikincil akımın şiddeti azalmakta, buna bağlı olarak oyulma derinliği de azalmaktadır.

Kohezyonlu tabanlarda oyulma süreci, akımın oluşturduğu kuvvetlerin yanı sıra taban malzemesinin direncine de bağlıdır. Bu direnç kil muhtevası, su muhtevası, konsolidasyon derecesi ve kil mineralojisi gibi çok sayıda parametreyle belirlenmektedir. Kohezyonlu malzemede oyulma tane tane olabildiği gibi topaklar halinde de gerçekleşebilmekte ve kohezyonsuz malzemeye göre daha yavaş gelişmektedir. Kil-kum karışımı tabanda yan savak etrafında yapılan deneylerde oyulmanın zamanla gelişimi kohezyonsuz tabana benzer bir eğilim göstermiştir. Ancak oyulma denge süresine oranla daha geç gelişmiş ve daha yüksek akım şiddetlerine rağmen oyulma derinlikleri daha küçük kalmıştır. Yalnızca kaolinden oluşan tabanda oyulma oluşmaması ve su muhtevasındaki küçük değişimlerin denge derinliğini belirgin şekilde etkilemesi, malzeme özelliklerinin süreçteki ağırlığını göstermektedir.

Bu sonuçlar mühendislik uygulamaları açısından değerlendirildiğinde, kohezyonlu veya karışık sedimentli tabanlara yerleştirilen yan savakların tasarımında hidrolik parametrelerin yanında taban malzemesinin özelliklerinin de dikkate alınması gerektiği görülmektedir. Kohezyonsuz taban için geliştirilmiş bağıntılar kil-kum karışımı tabanlarda oyulma derinliğini olduğundan büyük tahmin edebilir. Öte yandan kohezyonlu tabanın direnci su muhtevasına ve konsolidasyon durumuna son derece duyarlıdır. Yeni çökelmiş, konsolide olmamış veya su muhtevası yüksek tabanlarda direnç laboratuvar koşullarına göre çok daha düşük olabilir. Bu nedenle laboratuvar sonuçları, doğrudan tasarım değeri olarak değil, oyulmanın genel eğilimini gösteren bulgular olarak değerlendirilmelidir. Kret yüksekliğinin seçimi, savaklanan debi ile oyulma riski arasındaki dengeyi belirleyen önemli bir tasarım kararıdır. Oyulmanın savak boyunca ve özellikle savağın mansap yarısında yoğunlaşması, olası koruma önlemlerinin bu bölgeye odaklanması gerektiğine işaret etmektedir.

İleride yapılacak çalışmalarda kaolin yerine doğal akarsu yataklarından alınan killerin, farklı kum ve su muhtevalarının kullanılması, kohezyonlu tabanlardaki oyulma davranışının daha genel olarak ortaya konulmasını sağlayacaktır. Sel rejimi koşulları, düşük Froude sayıları, farklı savak geometrileri ve kıvrımlı kanallar için yapılacak deneyler ile oyulma çukurunun şekli ve hacminin ayrıntılı olarak ölçülmesi de konuya katkı sağlayacaktır. Laboratuvar çalışmalarının sayısal modeller ve arazi ölçümleriyle desteklenmesi ise sonuçların doğal akarsulara aktarılmasını kolaylaştıracaktır.

Kaynakça

Ağaççıoğlu, H. (1995). Yan savaklardaki akımın kıvrımlı bir kanal boyunca incelenmesi (Doktora tezi), YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ağaççıoğlu, H. (1998). Kıvrımlı Kanallarda Enine Su yüzü Eğiminin Yan savak Debi Katsayısına Etkisi. *İMO Teknik Dergi*, 126, 1741-1761.

Ağaççıoğlu, H., Önen, F., & Toprak, Z. F. (2007). Scour around a side-weir at a 30° section of a 180° alluvial curved channel. *Irrigation and Drainage*, 56, 423–438.

Ağaççıoğlu, H., & Yüksel, Y. (1998). Side-weir flow in curved channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(3), 163–175.

Ahmad, M. F., Dong, P., Mamat, M., Wan Nik, W. B., & Mohd, M. H. (2011). Critical shear stress for sand and mud mixture. *Applied Mathematical Sciences*, 5(2), 53–71.

Ansari, S. A., Kothyari, U. C., & Ranga Raju, K. G. (2002). Influence of cohesion on scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 40(6).

Black, K., Tolhurst, T., Paterson, D. M., & Hagerthey, S. E. (2002). Working with natural cohesive sediments. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 128(1), 2–8.

Borghei, S. M., Jalili, M. R., & Ghodsian, M. (1999). Discharge coefficient for sharp-crested side weir in subcritical flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(10), 1051–1056.

Briaud, J.-L., Chen, H.-C., Li, Y., Nurtjahyo, P., Wang, J., (2004). *Pier and contraction scour in cohesive soils (NCHRP Report 516).* Transportation Research Board, Washington, D.C.

Briaud, J.-L., Ting, F., Chen, H. C., Cao, Y., Han, S.-W., & Kwak, K. (2001). Erosion function apparatus for scour rate predictions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 127(2), 105–113.

Briaud, J.-L., Ting, F. C., Chen, H. C., Gudavalli, S. R., & Kwak, K. (2002). Maximum scour depth around a bridge pier in sand and in clay: Are they equal? *Proceedings of the International Deep Foundations Congress*, (s. 385–395). Orlando, FL.

Chow, V. T. (1973). *Open-channel hydraulics.* McGraw-Hill International Editions.

Collinge, V. K. (1957). The discharge capacity of side weirs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 6, 288–304.

Coşar, A., & Ağaççıoğlu, H. (2004). Discharge coefficient of a triangular side-weir located on a curved channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(5), 410–423.

De Marchi, G. (1934). Saggio di teoria del funzionamento degli stramazzi laterali. *L'Energia Elettrica*, 11, 849–860.

Debnath, K., & Chaudhuri, S. (2010). Laboratory experiments on local scour around cylinder for clay and clay–sand mixed beds. *Engineering Geology*, 111(1–4), 51–61.

El-Khashab, A. M. (1975). *Hydraulics of flow over side-weirs.* (Doktora tezi)*,* University of Southampton, İngiltere.

El-Khashab, A., & Smith, K. V. (1976). Experimental investigation of flow over side weirs. *Journal of the Hydraulics Division,* 102(9), 1255–1268.

Fares, Y. R. (1995). Boundary shear in curved channel with side overflow. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 121(1), 2–14.

Fares, Y. R. (2000). Changes of bed topography in meandering rivers at a neck cutoff intersection. *J. of Environmental Hydrology*, 8(13).

Grabowski, R. C., Droppo, I. G., & Wharton, G. (2011). Erodibility of cohesive sediment: The importance of sediment properties. *Earth-Science Reviews*, 105(3–4), 101–120.

Grim, R. (1962). *Applied clay mineralogy.* McGraw-Hill, New York.

Hager, W. H. (1987). Lateral outflow over side weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* 113(4), 491–504.

Hager, W., & Volkart, P. (1986). Distribution channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(10), 935–952.

Hanson, G. J., & Simon, A. (2001). Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the midwestern USA. *Hydrological Processes*, 15, 23–38.

Heinzen, R. T. (1976). *Erodibility criteria for soil* (Yüksek lisans tezi)*,* University of California, Davis.

Jepsen, R., Roberts, J., & Lick, W. (1997). Effects of bulk density on sediment erosion rates. *Water, Air and Soil Pollution*, 99(1–4), 21–31.

Jowett, L. G., & Elliot, M. A. (2009). *Erosion parameters for cohesive sediment in Auckland streams (Auckland Regional Council Technical Report 2009/038).* NIWA Ltd, Auckland Regional Council.

Lick, W., Jin, L. J., & Gailani, J. (2004). Initiation of movement of quartz particles. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 130(8), 755–761.

Lick, W., & McNeil, J. (2001). Effects of sediment bulk properties on erosion rates. *Science of the Total Environment*, 266(1–3), 41–48.

Mehta, A., & Lee, S. (1994). Problems in linking the threshold condition for the transport of cohesionless and cohesive sediment grains. *Journal of Coastal Research*, 10(1), 170–177.

Melville, B. W., & Chiew, Y. M. (1999). Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(1), 59–65.

Mitchener, H., & Torfs, H. (1996). Erosion of mud/sand mixtures. *Coastal Engineering*, 29(1–2), 1–25.

Molinas, A., & Hosny, M. (1999). *Effects of gradation and cohesion on bridge scour, Vol. 4: Experimental study of scour around circular piers in cohesive soils.* U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.

Naudascher, E. (1992). *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke.* Springer-Verlag.

Navarro, H. R. (2004). *Flume measurements of erosion characteristics of soils at bridge foundations in Georgia (Yüksek lisans tezi).* Georgia Institute of Technology.

Neary, V. S., Sotiropoulos, F., & Odgaard, A. J. (1999). Three-dimensional numerical model of lateral-intake inflows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(2), 126–140.

Önen, F. (2004). *Hareketli tabanlı akarsularda yanal akımın hidrodinamiğinin incelenmesi* (Doktora tezi)*,* Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Önen, F., & Ağaççıoğlu, H. (2007a). Kıvrımlı alüvyal kanallara yerleştirilen yan savakların etrafındaki yerel oyulmalar. *İMO Teknik Dergi*, 267, 4035–4053.

Önen, F., & Ağaççıoğlu, H. (2007b). Scour at a side-weir intersection located on an alluvial river. *Nordic Hydrology*, 38(2), 165–176.

Özaydın, K. (2011). *Zemin mekaniği.* Birsen Yayınevi, İstanbul.

Partheniades, E. (2009). *Cohesive sediments in open channels: Properties, transport, and applications.* Elsevier, Butterworth-Heinemann.

Ranga Raju, K. G., Prasad, B., & Gupta, S. K. (1979). Side weir in rectangular channel. *Journal of Hydraulics Division,* 105(5), 547–554.

Raudkivi, A. J. (1990). *Loose boundary hydraulics.* Pergamon Press. Oxford.

Rosier, B. (2007). *Interaction of side weir overflow with bed-load transport and bed morphology in a channel* (Doktora tezi). Almanya: Karlsruhe Institute of Technology,.

Sanford, L. P., & Maa, J. P. (2001). A unified erosion formulation for fine sediments. *Marine Geology*, 179(1–2), 9–23.

Saraçoğlu, F. A. (2015). *Yan savak akımlarının etkisindeki kohezyonlu taban malzemesinin oyulma probleminin deneysel incelenmesi,* (Doktora tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Saraçoğlu, F. A., & Ağaççıoğlu, H. (2015). The effect of the side-weir crest height to scour in clay-sand mixed sediments. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 9(5), 636–640.

Saraçoğlu, F. A., & Ağaççıoğlu, H. (2022). Local scour around the side-weir on cohesive bed material. *Fresenius Environmental Bulletin*, 31(1A), 1541–1549.

Shields, A. (1936). Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. *Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*, 26, 5–24.

Subramanya, K., & Awasthy, S. C. (1972). Spatially varied flow over side-weirs. *Journal of the Hydraulics Division*, 98(1), 1–10.

Ting, F. C., Briaud, J.-L., Chen, H. C., Gudavalli, R., Perugu, S., & Wei, G. (2001). Flume tests for scour in clay at circular piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(11), 969–978.

Van Ledden, M., van Kesteren, W. G., & Winterwerp, J. C. (2004). A conceptual framework for the erosion behaviour of sand–mud mixtures. *Continental Shelf Research*, 24(1), 1–11.

Winterwerp, J. C., & van Kesteren, W. G. (2004). *Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment.* Elsevier, Amsterdam.

Yüksel, Y. (2004). Effect of specific energy variation on lateral overflows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(5–6), 259–269.

BÖLÜM 3

Gömülü Borularda Deformasyon ve Tasarım Yaklaşımlarının Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

RIFAT ENES BİTKİN[1]

Giriş

Gömülü boru hatları, kentsel ve endüstriyel altyapının en yaygın bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. İçme suyu ve atıksu şebekeleri, doğal gaz ve petrol iletim hatları, sulama sistemleri ve haberleşme kanalları bu kapsamda değerlendirilebilir. Bu sistemlerin yapısal güvenliği, boru kesitinde meydana gelen gerilmelerin ve düşey çap değişimi gibi deformasyonların kontrol edilmesine bağlıdır (Watkins ve Anderson, 1999; Moser ve Folkman, 2008). Bu nedenle gömülü boruların tasarımında öncelikle boruya aktarılan yükün belirlenmesi, ardından söz konusu yükün neden olacağı deformasyonların ve kesitte oluşacak gerilmelerin tahmin edilmesi gerekmektedir.

Gömülü boruların deformasyon ve gerilme davranışını belirlemek amacıyla geliştirilen hesap yöntemleri, farklı mekanik kabullere ve zemin–boru etkileşimini açıklayan yaklaşımlara dayanmaktadır. Spangler (1964), boru yan dolgusunun sağladığı

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Bingöl Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-9333-4517

pasif zemin direncini; Watkins ve Anderson (1999), boru çevresinde gelişen yatay zemin basıncını; Burns ve Richard (1964) ile Hoeg (1966), elastik süreklilik teorisini; McGrath (1998), kemerlenme katsayısını; Zhang ve Wong (2024) ise boru–zemin rijitlik oranını esas alan yaklaşımlar geliştirmiştir. Bu yöntemler, yalnızca dayandıkları teorik kabuller bakımından değil, hesapladıkları büyüklükler ve kullandıkları zemin parametreleri açısından da birbirinden ayrılmaktadır. Bazı bağıntılar yatay çap değişimini, bazıları ise düşey çap değişimini esas almakta; zemin davranışı kimi formülasyonlarda zemin tepki modülü, kimilerinde ise kısıtlı sıkışma modülü aracılığıyla temsil edilmektedir. Benzer şekilde, yataklama açısının hesaplamalara dâhil edilmesi de yöntemler arasında farklılık göstermektedir. Bu durum, farklı yaklaşımlardan elde edilen sonuçların doğrudan karşılaştırılmasını güçleştirmekte ve belirli tasarım koşullarında hangi yöntemin kullanılabileceğinin değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Bu bölümde, gömülü boruların deformasyon ve gerilme davranışını tahmin etmek amacıyla geliştirilen başlıca hesap yöntemleri öncelikle teorik dayanakları ve temel kabulleri bakımından ele alınmaktadır. Ardından, farklı yöntemlerin sonuçları boyutsuz bir deformasyon katsayısı üzerinden ortak bir ölçekte ifade edilerek karşılaştırılmaktadır. Yöntemler arasındaki farklılıklar ve temel parametrelerin hesap sonuçları üzerindeki göreli etkileri, örnek bir boru kesiti üzerinden gerçekleştirilen sayısal hesaplamalarla ortaya konulmaktadır. Son olarak, söz konusu yaklaşımların ilgili standart ve şartnamelerdeki karşılıkları ile boru deformasyonuna ilişkin sınır değerler değerlendirilmektedir.

Boruya aktarılan yükün hesaplanması ve yük paylaşımını etkileyen yerleştirme koşulları, bu bölümün kapsamı dışında tutulmuş; söz konusu konular yük aktarım mekanizmalarını ve yük hesabı yaklaşımlarını ele alan ayrı bir bölümde değerlendirilmiştir. Bu bölümün kapsamı, düşey statik yükler altında davranış gösteren

dairesel kesitli gömülü boruların deformasyon ve gerilme tahminiyle sınırlandırılmıştır.

2. Boru–Zemin Etkileşimini Belirleyen Temel Parametreler

2.1. Kemerlenme Mekanizması ve Boru–Zemin Rijitlik Oranı

Gömülü boruların davranışında kemerlenme, boru ile çevresindeki zemin kütlesi arasında meydana gelen farklı oturmaların yük aktarımını değiştirmesiyle ortaya çıkmaktadır. Geri dolgu sırasında boru üzerindeki zemin ile borunun yanlarındaki zemin kütlesi, farklı miktarlarda deformasyona uğrayabilmektedir. Bu farklılık, düşey sınırlar boyunca kayma gerilmelerinin gelişmesine ve yükün bir bölümünün boru üzerinden yan zemin dolgusuna veya boruya aktarılmasına neden olmaktadır.

Boru üzerindeki zemin yükünün yanlara kıyasla daha fazla oturması durumunda yükün bir bölümü yan zeminlere aktarılmakta ve boruya ulaşan yük azalmaktadır. Bu mekanizma negatif kemerlenme olarak tanımlanmaktadır. Buna karşılık, boru üzerindeki zeminlerin yanlara göre daha az oturması durumunda yan zeminlerden boru üzerindeki zemine yük aktarımı gerçekleşebilmekte ve boruya etkiyen yük, üzerindeki zemin prizmasının kendi ağırlığının üzerine çıkabilmektedir. Bu durum ise pozitif kemerlenme olarak adlandırılmaktadır.

Kemerlenmenin yönü ve büyüklüğü, borunun eğilme rijitliği ile çevre zeminin sıkışma rijitliği arasındaki ilişkiye bağlıdır. Bu ilişki, boyutsuz boru–zemin rijitlik oranı (S) ile ifade edilmektedir (Zhang ve Wong, 2024):

$$S = \frac{E_p I_p}{M_s r^3} \tag{1}$$

Burada E_p borunun elastisite modülünü; I_p birim uzunluk başına boru cidarının atalet momentini; r borunun ortalama

yarıçapını; M_s ise geri dolgunun kısıtlı sıkışma modülünü göstermektedir. Bağıntının payı borunun eğilmeye karşı rijitliğini, paydası ise çevre zeminin sıkışmaya karşı rijitliğini temsil etmektedir.

Iowa eşitliği ve bu eşitlikten türetilen yaklaşımlarda zemin rijitliği geleneksel olarak zemin tepki modülü (E') ile temsil edilmektedir (Howard, 1977). Zemin tepki modülü ile kısıtlı sıkışma modülü farklı fiziksel büyüklükleri ifade etmekle birlikte, belirli zemin koşulları ve hesap kabulleri altında aralarında yaklaşık bir ilişki kurulabilmektedir. Bu ilişki, uygulamada iki parametrenin birbirine karşılık gelen zemin rijitliği göstergeleri olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır (Hartley ve Duncan, 1987). Bununla birlikte, bu parametrelerin tanım ve kullanım bakımından tamamen özdeş olmadığı göz önünde bulundurulmalıdır.

2.2. Boru–Zemin Rijitlik Oranına Göre Sınıflandırma

Boru–zemin rijitlik oranı, borunun çevre zemine kıyasla rijitliğini ortaya koymakta ve deformasyon ile gerilme bakımından hangi tasarım kontrollerinin ön plana çıkacağını belirlemektedir. Sargand vd. (1995) tarafından verilen sınıflandırma, Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Boru–zemin rijitlik oranına göre sınıflandırma (Sargand vd., 1995).

Sınıf	S aralığı	Davranış	Belirleyici tasarım kontrolü
Esnek	S<0,005	Yük büyük ölçüde yan dolguya aktarılmaktadır	Deformasyon ve burkulma
Yarı rijit	0,005≤S≤0,5	Boru ve zemin yükü paylaşmaktadır	Deformasyon ve gerilme birlikte
Rijit	S > 0,5	Yük büyük ölçüde boru tarafından taşınmaktadır	Gerilme ve kırılma dayanımı

Esnek borularda çevre zeminin sağladığı yanal destek ve borunun deformasyon kapasitesi tasarım açısından belirleyici olurken, rijit

borularda kesitte oluşan gerilmeler ve kırılma dayanımı daha fazla önem kazanmaktadır. Yarı rijit borularda ise deformasyon ve gerilme davranışı birlikte değerlendirilmelidir.

Zhang ve Wong (2024), deformasyon ve gerilme davranışının rijitlik oranındaki değişime özellikle yarı rijitlik aralığında daha duyarlı olduğunu belirtmektedir. Bu aralığın dışında, davranışın rijitlik oranındaki değişimlere duyarlılığı azalabilmektedir. Dolayısıyla boru–zemin rijitlik oranı, yalnızca borunun sınıflandırılmasında değil, farklı deformasyon ve gerilme tahmin yöntemlerinin karşılaştırılmasında da önemli bir parametre olarak ön plana çıkmaktadır.

2.3. Yanal zemin basıncı

Boru yanlarında gelişen yatay zemin basıncı, boru üzerindeki düşey yüklerin etkisiyle oluşan gerilme durumunun ve borunun yatay deformasyonuna karşı çevre zeminin gösterdiği direncin anlaşılması bakımından önemlidir. Zhang ve Wong (2024), yatay zemin basıncını başlangıçtaki yatay gerilme bileşeni ile borunun deformasyonu sonucunda gelişen ek basıncın toplamı olarak ifade etmektedir:

$$\sigma_h = KP = K_0P + \frac{\Delta x}{D}M_s = K_0P + 0{,}8\,\frac{\Delta y}{D}M_s \qquad (2)$$

Burada $K_0 = (1 - \sin\varphi)OCR^{\sin\varphi}$ hareketsiz durum zemin basıncı katsayısını; P Boru üzerindeki toplam düşey basıncı, Δx yatay çap değişimini, Δy dikey çap değişimini, D boru çapını, φ geri dolgunun içsel sürtünme açısını, OCR ise zeminin aşırı konsolidasyon oranını göstermektedir (Mayne ve Kulhawy, 1982). Borunun yatay deformasyonunun düşey deformasyonuna oranı için kullanılan 0,8 değeri, oluklu çelik ve plastik borular üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilmiştir (Masada, 2000; Kawabata vd., 2006; Talesnick vd., 2011).

Bu bağıntılar, boru yanındaki yatay zemin basıncının yalnızca başlangıç gerilme koşullarına bağlı olmadığını, borunun deformasyon özellikleri ile çevre zeminin rijitliğinden de etkilendiğini göstermektedir. Dolayısıyla yanal zemin basıncı, boru–zemin etkileşiminin bir sonucu olarak değerlendirilmelidir. Bu ilişkinin rijitlik oranı ve zemin özellikleriyle birlikte ele alınması, izleyen bölümlerde farklı deformasyon tahmin yöntemlerinin ortak bir ölçekte karşılaştırılması açısından önem taşımaktadır.

2.4. Yataklama Açısının Etkisi

Yataklama açısı (α), boru tabanında oluşan zemin tepkisinin boru çevresine hangi açısal genişlikte yayıldığını tanımlamaktadır. Yataklama açısının küçülmesiyle taban tepkisi daha dar bir bölgede yoğunlaşabilmekte; bu durum boru cidarında oluşan eğilme momentlerini ve buna bağlı deformasyonları ve gerilmeleri artırabilmektedir (Greenwood ve Lang, 1990).

Yataklama açısının deformasyon ve gerilme tahminlerine etkisi, kullanılan hesap yöntemine bağlı katsayılar aracılığıyla temsil edilmektedir. Spangler (1964) ile Zhang ve Wong (2024) tarafından verilen katsayılar Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Yataklama açısına bağlı katsayılar (Spangler, 1964; Zhang ve Wong, 2024).

α (°)	K_a	K_b	K_T	K_M	K_D	K_{TT}	K_{MT}	K_{DT}
0	0,110	0,294	—	—	—	—	—	—
30	0,108	0,235	−0,099	0,296	−0,113	−0,212	0,087	0,042
60	0,103	0,189	−0,080	0,286	−0,105	−0,210	0,086	0,041
120	0,089	0,138	−0,027	0,261	−0,089	−0,172	0,068	0,030
180	0,083	0,125	0,000	0,250	−0,083	0,000	0,000	0,000

Tablo 2'deki katsayılar, yataklama açısının hesap bağıntılarındaki etkisinin tek bir parametreyle sınırlı olmadığını göstermektedir. Bununla birlikte, katsayıların hangi deformasyon veya gerilme bileşeninde kullanıldığı ilgili yöntemin formülasyonu

dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Bu nedenle yataklama açısının etkisi, yalnızca geometrik bir değişken olarak değil, boru tabanındaki tepki dağılımını ve kesit davranışını etkileyen bir tasarım parametresi olarak ele alınmalıdır.

3. Boru Deformasyonu ve Gerilmelerin Tahmini

Boruya etkiyen yükün belirlenmesinin ardından, tasarım açısından ikinci temel aşama bu yük altında meydana gelecek deformasyonların ve boru cidarında oluşacak gerilmelerin tahmin edilmesidir. Bu amaçla geliştirilen yöntemler, esas aldıkları mekanik model ve zemin–boru etkileşimini temsil etme biçimleri bakımından farklılaşmaktadır. Genel olarak bu yöntemler üç ana grupta incelenebilir: Spangler'in yarı ampirik yaklaşımından türetilen bağıntılar, boru çevresindeki zemin basıncını üniform kabul eden yaklaşımlar ve elastik süreklilik teorisine dayanan çözümler. Bu yöntemlerin her biri, borunun deformasyon davranışını ve kesitteki gerilme dağılımını belirli kabuller çerçevesinde temsil etmektedir. Dolayısıyla yöntemler arasında karşılaştırma yapılırken yalnızca hesaplanan sonuçların değil, kullanılan zemin parametrelerinin, sınır koşullarının ve temel varsayımların da dikkate alınması gerekmektedir. İzleyen alt bölümlerde, söz konusu yöntemlerin teorik dayanakları, hesap bağıntıları ve geçerlilik sınırları ayrı ayrı ele alınmaktadır.

3.1. Iowa eşitliği ve Geliştirilmiş Yaklaşımlar

Marston ve Anderson (1913), yaklaşımı boruya aktarılan yükün hesaplanmasını sağlamakla birlikte, bu yük altında boruda meydana gelecek deformasyon veya gerilmeyi doğrudan belirlememektedir. Bu eksikliği gidermek amacıyla Spangler ve Shafer (1938), boru kesitini kalın cidarlı bir halka olarak idealize etmiş ve boru–zemin sisteminin deformasyon davranışını yarı ampirik bir yaklaşımla tanımlamıştır. Orijinal modelde düşey yükün boru tacı boyunca düzgün dağıldığı, taban tepkisinin belirli bir

yataklama açısı boyunca yayıldığı ve yan dolgu basıncının yaklaşık 100°'lik bir yay üzerinde parabolik biçimde dağıldığı kabul edilmiştir.

Spangler'in ilk formülasyonunda yer alan pasif zemin itkisi doğrudan ölçülebilen bir parametre değildir. Watkins ve Spangler (1958), bu terimi zemin tepki modülü *E'* ile ifade etmiş ve yükleme süresinin etkisini bir gecikme faktörü ile hesaba katmıştır. Böylece günümüzde Modifiye Iowa eşitliği olarak bilinen ve Denklem (3)'te gösterilen yaklaşım ortaya çıkmıştır (Masada, 2000; ALA, 2001):

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{D_l \, K_a \, P}{\frac{E_p I_p}{r^3} + 0{,}061 \, E'} \tag{3}$$

Bağıntının paydasındaki iki terim sırasıyla borunun eğilme rijitliğini ve çevre zeminin deformasyona karşı direncini temsil etmektedir. Gecikme faktörü D_l kısa süreli deformasyon tahminlerinde genellikle 1, uzun süreli tahminlerde ise 1,5 olarak alınmaktadır. Modifiye Iowa eşitliğinin temel kabullerinden biri, düşey ve yatay deformasyonların eşit olduğudur. Küçük deformasyonlar için kabul edilebilir olan bu yaklaşım, boruda belirgin ovalleşmenin meydana geldiği daha büyük şekil değiştirme düzeylerinde gerçek davranışı yeterince temsil etmeyebilir. Aynı zemin basıncı dağılımından hareketle, Denklem (4)'te gösterilen boru kesitinde oluşan maksimum çevresel gerilmeyi tahmin etmeye yönelik bağıntılar da geliştirilmiştir (Spangler, 1964):

$$\sigma_{max} = \frac{3K_b \, P \, D^2}{t^2} \tag{4}$$

Bu yaklaşımda, maksimum gerilme boru tabanında belirlenmekte ve yanal zemin basıncının katkısı ihmal edilmektedir. Iowa yaklaşımının tasarım açısından üç önemli sınırlaması

bulunmaktadır. İlk olarak, yanal zemin basıncının ihmal edilmesi gerilmenin sistematik olarak yüksek tahmin edilmesine neden olabilir. İkinci olarak, zemin tepki modülü E' yalnızca zeminin bir malzeme özelliği değildir; hendek geometrisi, çevre zeminin rijitliği ve borunun deformasyon davranışı ile birlikte şekillenen bir sistem parametresidir. Bu nedenle, standart tablolardan seçilen tek bir E' değerinin her saha koşulunu temsil etmesi beklenmemelidir. Üçüncü olarak, bağıntıda zeminin içsel sürtünme açısı doğrudan yer almamaktadır. Yanal zemin basıncının ihmal edilmesinin gerilme tahminleri üzerindeki etkisi çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (Warman vd., 2006; Zhang ve Wong, 2022). Chaallal vd. (2015), HDPE, PVC ve çelik borular üzerinde yaptıkları değerlendirmelerde, Iowa yaklaşımının ölçülen deformasyonları yaklaşık 2,3–53 kat arasında yüksek tahmin edebildiğini bildirmiştir.

Iowa eşitliğinin sınırlılıklarını gidermek amacıyla çeşitli türevleri geliştirilmiştir. Masada (2000), düşey deformasyonu doğrudan tahmin eden bir bağıntı geliştirerek Spangler yaklaşımında eşit kabul edilen düşey ve yatay deformasyonları birbirinden ayırmıştır. Greenwood ve Lang (1990), geri dolgunun tabakalar hâlinde yerleştirilmesi sırasında oluşan birikimli deformasyonu ve hendek dolgusu ile doğal zemin arasındaki rijitlik farkını hesaba katmıştır. McGrath (1998) ise esnek borulardaki toplam deformasyonun iki farklı bileşenden oluştuğunu ortaya koymuştur: ovalleşme ve dairesel daralma. Sığ gömme koşullarında dairesel daralma genellikle küçük kalırken, gömme derinliği arttıkça bu bileşenin etkisi daha belirgin hâle gelmektedir. McGrath yaklaşımında kemerlenme ayrıca bir katsayı ile hesaba katılmakta ve bu formülasyon esnek borulara ilişkin tasarım esaslarının temelini oluşturmaktadır.

3.2. Üniform zemin basıncı kabulüne dayalı yaklaşımlar

Watkins ve Anderson (1999), Spangler yaklaşımından farklı olarak boru çevresindeki düşey ve yatay zemin basınçlarının üniform biçimde dağıldığını kabul eden bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu kabul altında boru kesitindeki maksimum çevresel gerilmeler ve deformasyonlar, Denklem (5) ve Denklem (6)'daki gibi belirlenmektedir:

$$\frac{\Delta y}{D} = \left(0{,}083 - \frac{K}{12}\right)\frac{P\,r^3}{E_p I_p} \tag{5}$$

$$\sigma_{max} = -\frac{KPD}{2t} - 1{,}5\,(1-K)\frac{PD^2}{4t^2} \tag{6}$$

Bu yaklaşımın temel avantajı, yanal zemin basıncını K katsayısı üzerinden doğrudan hesaba katmasıdır. Buna karşılık, yataklama koşulları formülasyonda açık bir değişken olarak yer almamaktadır. Boru ile zemin arasında kesitin tamamı boyunca ideal temas bulunduğu, başka bir ifadeyle etkin yataklama açısının 180° olduğu varsayılmaktadır. Gerçek uygulamalarda ise boru tabanı ile zemin arasındaki temas bölgesi çoğu durumda bu ideal koşuldan daha dardır. Bu nedenle Watkins yaklaşımı, özellikle yetersiz veya kusurlu yataklama koşullarında boru deformasyonunu ve gerilmelerini olduğundan düşük tahmin edebilir. Zhang ve Wong (2022), gerilme tahminlerindeki sapmanın bazı koşullarda %80 mertebesine ulaşabildiğini bildirmiştir.

Yaklaşımın bir diğer sınırlaması, yanal zemin basıncı katsayısının nasıl belirleneceğinin açık biçimde tanımlanmamış olmasıdır. Bu durum, farklı zemin koşullarında yöntemin uygulanmasını güçleştirmektedir. Bu eksiklikleri gidermek amacıyla Zhang ve Wong (2024) tarafından daha kapsamlı bir formülasyon geliştirilmiştir. Bu modelde düşey zemin basıncı boru üzerinde üniform olarak dağıtılırken, taban tepkisinin yataklama açısı boyunca üniform olduğu kabul edilmektedir. Modelin ayırt edici

özelliği, yanal zemin basıncının yalnızca borunun üst yarısında ve yataklama bölgesi içerisinde etkili olduğunun kabul edilmesidir. Boru kesitinin diğer bölgelerinde ise boru–zemin temasının zayıf olduğu varsayılmaktadır. Böylece, ideal yataklama yerine gerçek sahalarda karşılaşılabilecek kusurlu yataklama koşullarının daha gerçekçi biçimde temsil edilmesi amaçlanmaktadır.

Yanal basıncın etkisi süperpozisyon ilkesi kullanılarak iki alt duruma ayrılmakta ve eğrisel çubuk teorisi yardımıyla boru tacındaki eksenel kuvvet ve eğilme momentleri belirlenmektedir. Elde edilen bağıntılar, Denklem (7) ve Denklem (8)'de verilmiştir:

$$\frac{\Delta y}{D} = -\frac{r^3 P}{E_p I_p}\left(K_D + \left(\frac{1}{12} - K_{DT}\right)K\right) \tag{7}$$

$$\sigma_{max} = -a\,\frac{PD}{t} - 1{,}5\,b\,\frac{PD^2}{t^2} \tag{8}$$

Burada ilgili katsayılar düşey ve yanal zemin basıncından kaynaklanan deformasyon ile eksenel kuvvet ve eğilme momentlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Tüm katsayılar, yataklama açısının fonksiyonu olup Tablo 2'de verilmiştir. Bu formülasyonun iki durum özellikle önemlidir. İlk olarak, yataklama açısı 180° olarak alındığında bağıntılar Watkins yaklaşımına indirgenmektedir. Dolayısıyla Watkins yöntemi, Zhang–Wong formülasyonunun ideal yataklama özel durumu olarak değerlendirilebilir.

İkinci olarak, yanal zemin basıncı bağıntısı modele dahil edildiğinde, boru deformasyonu Denklem (9)'da olduğu gibi doğrudan boru–zemin rijitlik oranı ile ilişkilendirilebilmektedir:

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{-[K_D + K_0\,(0{,}083 - K_{DT})]}{S + 0{,}8\,(0{,}083 - K_{DT})} \cdot \frac{P}{M_s} \tag{9}$$

Uzun dönem deformasyonlarının tahmininde, kısa dönem sonucunun 1,5 gecikme faktörü ile çarpılması önerilmektedir. Zhang ve Wong (2024), geliştirdikleri yöntemi tam ölçekli deneyler, üç boyutlu sonlu eleman analizleri ve literatürdeki deneysel ölçümler (Fenemor vd., 1979; Kawabata vd., 2006; Chaallal vd., 2015) ile karşılaştırmıştır. Sonuçlar, özellikle düşük boru–zemin rijitlik oranlarında yöntemin deneysel ölçümlere yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir.

3.3. Elastik ve viskoelastik çözümler

Yukarıda açıklanan yarı ampirik ve basitleştirilmiş yaklaşımların ortak özelliği, boru çevresindeki zemin basıncının dağılımına ilişkin önceden bir kabul yapılmasını gerektirmeleridir. Elastik süreklilik çözümleri ise zemin basıncının dağılımını ayrıca varsaymak yerine, boru–zemin sistemini sürekli bir elastik ortam olarak ele almaktadır.

Burns ve Richard (1964), gömülü boruyu çevreleyen zemini sonsuz elastik ortam olarak kabul ederek kapalı formda bir çözüm geliştirmiştir. Boru ile zemin arasındaki ara yüzey için tam bağlı ve tam kaygan sınır koşulları ayrı ayrı incelenmiştir. Hoeg (1966) ise aynı teorik çerçeveyi geliştirerek zemin parametrelerinin tanımlanmasını değiştirmiş ve ara yüzey davranışını tek bir eşdeğer sınır koşulu ile temsil etmiştir. Bu çözümlerin önemli bir avantajı, yalnızca maksimum deformasyon veya gerilme değerini değil, boru kesiti boyunca gerilme, eğilme momenti ve deformasyon dağılımını da ortaya koyabilmeleridir. Buna karşılık yarı ampirik bağıntılar çoğunlukla tasarım açısından gerekli olan tek bir maksimum değere odaklanmaktadır. Elastik çözümlerin temel sınırlaması ise zeminin doğrusal elastik bir malzeme olarak kabul edilmesidir. Gerçek zemin davranışında, gerilme–deformasyon ilişkisi doğrusal değildir ve özellikle yüksek gerilme düzeylerinde bu kabul geçerliliğini kaybedebilir. Ayrıca yataklama koşulları, yapım sırasında oluşan

sıkıştırma farklılıkları ve yerleştirme sürecindeki saha değişkenlikleri bu idealize çözümlere doğrudan yansıtılamamaktadır. Bu nedenle, özellikle küçük çaplı ve kalın cidarlı borularda ve sığ gömme koşullarında saha ölçümleriyle uyum sınırlı kalabilmektedir.

Zaman etkisi de özellikle termoplastik borularda ayrıca değerlendirilmelidir. Bu tür borularda elastisite modülü zaman içerisinde azalırken, geri dolguda konsolidasyon ve buna bağlı deformasyon gelişebilir. Modifiye Iowa eşitliğinde kullanılan gecikme faktörü, bu zaman etkilerini tek bir katsayıyla temsil eden pratik bir yaklaşımdır. Daha ayrıntılı bir viskoelastik yaklaşım için Chua ve Lytton (1989), Hoeg modeline Laplace dönüşümünü uygulayarak zamana bağlı bir çözüm geliştirmiştir. Özellikle uzun servis ömrü beklenen HDPE ve PVC boru hatlarında, kısa süreli elastisite modülü yerine uzun dönem sünme davranışını temsil eden modülün kullanılması tasarım sonuçlarını önemli ölçüde etkileyebilir.

4. Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması ve Yöntem Seçimi

Bölüm 5'te açıklanan yöntemler aynı fiziksel problemi farklı kabuller altında çözmektedir. Ancak kullanılan parametreler ve hesaplanan büyüklükler yöntemden yönteme değişmektedir. Örneğin bazı yaklaşımlar yatay deformasyonu, bazıları düşey deformasyonu temel almakta; zemin davranışı bazı formülasyonlarda zemin tepki modülü, bazılarında ise kısıtlı sıkışma modülü ile temsil edilmektedir. Benzer şekilde, yataklama açısı bazı yöntemlerde doğrudan hesap değişkeni olarak yer alırken, bazı yöntemlerde tamamen ihmal edilmektedir. Bu farklılıklar, yöntemlerin doğrudan karşılaştırılmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle aşağıda önce deformasyon bağıntıları ortak bir matematiksel

forma dönüştürülmekte, ardından örnek bir kesit üzerinden yöntemlerin sonuçları karşılaştırılmaktadır.

4.1. Hesaplama Yaklaşımlarının Karşılaştırılabilir Hale Getirilmesi

Zhang ve Wong (2024) tarafından gösterildiği üzere, başlıca deformasyon bağıntıları cebirsel olarak ortak bir biçimde Denklem (10)'da olduğu gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\Delta y}{D} = \xi \frac{P}{M_s} \tag{10}$$

Burada ξ boyutsuz deformasyon katsayısını temsil etmektedir. Düşey zemin basıncının zemin rijitliğine oranı tüm yöntemlerde ortak bir yapı gösterirken, yöntemler arasındaki temel fark ξ katsayısının nasıl hesaplandığında ortaya çıkmaktadır.

Üç yöntemde kullanılan deformasyon katsayılarının karşılıkları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3 Deformasyon katsayısı ξ'nin yöntemlere göre ifadesi (Zhang ve Wong, 2024).

Yöntem	**ξ ifadesi**	**Bağlı olduğu değişkenler**
Modifiye Iowa	$\frac{K_a}{0{,}061 + S}$	*S, α*
Watkins	$\frac{0{,}083\ (1 - K_0)}{0{,}0664 + S}$	*S, φ*
Zhang–Wong	$-\frac{K_D + K_0(0{,}083 - K_{DT})}{S + 0{,}8(0{,}083 - K_{DT})}$	*S, α, φ*

Tablonun incelenmesi, yöntemlerin hangi fiziksel değişkenleri hesaba kattığını açık bir biçimde göstermektedir. Modifiye Iowa eşitliğinde ξ, zeminin içsel sürtünme açısından bağımsızdır. Dolayısıyla zemin mekaniğinin temel parametrelerinden biri olan içsel sürtünme açısı, deformasyon hesabında doğrudan yer almamaktadır. Watkins yaklaşımında ise

yataklama açısı bağımsız bir parametre olarak bulunmamakta ve boru ile zeminin tüm kesit boyunca ideal temas hâlinde olduğu kabul edilmektedir. Buna karşılık Zhang–Wong yaklaşımı, boru rijitliği, zemin rijitliği, zemin sürtünme açısı ve yataklama açısını aynı formülasyon içerisinde dikkate almaktadır.

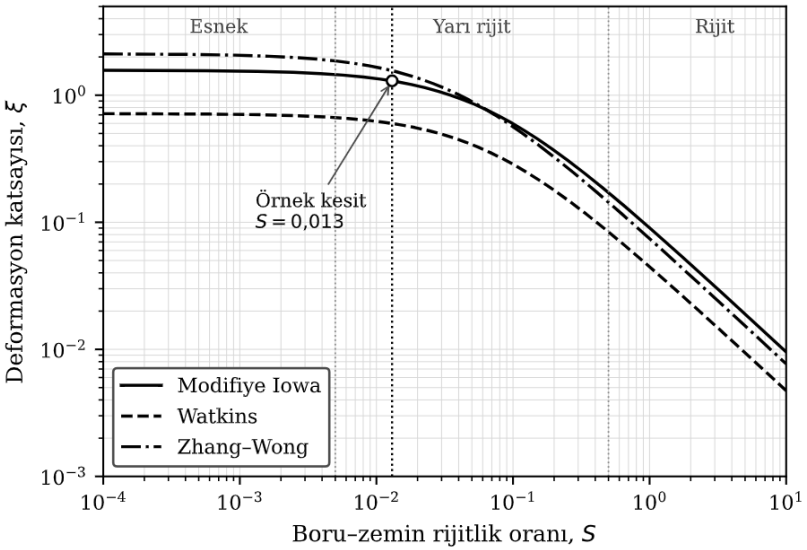
Maksimum gerilme için de benzer bir sadeleştirme yapılabilir. Gerilme, Denklem (11) biçiminde yazıldığında gerilme katsayısı ψ, Spangler yönteminde $3K_b$, Watkins yaklaşımında ise Denklem (12) şeklinde ifade edilmektedir.

$$\sigma_{max} = \psi \frac{PD^2}{t^2} \tag{11}$$

$$0{,}375(1 - K_0)\frac{S}{S + 0{,}0664} \tag{12}$$

Şekil 1'de ξ katsayısının boru–zemin rijitlik oranı S ile değişimi gösterilmektedir. Üç yaklaşımda da S değeri, arttıkça deformasyon katsayısının azalması, başka bir ifadeyle borunun rijitleşmesiyle deformasyonun azalması ortak bir davranıştır. Düşey kesikli çizgiler Sargand vd. (1995) sınıflandırma sınırlarını, daire ise örnek kesiti göstermektedir. Düşük rijitlik oranlarında, özellikle ($S <$ 0,005) bölgesinde, eğrilerin eğimi oldukça küçülmekte ve deformasyonun rijitlik oranına duyarlılığı azalmaktadır. Daha yüksek rijitlik oranlarında ise ξ giderek küçülmekte ve boru deformasyonu ihmal edilebilir seviyelere yaklaşmaktadır.

Yöntemler arasındaki farklılıklar özellikle yarı rijit davranış bölgesinde belirginleşmektedir. Bu nedenle, yöntem seçiminin tasarım sonucunu en fazla etkileyebileceği bölge de bu aralıktır.



Şekil 1 Deformasyon katsayısı ξ ile boru–zemin rijitlik oranı S arasındaki ilişki (α = 90°, φ = 35°).

4.2. Örnek hesaplama

Yöntemlerin uygulanma biçimini ve sonuçlar arasındaki farklılıkların nedenlerini göstermek amacıyla, yaygın bir atıksu hattını temsil eden örnek bir kesit ele alınmıştır.

Tablo 4. Örnek kesite ait malzeme ve yükleme parametreleri.

Değişken	**Değer**
Boru	HDPE, dış çap 600 mm, SDR 17
Et kalınlığı / ortalama çap	35,3 mm / 564,7 mm
Elastisite modülü E_p (kısa süreli)	800 MPa
Boru eğilme rijitliği $E_p I_p / r^3$	130,2 kPa
Geri dolgu	Kuru kum, γ = 17 kN/m³, φ = 35°
Kısıtlı sıkışma modülü M_s	10000 kPa
Hareketsiz basınç katsayısı K_0	0,426
Örtü yüksekliği *(H)* / düşey basınç *(P)*	2 m / 34 kPa
Yataklama açısı α	90°
Gecikme faktörü D_l	1,5

Birinci adım: rijitlik oranının belirlenmesi. Verilen malzeme ve geometrik özellikler kullanılarak boru–zemin rijitlik oranı (S = 0,013) olarak elde edilmektedir. Tablo 1'deki sınıflandırmaya göre bu değer, kesitin yarı rijit davranış aralığının alt bölümünde bulunduğunu göstermektedir. Bu sonuç iki açıdan önemlidir. İlk olarak, tasarımda yalnızca boru dayanımının değil, deformasyonun da kontrol edilmesi gerekir. İkinci olarak, zemin ve boru parametrelerindeki değişikliklerin hesap sonuçları üzerindeki etkisi bu bölgede daha belirgin olabilir.

İkinci adım: yükün belirlenmesi. Hendek genişliği 1,4 m olarak alındığında Marston bağıntısından C_d=1,139 ve birim boru uzunluğu başına 37,95 kN yük elde edilmektedir. Aynı kesit için zemin prizma yükü 20,4 kN/m olarak hesaplanmaktadır. Buna göre Marston yükü, prizma yükünün yaklaşık 1,86 katıdır. Bu fark, yalnızca sayısal bir yöntem farklılığı olarak değerlendirilmemelidir. Marston yaklaşımı rijit boruların yük aktarım davranışını esas almakta ve hendek duvarlarında gelişen sürtünmenin etkisini boruya aktarılan yük hesabına dahil etmektedir. Esnek borularda ise boru ve yan dolgu birlikte deformasyon gösterdiğinden yükün bir bölümü yan zemin kütlelerine aktarılır. Bu nedenle, esnek borular için yalnızca Marston yükünün kullanılması uygun değildir. Yerleşik tasarım yaklaşımında, prizma yükü ile Marston yükü arasından tasarım açısından uygun olan daha düşük değer esas alınmakta ve bu örnekte 20,4 kN/m prizma yükü kullanılmaktadır.

Üçüncü adım: deformasyon hesabı. Üç farklı yöntemin verdiği deformasyon sonuçları Tablo 5'de sunulmuştur.

Tablo 5 Yöntemlere göre boru deformasyonları (α = 90°)

Yöntem	ξ	$\Delta y/D$ (D_l = 1)	$\Delta y/D$ (D_l = 1,5)	Δy (mm)
Watkins	0,599	%0,204	%0,306	1,73
Modifiye Iowa	1,297	%0,441	%0,661	3,74
Zhang–Wong	1,560	%0,530	%0,796	4,49

En düşük ve en yüksek tahmin arasında yaklaşık 2,6 kat fark bulunmaktadır. Bu fark, yöntemlerden birinin tek başına “yanlış” olduğunu göstermemektedir. Aksine, farklı sonuçlar büyük ölçüde boru çevresindeki zemin basıncının farklı biçimlerde idealize edilmesinden kaynaklanmaktadır. Watkins yaklaşımının daha düşük deformasyon tahmin etmesinin temel nedeni, ideal yataklama ve tam temas kabulüdür. Zhang–Wong yaklaşımında ise yataklama açısı ve yanal zemin basıncının etkisi ayrıca dikkate alındığından daha yüksek bir deformasyon tahmini elde edilmektedir. Örnekte kullanılan $\alpha = 90°$ değeri, ideal 180° temas koşuluna göre belirgin biçimde daha sınırlı bir yataklamayı temsil etmektedir. Her üç yöntemle hesaplanan deformasyon değeri de yaygın olarak kullanılan %5 deformasyon sınırının altında kalmaktadır. Dolayısıyla bu örnek kesitte yöntem seçimi tasarım kararını değiştirmemektedir. Yöntem seçiminin kritik hâle geldiği durumlar, hesaplanan deformasyonun izin verilen sınır değere yaklaştığı veya farklı yöntemlerin sınırın farklı taraflarında sonuç verdiği koşullardır.

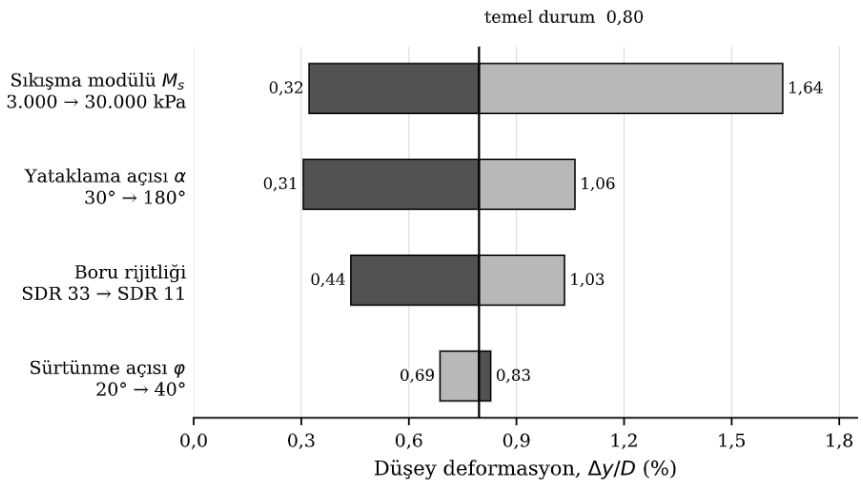
Dördüncü adım: gerilme kontrolü. Spangler bağıntısı kullanılarak $\alpha = 90°$ için yaklaşık 4,1 MPa maksimum gerilme elde edilirken, Watkins yaklaşımı yaklaşık 0,31 MPa değer vermektedir. İki sonuç arasındaki fark yaklaşık 13 kat düzeyindedir. Bu belirgin fark, iki yöntemin yanal zemin basıncına ilişkin kabullerinden kaynaklanmaktadır. Spangler yaklaşımında yanal zemin basıncı büyük ölçüde ihmal edildiğinden gerilme yüksek tahmin edilmektedir. Watkins yaklaşımında ise boru–zemin temasının ideal olduğu kabul edildiğinden daha düşük bir sonuç elde edilmektedir. Bu nedenle, iki yöntemin sonuçlarının aynı fiziksel durumu aynı doğruluk düzeyinde temsil ettiği varsayılmamalıdır. Deneysel sonuçlarla yapılan karşılaştırmalar, özellikle yataklama koşullarının ideal olmadığı durumlarda Zhang–Wong yaklaşımının daha gerçekçi sonuçlar verebildiğini göstermektedir (Zhang ve Wong, 2024).

4.3. Parametrelerin Göreli Etkinliğinin Değerlendirilmesi

Tasarımda hangi parametrenin öncelikli olarak kontrol edilmesi gerektiğini belirlemek için parametre duyarlılığının bilinmesi gerekir. Bu amaçla örnek kesitte her bir parametre ayrı ayrı değiştirilmiş, diğer değişkenler Tablo 4'teki değerlerinde sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, Şekil 2 ve Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6 Parametre duyarlılığı. Her satırda yalnızca belirtilen değişken değiştirilmiş, diğer parametreler Tablo 6'daki değerlerde sabit tutulmuştur (D_l = 1,5).

Değişken	Aralık	Modifiye Iowa	Zhang–Wong, (2024)	Değişim
Sıkışma modülü (M_s)	3000 → 30000 kPa	%1,56 → %0,25	%1,64 → %0,32	5–6 kat
Yataklama açısı (α)	30° → 180°	%0,74 → %0,57	%1,06 → %0,31	1,3 / 3,5 kat
Boru rijitliği (SDR 33 → 11)	S = 0,0016 → 0,0533	%0,78 → %0,43	%1,03 → %0,44	2 kat
Sürtünme açısı (φ)	20° → 40°	değişmemektedir	%0,69 → %0,83	1,2 kat

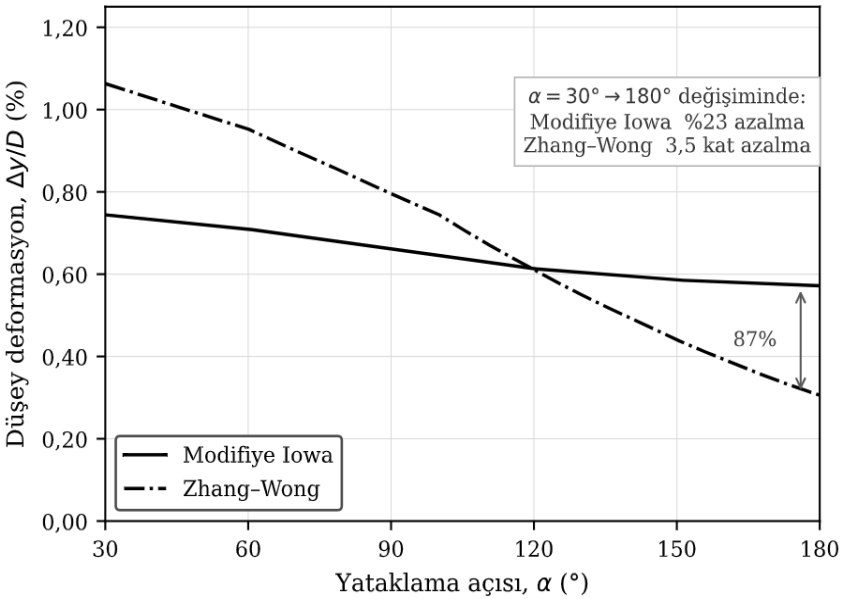


Şekil 2 Parametre duyarlılığı.

Sonuçlar dört temel gözlem ortaya koymaktadır:

Geri dolgunun etkisi boru rijitliğinden daha büyüktür. Boru eğilme rijitliğinin SDR 33'ten SDR 11'e geçilerek yaklaşık 33 kat artırılması, hesaplanan deformasyonda yaklaşık iki katlık bir azalma sağlamaktadır. Buna karşılık, zemin sıkışma modülünün 10 kat değiştirilmesi deformasyonda yaklaşık altı kata varan bir değişim oluşturmuştur. Bu sonuç, örnek kesitte Iowa eşitliğinin paydasındaki boru ve zemin katkılarının farklı mertebelerde olmasından kaynaklanmaktadır. Borunun katkısı yaklaşık 130 kPa iken, zemin katkısı yaklaşık 610 kPa düzeyindedir. Dolayısıyla deformasyona karşı toplam direncin yaklaşık %75'i çevre zeminden sağlanmaktadır. Bu durum özellikle ince cidarlı ve esnek borularda daha belirgin hâle gelebilir. Uygulamadaki temel karşılığı şudur: yetersiz sıkıştırılmış bir yan dolgu, daha rijit bir boru seçilerek her zaman telafi edilememektedir. Buna karşılık sıkıştırma kalitesinin artırılması, dolgunun donatılandırılması veya sıkışabilir ara dolgu kullanımı, geri dolgu tarafına yönelik müdahaleler vb. uygulamalar doğrudan etkili olmaktadır (Mahgoub ve El Naggar, 2020; Aksoy ve Bitkin, 2026).

Yataklama açısının etkisi kullanılan yönteme bağlıdır. Şekil 3'te görüldüğü üzere, yataklama açısının 30°'den 180°'ye artırılması Modifiye Iowa eşitliğinde deformasyonu yaklaşık %23 oranında azaltırken, Zhang–Wong yaklaşımında yaklaşık 3,5 katlık bir değişime neden olmaktadır. Bu fark, doğrudan formülasyonların yapısından kaynaklanmaktadır. Modifiye Iowa eşitliğinde, yanal zemin basıncının etkisi belirli bir yay dağılımı içerisinde temsil edilmekte ve yataklama açısının etkisi sınırlı kalmaktadır. Zhang–Wong yaklaşımında ise yanal basınç ve yataklama açısı doğrudan birbirine bağlı olduğundan, yataklama koşullarındaki değişimin deformasyon üzerindeki etkisi daha belirgin hâle gelmektedir.



Şekil 3 Yataklama açısının düşey deformasyona etkisi (S = 0,013, φ = 35°, D_l = 1,5).

Sürtünme açısının artması deformasyonu artırmaktadır. Sürtünme açısının artmasıyla deformasyonun artması başlangıçta tahmin edilebilen bir durum değildir. Ancak, Zhang–Wong yaklaşımında yanal zemin basıncı $K_o = (1 - \sin\varphi)$ ilişkisi üzerinden tanımlandığından, içesel sürtünme açısı arttıkça hareketsiz durumdaki yanal basınç katsayısı azalmakta ve boruyu yatay yönde sınırlayan basınç bileşeni küçülmektedir. Şekil 3'te açık tonlu çubuklar deformasyonu artıran, koyu tonlu çubuklar azaltan uç değerleri göstermektedir. Hesaplamalar, Zhang–Wong bağıntısı ile gerçekleştirilmiş ve temel durum %0,8 olarak alınmıştır. Sonuç olarak, bu formülasyonda daha yüksek sürtünme açısı, doğrudan daha düşük deformasyon anlamına gelmemektedir. Etkinin büyüklüğü sınırlı olmakla birlikte, Modifiye Iowa eşitliğinin bu değişkeni doğrudan içermediği dikkate alınmalıdır.

4.4. Uygulamaya Uygun Yöntemin Seçimi

Yukarıdaki karşılaştırmalar doğrultusunda, tipik uygulamalar için uygun hesap yaklaşımları Tablo 7'de özetlenmektedir.

Tablo 7 Gömülü boru tasarımında yöntemlerinde önerilen yaklaşım

Durum	**Uygun yaklaşım**	**Gerekçe**
Rijit boru, hendek yerleştirme	Marston yükü + Spangler gerilme bağıntısı	Yöntem bu koşul için türetilmiştir
Esnek boru, yataklama açısı bilinmiyor	Prizma yükü + Modifiye Iowa	Yaygın, şartnamelerde karşılığı bulunmakta, güvenli tarafta kalmaktadır
Esnek veya yarı rijit boru, yataklama açısı biliniyor	Zhang–Wong bağıntısı	Yataklama ve sürtünme açısını birlikte içermektedir
Derin gömme (H > 6r)	McGrath yaklaşımı	Dairesel daralma bileşenini hesaba katmaktadır
Sığ gömme, ağır trafik	Hareketli yük hesabı belirleyicidir	Örtü yükü ikincil kalmaktadır
Uzun servis ömrü, termoplastik boru	Gecikme faktörü veya sünme modülü	Modül zamanla düşmektedir
Kesit gerilme ve moment dağılımı gerekiyor	Burns–Richard veya Hoeg çözümü	Yalnızca bu yöntemler tam dağılımı vermektedir

Tablo 9'daki öneriler kesin bir tasarım yönlendirmesi olarak değil, yöntem seçimi için başlangıç çerçevesi olarak değerlendirilmelidir. Özellikle kritik yapılarda birden fazla yöntemle hesap yapılması ve sonuçların karşılaştırılması, tek bir bağıntıya bağlı kalmaktan daha güvenilir bir mühendislik yaklaşımı sunmaktadır. Farklı yöntemlerden elde edilen sonuçlar arasındaki yayılım da önemli bir veri bilgi sağlamaktadır. Sonuçların birbirine yakın olması, tasarımın yöntem seçimine duyarlılığının düşük olduğunu; sonuçların geniş bir aralıkta dağılması ise tasarımın kullanılan kabullere duyarlı olduğunu göstermektedir.

5. Tasarım Şartnameleri ve Standartlardaki Karşılıkları

Gömülü borular için geliştirilen teorik ve yarı ampirik yaklaşımlar, tasarım standartlarına ve uygulama şartnamelerine çeşitli biçimlerde yansıtılmıştır. Bununla birlikte, standartlar arasında hem kullanılan hesap yöntemi hem de zemin ve boru parametrelerinin tanımlanma biçimi bakımından önemli farklılıklar bulunmaktadır.

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Termoplastik borulara ilişkin AASHTO LRFD hükümleri, McGrath (1998) tarafından geliştirilen kemerlenme katsayılı formülasyonla yakından ilişkilidir. Zemin rijitliği E' yerine kısıtlı sıkışma modülü M_s ile ifade edilmekte ve ilgili değerler zemin sınıfı ile gerilme seviyesine bağlı tablolardan alınmaktadır. Tasarım, yük ve direnç faktörleri kullanılarak gerçekleştirilmekte; çevresel burkulma, cidar dayanımı ve deformasyon farklı sınır durumları altında ayrıca kontrol edilmektedir.

CSA S6, Canadian Highway Bridge Design Code. CSA S6 içerisinde hareketli yüklere ilişkin bağıntılar yer almakta ve bu bağıntılar hareketli yük yaklaşımının temelini oluşturmaktadır. Standart, ayrıca zemin rijitliğinin belirlenmesi için malzeme sınıfına bağlı öneri değerler sunmaktadır.

EN 1295-1; Avrupa genelinde tek bir hesap yöntemini zorunlu kılmak yerine farklı ülkelerin ulusal hesap yöntemlerinin kullanılabileceği ortak bir tasarım çerçevesi sunmaktadır. Örneğin Almanya'da ATV-DVWK-A 127 yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin ortak özelliklerinden biri, hendek geometrisinin ve çevre zeminin rijitliğinin hesaplamalarda açık biçimde dikkate alınmasıdır.

ASTM D2321; termoplastik boruların yerleştirilmesi ve gömülmesine ilişkin bir uygulama standardıdır. Bir yapısal hesap yöntemi olmaktan ziyade, dolgu malzemelerinin sınıflandırılması,

yerleştirilmesi ve sıkıştırılması için gereklilikleri tanımlar. Daha önce açıklanan parametre duyarlılığı dikkate alındığında, ASTM D2321 gibi yapım ve sıkıştırma koşullarını düzenleyen standartların boru performansı üzerindeki etkisinin, yalnızca hesap yöntemlerinin seçimi kadar önemli olduğu görülmektedir.

Türkiye'deki uygulamalar; Türkiye'de gömülü boruların tasarımında ilgili TS standartları, teknik şartnameler ve idareye özgü uygulama esasları birlikte kullanılmaktadır. Yaygın uygulamalarda prizma yükü ile Modifiye Iowa eşitliğinin birlikte kullanıldığı ve deformasyon sınırı olarak yaklaşık %5 değerinin esas alındığı görülmektedir.

5.1. Deformasyon sınırları

Hesaplanan boru deformasyonunun hangi sınır değerle karşılaştırılacağı, yalnızca borunun malzemesine değil, kontrol edilmek istenen hasar mekanizmasına ve kullanılan tasarım standardına da bağlıdır. Sınır değerlerin kökeni ve dayandığı gerekçeler Moser ve Folkman (2008) tarafından ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

%5 deformasyon: Birçok uygulamada yaygın olarak kullanılan tasarım sınırıdır. Temel amaç, özellikle contalı birleşimlerde sızdırmazlığın korunması ve uzun dönem performansı için yeterli güvenlik payının bırakılmasıdır (Spangler, 1964).

%7,5 deformasyon: Bazı tasarım yaklaşımlarında izin verilen üst sınır olarak kullanılmaktadır. Bu değer, özellikle ters eğrilik (reverse curvature) gibi ileri deformasyon mekanizmalarına karşı ek bir sınır olarak değerlendirilebilir (Watkins ve Anderson, 1999).

%10 ve üzeri deformasyon: Bu seviyeler genel olarak servis performansı açısından kabul edilebilir tasarım aralığının dışındadır ve göçme öncesi davranışın başladığı bölge olarak değerlendirilebilir.

Örnek kesitte hesaplanan deformasyonlar bu sınırların altında kalmaktadır. Bununla birlikte, geri dolgu rijitliğinin önemli ölçüde azalması veya sığ gömme koşullarında trafik yüklerinin devreye girmesi durumunda deformasyon artmaktadır. Bu sonuç, gömülü boruların servis performansında geri dolgu koşullarının belirleyici rolünü bir kez daha ortaya koymaktadır.

6. Sonuç ve Genel Değerlendirme

Gömülü boruların tasarımında kullanılan farklı hesap yöntemleri, temelde aynı fiziksel mekanizmanın farklı kabuller altında modellenmesinden kaynaklanmaktadır. Bu mekanizmanın merkezinde, boru ile çevre zeminin farklı miktarlarda deformasyon göstermesi ve bunun sonucunda boru ile zemin arasında kayma gerilmelerinin gelişmesi bulunmaktadır. Söz konusu kayma gerilmeleri, yükün bir bölümünün boruya aktarılmasını veya borudan uzaklaştırılarak yan zemin kütlelerine aktarılmasını sağlar. Böylece boruya ulaşan yük, basit bir zemin prizması ağırlığından farklı hâle gelir. Yöntemler arasındaki temel farklılık, bu yük aktarım mekanizmasının nasıl temsil edildiğinden kaynaklanmaktadır. Marston hendek duvarlarındaki sürtünmeyi, Spangler yan dolgunun pasif direncini, Watkins üniform yatay zemin basıncını, elastik çözümler zemin–boru sisteminin sürekliliğini, McGrath ve Zhang–Wong yaklaşımları ise kemerlenme ve boru–zemin rijitliği arasındaki ilişkiyi esas almaktadır. Bu genel çerçevede aşağıdaki sonuçlar öne çıkmaktadır. Yük hesaplama yöntemi borunun davranış sınıfı ile uyumlu seçilmelidir. Marston bağıntısı rijit boruların yük aktarım davranışı esas alınarak geliştirilmiştir. Esnek borularda ise boru ve çevre dolgunun birlikte deformasyon göstermesi nedeniyle aynı yaklaşım boruya aktarılan yükü yüksek tahmin edebilir. Bu nedenle, esnek borular için yalnızca Marston yüküne dayanan bir hesap uygun değildir.

Boru–zemin rijitlik oranı, tasarımın temel parametrelerinden biridir. Bu boyutsuz parametre, borunun esnek, yarı rijit veya rijit davranış gösterme eğilimini ortaya koymakta ve buna bağlı olarak hangi tasarım kontrolünün öncelikli olması gerektiği konusunda yol göstermektedir. Özellikle yarı rijit davranış bölgesinde deformasyon ve gerilme tahminleri parametre ve yöntem seçimlerine daha duyarlıdır. Geri dolgu koşulları borunun yapısal özellikleri kadar önemlidir. Özellikle esnek borularda borunun yük taşıma performansının önemli bir bölümü yan dolgunun sağladığı yatay dirençten kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, yetersiz sıkıştırılmış bir yan dolguda yalnızca daha rijit bir boru seçmek, beklenen performans artışını sağlamayabilir. Yataklama koşullarının tasarım üzerindeki etkisi kullanılan yönteme bağlıdır. Bazı formülasyonlar yataklama açısını açık bir değişken olarak içerirken, bazıları ideal temas koşulunu varsayarak bu etkiyi tamamen ortadan kaldırmaktadır. Bu nedenle, seçilen yöntemin yataklama koşullarına duyarlılığı bilinmeden elde edilen sonuçların doğrudan karşılaştırılması doğru değildir. Hesap yöntemleri, gerçek boru–zemin sisteminin tüm davranışını eksiksiz biçimde temsil etmemektedir. Mevcut yaklaşımlar zemin basıncı dağılımı, zemin rijitliği, yataklama, yapım koşulları ve zaman etkileri konusunda çeşitli idealizasyonlar içermektedir. Bu nedenle hesap sonuçları mutlak gerçeklik olarak değil, tasarım kararını destekleyen mühendislik tahminleri olarak değerlendirilmelidir.

Yapay Zekâ Araçlarının Kullanımına İlişkin Beyan

Bu kitap bölümünün hazırlanması sürecinde, metnin dil ve anlatım özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla ChatGPT ve Claude adlı üretken yapay zekâ araçlarından yararlanılmıştır. Araçların sunduğu öneriler yazar tarafından gözden geçirilmiş ve gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Bilimsel içeriğin ve kaynakların doğruluğu kontrol edilmiş olup nihai metnin sorumluluğu yazara aittir.

Kaynakça

Aksoy, H.S., & Bitkin, R.E., (2026). Effect of Soils Reinforced with PET Waste in Reducing Loads Transferred to Buried Pipeline. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 6(3), 100398. https://doi.org/10.1016/J.JPSE.2025.100398

American Lifelines Alliance. (2001). *Guidelines for the design of buried steel pipe*. American Society of Civil Engineers.

ASTM International. (2020). *Standard practice for underground installation of thermoplastic pipe for sewers and other gravity-flow applications* (ASTM D2321-20).

Burns, J. Q., & Richard, R. M. (1964). Attenuation of stresses for buried cylinders. *Proceedings of the Symposium on Soil-Structure Interaction* (ss. 379–392). University of Arizona.

Chaallal, O., Arockiasamy, M., & Godat, A. (2015). Field test performance of buried flexible pipes under live truck loads. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *29*(5), 1–10.

Chua, K. M., & Lytton, R. L. (1989). Viscoelastic approach to modeling performance of buried pipes. *Journal of Transportation Engineering*, *115*(3), 253–269.

Canadian Standards Association. (2019). *Canadian highway bridge design code* (CSA S6:19).

European Committee for Standardization. (2019). *Structural design of buried pipelines under various conditions of loading — Part 1: General requirements* (EN 1295-1).

Fenemor, A., Bevier, B., & Schwab, G. (1979). Prediction of deflection for corrugated plastic tubing. *Transactions of the ASAE*, *22*(6), 1338–1342.

Greenwood, M., & Lang, D. (1990). Vertical deflection of buried flexible pipes. *Buried plastic pipe technology* (ASTM STP 1093, ss. 185–214). ASTM International.

Hartley, J. D., & Duncan, J. M. (1987). E′ and its variation with depth. *Journal of Transportation Engineering*, *113*(5), 538–553.

Hoeg, K. (1966). *Pressure distribution on underground structural cylinders* (Teknik Rapor No. AFWL-TR-65-98). Air Force Weapons Laboratory.

Howard, A. K. (1977). Modulus of soil reaction values for buried flexible pipe. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, *103*(1), 33–43.

Kawabata, T., Ling, H. I., Mohri, Y., & Shoda, D. (2006). Behavior of buried flexible pipe under high fills and design implications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *132*(10), 1354–1359.

Mahgoub, A., & El Naggar, H. (2020). Innovative application of tire-derived aggregate around corrugated steel plate culverts. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, *11*(3), Makale 04020025. https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000466

Marston, A., & Anderson, A. O. (1913). *The theory of loads on pipes in ditches* (Bülten No. 31). Iowa Engineering Experiment Station.

Masada, T. (2000). Modified Iowa formula for vertical deflection of buried flexible pipe. *Journal of Transportation Engineering*, *126*(5), 440–446.

Mayne, P. W., & Kulhawy, F. H. (1982). K_o-OCR relationships in soil. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, *108*(6), 851–872.

McGrath, T. J. (1998). *Pipe-soil interactions during backfill placement* [Doktora tezi, University of Massachusetts Amherst].

Moser, A. P., & Folkman, S. L. (2008). *Buried pipe design* (3. baskı). McGraw-Hill.

Sargand, S. M., Hazen, G. A., Liu, X., Masada, T., & Hurd, J. O. (1995). Structural performance of buried polyvinyl chloride pipes under large distributed load. *Transportation Research Record*, *1514*, 59–67.

Spangler, M. G. (1964). Pipeline crossings under railroads and highways. *Journal of the American Water Works Association*, *56*(8), 1029–1046.

Spangler, M. G. (1966). *Soil engineering*. International Textbook Company.

Spangler, M. G., & Shafer, G. (1938). The structural design of flexible pipe culverts. *Proceedings of the 17th Annual Meeting of the Highway Research Board* (Cilt 17, ss. 235–239). Highway Research Board.

Talesnick, M. L., Xia, H. W., & Moore, I. D. (2011). Earth pressure measurements on buried HDPE pipe. *Géotechnique*, *61*(9), 721–732. https://doi.org/10.1680/geot.8.P.048

Warman, D. J., Chorney, J., Reed, M., & Hart, J. D. (2006). Development of a pipeline surface loading screening process. *Proceedings of the 6th International Pipeline Conference* (ss. 803–814). ASME.

Watkins, R. K., & Anderson, L. R. (1999). *Structural mechanics of buried pipes*. CRC Press.

Watkins, R. K., & Spangler, M. G. (1958). Some characteristics of the modulus of passive resistance of soil: A study

in similitude. *Proceedings of the 37th Annual Meeting of the Highway Research Board* . Highway Research Board.

Zhang, Y., & Wong, R. C. K. (2022). Full-scale investigation of responses of large diameter steel pipe under soil compaction and external truck load. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *130*, 104758. https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104758

Zhang, Y., & Wong, R. C. K. (2024). Equations to predict vertical deflection and maximum stress of buried pipes under overburden. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *152*, 105943. https://doi.org/10.1016/j.tust.2024

BÖLÜM 4

YAPISAL ÇELİK YORULMA ANALİZİ İÇİN KILAVUZ VE MİNER YÖNTEMİ İLE UYGULAMA ÖRNEKLERİ

İBRAHİM UTKU DEMİRBAŞ[1] & ERAY ÖZBEK[2]

Giriş

Yapısal çelikler, yüksek dayanım, süneklik ve taşıma kapasitesi gibi üstün mekanik özellikleri sayesinde modern yapı mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle köprüler, yüksek katlı çelik yapılar, endüstriyel tesisler ve dinamik yüklemelere maruz kalan taşıyıcı sistemlerde çelik elemanların uzun süreli yapısal performansı büyük önem arz etmektedir. Bu tür mühendislik yapılarında, tekrarlı ve yön değiştiren yüklemeler altında meydana gelebilen metal yorulması, yapı elemanlarının servis ömrünü ve yapısal güvenliğini doğrudan etkilemektedir. Yorulma hasarı, malzemenin dayanım sınırlarının altında kalan gerilme seviyelerinde oluşmakta ve oluşan çatlağın zamanla gelişmesi sonucunda taşıyıcı elemanlarda veya birleşimlerde göçmeye neden olabilmektedir (Pook, 2007; Fatemi ve Yang, 1998).

[1]Arş. Gör., Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0009-0008-4401-550X
[2] Doç. Dr., Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-6738-7789

Çelik yapıların yorulma performansının (fatigue) değerlendirilmesinde, gerilme aralıkları, yük çevrim sayıları ve yapısal detayların özellikleri temel parametrelerdir. Bu kapsamda, yorulma davranışının incelenmesinde S-N (Wöhler) eğrileri yaygın olarak kullanılırken, güncel Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (ÇYHY-2018), yapısal detayların yorulma dayanımlarının değerlendirilmesine yönelik tasarım esaslarını tanımlamaktadır.

Yapılardaki yüklemelerin gerçekte çoğunlukla değişken genlikli ve rassal olması, farklı gerilme düzeylerinde oluşan yorulma hasarlarının birlikte incelenmesini gerektirebilmektedir. Bu amaçla kullanılan Miner Kuralı, farklı yük çevrimlerinin yorulma ömrüne etkisini değerlendirmek için pratik bir yaklaşım sunmaktadır (Miner, 1945; Fatemi ve Yang, 1998).

Amaç ve Kapsam

Bu kitap bölümünde, yapısal çeliklerde metal yorulmasının oluşum mekanizmasının, yorulma hesabında kullanılan temel yaklaşımların ve Miner Kuralı'nın mühendislik uygulamaları açısından incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, öncelikle ÇYHY-2018 Ek-2 kapsamında tanımlanan yorulma tasarım esasları, ardından S-N eğrileri ve Miner yöntemi ile değişken genlikli yüklemeler altında yorulma hesaplamaları ele alınmıştır. Her iki yaklaşım, aynı örnek üzerinde kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir.

Böylece, yapısal çelik elemanların yorulma davranışını inceleyen araştırmacılar ve mühendisler için, ilgili yönetmelik esasları ile literatürdeki Miner yaklaşımını birlikte açıklayan uygulamalı bir kılavuz oluşturulması hedeflenmiştir.

METAL YORULMASI

Tanım, Oluşum ve Gelişmesi

Metal yorulması, eleman veya birleşim detayının tekrarlı ve yön değiştiren yüklemelere maruz kalması sonucu, çekme gerilmeleri altında mikro çatlakların başlaması, oluşan çatlakların çevrimler boyunca ilerlemesi, ardından duraklama çizgilerinin meydana gelerek gevrek kırılmanın oluşması şeklinde tanımlanabilmektedir (Şekil 1) (Pook, 2007).

Çatlak başlangıçları çoğu zaman gerilme yığılmasına neden olan delik kenarları, keskin geometri geçiş bölgeleri, yüzey çizikleri veya kaynak kusurları gibi bölgelerde görülmektedir. Yorulma davranışında malzemenin akma dayanımı tek başına yeterli bir ölçüt değildir. Elemanın veya birleşimin geometrisi ve gerilme aralıkları da önemli etkenlerdir (ÇŞB, 2018).

Şekil 1 Metal Yorulması Sonucu Kırılmış Bir Malzeme

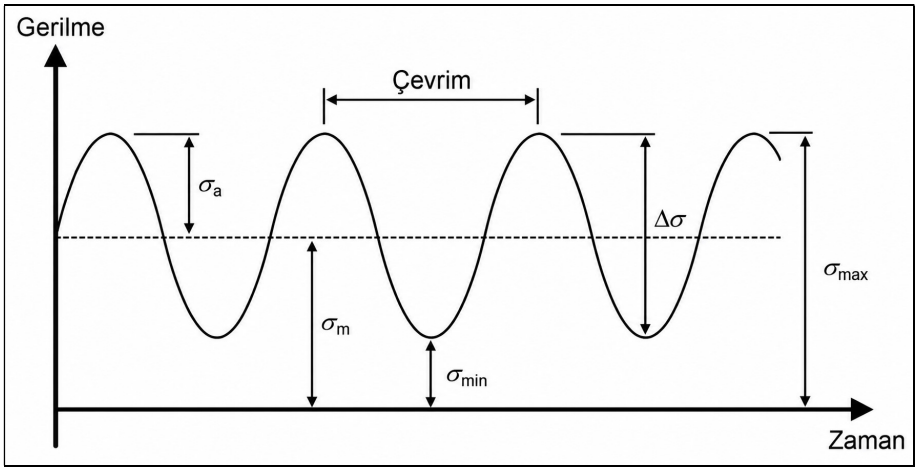


Kaynak: https://eddm.es/curso-fatiga-y-tolerancia-al-dano/

Temel Gerilme Büyüklükleri

Metal yorulmasının değerlendirilmesinde, tekrarlı yüklemeler altında meydana gelen gerilme parametreleri belirlenmelidir (Şekil 2). Aşağıda verilen denklikler ile hesaplanabilmektedir (Pook, 2007).

Şekil 2 Gerilme-Zaman Grafiği ve Temel Gerilme Büyüklükleri



Kaynak:https://www.comsol.com/multiphysics/material-fatigue?parent=structural-mechanics-0182-242

En Büyük Gerilme:

$$\sigma_{max}$$

En Küçük Gerilme:

$$\sigma_{min}$$

Gerilme Aralığı:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

Gerilme Genliği:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

Ortalama Gerilme:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

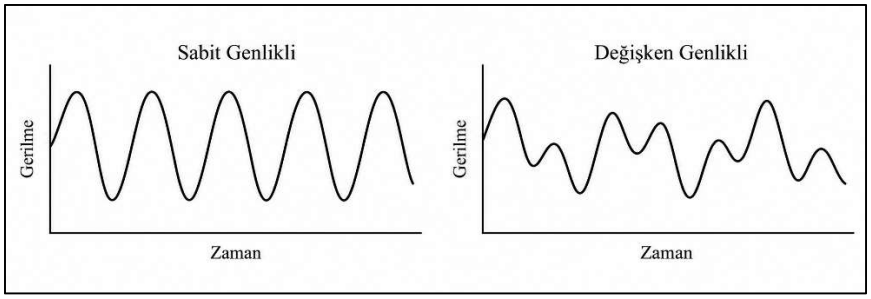
Gerilme Oranı:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

Yorulma Yüklemeleri ve Yorulmayı Etkileyen Faktörler

Metal yorulmasına neden olan tekrarlı yüklemeler, sabit ve değişken genlikli yüklemeler olarak sınıflandırılmaktadır. Sabit genlikli yüklemelerde en büyük ve en küçük gerilme değerleri her çevrimde aynı kalırken, değişken genlikli yüklemelerde gerilme aralıkları çevrimler boyunca farklılık göstermektedir (Şekil 3).

Şekil 3 Sabit ve Değişken Genlikli Yüklemeler



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur

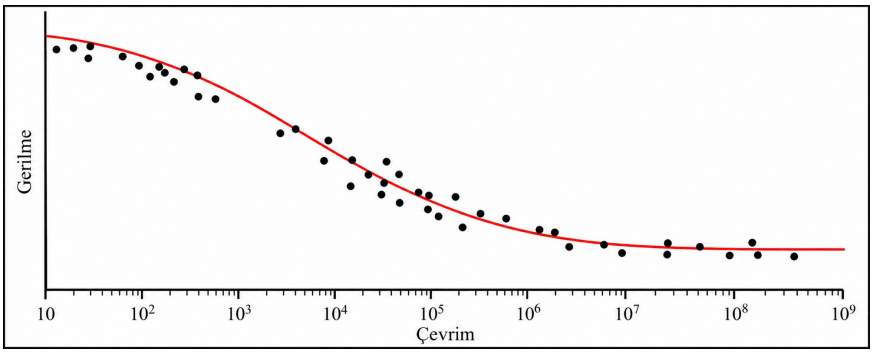
Yorulma davranışı, gerilme aralıkları ve yük çevrim sayılarının yanı sıra malzeme özellikleri, geometri, yüzey pürüzlülüğü, ortalama gerilme ve artık gerilmelerden de etkilenmektedir (Pook, 2007).

Ayrıca değişken genlikli yüklemelerde, yükleme sırası ve gerilme seviyeleri arasındaki etkileşimler, yorulma ömrü tahminlerinde farklılıklara neden olabilmektedir (Fatemi ve Yang, 1998).

S-N (Wöhler) Eğrileri ve Yorulma Ömrü

Metal yorulmasının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan S-N eğrileri, tekrarlı yüklemeler altındaki gerilme seviyesi ile kırılmaya kadar gerçekleşen yük çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır (Şekil 4). Bu eğriler, farklı gerilme seviyelerinde gerçekleştirilen sabit genlikli sinüzoidal yorulma deneylerinden elde edilmekte ve genellikle çevrim sayısının logaritmik eksende gösterilmesiyle oluşturulmaktadır. Genel olarak gerilme seviyesinin artmasıyla yorulma ömrü azalmaktadır. S-N eğrilerinin belirlenmesinde, farklı gerilme seviyelerinde test edilen numunelerin kırılmaya kadar dayanabildikleri çevrim sayıları kaydedilmektedir. Elde edilen deneysel verilerin değerlendirilmesiyle malzemeye ait gerilme-ömür ilişkisi oluşturulmaktadır. Deney sonuçlarında görülen saçılım nedeniyle tasarımda kullanılan eğrilerin güvenli tarafta kalacak şekilde belirlenmesi önem taşımaktadır (Pook, 2007).

Şekil 4 S-N (Wöhler) Eğrisi Örneği



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur

Eğri incelendiğinde başta yüksek gerilme düşük çevrim sayıları ile yorulmanın gerçekleşebildiği, gerilme azaldıkça orta bölgede yüksek çevrim sayıları ile yorulmaya ulaşıldığı ve belirli bir gerilme altında ise sonsuza kadar yorulma ömrünün devam ettiği (yorulma limiti) gözlemlenmektedir.

S-N ilişkisi, hem yönetmelik esaslı yorulma hesaplamalarının hem de Miner yönteminin temelini oluşturmaktadır. ÇYHY-2018 Ek-2'de yorulma dayanımı, yapısal detay sınıfları ve gerilme tekrar sayısına bağlı denklikler ile belirlenirken, Miner kuralında farklı gerilme seviyelerine karşılık gelen yorulma ömürleri birikimli hasarın hesaplanmasında kullanılmaktadır (ÇŞB, 2018; Pook, 2007).

ÇYHY-2018'E GÖRE METAL YORULMASI

Ek-2'nin Kapsamı ve Genel Esaslar

Yapısal elemanlarda ve birleşimlerde çatlak oluşumuna ve devamında göçmeye neden olabilecek, elastik sınırın aşılmadığı, yeteri büyüklükte ve sayıda tekrarlanan gerilmelerin oluşturduğu yorulma etkileri Ek 2 altında incelenmektedir. Ek 2.1 uyarınca yorulma kontrollerinde yükler yük katsayıları ile artırılmaz, servis yükleri altında hesaplanan gerilmeler esas alınır ve bu gerilmelerin $0{,}66F_y$ (Akma dayanımı) değerinden küçük olması gerekmektedir.

Çevrim sayısının 20000'den az olduğu, gerilme aralığı değerinin F_{TH} (Güvenli gerilme aralığı eşik değeri, sonsuz tasarım ömrüne denk gelen en büyük gerilme) değerinden düşük olması ve rüzgar yükü etkisindeki boru veya kutu enkesitli elemanların olduğu durumlarda yorulma kontrolü yapılmasına gerek bulunmamaktadır. Bahsi geçen kurallar, 150°C'den düşük sıcaklıklara maruz kalan ve normal atmosfer koşulları etkisindeki elemanlar veya korozyona karşı gerekli önlemlerin alınmış olduğu elemanlar için uygulanabilmektedir (ÇŞB, 2018).

Gerilme Sınıfları ve Yorulma Hesaplamaları

Yorulma dayanımı yalnızca çeliğin dayanım sınıfına bağlı olmayıp geometriye, birleşim türüne ve olası çatlak başlama noktalarından da etkilenmektedir. Yorulma tasarımı için parametreler, ÇYHY-2018 Tablo Ek 2.1'de, kaynaksız esas metal,

bulonlu birleşimler ve kaynaklı birleşimler gibi çeşitli başlıklar altında özelliklerine göre gerilme sınıflarına ayrılmaktadır. Her gerilme sınıfı için söz konusu tabloda C_f (Farklı gerilme sınıflan için verilen sabit değer) ve F_{TH} (Güvenli gerilme aralığının eşik değeri) MPa biriminde verilmektedir. F ve G sınıfı gibi tabloda bu değerleri mevcut olmayan sınıflar için ise farklı denklikler tanımlanmıştır. Elemanlarda ve kaynaklı birleşimlerde yorulma durumu Ek 2.3'te, bulonlarda yorulma durumu ise Ek 2.4'te bulunan denklikler ve tablodan alınan parametreler ile hesaplanmaktadır. Tasarım ömrü boyunca oluşacak gerilme tekrarı (n_{SR}) ve ilgili gerilme sınıfının parametreleri kullanılarak F_{SR} (Güvenli gerilme aralığı) hesaplanmaktadır. Hesaplanan F_{SR} değeri F_{TH} eşik değerinden küçük alınamaz. Yüklemedeki gerilme aralığı, belirlenen bu güvenli gerilme aralığını aşmamalıdır (ÇŞB, 2018).

ÇYHY-2018 Ek-2 kapsamında çelik yapı elemanları ve birleşimlerinde yorulma hesaplamalarında:

- Kontrol gerekmeyen durumlara dahil olup olmadığının belirlenmesi,
- Servis gerilmelerinin $0.66F_y$ değerini aşmaması ve genel esaslara uygunluğunun kontrolü,
- Kontrol yapılacak eleman veya birleşimin, Tablo Ek 2.1'den uygun gerilme sınıfı ile bu sınıfa karşılık gelen C_f ve F_{TH} parametrelerinin belirlenmesi,
- Servis yükleri altında gerilme aralığının ($\Delta\sigma$) hesaplanması,
- Gerilme tekrar sayısının (n_{SR}) belirlenmesi,
- Seçilen gerilme sınıfı, C_f, F_{TH} ve hesaplanan n_{SR} parametreleri kullanılarak, Ek 2.3 veya Ek 2.4 kapsamında verilen ilgili denklikler ile F_{SR} değerinin hesaplanması,

- Hesaplanan F_{SR} değeri ile tablodan alınan F_{TH} değerinin kıyaslanarak nihai güvenli gerilme aralığının belirlenmesi,
- Son olarak hesaplanan gerilme aralığı ile, belirlenen güvenli gerilme aralığının karşılaştırılması,

adımlarını genelleştirmek mümkündür. Gerilme aralığının küçük veya eşit olduğu durumlarda yorulma güvenliği kontrolü sağlanmıştır, aksi durumda ise eleman veya birleşimin yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir.

ÇYHY-2018 Ek-2 Uygulama Örneği

Bir demiryolu köprüsünde, S355 (ÇYHY-2018) sınıfı çelik levhalardan oluşan bindirmeli birleşim, yüksek dayanımlı bulonlarla sürtünme etkili olarak tasarlanmıştır. Birleşimin esas metalindeki kayıpsız enkesitinin yorulma kontrolü yapılacaktır. Köprünün tasarım ömrü 50 yıl olup günlük 150 tren geçişi öngörülmektedir. Dört farklı tren grubunun oluşturduğu gerilme çevrimleri ve günlük geçiş sayısındaki oranlar Tablo 1' de verilmiştir. Normal atmosfer ve 150°C altındaki sıcaklık koşulları mevcuttur.

Tablo 1 Tren Gruplarına Göre Geçiş Oranları ve Gerilmeler

Tren Grubu	Geçiş Oranı	σ_{min} (MPa)	σ_{max} (MPa)
A	%5	30	180
B	%15	30	160
C	%20	30	145
D	%60	30	120

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur

- S355 sınıfı çelik için $F_y = 355$ MPa

$\rightarrow 0.66F_y = 234.4$ MPa

En büyük servis gerilmesi (σ_{max}) = 180 MPa

→ 180 MPa < 234.4 MPa

- İncelenen birleşim, ÇYHY-2018 Tablo Ek 2.1, Bölüm 2, (2.1)'deki koşulları sağlamaktadır.

→ Gerilme Sınıfı: B

→ $C_f = 120 \times 10^8$

→ F_{TH} = 110 MPa

- Her tren grubuna ait gerilme aralıkları: $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

A = 180 – 30 = 150 MPa

B = 160 – 30 = 130 MPa

C = 145 – 30 = 115 MPa

D = 120 – 30 = 90 MPa

→ $\Delta\sigma_{max}$ = 150 MPa

- Gerilme tekrar sayısı

n_{SR} = 50 Yıl x 365 Gün/Yıl x 150 Tren/Gün = 2737500 Tren

- B sınıfı için;

$$F_{SR} = \left(\frac{C_f \times 329}{n_{SR}}\right)^{0.333} \geq F_{TH}$$

→ F_{SR} = 112.45 MPa ≥ 110 MPa (F_{TH})

→ Güvenli gerilme aralığı 112.45 MPa'dır.

- $\Delta\sigma \leq F_{SR}$

150 MPa > 112.45 MPa → Birleşim yeniden değerlendirilmelidir.

MİNER KURALI

Doğrusal Birikimli Hasar Yaklaşımı

Miner kuralı, değişken genlikli yükleme geçmişindeki her gerilme grubunun yorulma ömründen tükettiği payın doğrusal biçimde toplandığı bir yöntemdir. Her gerilme aralığı için sabit genlikli deneylerden elde edilen veriler ile S-N eğrisi oluşturulmakta ve eğri üzerinden yorulmanın gerçekleşmesi için gereken çevrim sayısı (N_i) okunmaktadır. O gerilme aralığında gerçekleşen çevrim sayısının (n_i), yorulma ömrüne oranı (d_i) hasar katkısını oluşturmaktadır (Miner, 1945; Pook, 2007).

$$d_i = \frac{n_i}{N_i}$$

$$D = \Sigma d_i = \Sigma \frac{n_i}{N_i}$$

İdeal doğrusal modelde $D \geq 1$ yorulma ömrünün tüketildiği sınırı temsil etmektedir. Başka bir deyişle, aslında sabit genlikli yüklemelerin süperpoze edilmesi şeklinde oluşan değişken genlikli yüklemelerin, her bir sabit gerilme aralığının çevrim sayılarının, o gerilme aralığı için ömür teşkil eden çevrim sayılarına oranlanması ve bu oranların doğrusal olarak toplanması biçiminde ifade etmek mümkündür.

Miner Kuralı ile Hesaplama Adımları

Miner kuralı kullanılarak değişken genlikli yüklemeler altında yorulma hasarının değerlendirilmesinde genel olarak aşağıdaki adımlar izlenmektedir:

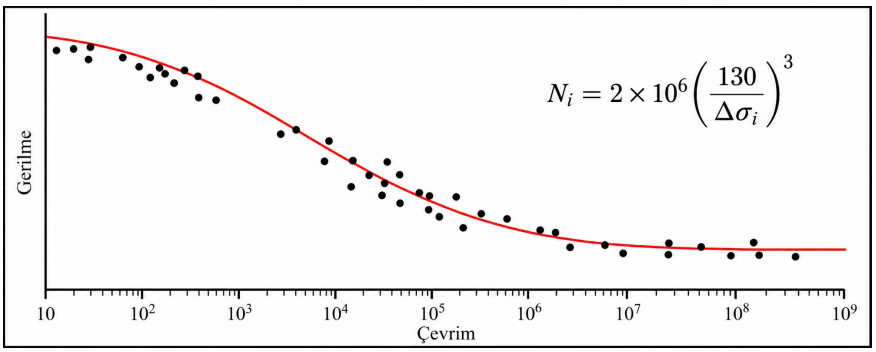
- Servis yükleri altında oluşan farklı gerilme aralıklarının belirlenmesi,
- Her gerilme aralığı için tasarım ömrü boyunca gerçekleşen çevrim sayısının (n_i) hesaplanması,

- Yorulma hasarı değerlendirilmesi yapılacak olan detaya ait S-N eğrisinin kullanılarak her gerilme aralığı için göçme durumu için gerçekleşmesi gereken çevrim sayısının (N_i) belirlenmesi,
- Her farklı grubun hasar katkısının (d_i) hesaplanarak toplam yorulma hasarının (D) elde edilmesi,
- Hesaplanan toplam hasar değerinin, sınır değer ile karşılaştırılması (D ≥1 ?).

Miner Kuralı Uygulama Örneği

ÇYHY-2018 için yorulma kontrolü yapılan demiryolu köprüsü örneği, bu başlık altında Miner kuralı ile yapılacaktır. Birleşim geometrisi, 50 yıllık tasarım ömrü ve dört farklı tren grubuna ait gerilme değerleri ile geçiş oranları Tablo 1'de verilen değerler ile aynıdır. Miner hesabının gösterilmesi amacıyla ilgili birleşim detayını temsil eden numuneler üzerinde gerçekleştirildiği varsayılan sabit genlikli yorulma deneylerinden kurgusal bir S-N eğrisi oluşturulmuştur. Bu kapsamda, 130 MPa referans gerilme aralığında N_i değeri 2 x 10^6 ve eğri parametresi m =3 olarak kabul edilmiştir (Şekil 5).

Şekil 5 Kurgusal S-N Eğrisi



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur

- Her tren grubuna ait gerilme aralıkları: $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

A = 180 – 30 = 150 MPa

B = 160 – 30 = 130 MPa

C = 145 – 30 = 115 MPa

D = 120 – 30 = 90 MPa

- Tasarım ömrü boyunca gerçekleşmesi beklenen toplam çevrim sayısı:

n_{SR} = 50 Yıl x 365 Gün/Yıl x 150 Tren/Gün = 2.737.500 Tren

Her tren grubunun çevrim sayısı, toplam çevrim sayısı ile geçiş oranlarının çarpılması ile belirlenir:

$n_i = n_{SR}$ x Geçiş oranı

→ n_A = 2737500 x 0.05 = 136875

→ n_B = 2737500 x 0.15 = 410625

→ n_C = 2737500 x 0.20 = 547500

→ n_D = 2737500 x 0.60 = 1642500

- S-N eğrisinden yorulma ömürlerinin (N_i) belirlenmesi:

Her tren grubunun gerilme aralığı, verilen S-N bağıntısında yerine yazılarak ilgili yorulma ömrü hesaplanır.

→ $N_i = 2 \times 10^6 (130/\Delta\sigma_i)^3$

→ $N_A = 2 \times 10^6 (130/150)^3 = 1301926$

→ $N_B = 2 \times 10^6 (130/130)^3 = 2000000$

→ $N_C = 2 \times 10^6 (130/115)^3 = 2889126$

→ $N_D = 2 \times 10^6 (130/90)^3 = 6027435$

- Her tren grubunun hasar katkısının hesaplanması:

$d_i = n_i / N_i$

$\rightarrow d_A = 136875 / 1301926 = 0.1051$

$\rightarrow d_B = 410625 / 2000000 = 0.2053$

$\rightarrow d_C = 547500 / 2889126 = 0.1895$

$\rightarrow d_D = 1642500 / 6027435 = 0.2725$

- Toplam yorulma hasarı:

$D = \Sigma d_i$

$\rightarrow D = 0.1051 + 0.2053 + 0.1895 + 0.2725 = 0.7724$

$D < 1$

$\rightarrow$ Birleşimin 50 yıllık tasarım ömründe teorik olarak yorulma hasarına ulaşmadığı sonucuna varılmaktadır.

Sonuçlar incelendiğinde, en büyük gerilme aralığına sahip A grubu trenlerin hasar katkısı 0.1051 iken, en küçük gerilme aralığına sahip D grubu trenlerin hasar katkısı 0.2725 olarak belirlenmiştir. Bu durum, yorulma hasarının gerilme aralığının yanı sıra ilgili gerilme seviyesindeki çevrim sayısının da ne kadar önemli olduğunu hatırlatmaktadır.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu kitap bölümünde, yapısal çeliklerde metal yorulması ÇYHY-2018 Ek-2 ve Miner Doğrusal birikimli hasar kuralı kapsamında incelenmiş, her iki yöntem ile aynı örnek üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.

ÇYHY-2018 esas alınarak yapılan kontrolde güvenli gerilme aralığı 112.45 MPa olarak hesaplanmış ve en büyük gerilme aralığının 150 MPa olması nedeniyle yeniden değerlendirilme yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Miner kuralıyla yapılan hesaplamalar sonucunda ise örneklendirme için oluşturulan kurgusal S-N eğrisi kullanılarak toplam yorulma hasarı değeri 0.7724 olarak belirlenmiş ve teorik hasar sınırına ulaşılmadığı görülmüştür. Sonuçlardaki farklılık, yöntemlerin hesap esaslarından ve kullanılan varsayımlardan kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak, ÇYHY-2018 kapsamındaki değerlendirilmenin temel alınması gerektiğiyle birlikte; Miner kuralı ile değişken genlikli yüklemelerde, yükleme gruplarının hasar üzerindeki etkilerini ayrı ayrı incelemek amacıyla farklı bir yaklaşım olarak kullanılabilmektedir.

Kaynakça

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2018). *Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (ÇYHY 2018)*. Ankara: Resmi Gazete.

Fatemi, A., & Yang, L. (1998). Cumulative fatigue damage and life prediction theories: A survey of the state of the art for homogeneous materials. *International Journal of Fatigue, 20*(1), 9-34. doi:[https://doi.org/10.1016/S0142-1123(97)00081-9]

Miner, M. A. (1945). Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics, 12*(3), A159-A164. doi:[https://doi.org/10.1115/1.4009458]

Pook, L. P. (2007). *Metal Fatigue: What It Is, Why It Matters.* Dordrecht: Springer.

BÖLÜM 5

SÜRDÜRÜLEBİLİR KENTSEL SU YÖNETİMİ İÇİN BİLGİ YÖNETİM SİSTEMLERİ VE VERİ TABANLARI: VERİ YÖNETİMİ, TEMEL KAVRAMLAR VE KAZANIMLAR

SALİH YILMAZ[1], MAHMUT FIRAT[2]

Giriş

Kentsel su yönetimi oldukça karmaşık bileşenleri ve süreçleri içermektedir. Bu süreçler temel olarak; su kaynağından son kullanıcıya kadar hizmet veren varlıkların performansının izlenmesi, hidrolik verilerin ölçümü ve izlenmesi, şebeke işletme performansının analizi, depo ve isale hatlarının izlenmesi, dağıtım sistemlerinde basınç ve debilerin izlenmesi, abonelerin ve tüketimlerinin düzenli ölçümü ve izlenmesi şeklinde örneklendirilebilir. Büyük dağıtım sistemlerinde sistem bileşenlerinin sayısı ve büyüklüğü arttıkça bu süreçlerin planlanması, saha çalışmaları ve sürdürülebilir yönetimi daha da zorlaşmaktadır. Bu nedenle kentsel su yönetiminde veri yönetimi, performans analizi ve izleme ve şebeke işletme süreçlerinin etkin ve

[1] Doç. Dr., Çankırı Karatekin Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-3206-1225)
[2] Prof. Dr., İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-8010-9289)

sürdürülebilir yönetimi için bilgi yönetim sistemleri ve veri yönetim araçları kullanılmaktadır (Panagopoulos ve diğerleri, 2012; Naik ve diğerleri, 2026). Kentsel su yönetiminde en temel hedef, kaynağından alınan kaliteli ve yeterli miktarda suyun abonelere sürekli bir şekilde iletilmesidir. Bununla birlikte su idarelerinin hizmet sürekliliğinin sağlanması, işletme ve ilk yatırım maliyetlerinin karşılanmasında abonelere sunulan hizmetin karşılığının alınması (tüketilen su bedelinin tahakkuk edilmesi) gerekmektedir (Sushma ve diğerleri, 2023). Bunun için sahada hizmet sunulan abonelerin sayısının ve konumunun doğru ve güncel olması, tahakkukların düzenli izlenmesi ve tahsilatların takip edilmesinde Abone Bilgi Yönetim Sistemi (ABYS) ve akıllı okuma sistemleri kullanılmaktadır (Ahmed ve diğerleri, 2025). İşlevsel ve verileri güncel bir ABYS ile hizmet sunulan abonelerin etkin ve sürdürülebilir yönetimi sağlanabilir.

Sahada hizmet veren varlıkların koordinatlı olarak kaydedilmesi, konumsal analiz ve değerlendirmelerin yapılması, varlık yönetimi için envanter veri tabanının oluşturulması ve işletme süreçlerinin iyileştirilmesi için tematik harita ve raporların oluşturulması kapsamında coğrafi bilgi sistem (CBS) önemli kazanımlar sunmaktadır (Zhang ve diğerleri, 2023; Naik ve diğerleri, 2026). Şebeke işletme maliyetinin artmasında en temel sorun dağıtım şebekesinde arıza oranlarının artması gösterilebilir. Arıza sayısı arttıkça su kesinti sayısı artmakta, arıza onarım maliyetleri yüksek seviyelere ulaşmakta ve hizmet seviyesi düşmektedir. Arızaların farkına varma ve müdahale süresinin kısaltılması, arıza onarım süresinin iyileştirilmesi, arıza ekiplerinin sistematik olarak yönetilmesi ve arızalara yönlendirilmesi gibi oldukça zorlu süreçlerin yönetiminde Çağrı Merkezi (Arıza Yönetimi Sistemi) kullanılmaktadır. Su temin ve dağıtım sisteminde su bütçesinin oluşturulması, üretilen ve sisteme verilen su miktarının izlenmesi, işletme planlarının oluşturulması ve sistematik güncellenmesi,

sürdürülebilir su kayıp yönetimi faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi kapsamında SCADA yazılımı ve sistemi önemli katkılar sunmaktadır (Joseph ve diğerleri, 2022; Beker & Kansal, 2024).

Özellikle sistem giriş debisi, depo giriş ve çıkış debisi, şebeke işletme basıncı, izole ölçüm bölge debi ve basınç verileri, depo ve kuyu seviye değişimi gibi temel hidrolik verilerin SCADA sistemi ile izlenmesi işletmeci birimler için kritik öneme sahiptir (Ibraheem ve diğerleri, 2026). Su şebekelerinde dijitalleşme, şehirlerdeki kentsel gelişim süreçlerinin geleceğe yönelik planlanması açısından hayati önem taşımaktadır. Ayrıca bu süreç, su yönetimi ve altyapıların sürdürülebilir sistemlere dönüştürülmesi konusunda küçük şehirlerin karşılaştığı en büyük zorluklardan biridir (Bonilla ve diğerleri, 2023). Brahmbhatt vd. (2023), büyük ölçekli su dağıtım şebekelerinde su kalitesinin düzenlenmesi ve sızıntı yerinin tahmini amacıyla dijital ikiz tabanlı bir karar destek sistemi geliştirmiştir. C-TOWN referans şebekesi üzerinde gerçekleştirilen çalışmada hidrolik modelleme, optimizasyon ve makine öğrenmesi yöntemleri birlikte değerlendirilmiştir.

Ntousakis vd. (2025), tarafından yapılan çalışmada su kullanımını optimize etmek, kayıpları azaltmak ve daha da önemlisi sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla, gelişmiş hesaplama araçları aracılığıyla akıllı su yönetiminin gerekliliği vurgulanmıştır. Langat vd. (2026), akıllı su sayaçlarının; doğru ve gerçek zamanlı veri sağlama, zamanında sızıntı tespiti, su kaybının azaltılması ve faturalandırma doğruluğunun artırılmasına olanak tanıyarak, modern konut, endüstriyel ve tarımsal su tedarik ve yönetim sistemlerinde kilit bir rol oynadığını ifade etmiştir. Bu çalışmada, içme suyu temin ve dağıtım sistemlerinde kullanılan temel bilgi yönetim sistemlerinin işlevleri, veri tabanı bileşenleri ve uygulama esasları ele alınmaktadır. Ayrıca CBS, SCADA, ABYS ve arıza yönetim sistemlerinin entegrasyonuna ilişkin temel ilkeler değerlendirilmekte; gerçek uygulamalardan elde edilen görsel

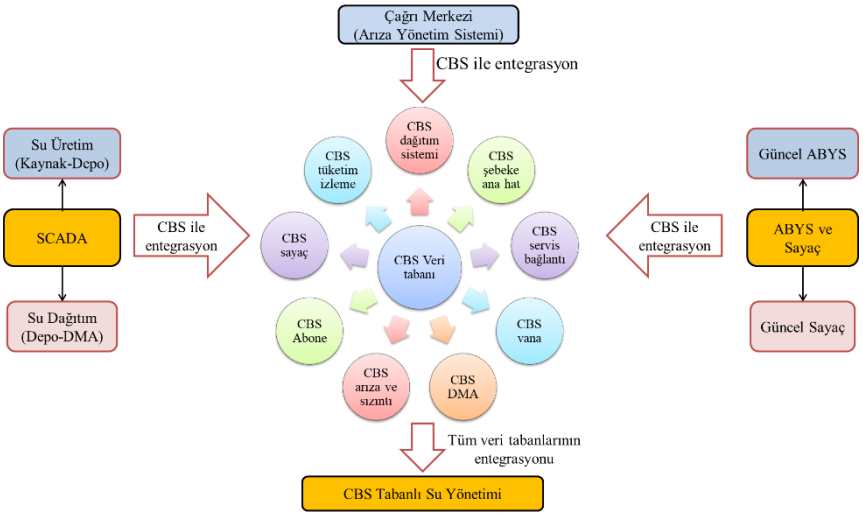
örneklerle sistemlerin kullanım alanları açıklanmaktadır. Bilgi yönetim sistemlerinin sağlayabileceği işletme kazanımları, veri kalitesi gereksinimleri ve uygulamadaki sınırlılıklar birlikte tartışılmaktadır.

Kentsel Su Yönetiminde Bilgi Yönetim Sistemleri

Su temin ve dağıtım sistemlerinde veri yönetimi, farklı kaynaklardan üretilen verilerin belirli standartlara göre toplanması, saklanması, güncellenmesi, doğrulanması ve ilgili kullanıcılara sunulması süreçlerini kapsamaktadır. Bu veriler, kullanım özelliklerine göre konumsal veriler, öznitelik verileri, zamansal ölçümler ve işletme kayıtları biçiminde sınıflandırılabilmektedir. Boru ve vana konumları konumsal verileri; boru malzemesi, çapı ve yapım yılı gibi bilgiler öznitelik verilerini; debi ve basınç ölçümleri ise zamansal verileri temsil etmektedir.

Verilerin işletme süreçlerinde kullanılabilir bilgiye dönüştürülmesi için yalnızca kayıt altına alınmaları yeterli değildir. Veri kalitesinin değerlendirilmesi, farklı sistemlerden elde edilen kayıtların ilişkilendirilmesi ve belirlenen performans göstergelerine göre analiz edilmesi gerekmektedir. Özellikle aynı fiziksel varlığa ait farklı bilgi sistemlerindeki kayıtların ortak ve benzersiz tanımlayıcılar aracılığıyla eşleştirilmesi, veri bütünlüğü açısından önem taşımaktadır.

Bilgi yönetim sistemleri, içme suyu temin, iletim ve dağıtım sistemlerinde sistem bileşenlerinin, abone bilgilerinin, hidrolik verilerin ve işletme bileşenlerinin etkin, sürdürülebilir ve sistematik izlenmesi, yönetilmesi ve müdahale edilmesi amacıyla kullanılan araçları ifade etmektedir. Kentsel su yönetiminde kullanılan en temel sistemler, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), SCADA, Abone Bilgi Yönetim Sistemi (ABYS), Çağrı Merkezi ve Arıza Yönetim Sistemi şeklinde verilebilir (Şekil 1).

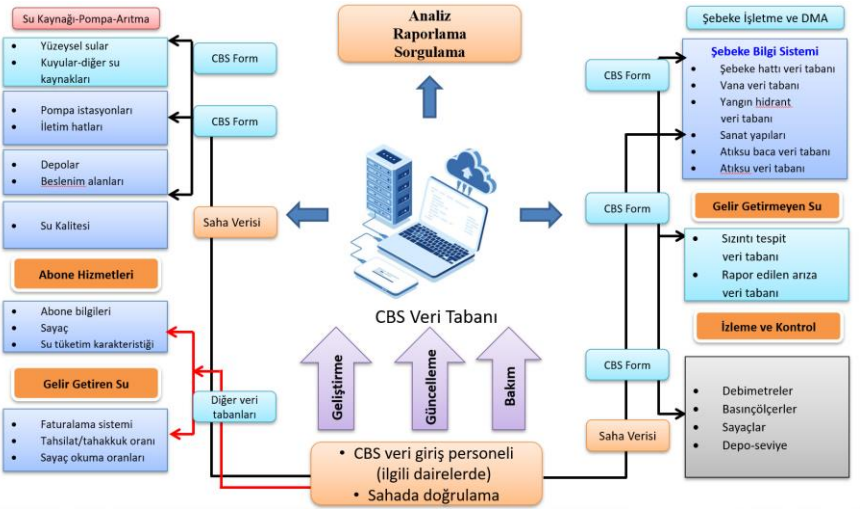


Şekil 1 Kentsel su yönetiminde kullanılan temel bilgi yönetim sistemleri

Abone bilgi yönetim sistemi (ABYS), idarede yasal abonelerin kayıt altına alındığı ve izlendiği, tahakkukların ve tahsilatların izlendiği sistemi ifade etmektedir. Bu sistemin güncel ve işlevsel olması gerekir. Düzenli bir ABYS'ye sahip idarede abone okuma verimliliği ve tahsilat-tahakkuk oranlarının yüksek olması mümkündür. ABYS kullanım amaçları; abonelerin su kullanımlarının takip edilmesi, abone bilgilerinin planlı ve doğru şekilde depolanması, su tüketimlerinin fiyatlandırılması ve tahsilatlarının yapılması, abonelerin sayaç bilgilerinin takip edilmesi ve belirli bir sürede sayaçların yenilenmesi, hatalı, arızalı sayaç bakım ve değişiminin yapılması, kaçak kullanım tespiti, borç ve icra takibinin yapılması, yeni abonelik veya abonelik devir işlemlerinin yapılması şeklinde sıralanabilir.

Coğrafi bilgi sistemler (CBS), içme suyu temin, iletim ve dağıtım sistemlerindeki tüm bileşenlere ait verilerin sayısal harita üzerine aktarılmasını, saklanmasını, görüntülenmesini, raporlanmasını ve analizini sağlayan sistem olarak ifade edilir (Şekil

2). Bu sistemden beklenen faydanın elde edilmesi için sahada verilerin düzenli olarak güncellenmesi gerekir. CBS ile kentsel su yönetiminde oluşturulabilecek veri tabanları, CBS arıza yönetim, CBS abone ve sayaç yönetimi, CBS şebeke, CBS vana, CBS dağıtım sistemi vb. şeklinde verilebilir.

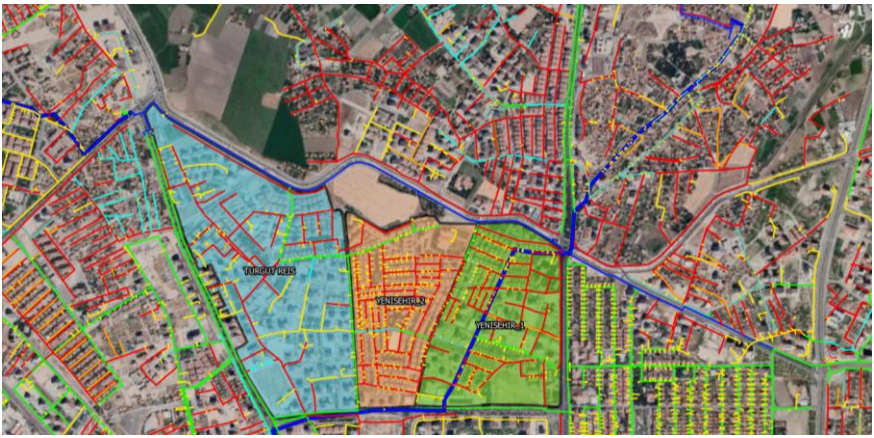


Şekil 2 Coğrafi bilgi sistem veri saklama, analiz ve raporlama bileşenleri

CBS veri tabanı, su temin, iletim ve dağıtım sistemi ve bileşenlerine ait karakteristik bilgilerin kaydedildiği, saklandığı, verilerin sayısal harita konumsal analiz ve tematik analizler için kullanıldığı ve sürekli güncelleme imkanının olduğu veri depolama sistemini ifade etmektedir. Bu veri tabanı, verinin niteliği (sözel veya sayısal veri), özelliği, kullanım amacı, verinin büyüklüğü gibi bileşenlere bağlı olarak her bir sistem için ayrı ayrı oluşturulabilir.

CBS tabanlı dağıtım sistemi, dağıtım sistemine ait tüm verilerin sayısal haritaya işlendiği, sistematik ve düzenli saha güncellemelerinin yapıldığı, şebeke, servis bağlantı, vana, izole ölçüm bölgesi ve dağıtım sistemine ait bileşenlerin izlendiği ve

raporlandığı sistemdir (Şekil 3). Bu sistemin güncel veriler ile desteklenmesi, işletme planlarının oluşturulması, arıza yönetimi, şebeke boru malzeme yönetimi ve izole ölçüm bölge yönetimi için oldukça önemlidir.

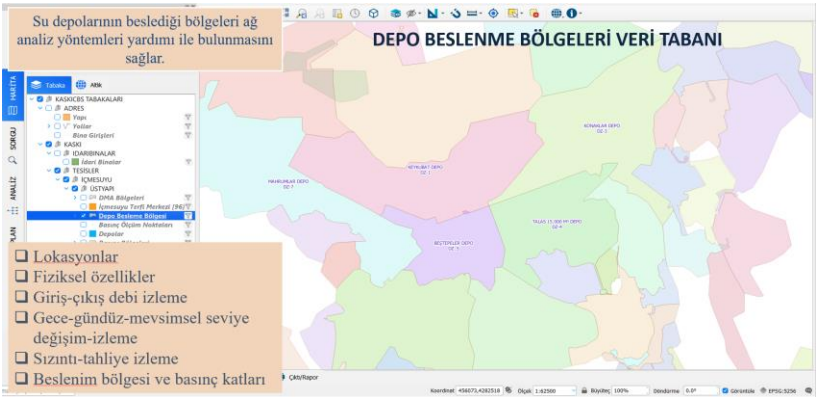


Şekil 3 İçmesuyu dağıtım şebekesi ve bileşenlerinin CBS ortamında görüntülenmesi

Kaynak: KASKİ (2024)

CBS servis bağlantı planı, dağıtım sistemindeki servis bağlantılarının yerleşimini gösteren, koordinatlı olarak haritada sorgulama imkanı sunan planı ifade etmektedir. Bu planın saha verilerine göre koordinatlı olarak sürekli güncellenmesi gerekmektedir.

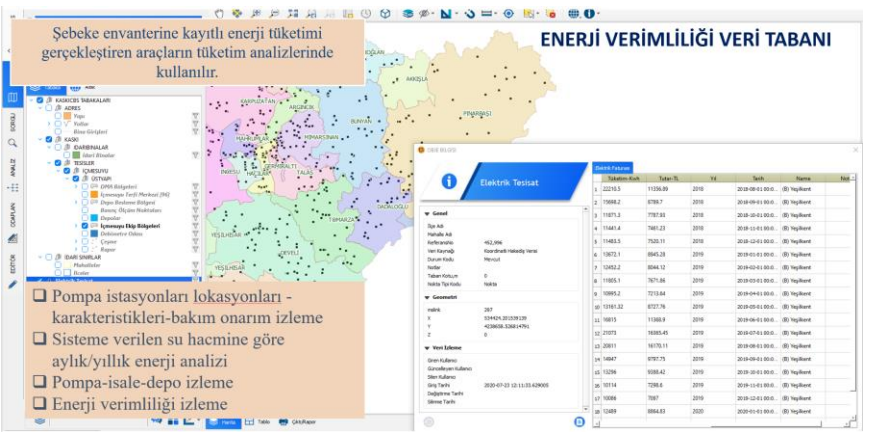
CBS tabanlı depo veri tabanı; depoların konum, kapasite, kot, bağlantı ve beslenim bölgelerine ilişkin bilgilerin saklanmasını ve konumsal olarak analiz edilmesini sağlamaktadır. Bu veriler, basınç bölgelerinin belirlenmesi, depo işletme planlarının hazırlanması ve izole ölçüm bölgelerinin oluşturulması süreçlerinde kullanılabilmektedir. Bunun için idarede veri tabanı güncel CBS sistemi olmalı, depo beslenim bölgeleri bilinmelidir.



Şekil 4 İçmesuyu dağıtım sisteminde depo ve bileşenlerinin CBS ortamında görüntülenmesi

Kaynak: KASKİ (2024)

CBS terfi/pompa yerleşim planı, su üretim, iletim ve dağıtım aşamalarında hizmet veren derin kuyu, isale hattı terfi, depolar arası terfi pompalarının konumlarının yer aldığı ve sayısal haritada analiz ve sorgulamaların yapıldığı planı ifade etmektedir (Şekil 5). Özellikle pompaların izlenmesi, bakım programının oluşturulması, sistem davranışının anlaşılması açısından oldukça önemlidir.



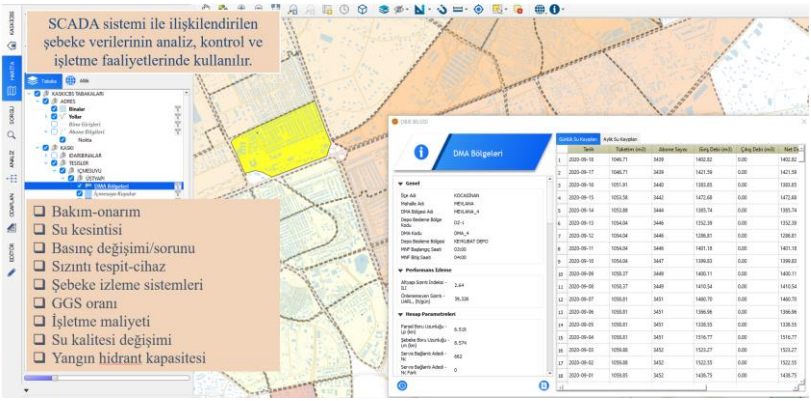
Şekil 5 İçmesuyu dağıtım sisteminde pompa ve bileşenlerinin CBS ortamında görüntülenmesi

Kaynak: KASKİ (2024)

CBS abone veri tabanı, idarede hizmet sunulan ve ABYS'de kayıtlı yasal abone bilgilerini içeren, sayısal haritada görüntülenmesini, analizini ve sorgulanmasını sağlayan veri tabanını ifade etmektedir. Bu veri tabanı özellikle, su kayıp analizleri, sayaç yönetimi, su dengesi analizi, kaçak bağlantı yönetimi ve idari kayıpların azaltılması gibi temel çalışmalar için gereklidir. Bunun için düzenli bir ABYS olmalı, güncel CBS veri tabanı olmalı ve abone bilgilerinin sahada güncellenmesi için planlama olmalıdır.

CBS sayaç veri tabanı, idarede hizmet sunulan ve ABYS'de kayıtlı yasal abone sayaç bilgilerini içeren, sayısal haritada görüntülenmesini, analizini ve sorgulanmasını sağlayan veri tabanını ifade etmektedir. İdarede hizmet veren abone sayaçlarının sayısının ve özelliklerinin sahayı temsil edecek şekilde belirlenmesi, abone yönetim sisteminde kayıtlı abonelerin güncelliğinin sağlanması için bu veri tabanı oldukça önemlidir. Ayrıca, su kayıp analizleri, sayaç yönetimi, su dengesi analizi, kaçak bağlantı yönetimi ve idari kayıpların azaltılması gibi temel çalışmalar için gereklidir. Bunun için düzenli bir ABYS olmalı, güncel CBS veri tabanı olmalı ve abone bilgilerinin sahada güncellenmesi için planlama olmalıdır.

CBS izole bölge veri tabanı, dağıtım sisteminde planlanan veya sahada uygulanan izole ölçüm bölgelerinin sayısal haritada izlenmesini ve görüntülenmesini sağlayan, izole bölgelere ait öz nitelik bilgilerini içeren ve işletme planlarının oluşturulmasında kullanılan veri tabanını ifade etmektedir (Şekil 6). Bu veri tabanında, izole bölgede yer alan şebeke bileşenleri, vanalar, servis bağlantıları ve diğer şebeke planları izlenebilmektedir.



Şekil 6 İçmesuyu dağıtım sisteminde izole ölçüm bölge ve bileşenlerinin CBS ortamında görüntülenmesi

Kaynak: KASKİ (2024)

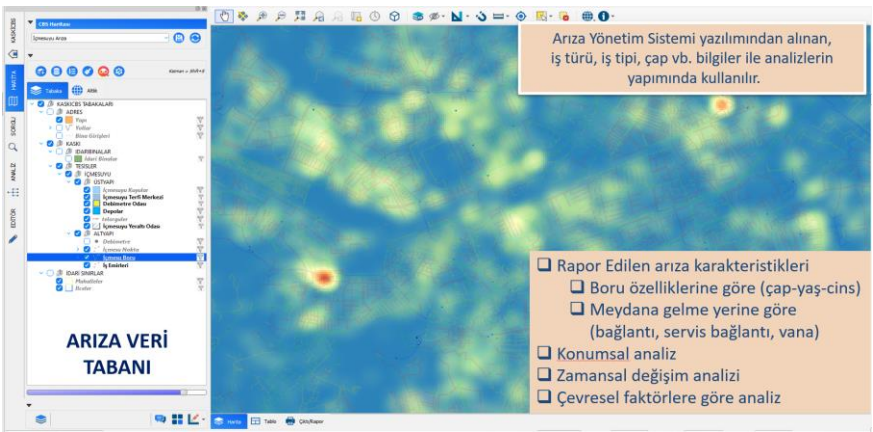
CBS veri tabanının güvenilirliği, saha ile veri tabanı arasındaki uyumun korunmasına bağlıdır. Yeni yapılan bağlantılar, değiştirilen borular, konumu güncellenen vanalar ve işletme durumunda değişiklik meydana gelen diğer varlıklar belirlenmiş güncelleme süreçleri kapsamında sisteme işlenmelidir. Böylece CBS yalnızca mevcut şebekenin görüntülendiği bir harita ortamı olmaktan çıkarak varlık yönetimini ve işletme kararlarını destekleyen bir bilgi altyapısı hâline gelebilmektedir.

Çağrı merkezi, dağıtım sisteminde arıza ve abone şikayetlerin idareye bildirilmesini sağlayan, verilerin düzenli tutulmasına, saklanmasına ve analizine imkan sağlayan, ekiplerin yönlendirilmesi ve çağrıların en kısa sürede çözüme kavuşturulmasına yardımcı olan sistemdir. Özellikle abone memnuniyetinin sağlanması, arızalara müdahale süresinin kısaltılması ve işletme verimliliğinin sağlanması için bu bileşen önemlidir.

Arıza yönetim sistemi, dağıtım sisteminde meydana gelen arıza çağrılarının alınmasını, tutulmasını, analiz edilmesini ve CBS ile entegrasyonunu sağlayan sistemi ifade etmektedir. Arızaların

müdahale ve çözüm sürelerinin kısaltılması ve etkin bir arıza yönetimi açısından bu sistem oldukça önemlidir. Özellikle konumsal olarak en fazla arızanın geldiği bölgelerin analiz edilmesi ve arıza yoğunluklarının belirlenmesi açısından oldukça önemlidir.

CBS arıza veri tabanı, dağıtım sisteminde gözlenen rapor edilen ve edilmeyen arızalara ait bilgileri (türü, yeri, boru çapı vb.) içeren, sayısal haritada görüntülemeyi sağlayan, konumsal analize imkan sağlayan ve işletme yönetiminde kullanılan veri tabanını ifade etmektedir (Şekil 7). Özellikle konumsal olarak en fazla arızanın geldiği bölgelerin analiz edilmesi ve arıza yoğunluklarının belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Bunun için idarede düzenli çalışan bir çağrı merkezi ve CBS olmalıdır.



Şekil 7 İçmesuyu dağıtım sisteminde arıza yönetimi bileşenlerinin CBS ortamında görüntülenmesi

Kaynak: KASKİ (2024)

SCADA sistemi, içme suyu miktarı ve kalitesinin sürekli olarak izlenmesini, kontrolünü, analizini ve değerlendirilmesini sağlayan uzaktan veri izleme ve kontrol sistemini ifade etmektedir. Pompa istasyonları, depolar, su kaynakları ve dağıtım şebekesindeki pek çok izleme noktası SCADA sistemine dahil edilebilir. Bu sistem ile depolardaki su seviyesi, pompa istasyonlarındaki pompaların

işletimi, şebekedeki vanalar (açık, kapalı, kısmen açık) izlenmekte ve uzaktan kontrol edilebilmekte, su ve enerji tüketimi verileri de takip edilebilmektedir.

Entegre edilmiş SCADA sistemi içme suyu dağıtım şebekesinin işletim verimliliğini geliştirmek için pek çok fayda sağlar:

- Sistem ile izlenen debi, su basıncı, klor seviyesi vb. parametrelerin zamansal ve mekânsal değişimleri ve trendleri görsel olarak takip edilebilir
- Tüm depolar, pompalar ve vanalar uzaktan kontrol edilebilir
- Boru patlaklarının tespiti ve yakın mesafeli lokasyonu belirlenebilir
- Hidrolik ve su kalite parametreleri için izleme ve modelleme çalışmaları entegre edilebilir.

SCADA veri izleme sistemi, su temin, iletim, depolama ve dağıtım sistemlerinde ölçülen verilerin (hidrolik, işletme, enerji, su vb.) uzaktan ve anlık olarak takip edilmesini ve değişimlerinin izlenmesini ifade etmektedir (Şekil 8). Bunun için öncelikle izlenmesi gereken veriler ve noktalarda doğru bir veri ölçüm ekipmanının olması ve SCADA sistemine entegre edilmesi gerekir. Verilerin izlenmesi, sistemin etkin ve verimli bir şekilde yönetilmesi, bileşenlerin analiz edilmesi ve en uygun yönetim planlarının ortaya konulması açısından oldukça önemlidir.



Şekil 8 İçmesuyu dağıtım sisteminde SCADA genel yönetim ekranı

Kaynak: (KASKİ, 2024)

SCADA izleme ve müdahale sistemi, su temin, iletim, depolama ve dağıtım sistemlerinde ölçülen verilerin (hidrolik, enerji, su vb.) uzaktan ve anlık olarak takip edilmesini, değişimlerinin izlenmesini ve analiz edilerek uzaktan müdahale ve kontrol edilmesini ifade etmektedir. Bu sistemde sadece sahadan ölçülen verilerin izlenmesi değil aynı zamanda depo giriş-çıkış, izole bölge giriş, pompa ve terfi elemanlarının kontrol edilmesi, müdahale ve yönetimi de yapılmaktadır. Bunun için öncelikle izlenmesi gereken veriler ve noktalarda doğru bir veri ölçüm ekipmanının olması, izleme noktalarında uzaktan kontrol için uygun ekipmanların yerleştirilmesi ve SCADA sistemine entegre edilmesi gerekir.

Bilgi yönetim sistemleri veri paylaşımı, dağıtım sistemi bileşenlerinin izlenmesi, kontrol edilmesi ve yönetilmesi amacıyla kurulan ve birbirinden bağımsız çalışan farklı bilgi yönetim sistemleri arasında bilgi ve veri paylaşımının sağlanmasını ifade etmektedir. Özellikle su dengesi analizi, işletme verilerinin izlenmesi ve analizi, performans analizi ve diğer hesaplamaların anlık ve sistematik yapılması için entegrasyon oldukça önemlidir. Bunun için idarede CBS, SCADA, ABYS, Çağrı merkezi ve arıza yönetim sistemi, kurumsal zekâ gibi bilgi yönetim sistemlerinin aktif bir şekilde çalışması gerekmektedir.

Veri tabanı entegrasyonu, dağıtım sistemi bileşenlerinin izlenmesi, kontrol edilmesi ve yönetilmesi amacıyla kurulan ve birbirinden bağımsız çalışan farklı sistemler arasında bilgi ve veri paylaşımının sağlanmasını ifade etmektedir. Özellikle su dengesi analizi, performans analizi ve diğer hesaplamaların anlık ve sistematik yapılması için entegrasyon oldukça önemlidir. Bunun için öncelikle idare sistem bileşenlerine ait veri tabanlarının düzenli ve güncel olması gerekmektedir.

Sonuçlar

Bu bölümde, içme suyu temin ve dağıtım sistemlerinin sürdürülebilir yönetiminde kullanılan bilgi yönetim sistemlerinin temel işlevleri, veri tabanı bileşenleri ve entegrasyon gereksinimleri değerlendirilmiştir. CBS, SCADA, ABYS ve arıza yönetim sistemlerinin farklı veri türlerinin yönetiminde tamamlayıcı görevler üstlendiği ortaya konulmuştur.

CBS, fiziksel varlıkların konumsal ve öznitelik bilgilerinin yönetilmesini; SCADA, hidrolik ve işletme verilerinin izlenmesini ve uygun koşullarda uzaktan kontrolünü; ABYS, abone ve sayaç kayıtlarının yönetilmesini; arıza yönetim sistemleri ise bildirim, müdahale ve onarım süreçlerinin izlenmesini desteklemektedir. Bu sistemlerin sağladığı katkıların düzeyi, veri doğruluğuna, güncelliğine, sistemler arası entegrasyona ve kurumsal kullanım kapasitesine bağlıdır.

Bölümde sunulan saha görselleri, bilgi yönetim sistemlerinin farklı işletme süreçlerinde kullanımına ilişkin uygulama örnekleri sağlamaktadır. Bununla birlikte belirli bir kazanımın nicel olarak ortaya konulabilmesi için sistemlerin uygulanması öncesi ve sonrasına ait karşılaştırılabilir performans göstergelerine ihtiyaç bulunmaktadır.

Sürdürülebilir bilgi yönetimi için güvenilir ölçüm ve kayıt altyapısının oluşturulması, veri güncelleme sorumluluklarının

belirlenmesi, farklı bilgi sistemleri arasında tutarlı veri paylaşımının sağlanması ve performans göstergelerinin düzenli olarak izlenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda bilgi yönetim sistemlerinin yalnızca bağımsız yazılım uygulamaları olarak değil, bütünleşik bir işletme ve karar destek altyapısının bileşenleri olarak ele alınması önerilmektedir. Bu çalışmanın özellikle kentsel su yönetiminde çalışan karar verici ve teknik personeller için uygulama planlaması ve değerlendirme süreçlerine katkı sağlaması beklenmektedir.

Kaynakça

Ahmed, T., Ahmed, M., Sipra, H., Hassan, F. u., & Scholz, M. (2025). Sustainable urban water management through the application of smart water meters in developing countries: example case study from Pakistan. *Sustain. Water Resour. Manag., 11*, 32. https://doi.org/10.1007/s40899-025-01211-w

Beker, B. A., & Kansal, M. L. (2024). Application of SCADA and IoT for Efficient Management of Urban Water Supply System. *Innovation in Smart and Sustainable Infrastructure.* Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-3994-3_44

Bonilla, C., Brentan, B., Montalvo, I., Ayala-Cabrera, D., & Izquierdo, J. (2023). Digitalization of Water Distribution Systems in Small Cities, a Tool for Verification and Hydraulic Analysis: A Case Study of Pamplona, Colombia. *Water, 15*, 3824. https://doi.org/10.3390/w15213824

Brahmbhatt, P., Maheshwari, A., & Gudi, R. D. (2023). Digital twin assisted decision support system for quality regulation and leak localization task in large-scale water distribution networks. *Digital Chemical Engineering, 9*, 100127. https://doi.org/10.1016/j.dche.2023.100127

Ibraheem, A., Mustafa, A., AlMaqbali, H. A., & Hussein, A. (2026). A Smart Water Distribution Network Management Framework Based on Internet of Things and Reinforcement Learning Technologies. *Journal of Soft Computing and Data Mining, 7*(2), 93-106. https://doi.org/10.30880/jscdm.2026.07.02.007

Joseph, K., Sharma, A., & van Staden, R. (2022). Development of an Intelligent Urban Water Network System. *Water, 14*, 1320. https://doi.org/10.3390/w14091320

KASKİ. (2024). *Su Yönetimi Faaliyetleri.* Kayseri Su ve Kanalizasyon İdaresi İçmesuyu Dairesi Başkanlığı.

Langat, P. K., Veljanovski, R., & Koech, R. (2026). Advancement of Smart Water Meter Asset Infrastructure: A Review of Maintenance and Management Strategies. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 13*(3), 70078. https://doi.org/10.1002/wat2.70078

Naik, D. D., Chaudhary, N., Tholiya, J. J., & Jawale, V. (2026). A review of integrated GIS techniques for optimization of urban water management. *Appl Water Sci, 16*, 260. https://doi.org/10.1007/s13201-026-02944-5

Ntousakis, E., Loukakis, K., Petrou, E. I., & & Papaefthimiou, S. (2025). Optimizing an Urban Water Infrastructure Through a Smart Water Network Management System. *Electronics, 14*(12), 2455. https://doi.org/10.3390/electronics14122455

Panagopoulos, G. P., Bathrellos, G. D., Skilodimou, H. D., & Martsouka, F. A. (2012). Mapping Urban Water Demands Using Multi-Criteria Analysis and GIS. *Water Resour Manage, 26*, 1347–1363. https://doi.org/10.1007/s11269-011-9962-3

Sushma, N., Suresh, H. N., Lakshmi, J. M., Srinivasu, P. N., Bhoi, A. K., & Barsocchi, P. (2023). A Unified Metering System Deployed for Water and Energy Monitoring in Smart City. *IEEE Access, vol. 11*, 80429-80447. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3299825

Zhang, X., Qiao, W., Huang, J., Li, H., & Wang, X. (2023). Impact and analysis of urban water system connectivity project on regional water environment based on Storm Water Management Model (SWMM). *Journal of Cleaner Production, 423*, 138840. https://doi.org/j.jclepro.2023.138840

BÖLÜM 6

İÇMESUYU DAĞITIM SİSTEMLERİNDE SIZINTILARIN AZALTILMASI VE SÜRDÜRÜLEBİLİR YÖNETİMİ İÇİN BASINÇ KONTROL YÖNETİMİ: TEMEL KAVRAMLAR, UYGULAMA ESASLARI VE KAZANIMLAR

MAHMUT FIRAT[1], SALİH YILMAZ[2]

Giriş

Gelir getirmeyen su (GGS), su temin ve dağıtım sistemine verilen ancak ücreti alınmayan suyu ifade etmektedir (Lambert ve diğerleri, 1999; Pearson, 2019). GGS, temel olarak su kayıpları ve faturalandırılmamış yasal kullanımlar olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. Su kayıpları ise fiziki kayıplar (sızıntılar) ve idari kayıplar (sayaç hatalarından kaynaklanan kayıplar ve yasadışı kullanımlar) olmak üzere iki alt bileşene sahiptir (AL-Washali ve diğerleri, 2020). İçmesuyu temin ve dağıtım sistemlerinde, su kaynağından son kullanıcıya kadar tüm varlıklarda arıza sonucu sızıntılar gözlenebilmektedir. Arıza sıklığı ve sızıntı

[1] Prof. Dr., İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-8010-9289)
[2] Doç. Dr., Çankırı Karatekin Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-3206-1225)

miktarı, arızanın türü, yeri, büyüklüğü, varlığın yaşı ve mevcut durumu, işletme ve çevresel faktörler, tasarım ve inşaat yapım kalitesi gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir (Bozkurt ve diğerleri, 2022). İçmesuyu dağıtım şebekelerinde, sistemin büyüklüğü, yaşı ve mevcut durumu arıza oranı ve sızıntı miktarı üzerinde doğrudan etkilidir. Bunun yanı sıra şebeke bileşenlerinin (şebeke ana hat, servis bağlantısı, vanalar vb.) maruz kaldıkları işletme basıncı da arıza ve sızıntı üzerinde oldukça etkilidir (Pons-Ausina ve diğerleri, 2025).

Ülkemizde 2014 yılında yayınlanan Su Kayıplarını Kontrol Yönetmeliğinde içmesuyu dağıtım sistemleri için maksimum basınç değeri 60 mss ile sınırlandırılmıştır. Burada temel amaç, yüksek basınçtan kaynaklanan arıza ve sızıntı oranlarının azaltılmasıdır. Bu yönetmelikten önce içmesuyu dağıtım şebekelerinin projelendirilmesinde maksimum basınç sınırı 80 mss'dur. Özellikle eski yerleşim yerlerinde hizmet veren dağıtım şebekeleri 80 m basınç değeri göz önüne alınarak boyutlandırılmıştır. Bir dağıtım şebekesinde mevcut bir arızada sızıntı su miktarı basıncın artmasına bağlı olarak artmaktadır (Moslehi & Jalili Ghazizadeh, 2020). Özellikle plastik esaslı boru yoğunluğunun fazla olduğu şebekelerde değişken alan sızıntıları meydana geldiği için yüksek basıncın sızıntı üzerindeki etkisi daha da fazla gözlenebilmektedir. Bu tür borular esnek yapıda olduğu için borudaki mevcut bir arıza çatlağı basıncın artması ile daha da genişleyecek, basıncın düşürülmesiyle çatlak çapı daralacaktır. Diğer taraftan sert malzemeye sahip borularda çatlak çapı basınç değişimine bağlı olarak daha az tepki vermekte ve değişmemektedir.

İçmesuyu dağıtım sistemlerinde yüksek basıncın yanı sıra sistemdeki basınç dalgalanması da arıza ve sızıntı yönetiminde dikkate alınması gereken bir bileşendir. Sistem basıncındaki dalgalanmalar, özellikle eski ve yaşlı şebekelerde yeni arıza olasılığını ve riskini artırmaktadır (Rjaibi & Duchesne, 2024).

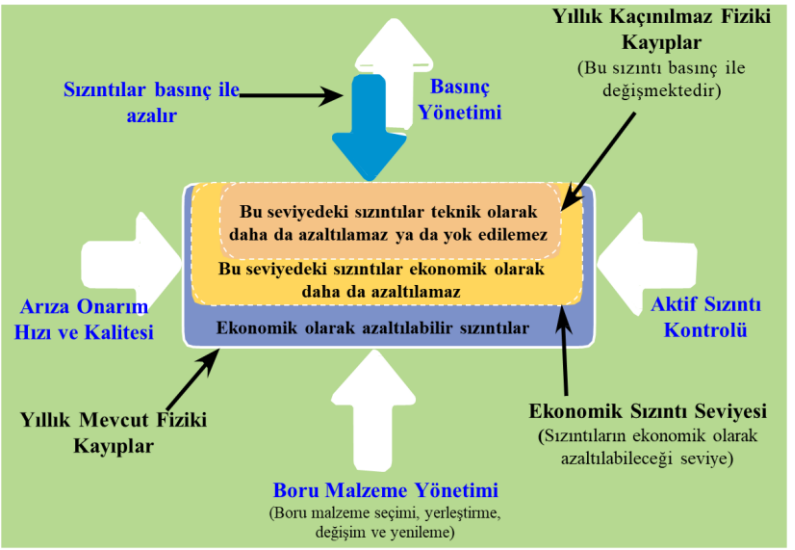
Literatür incelendiğinde basıncın ve basınçtaki dalgalanmaların arıza ve sızıntı yönetimindeki etkisini deneysel, sayısal ve/veya saha çalışmaları esas alarak tartışan ve değerlendiren birçok çalışma yapıldığı görülmektedir (Brentana ve diğerleri, 2017; Price ve diğerleri, 2022). Creaco & Walski (2017), sızıntı ve boru patlamalarının azaltılmasına yönelik basınç kontrol çözümlerinin ekonomik bir analizini sunmuştur. Bu çalışma, herhangi bir kontrolün uygulanmadığı bir senaryoyla karşılaştırıldığında, geleneksel mekanik basınç düşürücü vanaların (PRV'ler) veya uzaktan gerçek zamanlı kontrol (RTC) edilen vanaların kurulumunun maliyet etkin olduğu işletim koşullarını incelemektedir.

Ferrarese & Malavasi (2022), değişken talep koşullarında farklı tipteki basınç düşürücü vanaların (elektrikli aktüatörlü, pilot kumandalı ve doğrudan etkili) basınç kontrol etkinliğini ele almıştır. Vanaların basınç kontrol performansını değerlendirmek amacıyla; kontrol işlemleri sırasında ulaşılan tepe basınç değerini ve hedef basınç düzenleme hassasiyetini dikkate alan yeni parametrelerin kullanımı önerilmiştir. Denardi ve diğerleri (2025), dağıtım sistemlerinde sızıntıların hacmi, sistem içindeki basınçtan ve tespit edilene kadar geçen süreden etkilendiğini ve bu kayıpların etkin bir şekilde azaltılması için; basınç yönetimi, aktif sızıntı tespiti veya bakım gibi uygun stratejilerin uygulanmasını gerektiğini vurgulamıştır (Denardi ve diğerleri, 2025).

Bu çalışmada, içmesuyu dağıtım şebekelerinde sızıntıların ve su kayıplarının sürdürülebilir yönetimi için basınç kontrol yönetimi stratejisinin uygulama esasları, teknik kavramları ve elde edilecek kazanımları değerlendirilmiştir. Bu kapsamda özellikle sahada yaygın bir şekilde uygulanan ve kısa sürede önemli kazanımlar sağlayan basınç kontrol yönetimi (BKY) yöntemi göz önüne alınmıştır. Bunun için saha uygulamaları ile elde edilen gerçek veriler ışığında kazanımlar değerlendirilmiştir.

Basınç Kontrol Yönetimi

İçmesuyu dağıtım şebekelerinde sızıntı hacminin azaltılması ve yönetilmesi amacıyla literatürde, aktif sızıntı kontrolü, basınç kontrol yönetimi, boru malzeme yönetimi ve arıza onarım hızı ve kalitesinin iyileştirilmesi gibi dört temel yaklaşımın önerildiği görülmektedir (Şekil 1) (Pearson, 2019). Bu yöntemlerin uygulama düzeyine bağlı olarak sızıntı hacmi azalmakta veya artmaktadır.



Şekil 1 Sızıntı yönetimi için önerilen ve uygulanan temel yöntemler
Kaynak: Pearson (2019)

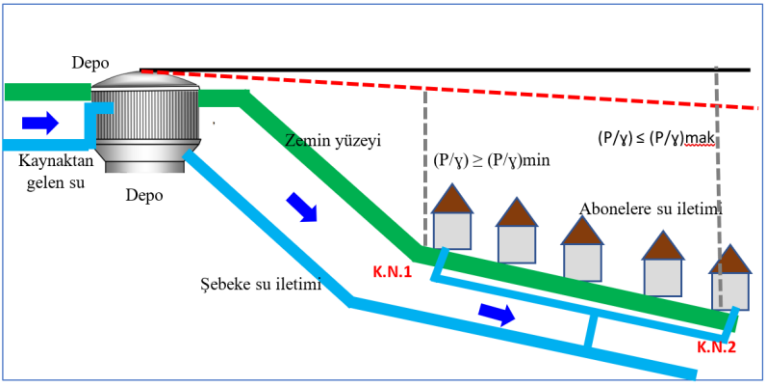
Şekil 1'de görüldüğü üzere, temel yöntemlerin uygulama düzeyi sızıntı hacmi üzerinde etkilidir. Bu çalışmada basınç yönetiminin sızıntıların azaltılması ve sürdürülebilir yönetilmesindeki rolü tartışılmaktadır. İçmesuyu dağıtım sistemlerinin projelendirilmesinde minimum ve maksimum basınç sınırları yönetmeliklerce sırasıyla 25 m ile 60 m şeklinde tanımlanmıştır. Bir dağıtım sisteminde abonelere güvenli ve sürekli hizmet sunulması amacıyla şebekede olması gereken ve

projelendirme ve işletme aşamalarında şebekede minimum basınç gereksinimi göz önüne alınmalıdır (Şekil 2).

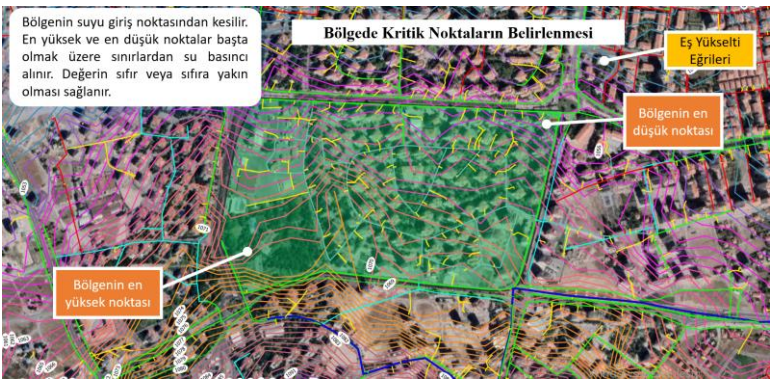
İçmesuyu dağıtım şebekelerinin işletilmesinde basınç yönetimi için öncelikli olarak basınç açısından kritik noktaların belirlenmesi gerekir. Bölgenin ve şebekenin özelliklerine, topoğrafya, abone tüketimleri ve dağılımları esas alınarak şebeke işletmede izlenmesi gereken noktalar (en düşük basıncın ve en yüksek basıncın oluşabileceği noktaları) saha ölçümlerine göre belirlenmelidir (Şekil 2, K.N.1, K.N.2).

Bölgede topoğrafik olarak en yüksek kotlu nokta gündüz saatlerinde güvenli bir şekilde su iletilmesi için kritik nokta iken (Şekil 2, K.N.1), en düşük kotlu nokta ise gece saatlerinde maksimum basınca maruz kalan kritik nokta olarak ifade edilir (Şekil 2, K.N.2). Bir bölgede kritik nokta sayısı ve yeri bölge özelliklerine göre değişmektedir.

Bir dağıtım şebekesinde kritik noktaların tanımlanması ile bu noktalarda oluşacak (verilmesi gereken) veya müsaade edilecek basınçlar tanımlanmaktadır. Dağıtım sisteminde gündüz saatlerinde ve/veya talep debisinin fazla olduğu dönemlerde, şebekede topografik olarak yüksek kotlu kritik noktalara (Şekil 2, K.N.1) su iletilebilmesi için gerekli minimum basınç değeri karşılanmalıdır. Şebekedeki kritik nokta, şehrin su tüketim karakteristiğine ya da sistemin yapısına göre değişiklik gösterebilir. Bu nedenle yerleşim yerinde kritik noktaya verilmesi gereken minimum basınç seviyesi ve zamanı saha incelemeleri sonucunda belirlenmelidir. Yangın debisine ihtiyaç olduğu zamanlarda ya da tüketimin çok yüksek seviyede olduğu saatler göz önüne alınmalıdır.



a)



b)

Şekil 2 a) İçmesuyu şebekelerinde minimum ve maksimum basınç koşulları b) İzole ölçüm bölgesinde kritik noktaların tanımlanması

Kaynak: (KASKİ, 2024)

İçmesuyu dağıtım şebekelerinde boruların dayanabileceği basınç üst sınırı projelendirmelerde dikkate alınması gereken diğer bir parametredir. Dağıtım sisteminde boruların yıpranmaması, hasar görmemesi ve arıza oluşmaması ve normal işletme koşullarının oluşturulması için projelendirme sırasında boru malzeme türü, boru çapı ve et kalınlığı esas alınarak sistemde olması gereken en yüksek basınç değeri yönetmelikte tanımlanan müsaade edilen maksimum basıncı aşmamalıdır (Şekil 2, K.N.2).

Daha önce de bahsedildiği üzere dağıtım sistemlerinde arıza oranının ve su kayıplarının azaltılması amacıyla müsaade edilebilir basınç değeri 60 mss olarak belirlenmiştir. İşletmeye alınan bir izole ölçüm bölgesinde ve/veya dağıtım şebekesinde tanımlanan kritik noktalarda basınç değişimleri düzenli olarak izlenmelidir. Topoğrafik olarak yüksek kotlu noktalara (kritik noktalara) gündüz saatlerinde ve/veya tüketimin fazla olduğu saatlerde güvenli bir şekilde su temininin sağlanması amacıyla bu noktalarda işletme basıncının izlenmesi kritik öneme sahiptir.

Basınç Kontrol Yönetimi: Uygulama Esasları

Basınç yönetimi uygulamalarının planlanmasında öncelikle şebekenin hidrolik ve fiziksel özellikleri değerlendirilmelidir. Bu kapsamda izole ölçüm bölgelerinin sınırlarının doğrulanması, giriş debileri ile basınçların ölçülmesi, kritik noktaların belirlenmesi ve gün içindeki tüketim değişimlerinin analiz edilmesi gerekmektedir. Elde edilen veriler kullanılarak hedef işletme basınçları belirlenmeli ve bölgenin özelliklerine uygun kontrol yöntemi seçilmelidir. Kontrol vanasının devreye alınmasından sonra giriş ve çıkış basınçları, kritik nokta basınçları ve bölge debileri düzenli olarak izlenmelidir. Uygulamanın başarısı yalnızca basınç azalmasıyla değil, yeterli hizmet basıncının korunması ve su kayıplarıyla ilişkili göstergelerde elde edilen değişimler birlikte değerlendirilerek belirlenmelidir.

Basınç sızıntı ilişkisi, dağıtım sistemlerinde basınçtaki değişime göre (basınç artışı veya azalması) mevcut arızalardaki sızıntı seviyesinin değişimini ifade etmektedir. Bu ilişkinin matematiksel olarak tanımlanmasında Sabit ve Değişken Alan Sızıntıları (FAVAD) denklemi kullanılmaktadır. Boru malzeme türü bu ilişki üzerinde oldukça etkilidir. FAVAD denklemi (denklem 1), dağıtım sistemlerinde basınç ile sızıntı arasındaki ilişkinin tanımlanması amacıyla May (1994), tarafından önerilen denklemdir.

Bu denklemde izole bölgede yeni basınç seviyesine göre oluşabilecek yeni sızıntı seviyesi hesaplanmaktadır (tahmin edilmektedir). FAVAD denklemine göre basınçtaki azalma sızıntı seviyesinin azalmasına neden olmaktadır (Lambert & Thornton, 2012).

$$L_1 = L_0 * (\frac{P_0}{P_1})^{N_1} \quad (1)$$

L_0: P_0 basıncında ilk sızıntı debisi, L_1: P_1 düzenlenmiş basınçta sızıntı debisi, P_0: Bölgede ilk ortalama basınç, P_1: Bölgede düzenlenmiş ortalama basınç, N_1: sızıntı katsayısıdır. N_1 katsayısı sabit alan sızıntıları (çelik veya düktil gibi sert boru malzemeleri) için 0.5 ve değişken alan sızıntıları (PE gibi esnek boru malzemeleri) için 1.5 olarak tanımlanmıştır. Boru malzemesinin bilinmediği veya karışık olduğu sistemlerde ise 1 alınmaktadır (Lambert & Thornton, 2012).

Dağıtım sisteminde topoğrafya, depo yerleşim kotu ve işletme koşullarına göre sistemde yüksek basınç gözlenmekte veya basınçta önemli dalgalanmalar ortaya çıkmaktadır. Bu tür sistemlerde basınç kontrolünün, mevcut sızıntılardan kaynaklanan sızıntı oranlarını azaltmada en etkili araçlardan biri olduğu kanıtlanmıştır (May, 1994). Şebekelerde basınçtaki dalgalanmanın en aza indirilmesi ve buna bağlı olarak meydana gelebilecek sızıntıların azaltılması için Basınç Yönetimi stratejisinin belirlenmesi ve uygulanması oldukça önemlidir. Basınç yönetimi, izole ölçüm bölgesinde sistem işletme basıncının son kullanıcılara yeterli miktardaki suyu güvenli ve etkin bir şekilde iletilmesini sağlayacak optimum seviyede tutulması veya ayarlanmasını ifade etmektedir (Yoon ve diğerleri, 2016; Creaco & Walski, 2017). Basınç yönetimi, dağıtım sisteminde mevcut arıza oranlarının ve sızıntı miktarlarının azaltılması, yeni arıza oluşumunun önlenmesi amacıyla, basınç-arıza, basınç-debi ve basınç-sızıntı ilişkilerinin analiz edilmesi ve buna göre basınç yönetimi uygulanması gereken

izole ölçüm bölgelerinin belirlenmesi çalışmalarının planlanması, sahada uygulanması ve izlenmesi faaliyetlerini kapsamaktadır (Özdemir ve diğerleri, 2021; Denardi ve diğerleri, 2025).

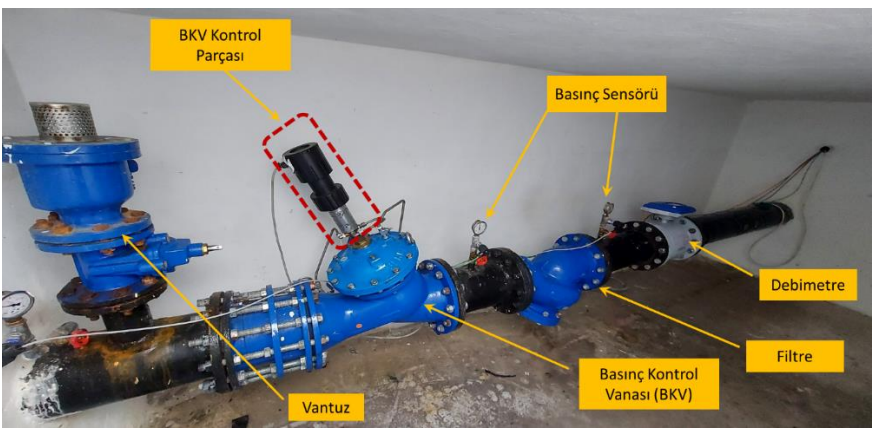
Basınç yönetimi sadece mevcut sisteme değil aynı zamanda yeni planlanan sistemlere de uygulanabilen bir yöntemdir. Basınç yönetimi sadece su kayıplarına sebep olan faktörlerin etkilerini azaltmakta olup su kayıplarının temel sebebi – çözüm seçeneği değildir. Bu nedenle basınç yönetimi, su kayıplarının azaltılması - kontrol altına alınmasında uzun vadeli çözüm ve başarı için uygulanan temel bileşen-araçlardan biri olarak görülebilir. Basınç yönetiminin uygulanması ile arıza oranı, sızıntı miktarı, işletme maliyeti, enerji tüketimi gibi başlıklarda faydalar sağlaması beklenmektedir. Basınç yönetiminin uygulanması ile beklenen faydalar şu şekilde sıralanabilir; şebekedeki mevcut arızalardan kaynaklanan sızıntı hacminin azaltılması, ileride oluşabilecek yeni arıza ve sızıntıların önlenmesi ve azaltılması, şebekedeki arıza sıklığının –işletme maliyetinin azaltılması, boru ekonomik ömrünün uzatılması ve su tasarrufu ve sızıntı hacminin azalmasına bağlı olarak enerji maliyetinin düşürülmesi.

Dağıtım şebekesinde basınç yönetiminin uygulanabilmesi, beklenen faydaların elde edilmesi, mevcut hizmet seviyesinin iyileştirilmesi amacıyla basınç yönetimi uygulanmadan önce aşağıdaki hususların göz önüne alınması gerekir.

- İçme suyu dağıtım sisteminde basınç azaltıldığında, şebekede kritik noktalara su iletilebilmesi için gerekli minimum basınç sağlanmalıdır.
- Şebekedeki kritik nokta, şehrin su tüketim karakteristiğine ya da sistemin yapısına göre değişiklik gösterebilir. Bu nedenle yerleşim yerinde kritik noktaya verilmesi gereken minimum basınç seviyesi ve zamanı saha incelemeleri sonucunda belirlenmelidir.

- Yangın debisine ihtiyaç olduğu zamanlarda ya da tüketimin çok yüksek seviyede olduğu saatler göz önüne alınmalıdır.
- Ölçüm cihazları (debimetre, basınçölçer), kritik nokta basınç izleme ve sınır vanaları, izolasyon için gerekli altyapının sağlanması gerekir.
- Basınç yönetimi daima basit ve kolaylıkla uygulanamaz. Planlanma yapmadan önce detaylı veri analizi yapılmalı-sistemin özel gereksinimleri belirlenmelidir.
- Basınç yönetimi gerekli mi? Uygulanabilir mi? Beklenen faydalar nelerdir? Teknik ve teknolojik alt yapı yeterli mi?

Dağıtım sisteminde ve/veya izole ölçüm bölgelerinde basınç yönetiminde kullanılan, bölge giriş odasında ve/veya kritik noktada yerleştirilen, BKV, pislik tutucu, vantuz, debimetre, basınçölçer (basınç sensörü), veri transfer sistemi gibi ekipmanlar kullanılmaktadır (Şekil 3) (KASKİ, 2024).



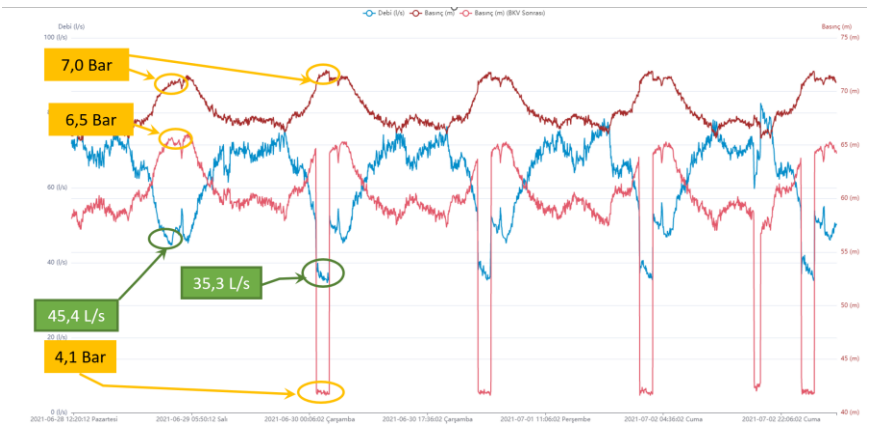
Şekil 3 Basınç kontrol yönetiminde kullanılan ekipmanlar

Kaynak: KASKİ (2024)

Basınç kontrol vanası (BKV), şebekede giriş basıncı ve debi koşullarındaki değişimlere rağmen vana çıkışındaki basıncı

hedeflenen işletme aralığında tutmak amacıyla kullanılan bir kontrol elemanıdır. Çıkış basıncının ayar değerini aşması durumunda vana açıklığı azaltılarak basınç düşürülür. Çıkış basıncının hedef değerin altına düşmesi hâlinde ise vana, mevcut giriş basıncı ve kapasite koşulları izin verdiği ölçüde açıklığını artırır. Kontrol sisteminin özelliklerine bağlı olarak sabit çıkış basıncı, zamana bağlı veya debiye bağlı basınç düzenlemesi uygulanabilir.

Sistem giriş basıncı, izole ölçüm bölgesi girişinde basınç ölçer ile ölçülen basıncı ifade etmektedir (Şekil 4). Bu basınç depo kotuna ve depodan bölgeye kadar olan hatta meydana gelen enerji kayıplarına bağlı olarak değişir. BKV sonrası basınç, basınç yönetimi uygulanan izole ölçüm bölgesinde basınç kontrol vanasından sonra ölçülen basıncı (azaltılan basınç) ifade etmektedir (Şekil 4). Bu basınç değeri, bölgede uygulanan basınç yönetimi tipine (sabit çıkışlı, zaman veya debi ayarlı) göre değişmektedir.



Şekil 4 Basınç yönetiminde BKV öncesi ve sonrası basınçlar

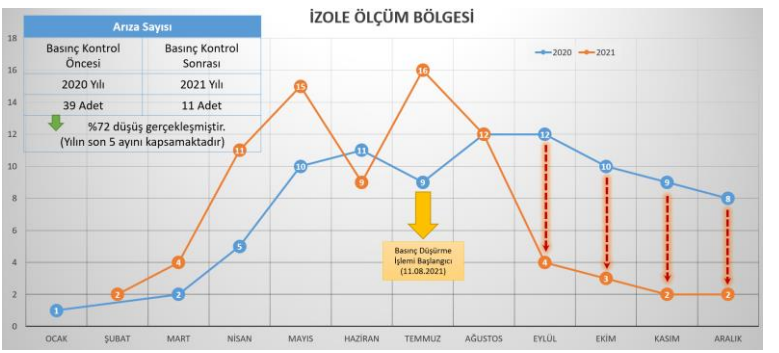
Kaynak: KASKİ (2024)

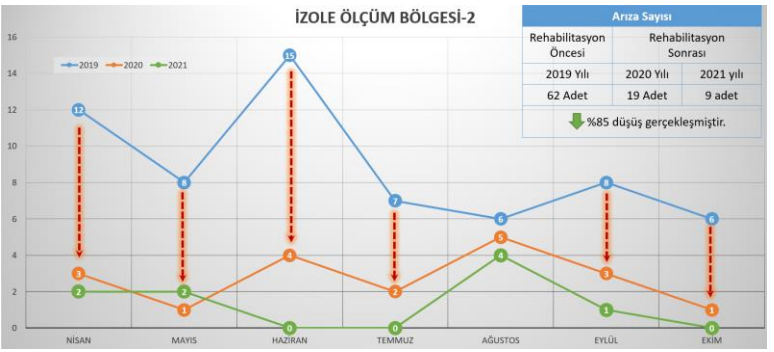
Basınç yönetimi, izole ölçüm bölgesinde ve/veya dağıtım şebekesinde aşırı basıncın azaltılması, basınç dalgalanmalarının en aza indirilerek potansiyel arızaların önlenmesi ve sistemin sürekli yüksek basınca maruz kalmasının engellenmesi gibi faydalar

sağlamaktadır. Şekil 4'te görüldüğü üzere bölgede BKV öncesi 70 m civarında olan işletme basıncı oldukça yüksek seviyededir. BKV devreye alındıktan sonra bölgenin koşulları dikkate alınarak 41 m civarına düşürülmüş ve böylece yaklaşık 30 m'lik aşırı basıncın sistem ve bileşenlerini zorlaması engellenmiştir. Böylece, sistemdeki varlıkların faydalı ömürlerini kısaltacak arıza ve çatlak riski de azaltılmış olmaktadır.

Basınç Kontrol Yönetimi: Kazanımlar

Basınç yönetimi, mevcut arızalarda sızıntı hacminin azaltılması, yeni arıza oluşumunun ve riskinin azaltılması, varlıkların faydalı ömürlerinin uzatılması ve sistem işletme güvenliğinin sağlanması gibi kazanımlar sağlamaktadır. Bu bölümde gerçek şebeke koşullarına ait örnekler ile basınç yönetiminin sağladığı faydalar tartışılmıştır. Özellikle eski ve yaşlanmış şebekelerde arıza oranları artmaktadır. Bu arıza oranlarının azaltılmasında şebeke yenileme gibi maliyetli çözümlerin yanı sıra arızaya sebep olan aşırı basıncın kırılmasını kapsayan yöntemler de uygulanmaktadır. Şekil 5'te gerçek şebeke koşullarına ait iki bölgede basınç yönetiminin arıza oranı üzerindeki etkisine ait örnek verilmiştir.





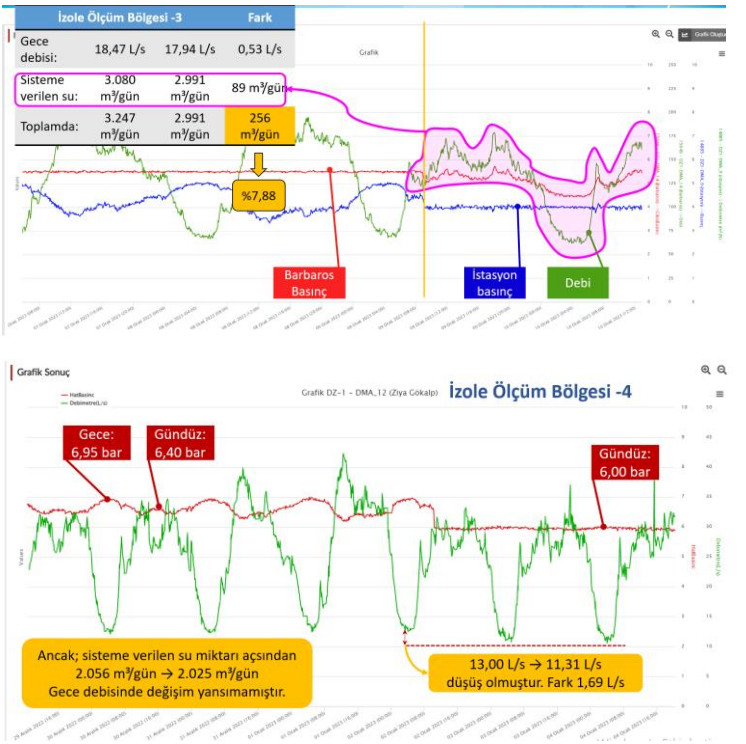
Şekil 5. Basınç yönetiminin arıza oranı üzerindeki etkisi

Kaynak: KASKİ (2024)

Şekil 5 incelendiğinde; izole ölçüm bölgesi-I için BKV öncesi ve sonrası arıza sayılarında yaklaşık %72'lik bir azalma olduğu görülmektedir. Benzer şekilde izole ölçüm bölgesi-II için bu oran yaklaşık %85 seviyesindedir. Görüldüğü gibi basınç yönetiminin uygulanması ile yeni arıza oluşumu ciddi oranda azalmaktadır. Arıza oranın azalmasına bağlı olarak daha az sızıntı meydana gelmekte, daha az su kesintisi uygulanmakta, daha az arıza onarım maliyeti ortaya çıkmakta ve abone memnuniyeti artmaktadır. Ayrıca bu iki sistemde yer alan şebeke hatları ve diğer varlıklar daha az basınca maruza kalmakta, hasar olasılığının azalmasına bağlı olarak faydalı ömür uzamakta ve şebeke yenileme süresi uzamaktadır. Böylece kurum açısından ilk yatırım maliyetinin ilerleyen zamanlara ötelenmesi mümkün olmaktadır.

Eski ve yaşlanmış şebekelerde arıza oranlarının artması şebekedeki sızıntı debisinin ve hacminin artması anlamına gelmektedir. Bu arıza oranlarının azaltılmasında aktif sızıntı kontrolü, basınç yönetimi ve şebeke yenileme gibi yöntemler uygulanmaktadır. Ancak özellikle sızıntı debisinin düşük olduğu çatlaklarda aktif sızıntı kontrolü ile arıza yerinin belirlenmesi güç olmakta ve sızıntı hacmi artmaktadır. Bu tür durumlarda basınç yönetimi mevcut arızalarda sızıntı hacminin azaltılmasına ciddi

katkı sunmaktadır. Şekil 6'da saha koşullarına ait iki bölgede basınç yönetiminin sızıntı oranı üzerindeki etkisine ait örnek verilmiştir.



Şekil 6. Basınç yönetiminin sızıntı oranı üzerindeki etkisi

Kaynak: KASKİ (2024)

Şekil 6 incelendiğinde; izole ölçüm bölgesi-III için BKV öncesi ve sonrası sızıntı hacimlerinde günlük olarak 256 m3 azalma olduğu görülmektedir. Benzer şekilde izole ölçüm bölgesi-IV için basıncın 10 m kırılması ile minimum gece debisinde yaklaşık 1.69 l/s azalma meydana gelmiştir. Diğer bir deyişle, basınç yönetiminin etkisi ile bölgede günlük 140 m3 sızıntı hacmi önlenmiştir. Arıza ve sızıntı yönetimi açısından verilen örneklerden de görüldüğü gibi basınç yönetiminin uygulanması ile yeni arıza oluşumu ve mevcut arızalarda sızıntı hacmi ciddi oranda azalmaktadır. Arıza ve sızıntı oranlarının azalmasına bağlı olarak daha az su kesintisi

uygulanmakta, su kaynağı verimliliği sağlanmakta, enerji verimliliğine katkı sunulmakta, abone memnuniyet seviyesi iyileştirilmekte ve daha az arıza onarım maliyeti ortaya çıkmaktadır.

Sonuçlar

Bu çalışma içmesuyu dağıtım şebekelerinde sürdürülebilir su yönetimi ve su kayıplarının etkin yönetimi için basınç kontrol yönetimi stratejisinin etkisi değerlendirilmiştir. Bu kapsamda basınç kontrol yönetimi ile ilgili temel teknik kavramlar, basınç yönetiminin sağladığı kazanımlar, basınç yönetimi uygulama esasları tartışılmıştır. Gerçek saha koşullarında basınç yönetiminin uygulanmasına bağlı olarak arıza oranlarında ciddi seviyelerde azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde basınç yönetiminin uygulanma düzeyine bağlı olarak mevcut arızalardan kaynaklanan sızıntı hacimlerinde ciddi oranlarda azalmalar görülmüştür. Çalışmada ön plana çıkan en temel sonuçlar; basınç yönetiminin uygulanması ile kısa sürede arıza ve sızıntı yönetiminde kazanımlar sağlandığı, sahada hizmet veren varlıkların hasar olasılığının azalmasına ve boruların faydalı ömürlerinin uzamasına katkı sağladığı ifade edilebilir. Bu çalışmanın özellikle kentsel su yönetiminde çalışan karar verici ve teknik personeller için katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Kaynakça

AL-Washali, T., Sharma, S., Lupoja, R., AL-Nozaily, F., Haidera, M., & Kennedy, M. (2020). Assessment of water losses in distribution networks: Methods, applications, uncertainties, and implications in intermittent supply. *Resources, Conservation and Recycling, 152*, 104515. https://doi.org/j.resconrec.2019.104515

Bozkurt, C., Firat, M., & Ateş, A. (2022). evelopment of a new comprehensive framework for the evaluation of leak management components and practices. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 71*(5), 642–663. https://doi.org/10.2166/aqua.2022.031

Brentana, B. M., Jr., E. L., Montalvob, I., Izquierdoc, J., & Pérez-Garcíac, R. (2017). Near real time pump optimization and pressure management. *Procedia Engineering, 186*, 666 – 675 . https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.248

Creaco, E., & Walski, T. (2017). Economic Analysis of Pressure Control for Leakage and Pipe Burst Reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management, 143*(12), 04017074. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000846

Denardi, M., Bianchotti, J. D., Castro-Gama, M., & Gabriel D. Puccini. (2025). Managing Nighttime Pressure for Background Leakage Control in Water Distribution Networks Using Simulated Annealing. *Journal of Water Resources Planning and Management, 151*(1), 04024062. https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-6454

Ferrarese, G., & Malavasi, S. (2022). Performances of Pressure Reducing Valves in Variable Demand Conditions: Experimental Analysis and New Performance Parameters.

Water Resour. Manage., 36, 2639–2652. https://doi.org/10.1007/s11269-022-03166-5

KASKİ. (2024). *Su Yönetimi Faaliyetleri.* Kayseri Su ve Kanalizasyon İdaresi İçmesuyu Dairesi Başkanlığı.

Lambert, A. O., Brown, T. G., Takizawa, M., & Weimer, D. (1999). A review of performance indicators for real losses from water supply systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 48*(6), 227–237. https://doi.org/10.2166/aqua.1999.0025

Lambert, A., & Thornton, J. (2012). Pressure: bursts relationships: influence of pipe materials, validation of scheme results, and implications of extended asset life. *Water Loss, 2*(11).

May, J. (1994). *Pressure dependent leakage.* World Water and Environmental Engineering.

Moslehi, I., & Jalili Ghazizadeh, M. (2020). Pressure-Pipe Breaks Relationship in Water Distribution Networks: A Statistical Analysis. *Water Resour. Manage., 34*, 2851–2868. https://doi.org/10.1007/s11269-020-02587-4

Özdemir, Ö., Fırat, M., Yılmaz, S., & Usluer, M. (2021). Analysis of the effect of pressure control on leakages in distribution systems by FAVAD equation and field applications. *Water Practice and Technology, 16*(2), 320–332. https://doi.org/10.2166/wpt.2021.024

Pearson, D. (2019). *Standard Definitions for Water Losses.* IWA Publishing. https://doi.org/10.2166/9781789060881

Pons-Ausina, J. F., Hosseini, S. N., Alves, R. L., Olivares, J. S., & March, R. d. (2025). Pressure-dependent leakage modeling and AI-assisted control in a rural water supply network: Varzea da Cobra (Ceará, Brazil) case study. *AQUA - Water*

Infrastructure, Ecosystems and Society, 74(12), 814–827. https://doi.org/10.2166/aqua.2025.033

Price, E., Abhijith, G. R., & Ostfeld, A. (2022). Pressure management in water distribution systems through PRVs optimal placement and settings. *Water Research, 226*, 119236. https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119236

Rjaibi, A., & Duchesne, S. (2024). Impact of Pressure on the Deterioration of Drinking Water Distribution Networks. *Water Resour. Manage., 38*, 4867–4882. https://doi.org/10.1007/s11269-024-03892-y

Yoon, S., Park, N.-S., Lee, Y. J., & Choi, D. Y. (2016). Performance evaluation of pressure reducing valves using statistical approach in water distribution system. *Desalination and Water Treatment, 57*(60), 29104-29112. https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1167129

BÖLÜM 7

BETONARME YAPILARDA DOLGU DUVARLARIN ANALİZ YÖNTEMLERİ

Ertuğrul ÇAMBAY[1]

Giriş

Betonarme çerçeve sistemler, dünyada ve Türkiye'de konut ve ticari yapı stokunun en yaygın taşıyıcı sistem türüdür. Bu yapılarda çerçeve gözleri, bölme ve dış cephe işlevi gören tuğla, briket, gazbeton veya bims blok gibi yığma birimlerle doldurulur. Uygulamada dolgu duvarlar genellikle çerçeve inşa edildikten sonra örülür ve tasarımda yalnızca düşey yük (kütle) olarak dikkate alınır; rijitlik ve dayanım katkıları ise "taşıyıcı olmayan eleman" kabulüyle ihmal edilir. Oysa yanal yükler altında çerçeve ve dolgu birlikte şekil değiştirmeye zorlandığında aralarında karmaşık bir etkileşim oluşur ve dolgu duvar, kendisi için öngörülmemiş bir taşıyıcı işlev üstlenir (Bertero ve Brokken, 1983; Paulay ve Priestley, 1992).

Deprem sonrası saha gözlemleri bu etkileşimin her iki yönünü de açıkça ortaya koymuştur. Düzenli dağılmış dolgu duvarların çıplak çerçeve tasarımına göre yetersiz kalan bazı binaların göçmesini önlediği bildirilirken, zemin katta dolgunun

[1] Dr. Öğretim Üyesi, Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-6173-7426

bulunmadığı ya da düzensiz yerleştirildiği binalarda yumuşak kat oluşumu, kısa kolon kesme kırılmaları ve burulma kaynaklı hasarlar yaygın biçimde gözlenmiştir (Sezen vd., 2003). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinden sonra yapılan saha incelemeleri betonarme binalardaki yaygın yapısal hasarı yeniden belgelemiştir (Ivanov ve Chow, 2023). Aynı depremlerde dolgu duvarları lifli polimer (FRP) ile güçlendirilmiş bir binanın hasarsız kalması ise dolgunun bilinçli olarak tasarlandığında olumlu katkı sağlayabileceğini göstermiştir (Tan vd., 2025).

Dolgu duvarın yapı davranışına etkisini nicel olarak öngörebilmek, hem mevcut binaların deprem performansının değerlendirilmesi hem de yeni binaların güvenli tasarımı açısından gereklidir. Bu amaçla yaklaşık yetmiş yıldır çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma yapılmış; basit eşdeğer çubuk modellerinden ayrıntılı sonlu eleman modellerine uzanan geniş bir yöntem yelpazesi geliştirilmiştir (Asteris vd., 2011, 2013). Bu bölümün amacı, söz konusu yöntemleri ortak bir kavramsal çerçevede sınıflandırmak, varsayımlarını ve sınırlarını karşılaştırmak ve uygulayıcıya analiz amacına uygun yöntemi seçmede yol gösterecek bir çerçeve sunmaktır.

Kapsam ve sınırlar. Bölüm, betonarme çerçeveler içindeki donatısız yığma dolgu duvarlarla sınırlıdır; donatılı veya kuşatılmış (confined) yığma, çelik çerçeveler ve güçlendirme yöntemlerinin tasarımı kapsam dışındadır. Çelik çerçeveler için geliştirilen bazı modeller, betonarme çerçevelerde de yaygın kullanıldıkları için ele alınmış ve bu durum metinde belirtilmiştir. Bölüm sistematik bir literatür taraması değildir: Kaynaklar, alandaki temel çalışmalar, kapsamlı derleme makaleleri (Asteris vd., 2011, 2013) ve yönetmeliklerin dayandığı çalışmalardan seçilmiş; tüm künyeler Crossref veritabanı üzerinden doğrulanmıştır. Bölümde kullanılan simgeler Tablo 1'de topluca verilmiştir.

Tablo 1. Bölümde kullanılan başlıca simgeler

Simge	Tanım
a ($\equiv w$)	Eşdeğer basınç çubuğunun genişliği (ASCE/SEI 41-17 gösteriminde a)
r_{inf} ($\equiv d$)	Dolgu panelin diyagonal uzunluğu
h_{col}, h_{inf}	Kolon (kat) yüksekliği ve dolgu panel yüksekliği
L_{inf}, t_{inf}	Dolgu panel uzunluğu ve kalınlığı
θ	Panel diyagonalinin yatayla yaptığı açı, $\tan\theta = h_{inf}/L_{inf}$
E_{me}, E_{fe}	Dolgu ve çerçeve malzemesinin elastisite modülü
I_{col}	Kolon kesitinin atalet momenti
λ_1, λh	Göreli rijitlik parametresi; bu bölümde $\lambda h \equiv \lambda_1 h_{col}$
K_{inf}, K_{el}	Eşdeğer çubuğun yatay rijitliği; çatlamamış panelin kayma rijitliği
F_y, F_{max}	Dolgunun ilk çatlama ve en büyük yatay dayanımı
f'_m, τ_{cr}, τ_0, μ	Dolgunun basınç dayanımı, çatlama kayma gerilmesi, derz kohezyonu, sürtünme katsayısı

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

Bölümde sırasıyla dolgulu çerçevelerin düzlem içi davranışı ve göçme modları, modelleme yaklaşımlarının sınıflandırılması, makro ve mikro modeller, düzlem dışı davranış ve etkileşim, yönetmelik yaklaşımları ve sayısal bir uygulama ele alınmakta; bölüm, yöntem seçimine ilişkin öneriler ve sonuçlarla tamamlanmaktadır.

Dolgulu Betonarme Çerçevelerin Düzlem İçi Davranışı

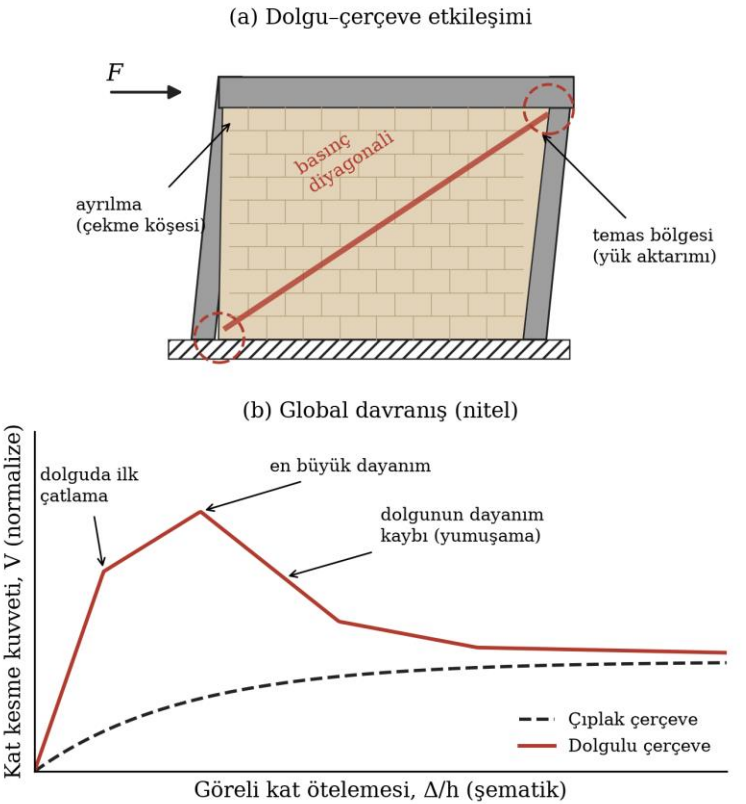
Dolgu–çerçeve etkileşimi

Yatay yük etkisindeki dolgulu bir çerçevede, çok küçük yerdeğiştirmelerde dolgu ve çerçeve monolitik bir kompozit eleman gibi davranır. Yük arttıkça çerçeve eğilme ağırlıklı, dolgu ise kayma ağırlıklı şekil değiştirmeye yöneldiğinden iki eleman, çekme diyagonalinin uçlarındaki köşelerde birbirinden ayrılır; temas yalnızca basınç diyagonalinin uçlarındaki sınırlı bölgelerde sürer (Şekil 1a). Bu durumda yatay kuvvetin önemli bir bölümü dolgu içinde basınç diyagonali boyunca oluşan bir basınç bandı ile aktarılır. Polyakov (1956/1963) tarafından deneysel gözlemlere dayanarak

ortaya konan bu davranış, sonraki tüm makro modellerin temelini oluşturan *eşdeğer diyagonal basınç çubuğu* kavramının çıkış noktasıdır (Holmes, 1961; Stafford Smith, 1962).

Temas uzunluğu ve dolayısıyla basınç bandının genişliği, dolgu ile çerçevenin göreli rijitliğine bağlıdır: Esnek kolonlu çerçevelerde temas kısa, basınç bandı dar ve köşe gerilmeleri yüksektir; rijit çerçevelerde ise temas uzunluğu ve etkin dolgu genişliği artar (Stafford Smith ve Carter, 1969). Global ölçekte etkileşimin sonucu, çıplak çerçeveye göre birkaç kat daha rijit ve dayanımlı, ancak dolgunun çatlaması ve ezilmesiyle birlikte ani dayanım kaybı gösteren bir kuvvet–ötelenme ilişkisidir (Şekil 1b; Mehrabi vd., 1996). Deneysel çalışmalarda bu artışın büyüklüğünün dolgu malzemesi, çerçeve detayı ve boşluk durumuna göre geniş bir aralıkta değiştiği görülmüştür (Kakaletsis ve Karayannis, 2008).

Şekil 1. (a) Yatay yük altında dolgu–çerçeve etkileşimi: çekme köşelerinde ayrılma, basınç diyagonali boyunca temas ve yük aktarımı; (b) çıplak ve dolgulu çerçevenin nitel kuvvet–ötelenme ilişkisi.



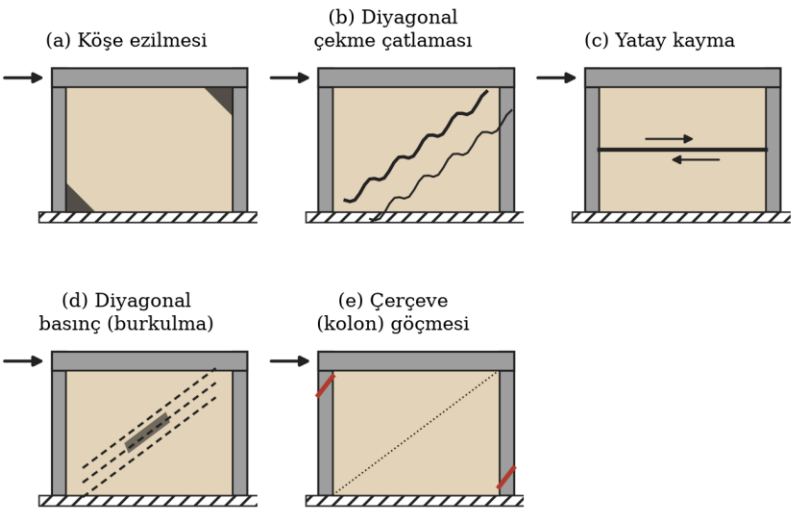
Kaynak: Yazar tarafından Polyakov (1956/1963), Stafford Smith ve Carter (1969) ve Mehrabi vd. (1996) esas alınarak çizilmiştir.

Hasar ve göçme modları

Dolgulu çerçevelerde gözlenen göçme modları, dolgu ile çerçevenin göreli dayanım ve rijitliğine göre farklılaşır ve literatürde genellikle beş ana başlık altında toplanır (Şekil 2; El-Dakhakhni vd., 2003; Asteris vd., 2011): (i) *köşe ezilmesi*: basınç diyagonalinin uçlarında, temas bölgesindeki yüksek basınç gerilmeleri nedeniyle

dolgunun ezilmesi; zayıf dolgu–güçlü çerçeve kombinasyonlarında tipiktir. (ii) *diyagonal çekme çatlaması*: basınç diyagonaline dik asal çekme gerilmeleri nedeniyle oluşan diyagonal çatlaklar; genellikle göçme modu değil, ilk ciddi hasar durumudur. (iii) *yatay kayma*: harç derzleri boyunca, özellikle zayıf harç ve düşük düşey gerilme durumunda oluşan kayma; kolonlarda kısa kolon benzeri etkiler doğurabilir. (iv) *diyagonal basınç (burkulma) göçmesi*: narin dolgularda basınç bandının düzlem dışı stabilite kaybı veya ezilmesi. (v) *çerçeve göçmesi*: kolon uçlarında eğilme mafsalları veya dolgunun kolona aktardığı yerel kesme kuvveti nedeniyle kolon kesme kırılması; özellikle güçlü dolgu–zayıf çerçeve kombinasyonlarında ve yetersiz enine donatılı kolonlarda belirleyicidir (Mehrabi vd., 1996; Stavridis ve Shing, 2010).

Şekil 2. Dolgulu çerçevelerde tipik hasar ve göçme modları.



Kaynak: Yazar tarafından El-Dakhakhni vd. (2003) ve Asteris vd. (2011) sınıflandırması esas alınarak çizilmiştir.

Göçme modunun doğru öngörülmesi, analiz yönteminin seçimi açısından belirleyicidir. Tek bir diyagonal çubukla temsil edilen bir modelin, kolon boyunca dağılan temas kuvvetlerini ve bunların yol açtığı kolon kesme kuvvetini yakalayamayacağı açıktır; bu nedenle kolon kesme göçmesinin olası olduğu durumlarda çoklu çubuk veya mikro modeller tercih edilmelidir (Crisafulli, 1997).

Davranışı etkileyen parametreler

Literatürde dolgulu çerçeve davranışını etkileyen başlıca parametreler şunlardır: (a) dolgu malzemesinin basınç, çekme ve kayma dayanımı ile elastisite modülü; (b) harç kalitesi ve derz kayma parametreleri (kohezyon, sürtünme katsayısı); (c) panelin en-boy oranı (L_{inf}/h_{inf}) ve narinliği (h_{inf}/t_{inf}); (d) çerçevenin rijitliği ve dayanımı, kolon enine donatısı; (e) dolgu–çerçeve arayüz koşulları (boşluk, kama, bağlantı elemanı varlığı); (f) pencere ve kapı boşluklarının boyutu ve konumu; (g) düşey yük düzeyi ve (h) önceki hasar ile düzlem dışı etkiler (Mehrabi vd., 1996; Asteris, 2003; Kakaletsis ve Karayannis, 2008; Kadysiewski ve Mosalam, 2009). Bu parametrelerin pek çoğunun saha uygulamasında yüksek belirsizlik içermesi, hangi analiz yöntemi seçilirse seçilsin sonuçların duyarlılık analizleriyle desteklenmesini gerekli kılar.

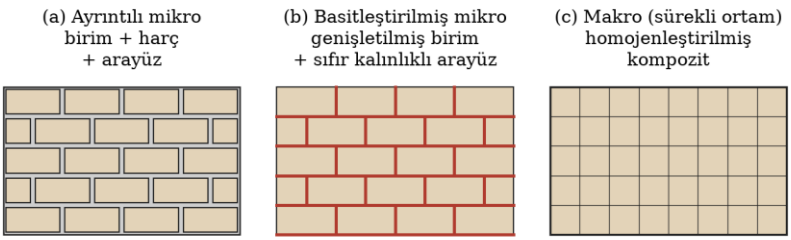
Modelleme Yaklaşımlarının Sınıflandırılması

Dolgulu çerçevelerin analizinde kullanılan modeller, temsil ettikleri ölçek ve ayrıntı düzeyine göre iki ana gruba ayrılır (Asteris vd., 2011, 2013): (i) *makro modeller* (basitleştirilmiş modeller), dolgu panelin global etkisini az sayıda eleman—çoğunlukla eksenel yük taşıyan eşdeğer çubuklar—ile temsil eder; (ii) *mikro modeller* ise paneli sonlu elemanlara ayırarak yerel gerilme dağılımını, çatlak oluşumunu ve dolgu–çerçeve arayüzünü ayrıntılı olarak modeller.

Yığma yapıların sonlu elemanlarla modellenmesinde Lourenço (1996) tarafından önerilen üç düzeyli sınıflandırma yaygın biçimde kabul görmektedir (Şekil 3): *Ayrıntılı mikro modelde* birim

ve harç ayrı sürekli ortam elemanlarıyla, birim–harç arayüzü ise süreksizlik (arayüz) elemanlarıyla temsil edilir. *Basitleştirilmiş mikro modelde* harç kalınlığı birimlere dağıtılarak "genişletilmiş birimler" oluşturulur ve harç ile iki arayüzün davranışı sıfır kalınlıklı tek bir arayüz elemanında toplanır. *Makro (sürekli ortam) modelde* ise birim, harç ve arayüz homojenleştirilmiş, genellikle anizotrop bir kompozit malzeme olarak ele alınır. Bu kesimdeki "makro sürekli ortam modeli", eşdeğer çubuk anlamındaki makro modelden farklıdır; ikincisi yapı ölçeğinde bir idealizasyondur.

Şekil 3. Yığma dolgunun sonlu elemanlarla modellenmesinde ayrıntı düzeyleri.



Kaynak: Yazar tarafından Lourenço (1996) sınıflandırması esas alınarak çizilmiştir.

Tablo 2, iki ana grubun özelliklerini karşılaştırmalı olarak özetlemektedir. Genel bir ilke olarak makro modeller çok katlı binaların doğrusal olmayan statik ve dinamik analizleri için hesap verimliliği sağlarken, mikro modeller yerel mekanizmaların anlaşılması, deney sonuçlarının yorumlanması ve makro model parametrelerinin kalibrasyonu için uygundur.

Tablo 2. Dolgu duvar modelleme yaklaşımlarının karşılaştırılması

Özellik	**Makro model (eşdeğer çubuk)**	**Mikro model (sonlu elemanlar)**
Temsil ölçeği	Panel / bina	Birim–harç / panel
Hesap maliyeti	Düşük; çok katlı binada zaman tanım alanında uygulanabilir	Yüksek; genellikle tek panel veya alt sistem
Yakalanan mekanizmalar	Global rijitlik, dayanım, enerji tüketimi; çoklu çubukla kolon kesmesi kısmen	Çatlak oluşumu ve ilerlemesi, kayma, ayrılma, kolon kesme kırılması
Girdi parametreleri	Az sayıda (çubuk genişliği, zarf eğrisi, histeretik kurallar)	Çok sayıda (kırılma enerjileri, arayüz parametreleri, çatlak modeli)
Başlıca sınırlama	Yerel etkileri basitleştirir; ampirik bağıntılara duyarlı	Kalibrasyon ve yakınsama güçlüğü; parametre belirsizliği
Örnek çalışmalar	Mainstone (1971); Crisafulli ve Carr (2007)	Mehrabi ve Shing (1997); Stavridis ve Shing (2010)

Kaynak: Asteris vd. (2011, 2013) ve bölümde anılan çalışmalardan yazar tarafından derlenmiştir.

Makro Modeller: Eşdeğer Basınç Çubuğu Yaklaşımı

Tarihsel gelişim ve temel kavram

Eşdeğer çubuk yaklaşımında dolgu panel, basınç diyagonali boyunca yerleştirilen, yalnızca basınç kuvveti taşıyan ve uçları çerçeve düğüm noktalarına mafsallı olarak bağlanan bir çubukla temsil edilir (Şekil 4). Çevrimsel yüklemede her iki yön için birer çubuk tanımlanır ve yükün yönüne göre bunlardan yalnızca biri etkin olur. Çubuğun kalınlığı dolgu kalınlığına (t_{inf}), elastisite modülü dolgunun elastisite modülüne (E_{me}) eşit alınır; modelin temel bilinmeyeni çubuğun *eşdeğer genişliği* (*a* veya *w*) ile doğrusal olmayan davranışı tanımlayan kuvvet–deformasyon ilişkisidir.

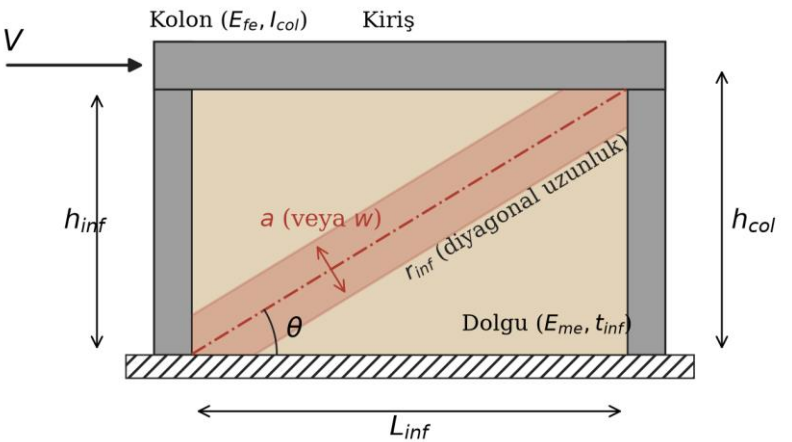
Holmes (1961), çubuk genişliğinin panel diyagonal uzunluğunun üçte biri alınabileceğini önermiştir. Stafford Smith (1962, 1966) ve Stafford Smith ve Carter (1969), elastik zemine

oturan kiriş benzetmesinden yararlanarak temas uzunluğunun dolgu ile kolonun göreli rijitliğine bağlı olduğunu göstermiş ve bu göreli rijitliği boyutsuz λh parametresi ile ifade etmiştir:

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_{\text{me}} t_{\text{inf}} \sin 2\theta}{4 E_{\text{fe}} I_{\text{col}} h_{\text{inf}}}\right]^{1/4} \quad (1)$$

Burada E_{me} dolgu elastisite modülü, t_{inf} dolgu kalınlığı, θ çubuğun yatayla yaptığı açı, E_{fe} çerçeve malzemesinin elastisite modülü, I_{col} kolon atalet momenti ve h_{inf} dolgu yüksekliğidir. $\lambda_1 h_{\text{col}}$ çarpımı büyüdükçe dolgu çerçeveye göre daha rijittir; temas uzunluğu ve buna bağlı olarak eşdeğer genişlik azalır.

Şekil 4. Eşdeğer diyagonal basınç çubuğunun geometrisi ve ASCE/SEI 41-17 gösteriminde kullanılan semboller.



Kaynak: Yazar tarafından çizilmiştir.

Eşdeğer çubuk genişliği bağıntıları

Eşdeğer genişlik için önerilen bağıntılar sabit oranlı ve λh'ye bağlı bağıntılar olarak iki grupta toplanabilir (Tablo 3). Mainstone (1971) tarafından deneysel sonuçlara dayanarak geliştirilen ve

FEMA 356 ile ASCE/SEI 41-17 tarafından benimsenen ifade uygulamada en yaygın kullanılandır:

$$a = 0{,}175(\lambda_1 h_{\mathrm{col}})^{-0{,}4} r_{\mathrm{inf}} \tag{2}$$

Liauw ve Kwan (1984), plastik analiz esaslı çalışmalarında

$$w = \frac{0{,}95 h_{\mathrm{inf}} \cos\theta}{\sqrt{\lambda h}} \tag{3}$$

ifadesini önermiştir (Denklem 3). Decanini ve Fantin (1986) ise çatlamamış ve çatlamış dolgu için ayrı bağıntılar vermiştir. Paulay ve Priestley (1992) pratik tasarım amacıyla $w = 0{,}25d$ değerini önermiş; ancak bu değerin büyük yerdeğiştirmelerde rijitliği abartabileceğini belirtmişlerdir. Bu bağıntılar özgün kaynaklarda farklı simgelerle ve λh çarpımındaki yükseklik için farklı tanımlarla (kolon veya panel yüksekliği) verilmiştir; karşılaştırma tutarlılığı için bu bölümde $w \equiv a$, $d \equiv r_{\mathrm{inf}}$ ve $\lambda h \equiv \lambda_1 h_{\mathrm{col}}$ alınmıştır (Tablo 1).

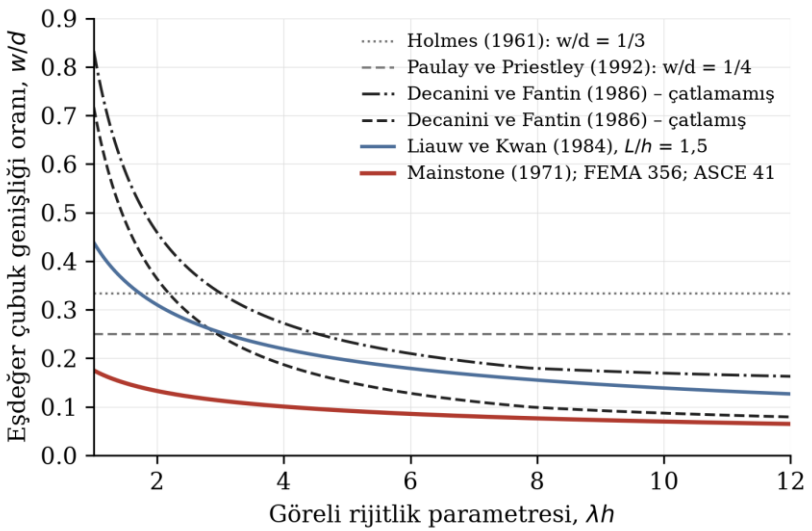
Tablo 3. Eşdeğer çubuk genişliği için seçilmiş bağıntılar ($d = r_{inf}$: panel diyagonal uzunluğu)

Kaynak	**Bağıntı**	**Not**
Holmes (1961)	$w = d/3$	Sabit oran; çerçeve rijitliğinden bağımsız
Mainstone (1971); FEMA 356 (2000); ASCE/SEI 41-17	$w = 0{,}175\,(\lambda h)^{-0{,}4}\, d$	En yaygın; genellikle alt sınır rijitlik verir
Liauw ve Kwan (1984)	$w = 0{,}95\, h \cos\theta \,/\, \sqrt{(\lambda h)}$	$25° \le \theta \le 50°$ için önerilmiştir
Decanini ve Fantin (1986)	$\lambda h \le 7{,}85$: $w/d = 0{,}748/\lambda h + 0{,}085$ (çatlamamış); $0{,}707/\lambda h + 0{,}010$ (çatlamış) $\lambda h > 7{,}85$: $w/d = 0{,}393/\lambda h + 0{,}130$ (çatlamamış); $0{,}470/\lambda h + 0{,}040$ (çatlamış)	Çatlama durumunu ayrıca dikkate alır
Paulay ve Priestley (1992)	$w = 0{,}25\, d$	Tasarım amaçlı üst değer

Kaynak: Asteris vd. (2011) derlemesi ve özgün kaynaklardan yazar tarafından hazırlanmıştır.

Şekil 5, söz konusu bağıntıların λh ile değişimini karşılaştırmaktadır. Bağıntılar arasındaki fark özellikle küçük λh (görece rijit çerçeve) bölgesinde iki ila beş katına ulaşmaktadır. Bu durum, eşdeğer çubuk modellerinde sonuçların seçilen bağıntıya yüksek duyarlılık gösterdiğini ve tek bir bağıntının "doğru" kabul edilmesinin yanıltıcı olabileceğini göstermektedir. Mainstone bağıntısının diğerlerine göre daha küçük genişlik vermesi, başlangıçta tam temasın bulunmadığı, ilk çatlamaya yakın rijitliği temsil etmeye yönelik olmasıyla açıklanmaktadır (Asteris vd., 2011). Liberatore vd. (2018), geniş bir deney veritabanı üzerinden hem deterministik hem olasılıksal analizlerde kullanılabilecek bir çubuk modeli önererek bu belirsizliği nicel olarak ele almıştır.

Şekil 5. Farklı bağıntılara göre eşdeğer çubuk genişliği oranının (w/d) göreli rijitlik parametresi λh ile değişimi. Liauw ve Kwan (1984) eğrisi L/h = 1,5 için hesaplanmıştır.



Kaynak: Yazar tarafından Tablo 3'teki bağıntılarla hesaplanarak çizilmiştir.

Eşdeğer çubuğun yatay doğrultudaki elastik rijitliği, eksenel rijitliğin yatay bileşeni olarak hesaplanır:

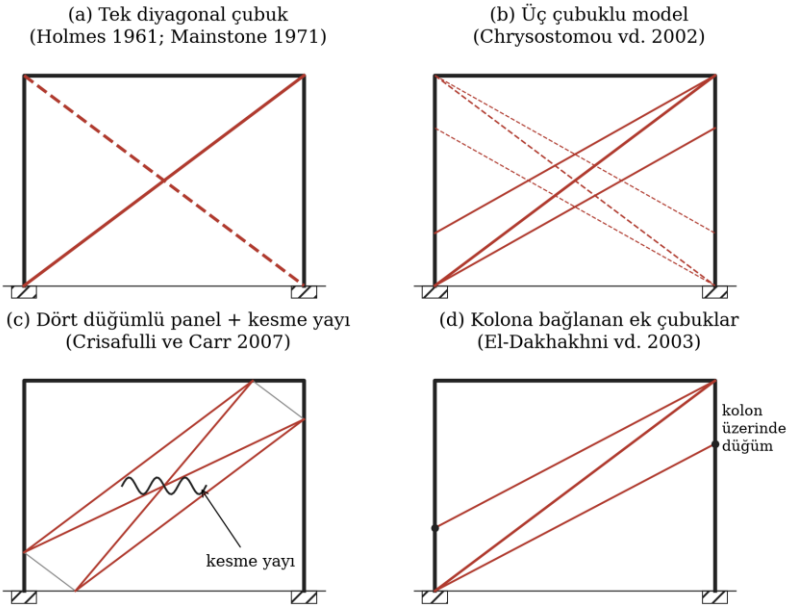
$$K_{\text{inf}} = \frac{E_{\text{me}} a t_{\text{inf}}}{r_{\text{inf}}} \cos^2\theta \qquad (4)$$

Çoklu çubuk modelleri

Tek çubuklu model, global rijitlik ve dayanımı makul doğrulukla temsil edebilse de dolgu ile kolon arasındaki temas kuvvetlerinin kolon boyunca dağılımını ve bunun sonucu olan kolon eğilme momenti ile kesme kuvvetlerini temsil edemez. Kuvvetin doğrudan düğüm noktasına aktarılması, kolon kesme kuvvetlerinin olduğundan küçük hesaplanmasına yol açar (Crisafulli, 1997). Bu eksikliği gidermek için çeşitli çoklu çubuk modelleri önerilmiştir (Şekil 6).

Crisafulli (1997), tek, iki ve üç çubuklu modelleri sistematik olarak karşılaştırmış; çift çubuklu modelin çerçeve iç kuvvetlerini daha iyi temsil ettiğini, üç çubuklu modelin ise en gerçekçi sonucu verdiğini ancak hesap maliyetini artırdığını göstermiştir. Crisafulli ve Carr (2007), bu bulgular üzerine her yön için iki paralel basınç çubuğu ile derz kaymasını temsil eden bir kesme yayından oluşan dört düğümlü bir panel elemanı geliştirmiştir. Bu eleman SeismoStruct programına uygulanmış ve dinamik deney sonuçlarıyla doğrulanmıştır (Smyrou vd., 2011). Chrysostomou vd. (2002) her yön için üç paralel çubuktan oluşan altı çubuklu bir model önermiş; El-Dakhakhni vd. (2003) ise biri köşegen, ikisi kolon üzerindeki ara düğümlere bağlanan üç çubuklu bir model geliştirmiştir. Son iki modelin çelik çerçeveler için geliştirildiği ve betonarme çerçevelerde kullanımında kalibrasyon gerektiği unutulmamalıdır.

Şekil 6. Tek ve çoklu eşdeğer çubuk modelleri (kesikli çizgiler ters yöndeki yükleme için etkin olan çubukları göstermektedir).



Kaynak: Yazar tarafından ilgili kaynaklar esas alınarak şematik olarak çizilmiştir.

Doğrusal olmayan zarf eğrileri ve histeretik kurallar

Doğrusal olmayan analizlerde eşdeğer çubuğun eksenel kuvvet–deformasyon ilişkisi bir *zarf eğrisi* ve çevrimsel yüklemede izlenecek yolu tanımlayan *histeretik kurallar* ile tanımlanır. Klingner ve Bertero (1978), çevrimsel yükler altında dayanım ve rijitlik azalması gösteren bir çubuk modelini ilk kullananlar arasındadır. Panagiotakos ve Fardis (1996), yaygın biçimde kullanılan dört doğrulu bir zarf eğrisi önermiştir (Şekil 7a). Bu modelde ilk doğru parçası çatlamamış panelin kayma rijitliğini temsil eder:

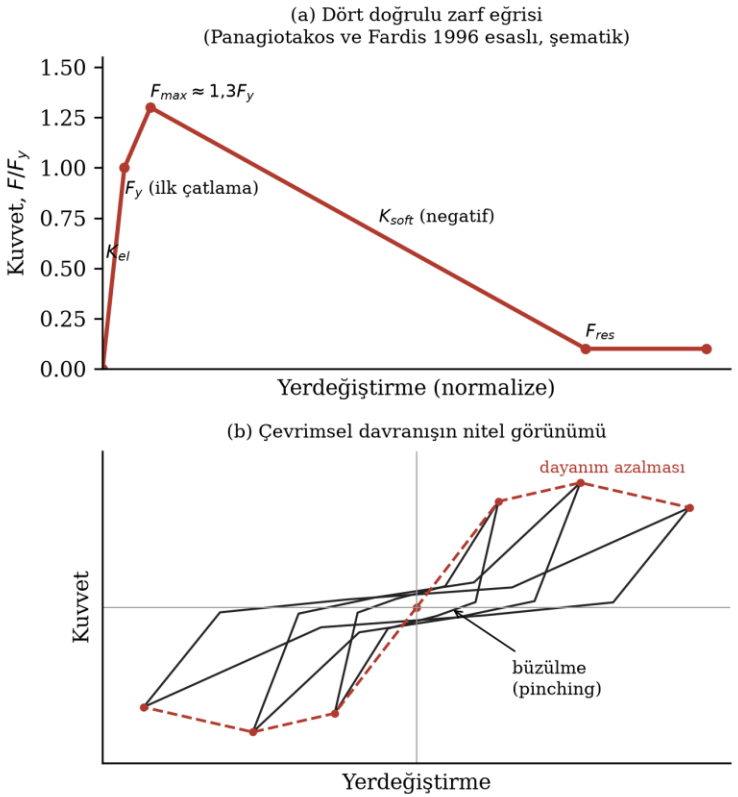
$$K_{\mathrm{el}} = \frac{G_w A_w}{h_w}, \quad F_y = \tau_{\mathrm{cr}} A_w \tag{5}$$

Burada G_w dolgunun kayma modülü, A_w panelin yatay en kesit alanı, h_w panel yüksekliği ve τ_{cr} çatlama kayma gerilmesidir. İkinci doğru parçası en büyük dayanıma ($F_{max} \approx 1{,}3F_y$) kadar uzanır ve rijitliği eşdeğer çubuk rijitliğine (Denklem 4) göre belirlenir; üçüncü parça negatif rijitlikli yumuşama bölgesini, son parça ise artık dayanımı temsil eder. Fardis ve Panagiotakos (1997), bu modeli dolgulu betonarme binaların deprem davranışının parametrik incelenmesinde kullanmıştır; benzer modeller itme ve artımsal dinamik analizlerde yaygın biçimde uygulanmaktadır (Dolšek ve Fajfar, 2008).

Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta, K_{el} ile eşdeğer çubuk rijitliği K_{inf} arasındaki büyük farktır. K_{el}, dolgu ile çerçevenin henüz ayrılmadığı ve panelin bütünüyle kayma etkisinde çalıştığı çok küçük ötelenmelerdeki rijitliği temsil eder; K_{inf} ise ayrılma sonrası, yükün diyagonal basınç bandıyla aktarıldığı durumdaki sekant rijitliğe karşılık gelir. Bu nedenle K_{el} genellikle K_{inf}'nin birkaç katıdır (bkz. Sayısal Uygulama). Doğrusal elastik analizlerde hangi rijitliğin kullanılacağı analizin amacına bağlıdır: Periyot ve kat ötelemesi tahmininde ayrılma sonrası rijitlik (K_{inf}) daha gerçekçi kabul edilir (Asteris vd., 2011).

Histeretik kurallar, dolgu duvarın çevrimsel davranışının üç temel özelliğini temsil etmelidir: (i) çatlak kapanmasına bağlı *büzülme (pinching)*, (ii) tekrarlı çevrimlerle *rijitlik azalması* ve (iii) *dayanım azalması* (Şekil 7b). Crisafulli (1997) tarafından önerilen histeretik model bu özellikleri ayrıntılı biçimde temsil eder ve Crisafulli ve Carr (2007) panel elemanının temelini oluşturur. Açık kaynaklı OpenSees platformunda (McKenna vd., 2000) ise dolgu çubukları için çoğunlukla çekme dayanımı ihmal edilmiş beton malzeme modelleri veya büzülme özellikli çok doğrulu malzeme modelleri kullanılmaktadır (Furtado vd., 2015).

Şekil 7. (a) Panagiotakos ve Fardis (1996) esaslı dört doğrulu zarf eğrisi (şematik); (b) dolgulu çerçevelerin çevrimsel davranışında büzülme, rijitlik ve dayanım azalmasının nitel gösterimi.



Kaynak: Yazar tarafından çizilmiştir; sayısal değerler temsilidir.

Dayanım hesabı ve göçme modu kontrolü

Eşdeğer çubuğun taşıma gücü, daha önce tanımlanan göçme modlarının her biri için ayrı ayrı hesaplanan kapasitelerin en küçüğü olarak belirlenir. Basitleştirilmiş bir yaklaşımla diyagonal basınç (köşe ezilmesi) kapasitesi çubuk genişliği ve dolgu basınç dayanımı (f'_m) cinsinden

$$R_c = a t_{\text{inf}} f'_m, \quad V_c = R_c \cos\theta \tag{6}$$

şeklinde, derz kayması kapasitesi ise Mohr–Coulomb ölçütüne dayanarak $V_s = (\tau_0 + \mu\sigma_n)\, t_{inf}\, L_{inf}$ şeklinde ifade edilebilir; burada τ_0 kohezyon, μ sürtünme katsayısı ve σ_n derze dik gerilmedir. ASCE/SEI 41-17 (ASCE, 2017), dolgunun beklenen yatay kesme dayanımını net yatay alan ile beklenen derz kayma dayanımının çarpımı ($V_{ine} = A_{ni} f_{vie}$) olarak tanımlar. Saneinejad ve Hobbs (1995) ise temas uzunlukları ve plastik analizi birlikte ele alan daha kapsamlı bir dayanım yöntemi önermiştir. Farklı yaklaşımların aynı panel için birbirinden belirgin biçimde farklı kapasiteler verebileceği unutulmamalıdır (bkz. Sayısal Uygulama).

Dayanım kontrolünün ikinci ve çoğu zaman belirleyici bileşeni, dolgunun kolona aktardığı kesme kuvvetidir. Tek diyagonal çubuk bu kuvveti düğüm noktasına aktardığından kolon kesmesini göstermez. FEMA 356 (FEMA, 2000) ve ASCE/SEI 41-17 bu nedenle, kolon kontrolünde çubuğun kiriş yüzünden l_{ceff} uzaklıkta kolona bağlandığı dış merkezli bir düzen kullanılmasını öngörür:

$$l_{ceff} = \frac{a}{\cos\theta_c}, \quad \tan\theta_c = \frac{h_{inf} - a/\cos\theta_c}{L_{inf}} \tag{7}$$

Bu yaklaşımla kolon, çubuk kuvvetinin yatay bileşenini kısa bir l_{ceff} boyu üzerinde taşır. Kolonun bu kuvvete karşı kesme kapasitesi ayrıca kontrol edilir; yetersiz enine donatılı mevcut kolonlarda belirleyici göçme modu çoğunlukla budur (Mehrabi vd., 1996; Stavridis ve Shing, 2010). Çoklu çubuk modelleri aynı etkiyi doğrudan analiz modeline taşır.

Boşluklu dolgu duvarlar

Pencere ve kapı boşlukları, basınç diyagonalinin sürekliliğini bozarak dolgunun rijitlik ve dayanım katkısını azaltır; boşluğun konumu ve boyutu göçme modunu da değiştirebilir (Kakaletsis ve Karayannis, 2008). Makro modellerde boşluk etkisi genellikle dolu panel için hesaplanan çubuk genişliğinin bir azaltma katsayısıyla

çarpılmasıyla dikkate alınır. Al-Chaar (2002), boşluk alanının panel alanına oranına (A_{op}/A_p) bağlı olarak

$$R_1 = 0{,}6\left(\frac{A_{op}}{A_p}\right)^2 - 1{,}6\left(\frac{A_{op}}{A_p}\right) + 1 \qquad (8)$$

azaltma katsayısını önermiştir; bağıntı boşluk oranının yaklaşık 0,6'yı aştığı durumlarda dolgu katkısının ihmal edilmesini öngörür. Asteris (2003), sonlu elemanlar analizlerine dayanarak boşluk konumunu da dikkate alan azaltma eğrileri geliştirmiştir. Büyük ve kenara yakın boşluklarda tek çubuk yerine boşluk çevresinden dolaşan çoklu çubuk düzenlerinin kullanılması daha gerçekçi sonuç verir. Boşlukların yanal rijitliğe etkisi ilk olarak Mallick ve Garg (1971) tarafından sistematik biçimde incelenmiştir.

Güncel eğilimler

Son on beş yılda makro modelleme alanındaki çalışmalar üç yönde yoğunlaşmıştır. Birincisi, deneysel veritabanlarına dayalı ve parametre belirsizliğini açıkça içeren çubuk modelleridir. Cavaleri ve Di Trapani (2014), çevrimsel deney sonuçlarından kalibre edilmiş basitleştirilmiş bir model önermiştir; Liberatore vd. (2018) ise deterministik ve olasılıksal analizler için ayrı parametre setleri vermiştir. İkincisi, dolgunun göçmeye etkisinin olasılıksal olarak değerlendirilmesidir: Sattar ve Liel (2016), sünek olmayan dolgulu betonarme çerçevelerin göçme riskini dolgu–çerçeve etkileşimini içeren modellerle incelemiştir. Üçüncüsü, dolgu–çerçeve etkileşimini bilinçli olarak sınırlayan *ayrıştırılmış (decoupled)* dolgu detaylarıdır. Preti vd. (2012) yatay kayma derzli dolgu duvarları büyük ölçekli deneyle incelemiş, Preti vd. (2019) bu sistem için basitleştirilmiş bir modelleme yaklaşımı önermiştir. TBDY 2018'in esnek derzli dolgular için daha büyük ötelenme sınırına izin vermesi (bkz. Yönetmeliklerde Dolgu Duvarlar) bu eğilimin yönetmeliğe yansımasıdır. Bu sistemlerin analizinde dolgunun katkısı, ayrışma

boşluğu kapanana kadar ihmal edilir, sonrasında ise yukarıda anlatılan modellerle temsil edilir.

Mikro Modeller: Sonlu Elemanlar Yaklaşımı

Malzeme ve arayüz modelleri

Mikro modeller, dolgulu çerçevenin yerel davranışını—çatlak oluşumu ve ilerlemesi, derz kayması, dolgu–çerçeve ayrılması, kolon kesme kırılması—doğrudan temsil edebildikleri için davranış mekanizmalarının incelenmesinde vazgeçilmezdir (Asteris vd., 2013). Bu modellerin başarısı büyük ölçüde üç bileşene bağlıdır: (i) yığma birimin ve betonun sürekli ortam davranışı, (ii) harç derzleri ve dolgu–çerçeve arayüzünün süreksizlik davranışı ve (iii) çatlak temsil yöntemi.

Page (1978), yığmayı birimleri sürekli ortam, harç derzlerini ise bağlantı elemanları olarak ele alan ilk sonlu eleman modellerinden birini önermiştir. Dhanasekar vd. (1985), tuğla yığmanın iki eksenli gerilme altındaki göçme yüzeyini deneysel olarak tanımlamış ve yığmanın anizotropisinin önemini göstermiştir. Lotfi ve Shing (1994), harç derzlerinin kayma ve açılma davranışını, kohezyonun ve sürtünmenin yumuşamasını içeren bir arayüz modeliyle temsil etmiştir. Lourenço ve Rots (1997), çekme kesmesi, Coulomb sürtünmesi ve basınç başlığından oluşan çok yüzeyli bir arayüz modeli geliştirerek basitleştirilmiş mikro modellemenin bugün de yaygın olarak kullanılan çerçevesini oluşturmuştur.

Çatlak temsili: yayılı ve ayrık çatlak modelleri

Çatlak temsili için iki yaklaşım kullanılır. *Yayılı (smeared) çatlak* modellerinde çatlak, eleman içinde dağılmış bir rijitlik ve dayanım kaybı olarak temsil edilir; ağ yapısından görece bağımsızdır, ancak tek bir baskın çatlağın lokalizasyonunu ve kayma kırılmasını temsil etmede güçlük çeker (Lotfi ve Shing, 1991). *Ayrık (discrete) çatlak* modellerinde ise çatlaklar arayüz elemanlarıyla

açıkça modellenir; olası çatlak yollarının önceden tanımlanması gerekir. Mehrabi ve Shing (1997), yayılı çatlak elemanlarını dolgu ve beton için, arayüz elemanlarını ise harç derzleri ve dolgu–çerçeve sınırı için birlikte kullanan bir yaklaşımla yarım ölçekli deney sonuçlarını başarıyla temsil etmiştir. Stavridis ve Shing (2010), betonarme çerçeve elemanlarında da yayılı ve ayrık çatlak yaklaşımlarını birleştirerek kolon kesme kırılmasını yakalayabilen bir model önermiş ve model parametrelerinin kalibrasyonu için sistematik bir yöntem sunmuştur.

Mikro modellerin olanakları ve sınırları

Mikro modeller, deneysel olarak ölçülmesi güç büyüklüklerin (örneğin temas uzunluğu, kolon boyunca kesme kuvveti dağılımı) elde edilmesini ve makro model parametrelerinin kalibrasyonunu mümkün kılar. Örneğin Asteris (2003) boşluk azaltma katsayılarını, Stavridis ve Shing (2010) ise basitleştirilmiş modeller için gerekli dayanım ve rijitlik değerlerini bu yolla türetmiştir. Buna karşın (i) çok sayıda malzeme parametresinin (kırılma enerjileri, arayüz kohezyonu ve sürtünmesi, genleşme açısı vb.) belirlenmesi gerekir; (ii) yumuşama davranışı nedeniyle sayısal yakınsama sorunları yaşanabilir; (iii) çevrimsel ve dinamik analizler yüksek hesap maliyeti gerektirir. Bu nedenle mikro modeller genellikle tek panel veya alt sistem düzeyinde, deneysel verilerle doğrulanarak kullanılmalıdır.

Düzlem Dışı Davranış ve Düzlem İçi–Düzlem Dışı Etkileşim

Deprem sırasında dolgu duvarlar, düzlemlerine dik doğrultudaki ivmelere de maruz kalır. Çerçeve içinde sıkışmış bir dolgunun düzlem dışı dayanımı, basit eğilme teorisinin öngördüğünden çok daha yüksektir; çünkü panelin orta yüksekliğinde oluşan çatlak sonrasında iki parça, sınır elemanlarına dayanarak bir kemer gibi çalışır (*kemerlenme etkisi*; Şekil 8a). McDowell vd. (1956) bu mekanizmanın kuramsal temelini ortaya

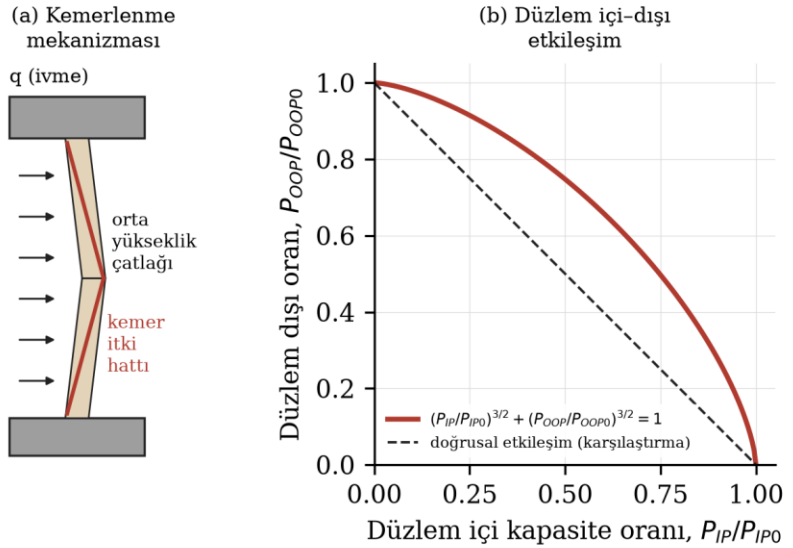
koymuş; Dawe ve Seah (1989) ise kemerlenmenin panel narinliği ve sınır koşullarına bağlılığını deneysel olarak incelemiştir. Kemerlenme etkisi, dolgunun çerçeveye sıkı temas etmesine bağlıdır; üst kenarda boşluk bulunması veya önceki düzlem içi hasar bu kapasiteyi önemli ölçüde azaltır (Angel vd., 1994).

Düzlem içi hasarın düzlem dışı kapasiteyi azaltması ve bunun tersi, iki doğrultudaki davranışın birlikte ele alınmasını gerektirir. Kadysiewski ve Mosalam (2009), düzlem içi ve düzlem dışı kapasitelerin etkileşimini

$$\left(\frac{P_{\mathrm{IP}}}{P_{\mathrm{IP0}}}\right)^{3/2} + \left(\frac{P_{\mathrm{OOP}}}{P_{\mathrm{OOP0}}}\right)^{3/2} = 1 \qquad (9)$$

biçiminde bir etkileşim eğrisiyle (Denklem 9) tanımlayan bir eleman modeli önermiştir (Şekil 8b). Modelde dolgu, orta düğümünde düzlem dışı kütlesi toplanmış lifli kiriş-kolon elemanlarından oluşan bir diyagonal ile temsil edilir; eğrinin dışına çıkıldığında eleman sistemden çıkarılarak dolgunun düzlem dışı göçmesi (devrilmesi) simüle edilir. Mosalam ve Günay (2015), bu yaklaşımı dolgulu betonarme çerçevelerin ilerleyen göçme analizine uygulamıştır. Hashemi ve Mosalam (2006) tarafından gerçekleştirilen sarsma tablası deneyi, iki doğrultudaki etkileşimin deneysel olarak gözlendiği önemli çalışmalardan biridir. Ricci vd. (2018b), önceden düzlem içi hasar görmüş tuğla dolgu duvarlar üzerinde düzlem dışı deneyler yaparak bu etkileşimi nicel olarak ölçmüş; aynı yazarlar düzlem içi talebe bağlı, deneye dayalı bir düzlem dışı dolgu modeli de önermiştir (Ricci vd., 2018a).

Şekil 8. (a) Çerçeve içindeki dolgunun düzlem dışı yükler altında kemerlenme mekanizması; (b) Kadysiewski ve Mosalam (2009) düzlem içi–düzlem dışı etkileşim eğrisi.

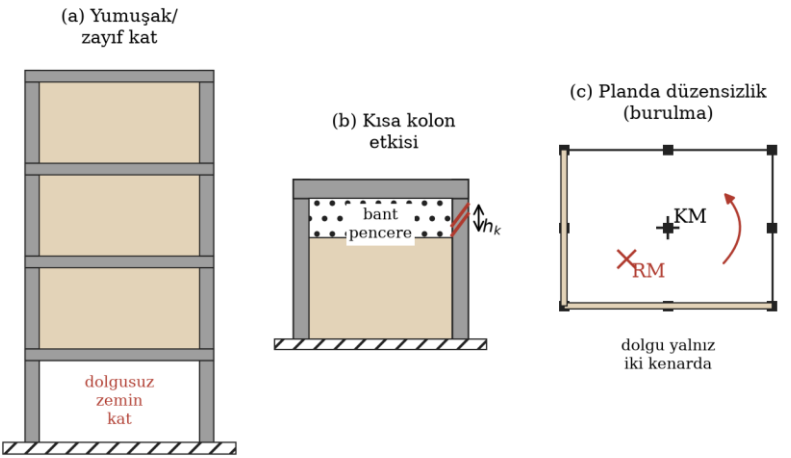


Kaynak: Yazar tarafından ilgili kaynaklar esas alınarak çizilmiştir.

Yönetmeliklerde Dolgu Duvarlar

Güncel deprem yönetmelikleri dolgu duvarlara iki farklı açıdan yaklaşır: (i) dolgunun taşıyıcı sisteme olumsuz etkilerinin (düzensizlikler, kısa kolon, yerel etkiler) önlenmesi ve (ii) mevcut binaların değerlendirilmesinde dolgunun rijitlik ve dayanım katkısının modele dahil edilmesi (Şekil 9).

Şekil 9. Dolgu duvarların düzensiz yerleşiminden kaynaklanan olumsuz etkiler: (a) yumuşak/zayıf kat, (b) kısa kolon, (c) planda düzensizlik ve burulma (KM: kütle merkezi, RM: rijitlik merkezi).



Kaynak: Yazar tarafından çizilmiştir.

ASCE/SEI 41-17 (ASCE, 2017), FEMA 356 (FEMA, 2000) çizgisini sürdürerek mevcut binaların değerlendirilmesinde dolguyu Mainstone (1971) esaslı eşdeğer çubukla (Denklem 2) modellemeyi öngörür; dolgunun kesme dayanımını, kolonların dolgudan gelen kesme kuvvetine göre kontrolünü ve doğrusal olmayan analizler için göreli kat ötelemesine bağlı modelleme parametrelerini ve kabul ölçütlerini tanımlar. Ayrıca düzlem dışı göçmeye karşı panel narinliğine (h_{inf}/t_{inf}) ve kemerlenme etkisine dayalı kontroller içerir.

Eurocode 8 (CEN, 2004), dolgulu çerçevelere ilişkin ek önlemleri tanımlar. Yönetmelik, dolguların planda düzensiz yerleşiminin burulma etkilerini artırabileceğini ve düşeyde düzensiz dağılımın dolgunun azaldığı katlarda yerel etkileri büyütebileceğini belirterek bu durumlarda tasarım etkilerinin artırılmasını öngörür. Düşeyde düzensizlik durumunda ilgili katta deprem etkileri $\eta = 1 + \Delta V_{Rw}/\Sigma V_{Ed} \leq q$ katsayısı ile büyütülür; burada ΔV_{Rw} incelenen katta dolgu dayanımındaki bir üst kata göre azalma, ΣV_{Ed} ise kattaki

toplam deprem kesme kuvvetidir. Yönetmelik ayrıca kısmi yükseklikteki dolguların oluşturduğu kısa kolonlar ile dolgudan kolona aktarılan kesme kuvvetleri için özel kontroller ister ve dolguların düzlem dışı göçmesinin sınırlanması için önlemler önerir.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018; AFAD, 2018) kapsamında yeni binaların tasarımında dolgu duvarlar genel olarak taşıyıcı sistem modeline rijitlik ve dayanım elemanı olarak dahil edilmez; kütle ve yük olarak göz önüne alınır. Dolgu duvarlar yönetmelikte esas olarak göreli kat ötelemesi sınırları aracılığıyla ele alınır. Madde 4.9.1.3'e göre, gevrek dolgu duvarların çerçeve elemanlarına boşluksuz bitişik olduğu durumda etkin göreli kat ötelemesi $\lambda \cdot \delta_{max}/h \leq 0{,}008\kappa$ ile, dolgu ile çerçeve arasında esnek derz bulunan veya cephe elemanlarının esnek bağlantılı olduğu durumda ise $\lambda \cdot \delta_{max}/h \leq 0{,}016\kappa$ ile sınırlanır. Burada λ, DD-3 ve DD-2 deprem yer hareketi düzeylerine ait elastik spektral ivmelerin oranı, κ ise betonarme binalar için 1 alınan bir katsayıdır. Böylece yönetmelik, dolgu–çerçeve etkileşimini esnek derzle sınırlayan tasarımları daha büyük bir ötelenme sınırıyla teşvik etmektedir.

Yönetmelikler arasındaki bu farklılık, uygulayıcının dolgu katkısını bir yandan güvenlik lehine ihmal ederken öte yandan dolgunun olumsuz etkilerini ayrıca kontrol etmesi gerektiği şeklinde özetlenebilir. Dolgunun ihmal edilmesi, dolgunun rijitlik katkısı nedeniyle binanın doğal periyodunun kısalması ve buna bağlı olarak deprem kuvvetlerinin artması olasılığını da göz ardı eder; bu nedenle dolgulu ve dolgusuz modellerin birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir (Fardis ve Panagiotakos, 1997; Dolšek ve Fajfar, 2008).

Sayısal Uygulama

Bu kesimde, Türkiye'deki betonarme konut stokunu temsil eden tek açıklıklı bir çerçeve gözü için eşdeğer çubuk parametreleri farklı bağıntılarla hesaplanmaktadır. Malzeme özellikleri, dolgu

malzemesinin yüksek değişkenliği nedeniyle **varsayımsal** olup yalnızca yöntemin uygulanışını göstermek amacıyla seçilmiştir; gerçek bir değerlendirmede deney veya yönetmelik değerleri kullanılmalıdır. Kullanılan girdi değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Sayısal uygulamada kullanılan girdi değerleri

Parametre	**Sembol**	**Değer**
Kat (kolon) yüksekliği	h_{col}	3,00 m
Dolgu yüksekliği (kiriş yüksekliği 0,50 m)	h_{inf}	2,50 m
Dolgu uzunluğu (aks açıklığı 4,50 m, kolon 40×40 cm)	L_{inf}	4,10 m
Dolgu kalınlığı (sıvasız)	t_{inf}	0,19 m
Beton elastisite modülü (C25, TS 500)	E_{fe}	30.250 MPa
Kolon atalet momenti	I_{col}	$2{,}133\times10^{-3}$ m^4
Dolgu elastisite modülü (varsayım)	E_{me}	1.500 MPa
Dolgu basınç dayanımı (varsayım)	f'_m	2,0 MPa
Çatlama kayma gerilmesi (varsayım)	τ_{cr}	0,25 MPa
Derz kohezyonu (varsayım; $\sigma_n \approx 0$ kabulü)	τ_0	0,30 MPa
Kolon etkin rijitlik çarpanı (çatlamış kesit, varsayım)	—	0,70

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

Geometriden $\theta = \arctan(2{,}50/4{,}10) = 31{,}4°$ ve $r_{inf} = 4{,}802$ m elde edilir. Denklem 1 ile $\lambda_1 = 0{,}792$ m^{-1} ve $\lambda_1 h_{col} = 2{,}37$ bulunur. Denklem 2 ile Mainstone/ASCE 41 çubuk genişliği $a = 0{,}175 \times 2{,}37^{-0{,}4} \times 4{,}802 = 0{,}595$ m olarak hesaplanır. Farklı bağıntılarla bulunan genişlikler ve Denklem 4 ile hesaplanan yatay elastik rijitlikler Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Sayısal uygulama için eşdeğer çubuk genişlikleri ve yatay elastik rijitlikler

Bağıntı	***w* (m)**	***w*/*d***	K_{inf} **(kN/m)**
Mainstone (1971) / ASCE 41-17	0,595	0,124	25.725
Liauw ve Kwan (1984)	1,316	0,274	56.929
Decanini ve Fantin (1986), çatlamış	1,478	0,308	63.931
Decanini ve Fantin (1986), çatlamamış	1,921	0,400	83.099
Paulay ve Priestley (1992)	1,201	0,250	51.939
Holmes (1961)	1,601	0,333	69.252

Kaynak: Yazar tarafından hesaplanmıştır. Not: Tüm bağıntılarda $\lambda h = \lambda_1 h_{col}$ *kullanılmıştır. Değerler bolum_olustur.py betiği ile hesaplanmıştır.*

Tablo 5, aynı panel için hesaplanan rijitliğin bağıntıya bağlı olarak yaklaşık 2,7 kat değişebildiğini göstermektedir. Karşılaştırma için, kirişi sonsuz rijit (kolon uçları ankastre) kabul edilen çıplak çerçevenin yatay rijitliği, çatlamış kesit için 0,70 etkin rijitlik çarpanıyla $24 \cdot 0{,}70 \cdot E_{fe} I_{col} / h_{col}^3 = 40.154$ kN/m olarak hesaplanır. Bu basitleştirilmiş değer kiriş esnekliğini ihmal ettiği için çıplak çerçeve rijitliğini olduğundan büyük tahmin eder; dolayısıyla aşağıdaki oranlar güvenli tarafta kalan alt değerlerdir. Buna göre dolgunun eklenmesi kat rijitliğini, en düşük değeri veren Mainstone bağıntısıyla en az yaklaşık 1,6 kat, Holmes bağıntısıyla ise en az yaklaşık 2,7 kat artırmaktadır. Sonuç, dolgunun ihmal edilmesinin periyot ve kat ötelemesi tahmininde önemli farklara yol açabileceğini ve bağıntı seçiminin kendisinin de önemli bir belirsizlik kaynağı olduğunu göstermektedir.

Panagiotakos ve Fardis (1996) zarf eğrisi için $G_w \approx 0{,}4E_{me} =$ 600 MPa ve $A_w = t_{inf} L_{inf} = 0{,}779$ m^2 alınırsa Denklem 5 ile $K_{el} =$ 186.960 kN/m, $F_y = 194{,}7$ kN ve $F_{max} \approx 1{,}3F_y = 253{,}2$ kN bulunur. Çatlamamış panel rijitliği K_{el}, Mainstone çubuk rijitliğinin yaklaşık 7,3 katıdır. Bu fark, zarf eğrileri ele alınırken açıklanan ayrılma öncesi ve sonrası davranış farkını yansıtır ve elastik analizde hangi rijitliğin seçildiğinin sonuçları ne kadar etkileyebileceğini gösterir.

Mekanizma esaslı kapasiteler için Denklem 6 ile diyagonal basınç kapasitesi R_c = 225,9 kN, yatay bileşeni V_c = 192,9 kN olarak bulunur. Dolguya düşey yük gelmediği ($\sigma_n \approx 0$) kabulüyle derz kayması kapasitesi $V_s = \tau_0 t_{inf} L_{inf}$ = 233,7 kN'dur. Buna göre bu panelde belirleyici mod diyagonal basınç (köşe ezilmesi) olup yatay kapasite yaklaşık 193 kN'dur. Panagiotakos ve Fardis zarfından elde edilen ampirik F_{max} = 253 kN değeri bu mekanizma kapasitesinden yaklaşık %31 büyüktür. Farklı yaklaşımlar arasındaki bu tutarsızlık, değerlendirmede küçük kapasitenin esas alınmasını veya modelin ilgili dolgu türü için deney verisiyle kalibre edilmesini gerektirir.

Kolon kontrolü için Denklem 7 iterasyonla çözüldüğünde θ_c = 24,3° ve l_{ceff} = 0,65 m bulunur. Buna göre dolgu, yaklaşık 193 kN'luk yatay kuvveti kolonun kiriş yüzüne yakın 0,65 m'lik bölgesine aktarır. Kolonun kesme kapasitesi (enine donatıya bağlı olarak) bu kuvvetten küçükse belirleyici göçme modu dolgu değil kolon kesme kırılması olur. Bu kontrol, tek çubuklu bir global modelin gösteremeyeceği bir sonuçtur.

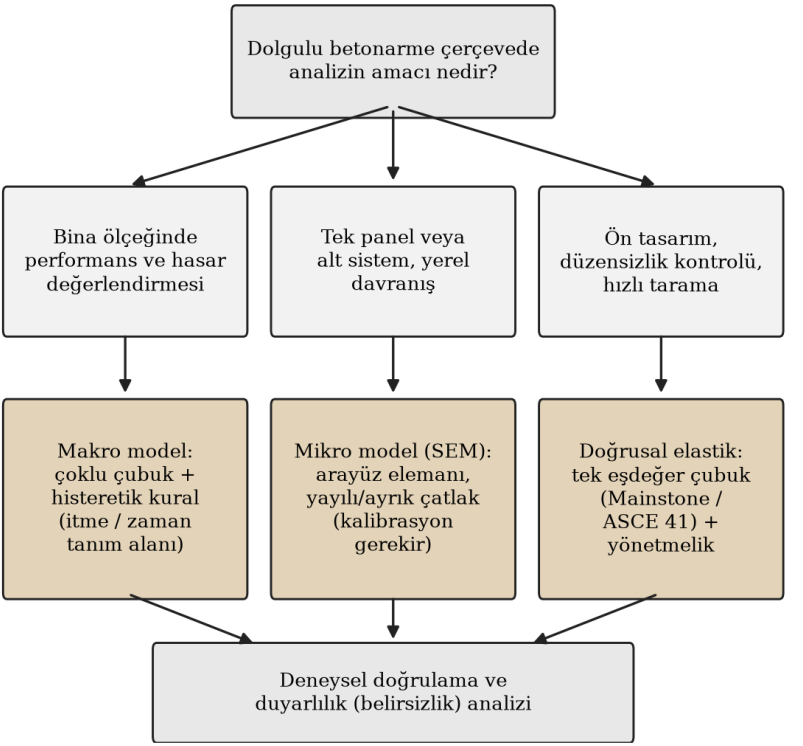
Son olarak, panelde 1,20 m × 1,20 m boyutunda bir pencere bulunması durumunda boşluk oranı 0,140 olup Denklem 8 ile R_1 = 0,787 elde edilir. Diğer bir ifadeyle çubuk genişliği ve rijitliği yaklaşık %21 oranında azaltılmalıdır.

Analiz Yöntemi Seçimi, Sonuçlar ve Araştırma Gereksinimleri

Yukarıda özetlenen yöntemlerin hiçbiri tüm amaçlar için tek başına yeterli değildir. Şekil 10'da, analiz amacına göre yöntem seçimi için bir akış şeması önerilmektedir: Bina ölçeğinde performans ve hasar değerlendirmesi için doğrusal olmayan histeretik kurallara sahip çoklu çubuk makro modelleri; tek bir panelin ya da alt sistemin yerel davranışının (çatlak gelişimi, kolon kesme kırılması) incelenmesi için kalibre edilmiş mikro modeller; ön tasarım, düzensizlik kontrolü ve hızlı tarama için ise doğrusal elastik tek çubuk modelleri uygun görünmektedir. Her durumda

sonuçların deneysel verilerle doğrulanması ve belirsiz parametrelere karşı duyarlılık analizi yapılması önerilir.

Şekil 10. Dolgulu betonarme çerçevelerde analiz amacına göre yöntem seçimi için önerilen akış şeması.



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

Bölümün başlıca sonuçları şöyle özetlenebilir:

- Dolgu duvarlar, taşıyıcı olmayan eleman kabulüne karşın betonarme çerçevelerin deprem davranışını rijitlik, dayanım, enerji tüketimi ve hasar dağılımı bakımından belirgin şekilde değiştirir; bu etki olumlu veya olumsuz olabilir.

- Eşdeğer çubuk modelleri bina ölçeğindeki analizler için en pratik araçtır; ancak çubuk genişliği bağıntıları arasında birkaç kata varan farklar bulunduğundan sonuçlar seçilen bağıntıya duyarlıdır.
- Tek çubuklu modeller kolon kesme kuvvetlerini olduğundan küçük tahmin eder; kolon kesme göçmesinin olası olduğu durumlarda çoklu çubuk veya mikro modeller kullanılmalıdır. Sayısal uygulama, farklı dayanım yaklaşımlarının aynı panel için belirgin biçimde farklı kapasiteler verdiğini ve kolon kesme kontrolünün ayrıca yapılması gerektiğini göstermiştir.
- Yönetmelikler dolgunun olumsuz etkilerini sınırlamaya odaklanır: TBDY 2018 dolguları esas olarak göreli kat ötelemesi sınırlarıyla ele alır ve esnek derzli çözümleri teşvik eder; ASCE/SEI 41-17 ise mevcut binalarda dolgunun eşdeğer çubukla açıkça modellenmesini öngörür.
- Mikro modeller yerel mekanizmaları başarıyla temsil eder, ancak çok sayıda parametre gerektirir ve deneysel kalibrasyon olmadan güvenilir sonuç vermeyebilir.
- Düzlem dışı kapasite, önceki düzlem içi hasar ile belirgin biçimde azalır; deprem değerlendirmesinde iki doğrultu birlikte ele alınmalıdır.

Gelecekteki araştırmalar için öncelikli konular şunlardır: Türkiye'de yaygın kullanılan dolgu malzemeleri (yatay delikli tuğla, gazbeton, bims) için mekanik özellik veritabanlarının oluşturulması; düzlem içi–düzlem dışı etkileşimi içeren ve pratik kullanıma uygun makro modellerin geliştirilmesi; dolgu parametrelerindeki belirsizliğin olasılıksal performans değerlendirmesine yansıtılması (Liberatore vd., 2018) ve dolgu–çerçeve ayrıştırma (izolasyon) detaylarının analiz yöntemlerine dahil edilmesi.

Kaynakça

AFAD. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. Resmî Gazete, 18 Mart 2018, Sayı 30364 (Mükerrer). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.

Al-Chaar, G. (2002). *Evaluating strength and stiffness of unreinforced masonry infill structures* (ERDC/CERL TR-02-1). U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center. https://doi.org/10.21236/ADA407072

Angel, R., Abrams, D. P., Shapiro, D., Uzarski, J., & Webster, M. (1994). *Behavior of reinforced concrete frames with masonry infills* (Structural Research Series No. 589, UILU-ENG-94-2005). University of Illinois at Urbana-Champaign.

ASCE. (2017). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings* (ASCE/SEI 41-17). American Society of Civil Engineers.

Asteris, P. G. (2003). Lateral stiffness of brick masonry infilled plane frames. *Journal of Structural Engineering, 129*(8), 1071–1079. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:8(1071)

Asteris, P. G., Antoniou, S. T., Sophianopoulos, D. S., & Chrysostomou, C. Z. (2011). Mathematical macromodeling of infilled frames: State of the art. *Journal of Structural Engineering, 137*(12), 1508–1517. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000384

Asteris, P. G., Cotsovos, D. M., Chrysostomou, C. Z., Mohebkhah, A., & Al-Chaar, G. K. (2013). Mathematical micromodeling of infilled frames: State of the art. *Engineering Structures, 56*, 1905–1921. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.010

Bertero, V. V., & Brokken, S. (1983). Infills in seismic resistant building. *Journal of Structural Engineering, 109*(6), 1337–1361. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1983)109:6(1337)

Cavaleri, L., & Di Trapani, F. (2014). Cyclic response of masonry infilled RC frames: Experimental results and simplified modeling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 65*, 224–242. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.06.016

CEN. (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings* (EN 1998-1:2004). European Committee for Standardization.

Chrysostomou, C. Z., Gergely, P., & Abel, J. F. (2002). A six-strut model for nonlinear dynamic analysis of steel infilled frames. *International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2*(3), 335–353. https://doi.org/10.1142/S0219455402000567

Crisafulli, F. J. (1997). *Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills* [Doktora tezi, University of Canterbury, Christchurch, Yeni Zelanda].

Crisafulli, F. J., & Carr, A. J. (2007). Proposed macro-model for the analysis of infilled frame structures. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 40*(2), 69–77. https://doi.org/10.5459/bnzsee.40.2.69-77

Dawe, J. L., & Seah, C. K. (1989). Out-of-plane resistance of concrete masonry infilled panels. *Canadian Journal of Civil Engineering, 16*(6), 854–864. https://doi.org/10.1139/l89-128

Decanini, L. D., & Fantin, G. E. (1986). Modelos simplificados de la mampostería incluida en pórticos. Características de

rigidez y resistencia lateral en estado límite. *VI Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural* (Cilt 2, ss. 817–836). Buenos Aires, Arjantin.

Dhanasekar, M., Page, A. W., & Kleeman, P. W. (1985). The failure of brick masonry under biaxial stresses. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2, 79*(2), 295–313. https://doi.org/10.1680/iicep.1985.992

Dolšek, M., & Fajfar, P. (2008). The effect of masonry infills on the seismic response of a four-storey reinforced concrete frame — a deterministic assessment. *Engineering Structures, 30*(7), 1991–2001. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.01.001

El-Dakhakhni, W. W., Elgaaly, M., & Hamid, A. A. (2003). Three-strut model for concrete masonry-infilled steel frames. *Journal of Structural Engineering, 129*(2), 177–185. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:2(177)

Fardis, M. N., & Panagiotakos, T. B. (1997). Seismic design and response of bare and masonry-infilled reinforced concrete buildings. Part II: Infilled structures. *Journal of Earthquake Engineering, 1*(3), 475–503. https://doi.org/10.1080/13632469708962375

FEMA. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings* (FEMA 356). Federal Emergency Management Agency.

Furtado, A., Rodrigues, H., & Arêde, A. (2015). Modelling of masonry infill walls participation in the seismic behaviour of RC buildings using OpenSees. *International Journal of Advanced Structural Engineering, 7*(2), 117–127. https://doi.org/10.1007/s40091-015-0086-5

Hashemi, A., & Mosalam, K. M. (2006). Shake-table experiment on reinforced concrete structure containing masonry infill wall. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 35*(14), 1827–1852. https://doi.org/10.1002/eqe.612

Holmes, M. (1961). Steel frames with brickwork and concrete infilling. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 19*(4), 473–478. https://doi.org/10.1680/iicep.1961.11305

Ivanov, M. L., & Chow, W.-K. (2023). Structural damage observed in reinforced concrete buildings in Adiyaman during the 2023 Turkiye Kahramanmaras Earthquakes. *Structures, 58*, 105578. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105578

Kadysiewski, S., & Mosalam, K. M. (2009). *Modeling of unreinforced masonry infill walls considering in-plane and out-of-plane interaction* (PEER Report 2008/102). Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. https://peer.berkeley.edu/sites/default/files/web_peer8102_stephen_kadysiewski_khalid_m._mosalam_.pdf

Kakaletsis, D. J., & Karayannis, C. G. (2008). Influence of masonry strength and openings on infilled R/C frames under cycling loading. *Journal of Earthquake Engineering, 12*(2), 197–221. https://doi.org/10.1080/13632460701299138

Klingner, R. E., & Bertero, V. V. (1978). Earthquake resistance of infilled frames. *Journal of the Structural Division, 104*(6), 973–989. https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0004947

Liauw, T. C., & Kwan, K. H. (1984). Nonlinear behaviour of non-integral infilled frames. *Computers & Structures, 18*(3), 551–560. https://doi.org/10.1016/0045-7949(84)90070-1

Liberatore, L., Noto, F., Mollaioli, F., & Franchin, P. (2018). In-plane response of masonry infill walls: Comprehensive experimentally-based equivalent strut model for deterministic and probabilistic analysis. *Engineering Structures, 167*, 533–548. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.057

Lotfi, H. R., & Shing, P. B. (1991). An appraisal of smeared crack models for masonry shear wall analysis. *Computers & Structures, 41*(3), 413–425. https://doi.org/10.1016/0045-7949(91)90134-8

Lotfi, H. R., & Shing, P. B. (1994). Interface model applied to fracture of masonry structures. *Journal of Structural Engineering, 120*(1), 63–80. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:1(63)

Lourenço, P. B. (1996). *Computational strategies for masonry structures* [Doktora tezi, Delft University of Technology, Hollanda].

Lourenço, P. B., & Rots, J. G. (1997). Multisurface interface model for analysis of masonry structures. *Journal of Engineering Mechanics, 123*(7), 660–668. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:7(660)

Mainstone, R. J. (1971). On the stiffnesses and strengths of infilled frames. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Supplement IV* (Paper 7360S), 57–90.

Mallick, D. V., & Garg, R. P. (1971). Effect of openings on the lateral stiffness of infilled frames. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 49*(2), 193–209. https://doi.org/10.1680/iicep.1971.6263

McDowell, E. L., McKee, K. E., & Sevin, E. (1956). Arching action theory of masonry walls. *Journal of the Structural*

Division, 82(2), 915-1–915-18. https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000019

McKenna, F., Fenves, G. L., & Scott, M. H. (2000). *Open system for earthquake engineering simulation (OpenSees)*. University of California, Berkeley.

Mehrabi, A. B., & Shing, P. B. (1997). Finite element modeling of masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering, 123*(5), 604–613. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:5(604)

Mehrabi, A. B., Shing, P. B., Schuller, M. P., & Noland, J. L. (1996). Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering, 122*(3), 228–237. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:3(228)

Mosalam, K. M., & Günay, S. (2015). Progressive collapse analysis of reinforced concrete frames with unreinforced masonry infill walls considering in-plane/out-of-plane interaction. *Earthquake Spectra, 31*(2), 921–943. https://doi.org/10.1193/062113EQS165M

Page, A. W. (1978). Finite element model for masonry. *Journal of the Structural Division, 104*(8), 1267–1285. https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0004969

Panagiotakos, T. B., & Fardis, M. N. (1996). Seismic response of infilled RC frame structures. *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Meksika.

Paulay, T., & Priestley, M. J. N. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9780470172841

Polyakov, S. V. (1963). *Masonry in framed buildings: An investigation into the strength and stiffness of masonry infilling* (G. L. Cairns, Çev.). (Özgün eser 1956, Moskova)

Preti, M., Bettini, N., & Plizzari, G. (2012). Infill walls with sliding joints to limit infill-frame seismic interaction: Large-scale experimental test. *Journal of Earthquake Engineering, 16*(1), 125–141. https://doi.org/10.1080/13632469.2011.579815

Preti, M., Bolis, V., & Stavridis, A. (2019). Seismic infill–frame interaction of masonry walls partitioned with horizontal sliding joints: Analysis and simplified modeling. *Journal of Earthquake Engineering, 23*(10), 1651–1677. https://doi.org/10.1080/13632469.2017.1387195

Ricci, P., Di Domenico, M., & Verderame, G. M. (2018a). Empirical-based out-of-plane URM infill wall model accounting for the interaction with in-plane demand. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 47*(3), 802–827. https://doi.org/10.1002/eqe.2992

Ricci, P., Di Domenico, M., & Verderame, G. M. (2018b). Experimental assessment of the in-plane/out-of-plane interaction in unreinforced masonry infill walls. *Engineering Structures, 173*, 960–978. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.033

Saneinejad, A., & Hobbs, B. (1995). Inelastic design of infilled frames. *Journal of Structural Engineering, 121*(4), 634–650. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:4(634)

Sattar, S., & Liel, A. B. (2016). Seismic performance of nonductile reinforced concrete frames with masonry infill walls—II:

Collapse assessment. *Earthquake Spectra, 32*(2), 819–842. https://doi.org/10.1193/091514EQS141M

Sezen, H., Whittaker, A. S., Elwood, K. J., & Mosalam, K. M. (2003). Performance of reinforced concrete buildings during the August 17, 1999 Kocaeli, Turkey earthquake, and seismic design and construction practise in Turkey. *Engineering Structures, 25*(1), 103–114. https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00121-9

Smyrou, E., Blandon, C., Antoniou, S., Pinho, R., & Crisafulli, F. (2011). Implementation and verification of a masonry panel model for nonlinear dynamic analysis of infilled RC frames. *Bulletin of Earthquake Engineering, 9*(5), 1519–1534. https://doi.org/10.1007/s10518-011-9262-6

Stafford Smith, B. (1962). Lateral stiffness of infilled frames. *Journal of the Structural Division, 88*(6), 183–199. https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000849

Stafford Smith, B. (1966). Behavior of square infilled frames. *Journal of the Structural Division, 92*(1), 381–404. https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001387

Stafford Smith, B., & Carter, C. (1969). A method of analysis for infilled frames. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 44*(1), 31–48. https://doi.org/10.1680/iicep.1969.7290

Stavridis, A., & Shing, P. B. (2010). Finite-element modeling of nonlinear behavior of masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering, 136*(3), 285–296. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000116

Tan, M. T., Binici, B., Kale, O., & Ozcebe, G. (2025). The successful performance of a reinforced concrete building with FRP strengthened infill walls and externally installed

shear walls subjected to Kahramanmaras and Hatay 2023 earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering, 23*(3), 1183–1202. https://doi.org/10.1007/s10518-024-02062-0

BÖLÜM 8

GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARINDA İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ: TEHLİKE MEKANİZMALARI, KRİTİK SAHA UYGULAMALARI VE 58 MADDELİK MEKANİZMA TEMELLİ BÜTÜNCÜL ÖNLEME ÇERÇEVESİ

Occupational Health and Safety in Geotechnical Engineering Applications: Hazard Mechanisms, Critical Field Practices, and a 58-Item Mechanism-Based Integrated Prevention Framework

Atila DEMİRÖZ[1], Mustafa ONÜÇYILDIZ[2] Ramazan ÇİVİCİ[3]

Özet

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında iş sağlığı ve güvenliği (İSG), yalnızca genel şantiye tehlikeleri, çalışan davranışları ve kişisel koruyucu donanım üzerinden ele

1 Dr. Öğr. Üyesi, Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Müh. Böl., ORCID: 0000-0003-1672-1630, E-posta: ademiroz@ktun.edu.tr

2 Dr. Öğr. Üyesi Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Müh. Böl., ORCID: 0000-0003-0811-9017

3 İnş. Müh. Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Müh. Böl., ORCID: 0009-0009-6456-9777

alınamayacak kadar çok bileşenli bir mühendislik problemidir. Kazı, hendek ve şevler, derin kazılar ve iksa sistemleri, ankraj ve zemin çivileri, insan girişli temel kuyuları ve şaftlar, sondaj ve kazık uygulamaları, zemin iyileştirme ve kompaksiyon, tünel ve yeraltı yapıları ile mesleki maruziyetlerde çalışan güvenliği; zemin-kaya davranışı, yeraltı suyu, yapım sırası, geçici destek sistemleri, ağır ekipman-zemin etkileşimi, çalışma platformu ve çalışma ortamı koşullarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu kitap bölümü, geoteknik İSG'yi teknik tehlike mekanizmaları, çalışan maruziyeti, erken uyarı göstergeleri, önleyici kontroller ve doğrulama/geri besleme adımlarını aynı yapı içinde birleştiren bütüncül bir mühendislik yaklaşımıyla ele almaktadır. İlk aşamada bilimsel literatür, düzenleyici kurum dokümanları ve geoteknik teknik rehberlerin kavramsal senteziyle 48 maddelik kaynak-temelli bir tehlike envanteri oluşturulmuş; ardından faaliyetler arası tekrarların karşılaştırılması, farklı mekanizmaların ayrıştırılması ve yeterince görünür olmayan özgün tehlikelerin kaynak-temelli olarak eklenmesiyle envanter dokuz faaliyet/maruziyet ailesinde 58 maddelik mekanizma temelli bir İSG kontrol listesine dönüştürülmüştür. Nihai yapıda her madde tehlike/koşul, mekanizma, erken uyarı veya gözlenebilir gösterge, çalışan maruziyeti, olası İSG sonucu, kontrol önlemi, kontrol hiyerarşisi, doğrulama/geri besleme ve kontrol listesi durumu ile ilişkilendirilmiştir. Bölüm ayrıca geoteknik tehlikelerin sınıflandırılmasını, bütüncül geoteknik-İSG değerlendirme çerçevesini, faaliyet bazında önleyici mühendislik tedbirlerini, dinamik izleme ve tetikleyici-eylem yaklaşımını, acil durum ve saha koordinasyonunu ayrıntılı olarak incelemektedir. Önerilen yaklaşım sayısal bir risk puanı üretmek yerine teknik nedensellik, gözlenebilirlik, çalışan maruziyeti ve kontrol edilebilirliği ortak bir karar ve geri besleme sistemi içinde bütünleştirmektedir.

Anahtar kelimeler: Geoteknik mühendisliği; iş sağlığı ve güvenliği; tehlike mekanizması; 58 maddelik kontrol listesi; geoteknik izleme; önleyici mühendislik; risk yönetimi.

Abstract

Occupational health and safety (OHS) in geotechnical engineering applications is a multi-component engineering problem that cannot be addressed solely through general construction hazards, worker behaviour, or personal protective equipment. Worker safety in excavations, trenches and slopes, deep excavations and retaining systems, ground anchors and soil nails, man-entry foundation shafts, drilling and piling, ground improvement and compaction, tunnelling and underground works, and occupational exposures is directly influenced by soil-rock behaviour, groundwater, construction sequencing, temporary support systems, heavy equipment-ground interaction, working platforms, and working-environment conditions. This book chapter presents an integrated engineering approach that links technical hazard mechanisms with worker exposure, early-warning indicators, preventive controls, and verification/feedback. In the first stage, a 48-item source-based hazard inventory was developed through conceptual synthesis of peer-reviewed literature, regulatory documents, and geotechnical technical guidance. The inventory was then reassessed through cross-activity duplication review, separation of distinct mechanisms, and source-supported addition of insufficiently represented hazards, resulting in a 58-item mechanism-based OHS checklist across nine activity/exposure families. Each item is linked to the hazard/condition, mechanism, early-warning or observable indicator, worker exposure, potential OHS consequence, control measure, hierarchy of controls, verification/feedback, and checklist status. The chapter further examines hazard classification, an integrated geotechnical-OHS assessment framework, activity-specific preventive engineering

measures, dynamic monitoring and trigger-action logic, emergency response, and field coordination. Rather than producing a numerical risk score, the proposed framework integrates technical causation, field observability, worker exposure, and controllability within a common engineering decision and feedback system.

Keywords: Geotechnical engineering; occupational health and safety; hazard mechanism; 58-item checklist; geotechnical monitoring; preventive engineering; risk management.

Giriş

İnşaat faaliyetlerinin güvenli biçimde yürütülmesi, yalnızca çalışan davranışlarının ve kişisel koruyucu donanım kullanımının denetlenmesiyle sınırlandırılamayacak kadar çok katmanlı bir mühendislik problemidir. Bu durum özellikle geoteknik mühendisliği uygulamalarında daha belirgindir. Çünkü kazı, şev, iksa, sondaj, kazık, zemin iyileştirme, tünel ve yeraltı yapıları gibi faaliyetlerde çalışanların güvenliği doğrudan zeminin veya kaya ortamının mühendislik davranışıyla ilişkilidir. Zemin türü, kayma dayanımı, tabakalanma, süreksizlikler, yeraltı su seviyesi, çevresel sürşarjlar, titreşimler ve imalat sırası gibi değişkenlerde meydana gelen değişimler yalnızca bir geoteknik tasarım problemini değil, aynı zamanda çalışanların maruz kaldığı tehlikenin düzeyini de değiştirebilmektedir. Bu nedenle geoteknik sahalarda iş sağlığı ve güvenliğinin (İSG) değerlendirilmesi, geleneksel iş güvenliği yaklaşımı ile zemin ve kaya mekaniğinin temel ilkelerinin birlikte ele alınmasını gerektirir (Einstein, 1996; International Labour Organization [ILO], 2022; Occupational Safety and Health Administration [OSHA], n.d.-a).

Geoteknik saha işleri, çoğu yapı projesinde inşaatın ilk fiziksel aşamalarından birini oluşturur ve sonraki imalatların güvenliğini doğrudan etkiler. Değişken zemin koşulları, sınırlı arazi araştırması, belirsiz parametreler, açık kazı yüzeyleri ve ağır ekipman kullanımı bu faaliyetlere özgü riskler üretmektedir.

Akboğa Kale ve Eskişar (2018), OSHA kayıtlarından seçilen 247 geoteknik saha olayında yüksek şiddet ve tekrarlanma düzeyi bildirmiş; Akboğa Kale, Eskişar ve Mortazavi (2024) ise 1.010 olayı kapsayan daha geniş veri setinde incelenen olayların %57,2'sinin ölümcül olduğunu göstermiştir. Bu oranlar tüm geoteknik çalışmalar için genel bir ölüm oranı olarak yorumlanmamalı, ancak kaza veri tabanına yansıyan geoteknik olayların ağır sonuçlar doğurabildiğini göstermektedir.

Kazı ve hendeklerde zemin/kaya duraylılığı; zemin türü, geometri, tabakalanma, su koşulları, sürşarj, titreşim ve kazının açık kalma süresinden etkilenir. Derin kazılarda buna iksa ve ankraj performansı, taban kabarması, hidrolik kırılma veya borulanma ve çevre yapı hareketleri eklenir. Sondaj, kazık ve zemin iyileştirme işlerinde çalışma platformu, ağır ekipman, dönen parçalar, askıdaki yükler ve yüksek basınçlı sistemler öne çıkarken; tünel ve yeraltı çalışmalarında kaya-zemin duraysızlığı, su girişi, havalandırma, patlatma, tahkimat ve sınırlı kaçış olanakları birlikte değerlendirilmelidir (Eskişar & Akboğa Kale, 2022; Eskesen et al., 2004; ILO, 2022).

Geoteknik risklerin ayırt edici yönlerinden biri, yeraltı suyu ve yapım sırasına duyarlı olmalarıdır. Yeraltı su seviyesindeki değişim, beklenmeyen su girişi veya drenaj/dewatering performansındaki yetersizlik; efektif gerilme, kazı ve şev duraylılığı, taban stabilitesi ve erişim koşulları üzerinde doğrudan etkili olabilir. Benzer biçimde kazının derinleşmesi, destek elemanlarının devreye alınması, ankraj germe sırası, yeni sürşarjlar ve komşu imalatlar güvenlik profilini zaman içinde değiştirebilir. Bu nedenle geoteknik İSG, yalnız işe başlangıçta hazırlanan statik bir kontrol listesi değil; saha gözlemi, ölçüm ve geri besleme ile güncellenen bir süreç olarak ele alınmalıdır (Lin et al., 2021).

Geoteknik iş güvenliğinde tehlikenin doğru tanımlanması, gelişme mekanizmasının gözlenebilir veya ölçülebilir göstergelerle ilişkilendirilmesine bağlıdır. Şev çatlakları, deformasyon eğilimi,

piezometrik seviye, destek yükleri, yüzey hareketleri, titreşim, sürşarj değişimi, çalışma platformundaki rutlanma ve su/kum gelişi gibi işaretler, çalışan maruziyeti ve olası sonuçlarla birlikte yorumlandığında önleyici karar üretilebilir. Böylece değerlendirme, yalnız 'göçük', 'devrilme' veya 'yaralanma' sonucunu adlandırmak yerine tehlikenin nasıl geliştiğini ve hangi noktada kontrol edilebileceğini görünür kılar.

Türkiye'deki 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ile Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği, işverenin güvenli çalışma koşullarını sağlama yükümlülüğünü ve yapı işlerinde asgari güvenlik gereklerini tanımlamaktadır. Ancak mevzuata uyum, doğal zemin ve kaya ortamındaki belirsizliği tek başına ortadan kaldırmaz. Bu nedenle güvenli şev geometrisi, uygun iksa ve destek sistemi, yeraltı suyu kontrolü, yeterli çalışma platformu, güvenli yapım sırası ve geoteknik izleme gibi mühendislik kontrollerinin; idari önlemler ve kişisel koruyucu donanımdan önce veya onlarla birlikte değerlendirilmesi gerekir (ILO, 2022; Republic of Türkiye, 2012; Republic of Türkiye Ministry of Labour and Social Security, 2013).

Bu çalışmada geoteknik tehlike, 'geoteknik/operasyonel koşul → tehlike mekanizması → erken uyarı veya gözlenebilir gösterge → çalışan maruziyeti → olası sonuç → mühendislik ve İSG kontrolü → doğrulama/geri besleme' zinciri içinde ele alınmıştır. Bu yaklaşım, zemin-kaya davranışı, hidrojeolojik koşullar, yapım yöntemi, ekipman etkileşimi ve çalışan konumunu aynı karar çerçevesinde birleştirmekte; tehlikenin mümkün olduğunca kaynağında kontrol edilmesini ve saha koşulları değiştikçe değerlendirmelerin güncellenmesini esas almaktadır.

Literatürde geoteknik saha kazaları, belirli geoteknik sistemlerin teknik güvenilirliği ve tünel/yeraltı risk yönetimi üzerine önemli çalışmalar bulunmakla birlikte, bu bilgi kümeleri çoğu kez ortak bir önleme yapısı içinde birleşmemektedir. Özellikle geoteknik mekanizma ile çalışan maruziyeti, erken uyarı

göstergeleri, uygulanabilir mühendislik kontrolleri ve kontrolün doğrulanması arasındaki ilişkinin farklı geoteknik faaliyetler için tek bir çerçevede gösterilmesi sınırlıdır. Bu boşluk, faaliyetler arası karşılaştırılabilir ve sahada kullanılabilir mekanizma-temelli bir kontrol yapısına gereksinim olduğunu göstermektedir.

Geoteknik Mühendisliğinde İSG Literatürü

Geoteknik Mühendisliğinde İSG literatürü üç ana eksende gelişmiştir: gerçekleşmiş olaylardan kaza sıklığı, şiddeti ve kök nedenleri çıkaran veri tabanı çalışmaları; belirli geoteknik sistemlerde stabilite, güvenilirlik ve yapım riskini inceleyen teknik çalışmalar; tünel ve yeraltı işlerinde faaliyet veya görev bazlı risk yönetimi araştırmaları. Bu çalışmalar geoteknik koşulların çalışan güvenliği üzerindeki önemini ortaya koymakla birlikte, geoteknik mekanizmanın saha göstergesi, çalışan maruziyeti ve önleyici kontrolle aynı zincirde ele alınması bakımından parçalı bir görünüm sunmaktadır (Einstein, 1996; Akboğa Kale & Eskişar, 2018; Lin et al., 2021; Eskesen et al., 2004).

Kaza verilerine dayalı araştırmalar, geoteknik saha olaylarının ağır sonuçlar üretebildiğini ve yalnız fiziksel koşulların değil davranışsal ve organizasyonel etkenlerin de önemli olduğunu göstermektedir. Buna karşılık derin kazı, ankraj, tünel ve benzeri sistemlere odaklanan teknik çalışmalar; zemin değişkenliği, yeraltı suyu, deformasyon, destek sistemi ve yapım sırası gibi mühendislik değişkenlerini ayrıntılı biçimde ele almaktadır. Bu iki yaklaşımın birlikte değerlendirilmesi, çalışan güvenliğinin yalnız genel şantiye kurallarıyla değil, tehlikeyi üreten geoteknik mekanizmanın kontrolüyle sağlanabileceğini göstermektedir.

Literatür değerlendirilmesi

Literatürdeki çalışmalar değerlendirildiğinde üç ortak sonuç öne çıkmaktadır.

1. Geoteknik kaza sonuçları, zemin/kaya davranışı ile saha organizasyonunun birlikte etkisindedir.

2. Risk düzeyi yapım aşaması boyunca değişmekte; ölçüm, gözlem ve güncel saha verisinin karar sürecine katılması gerekmektedir.
3. Araştırmalar kazı, hendek, derin kazı ve tünel alanlarında daha yoğunken; sondaj, kazık, zemin iyileştirme, çalışma platformu ve bazı mesleki maruziyetlerin bütüncül İSG bağlamında daha sınırlı ele alındığı görülmektedir.

Bu durum, farklı geoteknik faaliyetlerde ortak olan mekanizmaları ve faaliyete özgü tehlikeleri aynı yapıda gösterebilen bir envanter gereksinimini ortaya çıkarmaktadır. Ağır ekipman-zemin etkileşimi, yeraltı suyu, geçici destek sistemleri ve değişen yapım sırası birçok faaliyeti kesen ortak unsurlar iken; yüksek basınçlı enjeksiyon, kazık çakma ekipmanı, insan girişli şaftlar veya tünel atmosferi gibi riskler belirli uygulamalara özgüdür.

Araştırma boşluğu ve bu çalışmanın özgün katkısı

Bu çalışma açısından dört araştırma boşluğu belirlenmiştir:

- Geoteknik kaza verilerinin mekanizma-maruziyet-kontrol ilişkisiyle sistematik eşleştirilmesinin sınırlı olması;
- Farklı geoteknik faaliyetlerin ortak bir İSG çerçevesinde birlikte ele alınmaması;
- İnsan/organizasyon faktörleri ile zemin-kaya, su, deformasyon ve stabilite faktörlerinin çoğu kez ayrı analitik düzlemlerde değerlendirilmesi;
- Gelişmiş risk modellerinin saha göstergeleri ve uygulanabilir kontrollerle her zaman doğrudan ilişkilendirilmemesi.

Bu boşluklara karşılık çalışma, geoteknik koşuldan başlayarak mekanizma, gösterge, maruziyet, sonuç, kontrol ve doğrulamaya uzanan bütüncül bir karar zinciri önermektedir. Böylece örneğin yeraltı suyu yükselmesi yalnız 'su tehlikesi' olarak

değil; dayanım ve stabilite üzerindeki etkisi, gözlenebilir belirtileri, çalışanın tehlike alanındaki konumu ve uygun su/stabilite kontrolleriyle birlikte değerlendirilmektedir.

Çalışmanın özgün katkısı, literatür ve teknik rehberlerden türetilen 48 maddelik ön tehlike envanterini çapraz tekrar ve kapsam kontrolünden geçirerek 58 maddelik mekanizma-temelli bir kontrol listesine dönüştürmesi ve her maddeyi teknik/operasyonel koşul, mekanizma, erken uyarı veya gözlenebilir gösterge, çalışan maruziyeti, olası sonuç, kontrol, kontrol hiyerarşisi ve doğrulama/geri besleme alanlarıyla ilişkilendirmesidir.

Bu çerçevede çalışma üç soruya yanıt aramaktadır: (1) Geoteknik uygulamalarda çalışan güvenliğini tehdit eden başlıca teknik ve operasyonel mekanizmalar nelerdir? (2) Bu mekanizmaların gelişimi sahada hangi gözlenebilir veya ölçülebilir göstergelerle izlenebilir? (3) Tehlike zincirini kaynağında kesmek veya çalışan maruziyetini azaltmak için hangi mühendislik ve İSG kontrolleri uygulanabilir?

Literatürdeki temel çalışmaların kapsam, yöntem ve bu araştırma açısından taşıdığı işlev aşağıda özetlenmiştir.

Çalışma	Kapsam / yöntem	Temel bulgu	Bu çalışma açısından önemi
Suruda et al. (1988)	306 ölümcül hendek göçmesi olayı	Destekleme eksikliği ve sığ hendeklerde dahi ölümcül göçmeler	Kazı stabilitesi ile çalışan güvenliği arasındaki doğrudan ilişki
Arboleda & Abraham (2004)	296 ölümcül hendek olayı; fiziksel ve davranışsal nedensellik	Fiziksel süreç ve insan faktörü birlikte etkili	İki disiplinli geoteknik + İSG yaklaşımını destekler
Akboğa Kale & Eskişar (2018)	247 geoteknik saha kazası; OSHA veri madenciliği	Yüksek tekrarlanma ve %54,3 ölümcül olay oranı	Geoteknik işlerin ayrı bir İSG araştırma alanı olduğunu gösterir
Aneziris et al. (2010)	Tünel yapımında 17 iş pozisyonu; WORM	Meslek/görev bazında risk profilleri farklı	Çalışan maruziyetinin faaliyet bazında ele alınmasını destekler
Eskişar & Akboğa Kale (2022)	84 kazık çakma kazası	Güvensiz saha koşulları ve yöntem/tutum faktörleri öne çıkıyor	Kazık/sondaj faaliyetlerinin özel risklerini gösterir
Lin et al. (2021)	Kazı risk yöntemleri; bulanık modeller, ML, sensör/BIM	Statik ve öznel yaklaşımdan dinamik/veri temelli yaklaşıma geçiş	Geoteknik göstergelerin risk değerlendirmesine katılmasını destekler
Bozkurt & Akbaş (2023)	20 m ankrajlı derin kazı; olasılıksal FEM	Zemin değişkenliği ve doygun bantlar ankraj kapasitesini etkiler	Geoteknik belirsizliğin güvenlik riskine etkisini gösterir
Akboğa Kale et al. (2024)	1.010 geoteknik saha olayı; veri madenciliği + ANN	%57,2 ölümcül olay; göçme/çarpma ve davranışsal nedenler	Güncel ve geniş geoteknik kaza veri tabanı kanıtı
Aslan (2022)	İnşaat faaliyetlerinde Fine–Kinney	Risklerin nicel önceliklendirilmesine olanak	Sayısal İSG risk yöntemlerinin saha uygulamasına örnek oluşturur

Yakın dönemdeki geoteknik çalışmalar, tasarım ve yapım güvenliğinin izleme, kalite yönetimi ve karar desteği ile birlikte ele alınması gerektiğini güçlendirmektedir. Derin kazı ve temel uygulamalarında saha-pratik yaklaşımı, geoteknik enstrümantasyonun karar süreçlerine aktarılması, su tetiklemeli şev/heyelan mekanizmalarının yönetimi ve simülasyon-temelli

karar desteği; ölçüm ve gözlemin yalnız kayıt amacıyla değil, yapım sırasında müdahale ve geri besleme üretmek amacıyla kullanılmasının önemini göstermektedir (Sahabandu, 2024; Indraratna et al., 2024; Thakur et al., 2024; Abraham et al., 2025).

Metot

Bu çalışma, geoteknik saha çalışmalarında çalışan güvenliğini etkileyen teknik ve operasyonel tehlikelerin kaynak-temelli olarak tanımlanması, sınıflandırılması ve uygulanabilir bir kontrol listesine dönüştürülmesi amacıyla yürütülen yöntemsel ve kavramsal bir çalışmadır. Yeni bir şantiye veri seti, çalışan anketi, uzman paneli, deneysel ölçüm veya yeni bir kaza veri tabanı oluşturulmamış; analiz birimi bilimsel yayınlarda, düzenleyici dokümanlarda ve geoteknik teknik rehberlerde tanımlanan tehlike mekanizmaları ile bunlara bağlı kontrol yaklaşımları olmuştur.

Kaynak tabanı; geoteknik saha kazaları ve risk faktörlerini ele alan hakemli çalışmalar, çalışan güvenliğine ilişkin mevzuat ve düzenleyici dokümanlar ile kazı, iksa, ankraj, sondaj-kazık, çalışma platformu, zemin iyileştirme, tünel ve geoteknik izleme gibi faaliyetlere ilişkin teknik rehberlerden oluşturulmuştur. Çalışma sistematik derleme veya meta-analiz olarak tasarlanmamış; kaynaklar, temel tehlike mekanizmalarını ve kontrol önlemlerini temsil edecek biçimde amaçlı ve tematik olarak değerlendirilmiştir.

Bir tehlikenin değerlendirmeye alınması için beş ölçüt birlikte aranmıştır: geoteknik koşul, yapım aşaması, ekipman veya çalışma ortamıyla doğrudan ilişki; çalışan/operatör/üçüncü kişi maruziyetinin açıklanabilir olması; fiziksel, geoteknik veya operasyonel mekanizmanın teknik olarak tanımlanabilmesi; bilimsel veya kurumsal kaynakla desteklenebilmesi; gözlenebilir/ölçülebilir göstergeler ve uygulanabilir mühendislik/İSG kontrolleriyle ilişkilendirilebilmesi. Böylece yalnız '*kaza*', '*yaralanma*', '*göçük*' veya '*devrilme*' gibi sonuç ifadelerinin tehlike adı olarak kullanılmasından kaçınılmıştır.

Tehlikeler dokuz faaliyet/maruziyet grubunda kodlanmıştır: kazı-hendek-şev (K), derin kazı-iksa (D), ankraj-zemin çivisi (A), geoteknik izleme (I), insan girişli temel kuyusu/şaft (KT), sondaj-kazık (S), zemin iyileştirme-kompaksiyon (Z), tünel-yeraltı (T) ve mesleki maruziyetler (M). Aynı genel sonucu doğuran kayıtlar, mekanizma, maruziyet yolu veya kontrol stratejisi farklıysa ayrı tutulmuştur. Çalışmada sayısal risk puanı veya yüksek-orta-düşük sınıflaması yapılmamış; amaç nedensellik ve kontrol mantığını görünür kılmak olmuştur.

48 Maddelik Ön Envanterden 58 Maddelik Mekanizma Temelli Kontrol Listesine Güncelleme

İlk kaynak taraması ve kodlama sonunda dokuz grup altında 48 maddelik bir ön tehlike envanteri oluşturulmuştur. Her kayıt, geoteknik/operasyonel koşul, mekanizma, çalışan maruziyeti ve olası sonuç açısından incelenmiş; teknik doğruluğun yanında sahada anlaşılabilirlik gözetilmiştir. Ön envanter, daha sonra kontrol listesine dönüştürülmek üzere çapraz tekrar ve kapsam kontrolüne tabi tutulmuştur.

Çapraz değerlendirmede benzer kayıtlar yalnız sonuçlarına göre değil, tehlikenin kaynağı, fiziksel/geoteknik mekanizması, maruziyet yolu ve gerekli kontrol yaklaşımı bakımından karşılaştırılmıştır. Aynı mekanizma ve aynı temel kontrolü temsil eden tekrarlar ortaklaştırılmış; farklı mekanizma veya maruziyet yolu taşıyan kayıtlar ayrı korunmuştur. Bu inceleme sırasında ilk envanterde yeterince görünür olmayan hareketli ekipman-çalışan etkileşimi, iç destek montaj/sökümü, komşu yapı stabilitesi, ankraj test davranışı, izleme verisinin güvenilirliği ve alarm-eylem zinciri, şaft iletişim/kurtarma düzeni, basınçlı hat arızaları, enerji hatları, yeraltı trafiği, yangın/kaçış ve mesleki maruziyetler eklenerek nihai liste 58 maddeye ulaşmıştır.

Tablo 1. Araştırma tasarımı ve 58 maddelik kontrol listesinin geliştirilme aşamaları

Aşama	Temel işlem	Karar / değerlendirme ölçütü	Araştırma çıktısı
1. Kaynak setinin oluşturulması	Hakemli çalışmalar, düzenleyici belgeler ve geoteknik teknik rehberlerin belirlenmesi	Geoteknik saha İSG'si, tehlike mekanizması, maruziyet veya kontrol ile doğrudan ilişki	Analitik kaynak korpusu
2. Tehlike çıkarımı	Geoteknik/operasyonel koşul, mekanizma, maruziyet, sonuç ve kontrol bilgilerinin çıkarılması	Beş dâhil etme ölçütünün birlikte karşılanması	Aday tehlike kayıtları
3. Kodlama ve bağlamsal ayrıştırma	Kayıtların faaliyet gruplarına kodlanması; benzer kayıtların neden-maruziyet-kontrol açısından karşılaştırılması	Aynı sonucun farklı mekanizma veya kontrol gerektirmesi durumunda maddelerin ayrı tutulması	48 maddelik ön tehlike envanteri
4. Çapraz tekrar ve kapsam incelemesi	Faaliyetler arası tekrarların, boşlukların ve ortak mekanizmaların yeniden karşılaştırılması	Aynı teknik mekanizma ve aynı kontrol yaklaşımı tekrar ediyorsa birleştirme/çapraz referans; bağımsız mekanizma varsa ayrı madde	Revize aday madde seti
5. Kontrol listesine operasyonelleştirme	Her maddenin gösterge, maruziyet, sonuç, kontrol, kontrol hiyerarşisi ve doğrulama alanlarıyla yapılandırılması	Kaynak-temelli ve sahada değerlendirilebilir bir karar zinciri kurulması	Mekanizma temelli checklist kayıtları
6. Nihai sentez	Dokuz faaliyet/maruziyet grubunun bütünleştirilmesi ve son tekrar kontrolü	İzlenebilirlik, mekanizma ayrışması ve kontrol uygulanabilirliği	58 maddelik İSG kontrol listesi ve bütünleşik önleme çerçevesi

Tehlike çıkarımı, kodlama ve kapsam kontrolü

Nihai kodlama dokuz grup altında korunmuş; her madde faaliyete özgü teknik nedeni, mekanizmayı, maruziyeti ve kontrol yaklaşımını ayırt edecek biçimde tanımlanmıştır. Bu yapı, aynı

sonucun farklı uygulamalarda farklı neden ve kontrol gerektirebildiğini korurken, faaliyetler arası ortak mekanizmaların da görünür olmasını sağlamıştır. Kaynak-temelli çıkarım ve ilk kodlama aşamasında 48 maddelik bir ön tehlike envanteri oluşturulmuş; çapraz tekrar kontrolü ve kapsam tamamlama aşamalarının ardından dokuz faaliyet/maruziyet grubunda 58 maddelik nihai mekanizma-temelli İSG kontrol listesine ulaşılmıştır.

Çapraz tekrar kontrolü ve 58 maddelik nihai listenin oluşturulması

Ön envanterin nihai listeye dönüşümünde temel karar ölçütü, tekrarın yalnız sözcük benzerliğiyle değil teknik nedensellikle değerlendirilmesidir. Böylece aynı fiziksel mekanizma ve aynı kontrol yaklaşımına sahip kayıtlar birleştirilmiş; çalışan konumu, ekipman enerjisi, hidrojeolojik süreç veya doğrulama yöntemi farklı olan kayıtlar ayrı maddeler olarak korunmuştur.

Bu kapsam tamamlama adımı sonucunda 58 maddelik liste, yalnız geoteknik stabilite tehlikelerini değil; ekipman-zemin etkileşimi, izleme ve alarm, erişim-kurtarma, basınçlı sistemler, enerji hatları, yeraltı trafik/yangın güvenliği ile solunabilir silika, çimentolu malzemeler ve dizel egzozu gibi mesleki maruziyetleri de ortak mekanizma mantığı içinde kapsamıştır.

Mekanizma temelli kontrol listesi yapısı

Her kontrol maddesi ortak bir mühendislik karar zincirine bağlanmıştır: tehlike/koşul, mekanizma, erken uyarı veya gözlenebilir gösterge, çalışan maruziyeti, olası İSG sonucu, kontrol önlemi ve doğrulama/geri besleme. Uygulamayı kolaylaştırmak için kontrol hiyerarşisi ve kontrol listesi durumu alanları da eklenmiştir. Böylece kontrol listesi yalnız *'tehlike var/yok'* formu olmaktan çıkarılarak tehlikenin nasıl geliştiğini ve hangi noktada önlenebileceğini gösteren bir yapıya dönüştürülmüştür.

Kontrol listesi durumu 'Uygun', 'Aksiyon gerekli' ve 'Uygulanamaz' seçeneklerinden oluşur. Bu sınıflandırma nicel risk skoru değildir; saha verisi olmaksızın varsayımsal olasılık veya şiddet puanı üretmek yerine, gerekli kontrolün mevcut olup olmadığını ve etkinliğinin doğrulanıp doğrulanmadığını görünür kılmayı amaçlar.

Kontrol mekanizması ve doğrulama yaklaşımı

Kontrol önlemleri, mümkün olduğunca tehlikenin ortadan kaldırılması/ikamesi ve mühendislik kontrollerinden başlayarak idari-organizasyonel kontroller ve kişisel koruyucu donanımla tamamlanacak biçimde ele alınmıştır. Güvenli şev geometrisi, uygun iksa, yeraltı suyu kontrolü, çalışma platformu, yapım sırası, ekipman-çalışan ayrımı, havalandırma ve geoteknik izleme kaynağa yakın kontroller olarak önceliklendirilmiştir. Her maddede kontrolün varlığı kadar, görsel inceleme, ölçüm, enstrümantasyon, kayıt incelemesi, ekipman fonksiyon testi veya ilgili teknik kontrol yoluyla etkinliğinin doğrulanması da esas alınmıştır.

Bulgular: Nihai kontrol listesinin genel yapısı

Kaynak-temelli çıkarım, ilk kodlama, çapraz tekrar kontrolü ve kapsam tamamlama adımları sonunda dokuz faaliyet/maruziyet ailesinde 58 maddelik mekanizma temelli bir İSG kontrol listesi oluşturulmuştur. Nihai dağılım; kazı-hendek-şev grubunda 10, derin kazı-iksa grubunda 8, ankraj-zemin çivisi grubunda 5, geoteknik izleme grubunda 3, insan girişli temel kuyusu/şaft grubunda 7, sondaj-kazık grubunda 7, zemin iyileştirme-kompaksiyon grubunda 5, tünel-yeraltı grubunda 8 ve mesleki maruziyet grubunda 5 maddedir. Tablo 2, her bir tehlikeyi mekanizma, erken uyarı/gösterge, çalışan maruziyeti, olası İSG sonucu, kontrol, kontrol hiyerarşisi ve doğrulama boyutlarıyla birlikte vermektedir.

Tablo 2.1a. Geoteknik saha çalışmaları için 58 maddelik mekanizma temelli İSG kontrol listesi – tehlike, mekanizma ve maruziyet bileşenleri

Kod	Faaliyet	Tehlike / koşul	Mekanizma	Erken uyarı / gözlenebilir gösterge	Çalışan maruziyeti	Olası İSG sonucu
K-01	Kazı/şev	Zemin veya kaya koşullarının yanlış tanımlanması; uygun olmayan şev geometrisi	Kayma dayanımının yetersiz kalması; düzlemsel, dairesel veya lokal yenilme	Yeni çatlak, lokal dökülme, şev yüzünde hareket, kabarma, beklenmeyen su çıkışı	Çalışan/ekipmanın olası göçme etki alanında bulunması	Göçük altında kalma, ezilme, ağır/ölümcül yaralanma
K-02	Kazı/şev	Kazı kenarında hafriyat, araç veya ağır ekipman sürşarjı	Kenar bölgesindeki gerilmelerin artması ve stabilitenin azalması	Kenar çatlağı, lokal oturma, palet/teker izleri, kazı yüzünde deformasyon	Kenar yakınında çalışanlar ve ekipman operatörleri	Kenar göçmesi, ekipman devrilmesi, ezilme
K-03	Kazı/şev	Yağış, yüzey suyu veya yeraltı suyu nedeniyle dayanım kaybı	Efektif gerilmenin ve kayma dayanımının azalması; erozyon ve yumuşama	Su sızıntısı, bulanık akış, yüzey erozyonu, yumuşama, yeni çatlak/deformasyon	Su etkisindeki kazı/şev yakınında çalışanlar	Kayma, göçme, mahsur kalma, boğulma riski
K-04	Hendek	Yetersiz, eksik veya yanlış kurulmuş iksa sistemi	İksa elemanlarında kapasite/bağlantı kaybı ve yan duvar stabilitesinin bozulması	Eğilme, gevşek bağlantı, toprak akması, iksa arkasında boşluk/deformasyon	Hendek içinde veya iksa yakınında çalışanlar	Ezilme, göçük altında kalma
K-05	Hendek	Hendek koruma kutusu (trench box/shield)'ın yanlış konumlandırılması veya hareket sırasında yanlış kullanılması	Korunan hacmin kaybı veya shield'ın kontrolsüz hareketi	Shield çevresinde aşırı boşluk, uygunsuz kot, hareket sırasında çalışan varlığı	Shield içinde/çevresinde çalışanlar	Sıkışma, ezilme, mahsur kalma
K-06	Kaya şevi	Süreksizlik kontrollü blok/kama instabilitesi	Eklem/çatlak yönelimi ve serbest yüz nedeniyle kaya düşmesi veya kama kayması	Açılan çatlak, gevşek blok, taze kırılma yüzeyi, küçük taş düşmeleri	Şev tabanı veya düşme hattındaki çalışanlar	Çarpma, ezilme, ölümcül yaralanma
K-07	Kazı/hendek	Güvensiz giriş-çıkış, kenardan düşme ve yukarıdan malzeme düşmesi	Yetersiz erişim ve kenar/üst kot koruması	Eksik/uygunsuz merdiven, bariyer eksikliği, kenarda gevşek malzeme	Kazıya giriş-çıkış yapan veya tabanda çalışan personel	Düşme, çarpma, baş-vücut yaralanması
K-08	Kazı/hendek	Yeraltı servisleri ve enerji hatlarının belirlenmemesi	Kazı ekipmanının elektrik, gaz, su veya diğer gömülü hatlarla teması	İşaretlenmemiş hat güzergâhı, plan-saha uyumsuzluğu,	Kazıcı operatörü ve yakın çalışanlar	Elektrik çarpması, gaz/su boşalması, yangın, ikincil göçme

Kod	Faaliyet	Tehlike / koşul	Mekanizma	Erken uyarı / gözlenebilir gösterge	Çalışan maruziyeti	Olası İSG sonucu
				beklenmeyen boru/kablo		
K-09	Derin/kapalı kazı	Tehlikeli atmosfer veya yetersiz havalandırma	Yetersiz hava değişimi; oksijen azalması veya zararlı/yanıcı gaz birikmesi	Gaz ölçümünde sapma, koku/duman, çalışanlarda baş dönmesi/irritasyon, yetersiz hava akımı	Derin veya kısmen kapalı kazıda çalışanlar	Zehirlenme, bilinç kaybı, yangın/patlama, ölüm
K-10	Kazı/hendek	Hareketli iş makinesi/kamyon ile çalışan etkileşimi	Kör nokta, geri hareket, dar çalışma alanı ve yaya-araç güzergâh çakışması	Yaya-ayrımının olmaması, geri manevra, sınırlı görüş, ikaz sisteminin çalışmaması	Kazı kenarı ve erişim yollarındaki yaya çalışanlar	Çarpma, sıkışma, üzerinden geçilme, ağır/ölümcül yaralanma
D-01	Çelik düşey elemanlı/Berlin duvarı	Çelik eleman ve yatay kaplama elemanı yerleştirilirken montaj/stabilite problemi	Montaj kusuru, eleman düşmesi veya elemanlar arasından zemin kaybı	Lagging arkasından malzeme akması, eleman sapması, gevşek bağlantı	Kazı yüzü ve montaj alanındaki çalışanlar	Çarpma, lokal göçme, sıkışma
D-02	Diyafram duvar	Panel hendeği ve destek bulamacı (slurry) destek stabilitesinin yetersizliği	Destek bulamacı (slurry) destekli hendekte stabilite kaybı veya zemin kaybı	Destek bulamacı (slurry) seviyesi/özelliğinde anormallik, zemin kaybı, panel kenarında çökme	Panel hendeği çevresindeki çalışanlar ve ekipman	Göçme, düşme, sıkışma
D-03	Derin kazı/iksa	Aşırı iksa duvarı deplasmanı ve kazı-destek sırasından sapma	Zemin-iksa etkileşiminde rijitlik/kapasite kaybı; aşırı deformasyon	İnklinometre artışı, yüzey çatlağı/oturma, strut/ankraj yükünde değişim	Kazı içindeki ve çevresindeki çalışanlar; komşu alanlar	Göçme, çevre hasarı, çalışan maruziyeti
D-04	Derin kazı	Taban kabarması (basal heave)	Gerilme boşalması ve düşük drenajsız kayma dayanımı	Tabanda kabarma, çatlak, ölçülen düşey hareket, desteklerde beklenmeyen deformasyon	Kazı tabanındaki çalışanlar ve ekipman	Ani deformasyon, lokal/genel göçme, sıkışma
D-05	Derin kazı	Hidrolik kaldırma, boiling veya piping	Yukarı yönlü hidrolik gradyan; efektif gerilme kaybı; tane taşınımı	Tabandan su-kum çıkışı, bulanık su, lokal kaynama, piezometrik yükselme	Kazı tabanı ve su giriş bölgesindeki çalışanlar	Su/zemin girişi, taban kaybı, göçme, mahsur kalma
D-06	Derin kazı/dewatering	Susuzlaştırmaya bağlı çevre zemin ve yapı oturması	Boşluk suyu basıncının azalması ve konsolidasyon	Komşu yapılarda çatlak, settlement point hareketi, piezometrik düşüş	Kazı çevresi çalışanları, üçüncü kişiler ve altyapılar	Yapı/servis hasarı ve dolaylı çalışan güvenliği riski
D-07	İç destek sistemi	Strut/raker/kuşak kirişi montajı, bağlantısı, aşırı yüklenmesi veya	Bağlantı kaybı, burkulma/aşırı yük veya yük yolunun kesilmesi	Eleman eğilmesi, bağlantı gevşemesi, kaynak/cıvata hasarı, duvar hareketi	Destek elemanı altında/yakınında veya söküm	Çarpma, sıkışma, lokal/sistemsel göçme, ağır/ölümcül yaralanma

Kod	Faaliyet	Tehlike / koşul	Mekanizma	Erken uyarı / gözlenebilir gösterge	Çalışan maruziyeti	Olası İSG sonucu
		güvensiz söküm sırası			bölgesindeki çalışanlar	
D-08	Derin kazı/komşu yapılar	Kazının komşu temel, duvar, yol veya yapıyı desteksiz bırakması	Temel altının oyulması/zemin desteğinin kaybı ve yük yolunun değişmesi	Komşu yapıda çatlak oluşumu/oturma, temel altında boşalma, kazı kenarında hareket	Kazı içi/çevresi çalışanları ve üçüncü kişiler	Yapısal hasar, lokal göçme, düşen eleman, ağır yaralanma
A-01	Zemin ankrajı	Ankraj delgisi, dönen ekipman ve basınçlı enjeksiyon sistemi tehlikeleri	Döner elemanla temas veya basınçlı sıvının kontrolsüz boşalması	Hortum/bağlantı kaçağı, titreşim, ekipman koruyucusunda eksik, anormal basınç	Delgi/enjeksiyon ekipmanı yakınındaki çalışanlar	Dolanma/ezilme, çarpma, enjeksiyon yaralanması
A-02	Zemin ankrajı	Germe/test sırasında tendon, ankraj başlığı veya kriko arızası	Yüksek elastik enerjinin ani kontrolsüz boşalması	Tendon/başlık deformasyonu, hidrolik kaçak, anormal ses/hareket, yük tutmama	Germe ekseninde veya ekipman yakınındaki çalışanlar	Yüksek enerjili çarpma, ağır/ölümcül yaralanma
A-03	Zemin çivisi	Delgi, çivi yerleştirme ve enjeksiyon sırasında geçici yüz stabilitesi	Henüz tam desteklenmemiş kazı yüzünde geçici stabilite kaybı ve ekipman etkileşimi	Yüzde dökülme/çatlak, lokal zemin akması, beklenmeyen deformasyon	Kazı yüzü yakınındaki çalışanlar	Zemin/kaya düşmesi, mahsur kalma, çarpma
A-04	Ankraj başlığı/kuşak kirişi	Ankraj başlığı, bearing plate, kuşak kirişi veya bağlantılarda yetersiz kapasite/kurulum	Ankraj kuvvetinin iksa sistemine düzensiz veya yetersiz aktarılması	Başlık/kuşak kirişi deformasyonu, gevşek/çatlak bağlantı, lokal duvar hareketi	Ankraj başlığı ve kuşak kirişi yakınındaki çalışanlar	Eleman hareketi/düşmesi, sıkışma; iksa performans kaybı
A-05	Ankraj kanıtlama/performans testi	Test sırasında aşırı ankraj deplasmanı, yetersiz bağ direnci veya aşırı iksa hareketi	Test yükünün bağ/zemin direncini veya lokal iksa kapasitesini aşması	Yük-deplasman eğrisinde anormallik, yüksek creep, ankraj başlığı/kuşak kirişi hareketi, duvar deplasmanı	Test düzeneği ve ankraj başlığı yakınındaki çalışanlar	Lokal destek deformasyonu, ani eleman hareketi, çarpma/sıkışma
I-01	Geoteknik izleme	İnklinometre/piezometre vb. kurulumu sırasında delgi, açık kuyu ve ekipman tehlikesi	Delgi/open bore ile çalışan-ekipman etkileşimi	Açık/korumasız kuyu, düzensiz platform, kontrolsüz ekipman hareketi	Cihaz kurulumu yapan saha ekibi	Düşme, mahsur kalma, çarpma
I-02	Geoteknik izleme	Cihaz arızası, hasar, kalibrasyon sorunu veya yetersiz ölçüm sıklığı nedeniyle güvenilmez/eksik veri	Gerçek davranış sürerken izleme sisteminin değişimi doğru/zamanında temsil edememesi	Veri kesilmesi, fiziksel olarak anlamsız sıçrama, referansla uyumsuzluk, sensör/kablo hasarı	Tehlike gelişimi fark edilmeden tehlike bölgesinde çalışmaya devam eden personel	Müdahalenin gecikmesi; progresif yenilmeye dolaylı maruziyet

Kod	Faaliyet	Tehlike / koşul	Mekanizma	Erken uyarı / gözlenebilir gösterge	Çalışan maruziyeti	Olası İSG sonucu
I-03	Geoteknik izleme/karar zinciri	Verinin geç değerlendirilmesi, alarm/action seviyelerinin yanlış tanımlanması	Erken uyarı bilgisinin zamanında mühendislik kararına/aksiyona dönüşmemesi	Artan deplasman hızı, piezometrik değişim, destek yükü artışı, eşik yaklaşımı/aşımı	Kabul edilebilir davranış sınırını aşmış sistemin etki alanındaki çalışanlar	Tahliye/müdahale gecikmesi; progresif göçme ve ağır/ölümcül olay
KT-01	İnsan girişli temel kuyusu/şaft	Yetersiz şaft cidarı desteği veya gecikmiş kaplama	Şaft çevresinde lokal/genel stabilite kaybı	Cidarda çatlak/dökülme, zemin akması, destek deformasyonu	Şaft içindeki çalışan	Göçük altında kalma, ezilme, ölüm
KT-02	İnsan girişli temel kuyusu/şaft	Ani su, kum veya zemin girişi	Yeraltı suyunun ve gevşek tabakanın kontrolsüz şaft içine girişi	Su debisi artışı, kum taşınımı, tabanda/duvarda sızıntı ve yumuşama	Şaft içindeki çalışanlar	Boğulma, mahsur kalma, göçme
KT-03	İnsan girişli temel kuyusu/şaft	Yetersiz havalandırma ve tehlikeli atmosfer	Kısıtlı doğal hava dolaşımı; oksijen azalması veya zararlı gaz birikmesi	Atmosfer ölçümünde sapma, kötü hava akımı, koku/duman, çalışan belirtileri	Şaft içindeki çalışanlar	Zehirlenme, bilinç kaybı, yangın/patlama, ölüm
KT-04	İnsan girişli temel kuyusu/şaft	Şaft ağzından malzeme, taş veya el aleti düşmesi	Yetersiz collar koruması ve malzeme kontrolü	Şaft ağzında gevşek malzeme, eksik bariyer/toe-board, kontrolsüz taşıma	Şaft tabanındaki çalışanlar	Baş/vücut yaralanması, ölümcül çarpma
KT-05	İnsan girişli temel kuyusu/şaft	Kova, halat, makara veya kaldırma sistemi arızası	Kaldırma elemanında kapasite/bağlantı kaybı veya kontrolsüz yük hareketi	Halat aşınması, bağlantı gevşemesi, anormal ses, fren/limit sorunu	Şaft içindeki ve kaldırma hattındaki çalışanlar	Çarpma, ezilme, düşen yük nedeniyle ölümcül yaralanma
KT-06	İnsan girişli temel kuyusu/şaft	Güvensiz giriş-çıkış ve yetersiz acil kurtarma/geri çıkarma düzeni	Tek/kısıtlı erişim yoluna bağımlılık ve gecikmiş tahliye	Engelli erişim, uygunsuz merdiven, kurtarma ekipmanının hazır olmaması	Şaft içindeki çalışanlar	Tahliye/kurtarmanın gecikmesi ve ölümcül sonucun ağırlaşması
KT-07	İnsan girişli temel kuyusu/şaft	Şaft-yüzey iletişimi, gözcü/gözcü ve çalışan sayımının yetersizliği	Olayın veya yardım ihtiyacının yüzey ekibince zamanında fark edilmemesi	İletişim cihazının çalışmaması, çağrıya yanıt yok, eksik giriş-çıkış kaydı, gözcü yokluğu	Şaft içinde yalnız/iletişimsiz kalan çalışan	Acil durumun geç fark edilmesi; kurtarmanın gecikmesi; ölümcül sonuç
S-01	Delgi/kazık/zemin iyileştirme	Ağır geoteknik makine için yetersiz çalışma platformu	Yetersiz taşıma gücü, seviye/drenaj veya lokal zayıflık nedeniyle diferansiyel oturma ve devrilme	Rutting, lokal çökme, su birikmesi, platform kenarında bozulma, makine eğimi	Rig operatörü ve çevredeki çalışanlar	Makine devrilmesi, ezilme, ölümcül yaralanma

Kod	Faaliyet	Tehlike / koşul	Mekanizma	Erken uyarı / gözlenebilir gösterge	Çalışan maruziyeti	Olası İSG sonucu
S-02	Delgi	Açık borehole/şafta düşme veya kuyu ağzı çevresinde lokal göçme	Açık boşluk ve lokal zemin instabilitesi	Korumasız kuyu ağzı, kenar çatlağı/çökmesi, gevşek zemin	Kuyu çevresinde çalışanlar	Düşme, göçük altında kalma
S-03	Delgi	Döner auger, rod veya drill string ile temas	Dönen mekanik parçaların giysi/uzvu yakalaması	Koruyucu eksikliği, çalışan yaklaşımı, temizleme/bakım sırasında enerji verilmesi	Rig çevresindeki saha personeli	Dolanma, uzuv yaralanması, ezilme
S-04	Delgi/kazık	Askıdaki casing, donatı kafesi, kazık veya uzun elemanın kontrolsüz hareketi	Ağır kaldırma ve sarkaç hareketi	Yük salınımı, uygunsuz sapan/kaldırma bağlantıları, kontrolsüz yönlendirme halatı, personelin yük düşme bölgesi içinde bulunması	Kaldırma alanındaki çalışanlar	Çarpma, sıkışma, ezilme
S-05	Kazık çakma	Pile-driving ekipmanı, yüksek darbe enerjisi ve yetersiz işaretleşme	Yüksek enerji, ağır eleman ve ekipman hareketinin çalışanla etkileşimi	Çalışanın tehlike bölgesine girmesi, iletişim/ikaz yetersizliği, kontrolsüz yük hareketi	Kazık çakma ekibi ve yakın çalışanlar	Çarpma, ezilme, ölümcül yaralanma
S-06	Delgi/kazık ekipmanı	Basınçlı hava/buhar/hidrolik hortum veya bağlantı arızası	Basıncın kontrolsüz boşalması ve hortum kamçılaması	Aşınmış hortum, sızıntı, hasarlı coupling, anormal titreşim/basınç	Hortum ve bağlantı yakınındaki çalışanlar	Çarpma, basınç/enjeksiyon yaralanması, ikincil düşme
S-07	Rig mast/boom ve uzun elemanlar	Enerjili havai elektrik hatlarına tehlikeli yaklaşma/temas	Mast/boom/yükün enerji hattına yaklaşması, ark veya doğrudan temas	Yetersiz açıklık, hat geriliminin/konumunun bilinmemesi, sınır işaretinin olmaması	Rig operatörü, banksman ve zemin ekibi	Elektrik çarpması, yanık, yangın, ikincil ekipman devrilmesi
Z-01	Jet grouting/enjeksiyon	Yüksek basınçlı grout, su veya hava hattının arızası	Yüksek basınçlı akışkanın kontrolsüz boşalması; hose whip/injection	Hortumda kabarma/aşınma, kaçak, hasarlı coupling, anormal basınç	Pompa/hat ve enjeksiyon başlığı yakınındaki çalışanlar	Enjeksiyon yaralanması, çarpma, göz/cilt yaralanması
Z-02	Jet grouting/deep mixing/enjeksiyon	İmalatın çevre zeminde kabarma, oturma, yanal hareket veya ilave yük oluşturması	Enjeksiyon/mixing kaynaklı basınç ve hacim değişiminin çevre zemine/iksa/yapıya aktarılması	Yüzey kabarması/çatlak, beklenmeyen geri dönen enjeksiyon malzemesi, survey/inclinometer değişimi, servis hattı deformasyonu	Çevre yapı/iksa/servis etkilenme alanındaki çalışanlar	Lokal hasar/göçme; servis kırılması; dolaylı çalışan maruziyeti

Kod	Faaliyet	Tehlike / koşul	Mekanizma	Erken uyarı / gözlenebilir gösterge	Çalışan maruziyeti	Olası İSG sonucu
Z-03	Silindir/dolgu/şev	Silindirin dolgu veya şev kenarına fazla yaklaşması	Araç ağırlığı ile kenar stabilitesinin etkileşimi ve zeminin kopması	Kenar çatlağı, rutting, düzensiz/gevşek dolgu, güvenli mesafenin ihlali	Operatör ve yakın çalışanlar	Araç devrilmesi, ezilme, ölüm
Z-04	Dinamik kompaksiyon	Ağır tokmağın kaldırılması/düşürülmesi, malzeme fırlaması ve krater	Yüksek darbe enerjisi ve ağır kaldırma	Düşme alanına çalışan yaklaşımı, krater oluşumu, malzeme saçılması	Tamper düşme alanı ve çevresindeki çalışanlar	Çarpma, ezilme, düşme
Z-05	Hızlı darbe kompaksiyonu (RIC)/vibro/taş kolon	Ağır ekipman ve tekrarlı dinamik yükleme sırasında lokal zemin bozulması/ekipman hareketi	Dinamik yükleme ve lokal densifikasyon/bozulma	Lokal çökme, aşırı titreşim, platform deformasyonu, ekipman eğimi	Operatör ve ekipman çevresindeki çalışanlar	Devrilme, mahsur kalma, titreşim maruziyeti
T-01	Tünel	Ayna, tavan, yan duvar ve destek/kaplama instabilitesi	Jeolojik süreksizlik, gerilme yeniden dağılımı, aşırı deformasyon veya yetersiz/gecikmiş destek	Çatlak, spalling, yakınsama artışı, steel-set deformasyonu, bolt/load değişimi, su girişi	Stabil olmayan zemin/destek yakınındaki çalışanlar	Kaya/zemin düşmesi, destek göçmesi, mahsur kalma, ezilme, ölüm
T-02	Tünel	Ani su veya çamur girişi	Basınçlı su yolları ve geçirgen/zayıf zonlardan kontrolsüz giriş	Debi artışı, su basıncı/sızıntı, çamurlu akış, sondajda beklenmeyen su	Ayna ve düşük kot bölgelerinde çalışanlar	Sel, mahsur kalma, boğulma, lokal göçme
T-03	Tünel/yeraltı	Yetersiz havalandırma ve zararlı/yanıcı atmosfer	Kısıtlı hava değişimi ile gaz, duman ve egzoz kaynaklarının birikmesi	O2/CO/NO2/alt patlama sınırı (LEL) ölçüm sapmaları, görünür duman, yetersiz hava akımı	Yeraltındaki çalışanlar	Zehirlenme, bilinç kaybı, yangın/patlama
T-04	Tünel/patlatma	Patlatma ve misfire riski	Patlayıcı enerjinin kontrolsüz/gecikmiş boşalması	Patlamamış delik şüphesi, ateşleme kaydı uyumsuzluğu, beklenmeyen patlayıcı kalıntı	Patlatma sonrası çalışma alanına giren personel	Ağır/ölümcül yaralanma
T-05	Tünel destek montajı	Çelik hasır/çelik iksa elemanlarının montajı	Yetersiz destekli zemine yakın ağır/keskin elemanların kontrolsüz hareketi	Gevşek hasır/çelik, uygunsuz askı/bağlantı, desteklenmemiş yüz	Montaj ekibi	Kesilme, çarpma, sıkışma, zemin düşmesi

Kod	Faaliyet	Tehlike / koşul	Mekanizma	Erken uyarı / gözlenebilir gösterge	Çalışan maruziyeti	Olası İSG sonucu
T-06	Püskürtme beton (püskürtme beton (shotcrete))	Püskürtme beton (püskürtme beton (shotcrete)) hortumu kamçılaması ve geri sekme/projektil etkisi	Basınçlı püskürtme ve malzeme geri sekmesi	Hortum hareketi/sızıntı, nozzle kontrol kaybı, aşırı geri sekme	Nozzleman ve yakın çalışanlar	Göz/yüz yaralanması, çarpma, ikincil düşme
T-07	Tünel/yeraltı nakliye	Yeraltında mobil ekipman-yaya etkileşimi	Dar güzergâh, kör nokta, geri hareket ve sınırlı kaçış alanı	Yaya/araç ayrımının olmaması, kör kavşak, arızalı ikaz/aydınlatma	Nakliye güzergâhındaki çalışanlar	Çarpma, sıkışma, üzerinden geçilme, ölüm
T-08	Tünel/yeraltı	Yangın/duman ile sınırlı kaçış ve acil tahliye	Tutuşma sonrası ısı/dumanın kapalı yeraltı ortamında yayılması ve kaçışı engellemesi	Duman/koku, sıcaklık artışı, fuel/hydraulic leak, elektrik arızası, alarm	Tek/uzun kaçış yoluna bağımlı yeraltı çalışanları	Yanık, duman inhalasyonu, görüş kaybı, mahsur kalma, ölüm
M-01	Mesleki maruziyet – gürültü	Delgi, kazık çakma, breaker, kompresör, püskürtme beton (shotcrete) ve kompaksiyon kaynaklı yüksek gürültü	Yüksek ve/veya impulsif ses basınç düzeyi	Gürültü ölçümünde yüksek değer, iletişim/uyarıların duyulamaması	Gürültü kaynağı yakınındaki çalışanlar	İşitme kaybı, tinnitus, iletişim kaybına bağlı ikincil kaza
M-02	Mesleki maruziyet – titreşim	El-kol ve tüm vücut titreşimi	Mekanik titreşimin tekrarlı/uzun süreli olarak vücuda aktarılması	Yüksek titreşimli ekipman, uzun kullanım süresi, kötü koltuk/zemin koşulu	Vibrasyonlu el aleti ve mobil ekipman operatörleri	Kas-iskelet ve dolaşım sistemi etkileri, yorgunluk
M-03	Mesleki maruziyet – solunabilir toz/silika	Kazı, kaya delgisi, kırma ve benzeri işlerde respirable dust/crystalline silica maruziyeti	İnce mineral partiküllerin solunum bölgesine ulaşması	Görünür toz, kuru işlem, yetersiz bastırma/emme; maruziyet ölçümünde yüksek değer	Toz kaynağına yakın çalışanlar	Solunum sistemi etkileri; silika içeren tozlarda ciddi uzun dönem mesleki hastalık riski
M-04	Mesleki maruziyet – çimento/grout/püskürtme beton (shotcrete)	Alkali bağlayıcılarla cilt-göz teması ve aerosol/sıçrama	Kostik/alkali malzemenin doğrudan teması veya aerosol/sıçrama	Grout/püskürtme beton (shotcrete) kaçağı-sıçraması, kirlenmiş eldiven/giysi, yetersiz yıkama imkânı	Karıştırma, enjeksiyon, püskürtme beton (shotcrete) ve hortum temizliği yapan çalışanlar	Dermatit, kimyasal yanık, göz/solunum irritasyonu
M-05	Mesleki maruziyet – dizel egzozu	Dizel ekipman egzozu ve yanma ürünlerine tekrarlı maruziyet	Dizel partikül maddesi ve CO/NOx vb. kirleticilerin yetersiz havalandırmada birikmesi	Görünür egzoz/duman, yetersiz hava akımı, aşırı rölanti, CO/NO2 artışı	Tünel, şaft veya zayıf havalandırılan geoteknik alandaki çalışanlar	Göz/solunum irritasyonu; akut ve uzun dönem solunum sağlığı etkileri

Tablo 2.1b. Geoteknik saha çalışmaları için 58 maddelik mekanizma temelli İSG kontrol listesi – kontrol, doğrulama ve kaynak bileşenleri

Kod	Kontrol önlemi	Kontrol hiyerarşisi	Doğrulama / geri besleme	Kontrol listesi durumu	Kaynak
K-01	Zemin-kaya koşullarının uygun tanımlanması; güvenli şev/kademeli şevlendirme/iksa tasarımı; koşul değişiminde yeniden değerlendirme	Mühendislik	Vardiya öncesi ve koşul değişiminden sonra şev/kazı kontrolü; tasarım-geometri uygunluk kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Suruda et al., 1988; OSHA, n.d.-a; OSHA, n.d.-g; OSHA, n.d.-h; Thakur et al., 2024; Otoma & Ayothiraman, 2025
K-02	Hafriyat ve ekipmanın güvenli geri çekilme mesafesinde tutulması; kenar yüklerinin tasarımda dikkate alınması	Mühendislik + İdari	Kenar mesafesi ve saha yerleşiminin günlük kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	NIOSH, 2026; OSHA, n.d.-d; Republic of Türkiye Ministry of Labour and Social Security, n.d.
K-03	Yüzey drenajı, suyun kazıdan uzaklaştırılması, uygun dewatering/drenaj ve gerekirse destekleme	Mühendislik	Yağış sonrası kontrol; su seviyesi/akış gözlemi; gerekiyorsa piezometrik izleme	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-d; ILO, 2022; Republic of Türkiye Ministry of Labour and Social Security, n.d.; Thakur et al., 2024
K-04	Tasarım ve zemin koşullarına uygun koruyucu sistem; doğru kurulum ve kademeli uygulama	Mühendislik	Yetkin kişi kontrolü; bağlantı/eleman ve hendek yüzü inspeksiyonu	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-e; Republic of Türkiye Ministry of Labour and Social Security, n.d.
K-05	Üretici/tasarım koşullarına uygun konumlandırma; hareket sırasında çalışanların güvenli bölgeye alınması	Mühendislik + İdari	Kullanım öncesi konum ve bütünlük kontrolü; hareket prosedürü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-e
K-06	Kaya kütlesi değerlendirmesi; scaling, ankraj/ağ/koruyucu bariyer veya uygun şev geometrisi	Mühendislik	Jeolojik yüzey kontrolü; gevşek blok inspeksiyonu; gerekiyorsa deformasyon izleme	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Einstein, 1996; ILO, 2022
K-07	Güvenli erişim; kenar koruması; malzemelerin kenardan uzak tutulması; düşen cisim kontrolü	Mühendislik + İdari	Erişim ve bariyerlerin vardiya öncesi kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-d; ILO, 2022; Republic of Türkiye Ministry of Labour and Social Security, n.d.

Kod	Kontrol önlemi	Kontrol hiyerarşisi	Doğrulama / geri besleme	Kontrol listesi durumu	Kaynak
K-08	Servis araştırması ve işaretleme; izinli kazı; gerektiğinde enerji izolasyonu ve kontrollü yaklaşım	Eliminasyon/İzolasyon + İdari	Güncel servis planı, saha işaretleri ve kazı öncesi doğrulama	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	NIOSH, 2026; OSHA, n.d.-d; Republic of Türkiye Ministry of Labour and Social Security, 2013; Republic of Türkiye Ministry of Labour and Social Security, n.d.
K-09	Giriş öncesi/iş süresince uygun atmosfer kontrolü; mekanik havalandırma; gerektiğinde erişim kısıtı ve tahliye	Mühendislik + İdari	Atmosfer ölçümü; havalandırma fonksiyon kontrolü; alarm/tahliye kriterleri	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-f; ILO, 2022
K-10	Yaya-araç ayrımı; kontrollü güzergâh; spotter/banksman; geri görüş/ikaz sistemleri; hız kontrolü	Mühendislik + İdari	Trafik planı, ikaz cihazı ve kör nokta kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-d; ILO, 2022
D-01	Tasarım sırasına uygun kurulum; geçici stabilite; bağlantı ve yatay kaplama elemanı kontrolü	Mühendislik	İmalat aşaması kontrolü; eleman/bağlantı inspeksiyonu	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Sabatini et al., 1997
D-02	Uygun destek bulamacı (slurry) seviyesi/özellikleri; panel kazısının kontrollü yürütülmesi; kenar koruması	Mühendislik	Destek bulamacı (slurry) parametreleri ve panel stabilitesinin saha kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Sabatini et al., 1997
D-03	Tasarlanan kazı-destek sırasına uyma; gerektiğinde ara destek ve tasarım revizyonu	Mühendislik + İdari	Deformasyon izleme; aşama kontrolü; alarm/eylem planı	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Bozkurt & Akbaş, 2023; Lin et al., 2021; Sabatini et al., 1997; Sahabandu, 2024
D-04	Taban stabilitesi kontrolü; kazı derinliği/sırası ve gerekirse taban iyileştirmesi/destek	Mühendislik	Taban deformasyon gözlemi/ölçümü; tasarım stabilite kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Sabatini et al., 1997
D-05	Dewatering/relief wells veya cutoff; piezometrik kontrol; kademeli kazı	Mühendislik	Piezometre, debi ve su-kum gözlemi; taban kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Sabatini et al., 1997
D-06	Dewatering tasarımı; kademeli pompalama; recharge/alternatif yöntem; çevre yapı izleme	Mühendislik	Piezometre ve oturma ölçümleri; komşu yapı/altyapı gözlemi	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Wu et al., 2019; Sabatini et al., 1997; Sahabandu, 2024
D-07	Tasarım kapasitesine uygun destek; güvenli montaj; alternatif yük yolu sağlanmadan sökmeme; kontrollü söküm	Mühendislik + İdari	Bağlantı ve deformasyon kontrolü; söküm öncesi mühendislik onayı	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Sabatini et al., 1997

Kod	Kontrol önlemi	Kontrol hiyerarşisi	Doğrulama / geri besleme	Kontrol listesi durumu	Kaynak
D-08	Ön durum incelemesi; underpinning/shoring/bracing; güvenli kazı geometrisi ve aşamalama	Mühendislik	Komşu yapı deformasyon takibi; kazı-temel kot ilişkisinin saha doğrulaması	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-d; Sabatini et al., 1997
A-01	Koruyucu sistemler; güvenli çalışma mesafesi; basınçlı bağlantı kontrolü; enerji kesme prosedürü	Mühendislik + İdari	Ekipman, hortum ve bağlantıların kullanım öncesi kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Sabatini et al., 1999
A-02	Kalibre ekipman; kontrollü test alanı; yük/enerji doğrultusu dışı çalışma; bağlantı ve tendon kontrolü	Mühendislik + İdari	Germe öncesi düzenek kontrolü; kalibrasyon ve yük kaydı	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Sabatini et al., 1999
A-03	Küçük kazı kademeleri; zamanında nail/püskürtme beton (shotcrete) desteği; yüz stabilitesinin sürekli değerlendirilmesi	Mühendislik + İdari	Her kazı kademesinde yüz kontrolü; destekleme gecikmesinin izlenmesi	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Lazarte et al., 2015
A-04	Tasarım detayına uygun bağlantı ve bearing; yük aktarım elemanlarının doğru montajı	Mühendislik	Bağlantı, kaynak/cıvata ve lokal deformasyon kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Sabatini et al., 1999; Lazarte et al., 2015
A-05	Tanımlı test prosedürü; kalibre sistem; yük limitlerine ve kabul kriterlerine uyma; anormal davranışta testi durdurma	Mühendislik + İdari	Yük-deplasman/creep kayıtları; kabul ve lock-off kriterlerinin doğrulanması	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Sabatini et al., 1999
I-01	Kurulum alanının güvenli düzenlenmesi; açık kuyunun korunması; ekipman erişim kontrolü	Mühendislik + İdari	Kurulum öncesi çalışma alanı ve kuyu ağzı kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Dunnicliff, 1998
I-02	Uygun cihaz seçimi; başlangıç ölçümü; koruma; kalibrasyon/fonksiyon kontrolü; tanımlı ölçüm sıklığı ve veri kalite kontrolü	Mühendislik + İdari	Veri sürekliliği ve kalite kontrolü; cihaz fonksiyon testi; gerekirse bağımsız ölçüm	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Dunnicliff, 1998; Indraratna et al., 2024
I-03	Önceden tanımlı inceleme-uyarı-eylem seviyeleri; sorumluluk ve bildirim zinciri; işi durdurma/tahliye prosedürü	İdari + Mühendislik izleme	Alarm kaydı, bildirim, mühendislik değerlendirmesi, aksiyon kaydının izlenmesi	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Lin et al., 2021; Dunnicliff, 1998; Indraratna et al., 2024
KT-01	Uygun casing/bracing/lining; kazıyla eş zamanlı ve gecikmesiz destekleme	Mühendislik	Her ilerleme kademesinde cidar ve destek kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-f; ILO, 2022
KT-02	Su kontrolü/dewatering; casing/lining; giriş kaynağının kontrolü; gerektiğinde çalışmayı durdurma	Mühendislik	Su seviyesi/debi ve cidar gözlemi; acil tahliye kriterleri	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	ILO, 2022

Kod	Kontrol önlemi	Kontrol hiyerarşisi	Doğrulama / geri besleme	Kontrol listesi durumu	Kaynak
KT-03	Giriş öncesi test; sürekli/periyodik izleme; mekanik havalandırma; kabul kriterleri ve tahliye	Mühendislik + İdari	Atmosfer ölçümü ve havalandırma fonksiyon kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-f; ILO, 2022
KT-04	Şaft ağzı bariyeri; malzeme kontrolü; düşen cisim önleme; uygun baş koruması	Mühendislik + İdari	Collar ve malzeme düzeninin vardiya öncesi kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-f; ILO, 2022
KT-05	Uygun kapasiteli kaldırma sistemi; düzenli inspeksiyon; yük emniyeti; limit/fren düzenekleri	Mühendislik + İdari	Vardiya öncesi hoist/rope/bucket kontrolü; periyodik muayene kayıtları	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-f; ILO, 2022
KT-06	Güvenli erişim; uygun geri çıkarma/kaldırma düzeni; önceden planlanmış kurtarma; erişimin açık tutulması	Mühendislik + İdari	Kurtarma ekipmanı ve erişim fonksiyon testi; tatbikat/plan uygunluğu	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-f; ILO, 2022; OSHA, n.d.-k
KT-07	Sürekli güvenilir iletişim; tanımlı gözcü/gözcü; giriş-çıkış takibi; acil çağrı düzeni	Mühendislik + İdari	Vardiya başlangıcında iletişim testi; kişi sayımı ve görevli kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-f; OSHA, n.d.-j
S-01	Tasarlanmış çalışma platformu; yeterli taşıma gücü/seviye/drenaj; kenar kontrolü; bakım ve yeniden değerlendirme	Mühendislik	Platform sertifikası/tasarım doğrulaması; günlük görsel kontrol ve bakım kaydı	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	EFFC & DFI, 2025; Schaefer et al., 2017
S-02	Bariyer/kapak; güvenli set-back; kuyu ağzı stabilitesi ve erişim kontrolü	Mühendislik + İdari	Kuyu ağzı ve bariyerlerin vardiya öncesi kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Brown et al., 2018; ILO, 2022
S-03	Guarding; güvenli yaklaşım mesafesi; enerji izolasyonu/LOTO; kontrollü rod işlemleri	Mühendislik + İdari	Koruyucu ve acil durdurma kontrolü; bakım öncesi izolasyon doğrulaması	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	ILO, 2022
S-04	Uygun sapan/kaldırma bağlantıları; kontrollü kaldırma; exclusion/fall zone; yönlendirme halatı ve işaretleşme	Mühendislik + İdari	Sapan/kaldırma bağlantıları/kanca/bağlantı kontrolü; kaldırma planı ve alan kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-c; Brown et al., 2018
S-05	Tehlike bölgesi; standart işaretleşme; güvenli kaldırma/çakma prosedürü; ekipman kontrolü	Mühendislik + İdari	Vardiya öncesi ekipman ve iletişim/işaret sistemi kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Eskişar & Akboğa Kale, 2022; OSHA, n.d.-c
S-06	Uygun basınç sınıfı hortum/bağlantı; restraint/safety chain; bakım öncesi izolasyon	Mühendislik + İdari	Kullanım öncesi hortum-coupling-restraint kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-c

Kod	Kontrol önlemi	Kontrol hiyerarşisi	Doğrulama / geri besleme	Kontrol listesi durumu	Kaynak
S-07	Mümkünse hattın enerjisiz bırakılması/taşınması; güvenli yaklaşma mesafesi; çalışma sınırı; spotter ve planlama	Eliminasyon/İzolasyon + Mühendislik + İdari	Hat gerilimi/konumu doğrulaması; yaklaşma mesafesi ve spotter kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-i
Z-01	Basınca uygun hortum/bağlantı; restraint; kontrollü basınç; izolasyon ve güvenli bakım	Mühendislik + İdari	Hat-bağlantı kontrolü; basınç kayıtları; sızıntı gözlemi	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Schaefer et al., 2017; Bellato et al., 2018
Z-02	Ön araştırma ve altyapı/servis hatları araştırması; tedavi geometrisi/basınç kontrolü; kademeli imalat; gerekiyorsa izleme	Mühendislik	Survey/instrumentation; grout/mixing parametre kayıtları; komşu yapı/servis kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Schaefer et al., 2017; Bellato et al., 2018
Z-03	Güvenli kenar mesafesi; dolgu kenarı stabilitesi; bariyer/işaretleme; kontrollü güzergâh	Mühendislik + İdari	Kenar ve güzergâhın vardiya öncesi kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	ILO, 2022
Z-04	Exclusion zone; kontrollü kaldırma/düşürme; krater alanı güvenliği; ekipman kontrolü	Mühendislik + İdari	Düşme alanı sınırı; sapan/kaldırma bağlantıları ve zemin yüzeyi kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Lukas, 1995
Z-05	Uygun platform ve çalışma dizisi; güvenli yaklaşım mesafesi; titreşim/zemin davranışının kontrolü	Mühendislik + İdari	Platform/zemin inspeksiyonu; operasyon parametreleri ve titreşim gözlemi	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Schaefer et al., 2017
T-01	Uygun destek tasarımı; zamanında destek; kontrollü kazı sırası; gerektiğinde güçlendirme ve su kontrolü	Mühendislik	Görsel kontrol; convergence/deformasyon izleme; destek/kaplama inspeksiyonu ve eşik kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Einstein, 1996; Eskesen et al., 2004; ILO, 2022
T-02	Ön araştırma/probe drilling; drenaj/grouting; su kontrolü; tahliye planı	Mühendislik	Debi/su basıncı gözlemi; probe sonuçları; kaçış yolu kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	Eskesen et al., 2004; ILO, 2022
T-03	Mekanik havalandırma; hava izleme; kirletici kaynağının kontrolü; alarm ve tahliye kriterleri	Mühendislik + İdari	Hava ölçümleri ve havalandırma performans kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-f; ILO, 2022
T-04	Yetkili patlatma prosedürü; alan boşaltma; misfire prosedürü; yeniden giriş kontrolü	Mühendislik + İdari	Patlatma kayıtları; yetkili kişi kontrolü; yeniden giriş onayı	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	ILO, 2022
T-05	Kontrollü kaldırma; geçici destek; güvenli montaj sırası; el/baş koruması	Mühendislik + İdari	Montaj ve bağlantı kontrolü; yüz stabilitesi doğrulaması	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	ILO, 2022

Kod	Kontrol önlemi	Kontrol hiyerarşisi	Doğrulama / geri besleme	Kontrol listesi durumu	Kaynak
T-06	Hortum/bağlantı emniyeti; nozzle kontrolü; exclusion zone; uygun göz-yüz ve baş koruması	Mühendislik + İdari + KKD	Hortum-bağlantı kontrolü; çalışma alanı ve KKD kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	ILO, 2022
T-07	Yaya-araç ayrımı; güvenli refuge/geçiş; aydınlatma; hız kontrolü; ikaz ve spotter	Mühendislik + İdari	Trafik güzergâhı, ikaz/aydınlatma ve ekipman inspeksiyonu	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-f
T-08	Yakıt/ateşleme kontrolü; yangın söndürme; acil aydınlatma/iletişim; açık kaçış güzergâhı ve tahliye planı	Mühendislik + İdari	Yangın ekipmanı, alarm/iletişim ve kaçış yolunun vardiya kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-f; ILO, 2022
M-01	Daha sessiz ekipman; izolasyon/susturucu; bakım; maruziyet süresi yönetimi; gerekli işitme koruması	Mühendislik + İdari + KKD	Gürültü ölçümü; ekipman bakım ve işitme koruyucu kullanım kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-b
M-02	Düşük titreşimli ekipman; bakım; koltuk/süspansiyon; süre/rotasyon yönetimi	Mühendislik + İdari	Ekipman durumu ve maruziyet süresi kayıtları; gerektiğinde titreşim ölçümü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	ILO, 2022
M-03	Islak yöntem; lokal emiş/vakum; toz bastırma; izolasyon; uygun çalışma yöntemi ve gerektiğinde solunum koruması	Mühendislik + İdari + KKD	Maruziyet değerlendirmesi/hava ölçümü; kontrol sisteminin fonksiyon kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-l
M-04	Kapalı/korumalı transfer; sıçrama kontrolü; hijyen; göz-yüz/el koruması; acil yıkama imkânı	Mühendislik + İdari + KKD	Sızıntı/sıçrama kontrolü; KKD ve yıkama istasyonu kontrolü	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, 2008
M-05	Mümkünse düşük/ sıfır emisyonlu ekipman; düzenli bakım; gereksiz rölantiyi azaltma; egzoz kontrolü ve mekanik havalandırma	Eliminasyon/İkame + Mühendislik + İdari	Havalandırma ve motor bakım kayıtları; CO/NO2 ve uygun hava kalitesi ölçümleri	□ Uygun □ Aksiyon gerekli □ Uygulanamaz	OSHA, n.d.-f; Bugarski et al., 2011

Kazı, hendek ve şev çalışmaları

Kazı, hendek ve şevlerde temel tehlike, zemin veya kaya kütlesinin kazı sonrasında yeni gerilme koşullarına uyum sağlayamaması ve duraylılığını kaybetmesidir. Uygun olmayan şev geometrisi, süreksizlik kontrollü kaya blokları, sürşarj, yağış, yeraltı suyu ve titreşim göçme mekanizmasını hızlandırabilir. Hendeklerde payandalama kazı yan yüzünü desteklerken, kalkan/trench box esas olarak çalışanı olası göçük kütlesinden korur; bu nedenle iki yaklaşım aynı kontrol olarak değerlendirilmemiştir. Nihai liste ayrıca kazı kenarı yükleri, güvenli giriş-çıkış, yeraltı/havai hatlar, tehlikeli atmosfer ve hareketli ekipman-çalışan etkileşimini ayrı maruziyet yolları olarak ele almaktadır (Suruda et al., 1988; OSHA, n.d.-a, n.d.-d, n.d.-e).

Derin kazı ve iksa sistemleri

Derin kazılarda güvenlik, zemin-destek sistemi etkileşiminin her kazı kademesinde yeterli kalmasına bağlıdır. Aşırı duvar deplasmanı, çevre oturması, destek kuvvetlerinde beklenmeyen değişim, taban kabarması, hidrolik kaldırma/borulanma ve kontrolsüz su girişi; göçme öncesi kritik göstergeler olabilir. Taban kabarması ile hidrolik kabarma/borulanma farklı fiziksel mekanizmalardır ve ayrı kontroller gerektirir. Çapraz değerlendirme ayrıca strut/raker/kuşak kirişi gibi iç desteklerin montaj-söküm güvenliği ile komşu yapı ve temel stabilitesini bağımsız kontrol maddeleri olarak belirginleştirmiştir (Sabatini et al., 1997; Bozkurt & Akbaş, 2023; Wu et al., 2019).

Ankraj, zemin çivisi ve geoteknik izleme

Ankraj ve zemin çivisi uygulamalarında delgi, tendon/donatı yerleştirme, enjeksiyon ve germe-test aşamalarının her biri farklı enerji ve maruziyet biçimleri üretir. Germe sırasında kriko, tendon ve ankraj başlığındaki depolanmış enerji; çalışanların

doğrultu hattında bulunması hâlinde ciddi sonuç doğurabilir. Proof/performance testleri ise yalnız ekipman güvenliği açısından değil, ankraj-zemin bağ kapasitesi ve iksa sisteminin test yükü altındaki davranışının doğrulanması bakımından da önemlidir. Geoteknik izleme grubunda ölçümün güvenilirliği ile doğru verinin zamanında değerlendirilip alarm/eylem zincirine dönüştürülmesi iki ayrı güvenlik gereksinimi olarak ele alınmıştır (Sabatini et al., 1999; Dunnicliff, 1998).

İnsan girişli temel kuyuları ve şaftlar

İnsan girişli temel kuyuları ve şaftlar, çalışanı dar ve sınırlı kaçış olanağı bulunan bir ortamda doğrudan zemin/kaya, su ve atmosfer tehlikelerine maruz bırakır. Çeper göçmesi, tabandan veya yandan su/zemin girişi, düşen cisimler, kaldırma operasyonları, yetersiz giriş-çıkış ve tehlikeli atmosfer aynı çalışma alanında birleşebilir. Bu nedenle yapısal desteklemenin yanında bağımsız erişim, şaft-yüzey iletişimi, içerideki çalışan sayısının izlenmesi, gözcü/attendant düzeni ve kurtarma hazırlığı ayrı kontrol gereksinimleri olarak değerlendirilmiştir (ILO, 2022; OSHA, n.d.-j, n.d.-k).

Sondaj ve kazık uygulamaları

Sondaj ve kazık uygulamalarında ağır ve yüksek ağırlık merkezli makineler, dönen elemanlar, açık delikler, uzun elemanlar ve askıdaki yükler aynı çalışma alanında bulunur. Bu grupta çalışma platformunun taşıma gücü, düzgünlüğü, drenajı ve kenar stabilitesi ekipman devrilmesi açısından temel geoteknik kontroldür. Kazık çakmada yüksek darbe enerjisi ve gürültü/titreşim; sondaj ve enjeksiyonlu işlemlerde ise döner parçalar, basınçlı hortum/bağlantılar ve yeraltı-havai hatlarla etkileşim ek riskler oluşturur. Nihai liste bu mekanizmaları ekipman bakımı, güvenli çalışma alanı, platform doğrulaması ve enerji kaynaklarının kontrolüyle ilişkilendirmektedir (Brown et al., 2018; OSHA, n.d.-c, n.d.-i; EFFC & DFI, 2025).

Zemin iyileştirme ve kompaksiyon

Zemin iyileştirme ve kompaksiyon faaliyetlerinde risk, yöntemle birlikte değişmektedir. Jet grouting ve deep mixing gibi uygulamalarda ağır ekipman-zemin etkileşimi, dönen parçalar ve yüksek basınçlı akışkanlar; dinamik kompaksiyon ve benzeri yüksek enerjili yöntemlerde ise düşürülen kütleler ve geniş etki alanları öne çıkar. Yol dolgusu, şev ve platformlarda kompaksiyon sırasında makinenin kenara fazla yaklaşması veya yerel stabilite kaybı devrilmeye dönüşebilir. Bu nedenle çalışma platformu/zemin yeterliliği, ekipman çevresinde güvenli mesafe, basınçlı sistem bütünlüğü ve uygulama alanının ayrılması temel kontrollerdir (Schaefer et al., 2017; Lukas, 1995; EFFC & DFI, 2025).

Tünel ve yeraltı çalışmaları

Tünel ve yeraltı çalışmalarında değişken jeolojik koşullar, sınırlı çalışma alanı ve kısıtlı kaçış olanakları nedeniyle çoklu tehlikeler aynı anda yönetilmelidir. Ayna veya tavan duraysızlığı, tahkimat gecikmesi, ani su/çamur girişi, zararlı veya yanıcı atmosfer, patlatma/misfire, ağır ekipman trafiği ve yangın/kaçış koşulları birbirini etkileyebilir. Kontrol listesi bu mekanizmaları zamanında destekleme, probe drilling ve su kontrolü, havalandırma ve atmosfer ölçümü, patlatma prosedürü, trafik ayrımı, haberleşme ve acil tahliye hazırlığıyla ilişkilendirmektedir (Eskesen et al., 2004; ILO, 2022; OSHA, n.d.-f).

Mesleki maruziyetler

Mesleki maruziyetler, geoteknik faaliyetlerin yalnız ani kaza değil uzun süreli sağlık etkileri de üretebildiğini göstermektedir. Kazık çakma, sondaj, dinamik kompaksiyon ve tünel işlerinde gürültü/titreşim; kuru delgi, kırma, püskürtme ve kazıda solunabilir toz ve kristalin silika; çimentolu malzemelerde kimyasal temas; yeraltı ve kapalı çalışma ortamlarında dizel egzozu öne çıkan maruziyetlerdir. Bu başlıklar farklı oluşum ve kontrol

mekanizmaları nedeniyle ayrı maddeler olarak korunmuş; kaynağa yönelik ekipman seçimi, izolasyon, havalandırma, toz bastırma, maruziyet süresi/mesafesi ve uygun kişisel koruma ile ilişkilendirilmiştir (OSHA, 2008, n.d.-b, n.d.-l; Bugarski et al., 2011).

Faaliyetler arası ortak örüntüler

Elli sekiz madde birlikte değerlendirildiğinde altı ortak neden boyutu ortaya çıkmaktadır: zemin/kaya ve hidrojeolojik koşullar; geoteknik tasarım ve geçici destek; yapım sırası ve değişiklik yönetimi; ekipman-zemin etkileşimi; çalışan maruziyeti ve iş organizasyonu; izleme-doğrulama-alarm zinciri. Yeraltı suyu bunun tipik örneğidir: aynı hidrojeolojik kaynak kazı/şev dayanım kaybı, derin kazıda kaldırma veya borulanma, dewatering kaynaklı çevre oturması ya da kuyu/tünelde ani su-zemin girişi biçiminde farklı mekanizmalara dönüşebilir. Benzer şekilde çalışma platformu yetersizliği sondaj, kazık ve zemin iyileştirme makinelerinde ortak bir devrilme mekanizmasıdır. Bu nedenle kontrol seçimi olay adından çok teknik nedene göre yapılmalıdır.

Tablo 3. Bütüncül geoteknik-İSG değerlendirme çerçevesinin güncellenmiş bileşenleri

Bileşen	Çerçevedeki anlamı	Kontrol listesinde kullanım
1. Koşul/kaynak	Zemin-kaya özellikleri, yeraltı suyu, sürşarj, geometri, yapım yöntemi, ekipman, platform, atmosfer veya maruziyet kaynağı.	Tehlikenin başladığı teknik/operasyonel durumu tanımlar.
2. Mekanizma	Kayma, göçme, piping, taban kabarması, aşırı deformasyon, devrilme, basınçlı boşalma, kaya düşmesi, atmosfer bozulması vb.	Koşulun neden tehlikeye dönüştüğünü açıklar.
3. Gösterge	Çatlak, su/kum gelişi, deformasyon artışı, cihaz değişimi, destek hasarı, platform rutlanması, gaz ölçümü vb.	Sapmanın gözlem/ölçümle nasıl fark edileceğini gösterir.
4. Maruziyet	Çalışan, operatör veya üçüncü kişinin etki alanındaki konumu; kaçış, süre ve yakınlık.	Teknik olayın çalışana hangi yoldan ulaştığını tanımlar.
5. Sonuç	Gömülme, ezilme, düşme, boğulma, yüksek enerjili çarpma, devrilme veya mesleki sağlık etkisi.	Olası İSG sonucunu tanımlar; sayısal risk puanı değildir.
6. Kontrol	Tehlikeyi ortadan kaldırma/azaltma, mühendislik, idari önlem ve gerektiğinde KKD.	Mekanizmayı veya maruziyeti kesen önlemi gösterir.
7. Doğrulama/geri besleme	Gözlem, ölçüm, inspeksiyon, test veya kayıt yoluyla kontrolün sahada etkili olduğunun teyidi.	Koşullar değiştiğinde yeniden değerlendirme ve eylemi tetikler.
Ek alan A: Kontrol hiyerarşisi	Eliminasyon/ikame, mühendislik, idari/organizasyonel ve KKD sınıflaması.	Kontrolün kaynağa ne kadar yakın olduğunu görünür kılar.
Ek alan B: Kontrol durumu	Uygun / Aksiyon gerekli / Uygulanamaz.	Checklistin saha veya proje incelemesinde işaretlenebilir alanıdır.

Tablo 4. Nihai kontrol listesinin faaliyet gruplarına göre dağılımı

Kod	Faaliyet / maruziyet grubu	Madde sayısı	Temel odak
K	Kazı, hendek ve şev	10	Zemin/kaya stabilitesi, su, koruyucu sistem, erişim, altyapı, atmosfer ve mobil ekipman
D	Derin kazı ve iksa	8	İksa sistemi, duvar hareketi, taban stabilitesi, hidrojeoloji, iç destek ve komşu yapılar
A	Ankraj ve zemin çivisi	5	Delgi/enchjeksiyon, germe enerjisi, yüz stabilitesi, yük aktarımı ve test davranışı
I	Geoteknik izleme	3	Kurulum tehlikesi, veri bütünlüğü ve alarm-eylem zinciri
KT	İnsan girişli temel kuyusu/şaft	7	Cidarı destekleme, su, atmosfer, düşen cisim, kaldırma, kurtarma ve iletişim
S	Sondaj ve kazık	7	Çalışma platformu, açık delik, döner/askıdaki eleman, yüksek enerji, basınçlı hat ve elektrik hattı
Z	Zemin iyileştirme ve kompaksiyon	5	Basınçlı enjeksiyon, zemin hareketi, kenar stabilitesi ve dinamik enerji
T	Tünel ve yeraltı	8	Stabilite/tahkimat, su, atmosfer, patlatma, shotcrete, trafik ve yangın/kaçış
M	Mesleki maruziyetler	5	Gürültü, titreşim, silika/toz, çimentolu malzeme teması ve dizel egzozu
Toplam	—	58	Dokuz faaliyet/maruziyet ailesi

Bütüncül Geoteknik–İSG Değerlendirme ve Önleme Çerçevesi

Bütüncül değerlendirme çerçevesinin amacı, 58 maddelik kontrol listesini sahada kullanılabilir ortak bir karar mantığına bağlamaktır. Her tehlike önce geoteknik veya operasyonel koşul üzerinden tanımlanır; ardından gelişme mekanizması, erken uyarı/gözlenebilir gösterge, çalışan maruziyeti ve olası sonuç belirlenir. Kontrol önlemi seçildikten sonra önlemin sahada gerçekten uygulandığı ve beklenen etkiyi ürettiği doğrulama/geri besleme adımıyla sınanır. Bu zincir, tasarım güvenliği ile çalışan güvenliğini aynı mühendislik karar sürecinde birleştirir.

Erken uyarı kavramı yalnız otomatik sensörleri ifade etmez. İnklinometre, piezometre, oturma ve destek kuvveti ölçümleri kadar yeni çatlaklar, su/kum gelişi, yüzey dökülmesi, destek hasarı,

platform rutlanması, makine eğimi, kaçak veya atmosfer ölçümleri de tehlike gelişiminin göstergesi olabilir. Kontrol hiyerarşisi içinde öncelik, mümkün olduğunca geometri, destek, su kontrolü, platform, ekipman ayrımı, havalandırma ve izleme gibi mühendislik önlemlerine verilmekte; idari önlemler ve kişisel koruyucu donanım bu kontrolleri tamamlamaktadır.

Çerçeve statik bir risk puanlama sistemi değildir. Geoteknik koşullar yapım boyunca değiştiği için tetikleyici-eylem mantığıyla kullanılmalıdır: önceden tanımlanan bir gösterge veya eşik aşıldığında yeni maruziyet durdurulur, çalışanlar etki alanından uzaklaştırılır, teknik neden değerlendirilir ve uygun düzeltici kontrol uygulandıktan sonra yeniden çalışma kararı verilir. Projeye özgü sayısal eşikler, izleme sıklıkları ve tasarım kriterleri yetkin geoteknik mühendislik hesabı ve ilgili mevzuat/standartlarla belirlenmelidir; bu çalışma bunların yerine geçmez.

Erken uyarı ve gözlenebilir göstergelerin güvenlikteki rolü

Geoteknik tehlikelerin önemli bir bölümü tamamen işaretsiz gelişmez; ancak belirtilerin niteliği ve gelişme hızı zemine, kaya kütlesine, su koşullarına ve yapım yöntemine göre değişebilir. Bu nedenle erken uyarı göstergeleri "göçme kesin olarak olacaktır" şeklinde yorumlanmamalı, sistem davranışındaki sapmayı ortaya koyan karar destek bilgileri olarak değerlendirilmelidir. Özellikle derin kazılarda artan duvar deplasmanı, çevre oturması, ankraj veya destek kuvvetindeki beklenmeyen değişim ve piezometrik seviyedeki yükselme; tasarım kabullerinin yeniden gözden geçirilmesini gerektirebilecek işaretlerdir. Bozkurt ve Akbaş (2023) zemin değişkenliğinin ankrajlı derin kazı sisteminin güvenilirliğini etkileyebildiğini; Wu ve arkadaşları (2019) ise yeraltı suyu düşürme işlemlerinin çevrede oturma oluşturabileceğini göstermiştir.

Kazı ve şevlerde göstergeler çoğu zaman daha doğrudan gözlenebilir niteliktedir. Kazı başında yeni çatlaklar, lokal yüzey

dökülmeleri, şev topuğunda kabarma, yağış sonrası yumuşama, su sızıntısının artması, kum veya ince malzeme taşınması ve kazı kenarındaki yüklerin değişmesi stabilite kaybının gelişebileceğini gösterebilir. Bu tür belirtiler tek başına mühendislik analizi yerine geçmez; ancak çalışanların tehlikeli alandan uzaklaştırılması ve yetkin teknik değerlendirme yapılması için bir tetikleyici olarak kullanılmalıdır. OSHA'nın kazı hükümleri çalışanların göçmeye karşı uygun koruyucu sistemlerle korunmasını ve su birikmesi gibi koşulların kontrolünü zorunlu kılarken, ILO'nun güncellenmiş inşaat güvenliği kodu da tehlikelerin önleme ve kontrolünü proje yaşam döngüsü boyunca ele almaktadır (ILO, 2022; OSHA, n.d.-d, n.d.-e).

Sondaj, kazık ve zemin iyileştirme makinelerinde erken uyarı yalnız zeminin duraylılığıyla sınırlı değildir. Çalışma platformunda derin rutlanma, lokal ezilme, yüzeyde su birikmesi, platform kenarına yaklaşma, makinenin düşeyliğinde bozulma veya beklenmeyen oturma, ağır ve yüksek ağırlık merkezli ekipmanların devrilme riskinin arttığını gösterebilir. EFFC/DFI çalışma platformu rehberi, ağır temel ve geoteknik ekipmanların güvenli çalışması için platformun tasarım, yapım, bakım ve doğrulanmasının bütüncül olarak ele alınmasını vurgulamaktadır (European Federation of Foundation Contractors & Deep Foundations Institute [EFFC/DFI], 2025).

Tünel ve yeraltı çalışmalarında ise kaya-zemin davranışına ilişkin belirtiler ile atmosferik göstergeler birlikte değerlendirilmelidir. Yeni çatlak, blok gevşemesi, tahkimatta deformasyon, aşırı su veya çamur girişi gibi jeoteknik belirtilerin yanı sıra oksijen, yanıcı veya zararlı gaz konsantrasyonları da doğrudan iş güvenliği kararını etkiler. OSHA'nın yeraltı inşaat standardı tünel, şaft ve yeraltı geçitlerinde havalandırma, atmosfer kontrolü, iletişim, yangın güvenliği ve şaftların desteklenmesi gibi gereklilikleri birlikte düzenlemektedir (OSHA, n.d.-f).

Kontrol mekanizması geoteknik mühendisliğine uyarlanması

Geoteknik tehlikelerde kontrol önlemlerinin sıralaması kritik öneme sahiptir. Bir göçme, kaya düşmesi veya ağır ekipman devrilmesi gibi yüksek enerjili olayların etkisi yalnız kişisel koruyucu donanımla ortadan kaldırılamaz. Bu nedenle temel yaklaşım, tehlikenin kaynağını mühendislik yoluyla ortadan kaldırmak veya etkisini kabul edilebilir düzeye indirmektir. Güvenli şev geometrisinin seçilmesi, yeterli iksa sisteminin kurulması, yeraltı suyu basıncının kontrolü, uygun çalışma platformu tasarımı, kaldırma ve ekipman geometrisinin sınırlandırılması, yüzey sularının uzaklaştırılması ve izleme sistemlerinin kurulması geoteknik açıdan birincil kontrollere örnektir. İdari önlemler, erişim kısıtlamaları, çalışma izinleri, haberleşme, işaretleme, vardiya kontrolleri ve acil durum prosedürleri bu mühendislik önlemlerini tamamlar; KKD ise son savunma katmanı olarak kalır (ILO, 2022).

Kontrol mekanizmasının geoteknik uygulamalardaki bir başka özelliği, önlemlerin yapım sırasına bağlı olmasıdır. Örneğin ankrajlı bir iksa sisteminde ankrajın zamanında gerilmesi, kuşak kirişinin bağlantılarının tamamlanması ve bir sonraki kazı kademesine ancak tasarlanan destek sistemi devreye alındıktan sonra geçilmesi doğrudan güvenlik kontrolüdür. Benzer şekilde tünelde çelik hasır, çelik iksa veya püskürtme betonun uygulanma zamanı; kuyu temelde kuyu çeperinin desteklenme hızı, zemin iyileştirmede yüksek basınçlı hatların izolasyonu ve makine çalışma alanının ayrılması, kontrolün yalnız "ne" olduğundan çok "ne zaman" uygulandığını da kritik hale getirir (FHWA, 1999, 2015; Eskesen et al., 2004).

Sınırlılıklar ve gelecek araştırmalar

Bu çalışma literatür, düzenleyici kurum dokümanları ve teknik geoteknik rehberlerin sentezine dayanan kavramsal bir çerçevedir. Yeni saha verisi, uzman ağırlıklandırması veya nicel

risk puanlaması içermediğinden maddeler arasında öncelik sırası üretmez; ayrıca erken uyarı göstergeleri proje özelindeki sayısal eşiklerin yerine kullanılmamalıdır. Çerçevenin farklı proje türlerinde kaza/ramak kala kayıtları, sensör verileri ve saha gözlemleriyle doğrulanması; özellikle çalışma platformu performansı, insan girişli kuyu temeller, zemin iyileştirme ve gerçek zamanlı izleme-İSG entegrasyonu alanlarında ek verilerle geliştirilmesi gerekmektedir.

Sonuç ve Öneriler

Bu kitap bölümünde geoteknik mühendisliği uygulamalarındaki iş sağlığı ve güvenliği, zemin-kaya özellikleri, hidrojeolojik koşullar, yapım yöntemi, ekipman etkileşimi, geçici yapım aşamaları, geoteknik izleme ve çalışan maruziyetinin birlikte belirlediği bütünleşik bir mühendislik güvenliği problemi olarak ele alınmıştır. Temel sonuç, geoteknik saha güvenliğinin bağımsız bir İSG kontrol alanı değil, tasarım ve yapım sürecinin doğrudan bir mühendislik çıktısı olduğudur. Güvenli çalışma için tasarım varsayımlarının sahada doğrulanması, koşul değişikliklerinin izlenmesi ve kontrollerin geri besleme yoluyla güncellenmesi gerekir.

Kaynak-temelli ilk kodlama 48 maddelik bir ön tehlike envanteri üretmiş; çapraz tekrar, mekanizma, maruziyet ve kontrol karşılaştırması ile kapsam tamamlama sonucunda dokuz faaliyet/maruziyet grubunda 58 maddelik nihai kontrol listesi oluşturulmuştur. Listenin ayırt edici yönü, her maddeyi yalnız sonuç adıyla değil; koşul/kaynak, mekanizma, erken uyarı veya gözlenebilir gösterge, çalışan maruziyeti, olası sonuç, kontrol, kontrol hiyerarşisi ve doğrulama/geri besleme ilişkisi içinde vermesidir.

Bulgular; mühendislik kontrollerinin geoteknik İSG'de merkezi rol taşıdığını, güvenliğin zamana ve yapım aşamasına bağlı olarak değiştiğini, izleme ve alarm-eylem zincirinin çalışan

güvenliği için doğrudan geri besleme sağladığını, ağır ekipman güvenliğinin çalışma zemini/platform performansından ayrı düşünülemeyeceğini ve çalışan maruziyetinin teknik mekanizma kadar belirleyici olduğunu göstermektedir. Gürültü, titreşim, silika, çimentolu malzemeler ve dizel egzozu gibi mesleki maruziyetlerin de aynı önleme çerçevesine dâhil edilmesi gerekir.

Çalışmanın temel sonuçları

Uygulamada ilk öncelik, yüksek enerjili veya hızlı gelişebilen olayların kaynağında mühendislik kontrolüyle önlenmesidir. Güvenli şev geometrisi, uygun iksa ve destek, yeraltı suyu kontrolü, yeterli çalışma platformu, zamanında tahkimat ve işleyen izleme sistemi bu nedenle aynı zamanda İSG kontrolleridir. Kişisel koruyucu donanım gerekli olmakla birlikte göçme, kaya düşmesi veya ekipman devrilmesi gibi temel mekanizmaların enerjisini ortadan kaldırmaz.

İkinci olarak kontrol listesi, tek seferlik bir kontrol formu yerine dinamik bir saha aracı olarak kullanılmalıdır. Kazının ilerlemesi, destek sırası, su koşulları, yağış, yeni sürşarjlar, ekipman konumu veya beklenmeyen zemin tabakaları güvenlik profilini değiştirebilir. Bu nedenle gözlem ve ölçüm sonuçları önceden belirlenen tetikleyicilerle ilişkilendirilmeli; kritik değişimlerde çalışma durdurma, alanı boşaltma, teknik inceleme ve yeniden başlatma koşulları açık biçimde tanımlanmalıdır.

Üçüncü olarak çalışan maruziyeti, aynı teknik mekanizmanın sonucunu değiştirebilir. Dar hendek, insan girişli şaft ve tünel gibi sınırlı kaçış ortamlarında güvenli giriş-çıkış, haberleşme, atmosfer kontrolü ve kurtarma hazırlığı; sondaj, kazık ve zemin iyileştirmede ise çalışma platformu, ekipman-çalışan ayrımı ve enerji kaynaklarının kontrolü kritik tamamlayıcı unsurlardır. Böylece güvenlik değerlendirmesi, yalnız sistemin stabilitesini değil çalışanın tehlike alanındaki konumunu da kapsar.

Tablo 5. Geoteknik uygulamalarda çalışmanın sonuçlarından türetilen temel güvenlik önerileri.

Uygulama alanı	Temel güvenlik ilkesi	İzlenecek tipik gösterge	Önerilen yönetim yaklaşımı
Kazı–hendek–şev	Stabiliteyi geometri, su, sürşarj ve koruyucu sistem üzerinden yönetmek	Çatlak, dökülme, topuk kabarması, su/kum gelişi	Koşul değişiminde yeniden değerlendirme ve gerekirse alanın boşaltılması
Derin kazı–iksa	Kazı-destekleme sırasını ve yeraltı suyunu birlikte kontrol etmek	Duvar deplasmanı, oturma, piezometrik seviye, destek hasarı	Proje özelinde alarm/eylem planı ve ölçüm temelli geri besleme
Sondaj–kazık–zemin iyileştirme	Makine ile çalışma zemininin birlikte tasarlanması	Rutlanma, lokal oturma, makine eğimi, basınç kaçağı	Platform ve ekipman kontrolü; tehlikeli çalışma alanının ayrılması
Kuyu temel–yeraltı	Çalışan maruziyetini ve kaçış/kurtarma koşullarını tasarımın parçası yapmak	Çeper hareketi, su girişi, atmosfer sapması	İnsan girişini azaltma; destek, atmosfer ve kurtarma sisteminin birlikte doğrulanması
Tünel	Jeolojik gözlem, tahkimat ve atmosfer yönetimini tek sistemde yürütmek	Blok gevşemesi, tahkimat deformasyonu, su/çamur girişi, gaz/oksijen sapması	İlerleme öncesi jeoteknik ve atmosferik doğrulama; güvenli yeniden giriş
Mesleki maruziyetler	Kaynakta ve iletim yolunda kontrolü KKD'den önce uygulamak	Gürültü/titreşim ölçümü, toz/aerosol yoğunluğu, maruziyet süresi	Ekipman, izolasyon, havalandırma ve süre yönetiminin birlikte uygulanması

Gelecekteki araştırmalara yönelik öneriler

Gelecekteki çalışmalar 58 maddelik çerçeveyi farklı proje türlerinde gerçek kaza, ramak kala, saha gözlemi ve sensör verileriyle doğrulayabilir. Özellikle çalışma platformu performansı, insan girişli kuyu/şaft uygulamaları, zemin iyileştirme faaliyetleri ve geoteknik izleme verilerinin gerçek zamanlı İSG kararlarına dönüştürülmesi öncelikli araştırma alanlarıdır. Yeterli veri oluştuğunda Fine-Kinney, olasılıksal güvenilirlik, Bayes ağları, bulanık karar modelleri veya makine öğrenmesi gibi nicel yöntemler çerçeveye eklenebilir; ancak sayısal skorların geoteknik koşul-mekanizma-maruziyet ilişkisini görünmez hâle getirmemesi gerekir.

Genel sonuç

Sonuç olarak geoteknik tasarım güvenliği ile çalışan güvenliği birbirinden bağımsız hedefler değildir. Doğru geoteknik çözüm sahada doğru sırada uygulanıp izlenmediğinde yeterli değildir; güçlü bir İSG yönetimi de tehlikenin mühendislik kaynağını kontrol etmediğinde tek başına etkili olamaz. Önerilen 58 maddelik mekanizma-temelli çerçeve, tehlikenin kazaya dönüşmeden önce hangi göstergelerle fark edilebileceğini, zincirin hangi noktada kırılabileceğini ve kontrolün nasıl doğrulanacağını görünür kılarak tasarım, yapım, saha gözlemi, izleme, ekipman yönetimi ve acil durum hazırlığını ortak bir önleme sistemi içinde birleştirmektedir.

Önerilen çerçevenin uygulamadaki en önemli karşılığı, kazadan sonra "hangi hata yapıldı?" sorusunu sormadan önce, kazaya dönüşebilecek mekanizmanın sahada hangi göstergelerle fark edilebileceğini ve hangi noktada zincirin kırılabileceğini belirlemektir. Güvenliğin tasarım, saha gözlemi, izleme, ekipman yönetimi, iş organizasyonu ve acil durum hazırlığının ortak sonucu olarak görülmesi, geoteknik faaliyetlerde daha proaktif bir güvenlik kültürünün kurulmasına katkı sağlayabilir.

Kaynakça

Abraham, M. T., Satyam, N., & Kowalski, J. (2025). Numerical modelling of debris flows for simulation-based decision support: An Indian perspective. Indian Geotechnical Journal, 55(4), 2680–2692. https://doi.org/10.1007/s40098-024-00988-5

Akboğa Kale, Ö., & Eskişar, T. (2018). Work-related injuries and fatalities in the geotechnical site works. Industrial Health, 56(5), 394–406.

Akboğa Kale, Ö., Eskişar, T., & Mortazavi, A. (2024). Safety evaluation in the geotechnical site applications: A comprehensive analysis and forecasting model. Safety Science, 173, 106451.

Aneziris, O. N., Papazoglou, I. A., & Kallianiotis, D. (2010). Occupational risk of tunneling construction. Safety Science, 48(8), 964–972.

Arboleda, C. A., & Abraham, D. M. (2004). Fatalities in trenching operations—Analysis using models of accident causation. Journal of Construction Engineering and Management, 130(2), 273–280.

Aslan, S. (2022). Risk assessment of construction works in city square using Fine Kinney method. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37, 329–340. [In Turkish].

Bellato, D., Schorr, J., & Spagnoli, G. (2018). Mathematical analysis of shadow effect in jet grouting. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 144(12), 04018088.

Bozkurt, S., & Akbaş, S. O. (2023). Finite element-based geotechnical risk analysis for anchor-supported deep excavations. Arabian Journal of Geosciences, 16(8), 470.

Brown, D. A., Turner, J. P., Castelli, R. J., & Loehr, E. (2018). Drilled shafts: Construction procedures and LRFD design

methods (Geotechnical Engineering Circular No. 10, FHWA-NHI-18-024). National Highway Institute, Federal Highway Administration. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/73033

Bugarski, A. D., Janisko, S. J., Cauda, E. G., Noll, J. D., & Mischler, S. E. (2011). Diesel aerosols and gases in underground mines: Guide to exposure assessment and control (Report of Investigations 9687, DHHS [NIOSH] Publication No. 2012-101). National Institute for Occupational Safety and Health. https://doi.org/10.26616/NIOSHPUB2012101

Dunnicliff, J. (1998). Geotechnical instrumentation reference manual (FHWA-HI-98-034). National Highway Institute, Federal Highway Administration. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/75281

Echt, A., Earnest, S., & Garza, E. (2019, June 6). Preventing trenching fatalities. NIOSH Science Blog, National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control and Prevention. https://www.cdc.gov/niosh/blogs/2019/trenching.html

European Federation of Foundation Contractors, & Deep Foundations Institute. (2025). EFFC/DFI guide to working platforms (2nd ed.). https://doi.org/10.37308/EFFC-DFI-WPTG-GUIDEe2-2025

Einstein, H. H. (1996). Risk and risk analysis in rock engineering. Tunnelling and Underground Space Technology, 11(2), 141–155.

Eskesen, S. D., Tengborg, P., Kampmann, J., & Veicherts, T. H. (2004). Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2. Tunnelling and Underground Space Technology, 19(3), 217–237.

Eskişar, T., & Akboğa Kale, Ö. (2022). Evaluation of pile driving accidents in geotechnical engineering. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 28(1), 625–634.

Ilbahar, E., Karaşan, A., Cebi, S., & Kahraman, C. (2018). A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system. Safety Science, 103, 124–136.

International Labour Organization. (2022). Safety and health in construction: ILO code of practice (Rev. ed.). International Labour Office. https://www.ilo.org/resource/other/safety-and-health-construction-revised-edition

Indraratna, B., Malisetty, R. S., Nair, L., & Rujikiatkamjorn, C. (2024). Instrumentation and data interpretation in transportation geotechnics. Indian Geotechnical Journal, 54, 40–62. https://doi.org/10.1007/s40098-023-00765-w

Kinney, G. F., & Wiruth, A. D. (1976). Practical risk analysis for safety management (NWC Technical Publication 5865). Naval Weapons Center.

Lazarte, C. A., Robinson, H., Gomez, J. E., Baxter, A., Cadden, A., & Berg, R. R. (2015). Geotechnical Engineering Circular No. 7: Soil nail walls—Reference manual (FHWA-NHI-14-007). National Highway Institute, Federal Highway Administration. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/40556

Lin, S. S., Shen, S. L., Zhou, A., & Xu, Y. S. (2021). Risk assessment and management of excavation system based on fuzzy set theory and machine learning methods. Automation in Construction, 122, 103490.

Lin, S. S., Zhang, N., Zhou, A., & Shen, S. L. (2022). Risk evaluation of excavation based on fuzzy decision-making model. Automation in Construction, 136, 104143.

Lin, S. S., Zhou, A., & Shen, S. L. (2023). Safety assessment of excavation system via TOPSIS-based MCDM modelling in fuzzy environment. Applied Soft Computing, 138, 110206.

Liu, S., Song, Z., Zhang, Y., Guo, D., Sun, Y., Zeng, T., & Xie, J. (2023). Risk assessment of deep excavation construction based on combined weighting and nonlinear FAHP. Frontiers in Earth Science, 11, 1204721.

Lukas, R. G. (1995). Geotechnical Engineering Circular No. 1: Dynamic compaction (FHWA-SA-95-037). Federal Highway Administration. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/40768

National Institute for Occupational Safety and Health. (2026, July 16). Trenching and excavation safety. Centers for Disease Control and Prevention. https://www.cdc.gov/niosh/trenching/about/index.html

Occupational Safety and Health Administration. (2008). Preventing skin problems from working with Portland cement (OSHA 3351-07). U.S. Department of Labor. https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA-3351-portland-cement.pdf

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.-a). 29 CFR 1926 Subpart P—Excavations. U.S. Department of Labor. Retrieved September 15, 2026, from https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926SubpartP

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.-b). 29 CFR 1926.52—Occupational noise exposure. U.S. Department of Labor. Retrieved September 15, 2026, from https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926.52

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.-c). 29 CFR 1926.603—Pile driving equipment. U.S. Department of Labor.

Retrieved September 15, 2026, from https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926.603

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.-d). 29 CFR 1926.651—Specific excavation requirements. U.S. Department of Labor. Retrieved September 15, 2026, from https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926.651

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.-e). 29 CFR 1926.652—Requirements for protective systems. U.S. Department of Labor. Retrieved September 15, 2026, from https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926.652

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.-f). 29 CFR 1926.800—Underground construction. U.S. Department of Labor. Retrieved September 15, 2026, from https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926.800

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.-g). 29 CFR 1926 Subpart P Appendix A—Soil classification. U.S. Department of Labor. Retrieved September 15, 2026, from https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926subpartpappa

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.-h). 29 CFR 1926 Subpart P Appendix B Sloping and benching. U.S. Department of Labor. Retrieved September 15, 2026, from https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926SubpartPAppB

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.-i). 29 CFR 1926.1408—Power line safety (up to 350 kV) Equipment operations. U.S. Department of Labor. Retrieved September 17,

2026, from https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926.1408

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.-j). 29 CFR 1926.1209—Duties of attendants. U.S. Department of Labor. Retrieved September 17, 2026, from https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926.1209

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.-k). 29 CFR 1926.1211—Rescue and emergency services. U.S. Department of Labor. Retrieved September 17, 2026, from https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926.1211

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.-l). 29 CFR 1926.1153—Respirable crystalline silica. U.S. Department of Labor. Retrieved September 17, 2026, from https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926.1153

Otoma, B. K., & Ayothiraman, R. (2025). State-of-the-art review on the use of micropiles in slope/landslide protection measures. Indian Geotechnical Journal, 55(3), 2030–2049. https://doi.org/10.1007/s40098-025-01190-x

Phoon, K. K., & Ching, J. (Eds.). (2015). Risk and reliability in geotechnical engineering (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b17970

Republic of Türkiye. (2012). 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu [Occupational Health and Safety Law No. 6331]. Resmî Gazete, 30 June 2012, No. 28339. [In Turkish].

Republic of Türkiye Ministry of Labour and Social Security. (2013). Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği [Regulation on Occupational Health and Safety in Construction

Works]. Resmî Gazete, 5 October 2013, No. 28786. [In Turkish].

Republic of Türkiye Ministry of Labour and Social Security. (n.d.). Kazı işlerinde tehlike ve riskler [Hazards and risks in excavation works]. İnşaat Sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği. Retrieved September 15, 2026, from https://guvenliinsaat.csgb.gov.tr/isg-konulari/kazi-isleri/

Sabatini, P. J., Elias, V., Schmertmann, G. R., & Bonaparte, R. (1997). Geotechnical Engineering Circular No. 2: Earth retaining systems (FHWA-SA-96-038). Federal Highway Administration. https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/library_listing.cfm

Sabatini, P. J., Pass, D. G., & Bachus, R. C. (1999). Ground anchors and anchored systems (Geotechnical Engineering Circular No. 4, FHWA-IF-99-015). Federal Highway Administration. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/712

Sahabandu, K. L. S. (2024). Advances in design and construction of deep excavations and foundations in Sri Lanka. Indian Geotechnical Journal, 54, 1856–1872. https://doi.org/10.1007/s40098-024-01007-3

Schaefer, V. R., Berg, R. R., Christopher, B. R., DiMaggio, J. A., Filz, G. M., Bruce, D. A., Ayala, D., & Collin, J. G. (2017). Geotechnical Engineering Circular No. 13: Ground modification methods reference manual (Vols. I–II; FHWA-NHI-16-027 & FHWA-NHI-16-028). National Highway Institute, Federal Highway Administration. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/40552

Suruda, A., Smith, G., & Baker, S. P. (1988). Deaths from trench cave-in in the construction industry. Journal of Occupational Medicine, 30, 552–555.

Thakur, V., Depina, I., Degago, S. A., Alene, G. H., Oguz, E. A., Singh, M., & Chandel, A. (2024). Landslide mitigation of urbanized slopes for sustainable growth: A summary of recent developments in structural and non-structural countermeasures to manage water-triggered landslides. Indian Geotechnical Journal, 54, 1751–1766. https://doi.org/10.1007/s40098-024-01042-0

Wu, Y. X., Lyu, H. M., Han, J., & Shen, S. L. (2019). Dewatering-induced building settlement around a deep excavation in soft deposit in Tianjin, China. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 145(5), 05019003.

BÖLÜM 9

HARÇ DOLGULU VE TAMAMI ÇELİK BURKULMASI ÖNLENMİŞ ÇAPRAZLARIN SÜRDÜRÜLEBİLİR DEPREM MÜHENDİSLİĞİ AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

BARIŞ SERİN[1]
MEHMET BAKIR BOZKURT[2]

Giriş

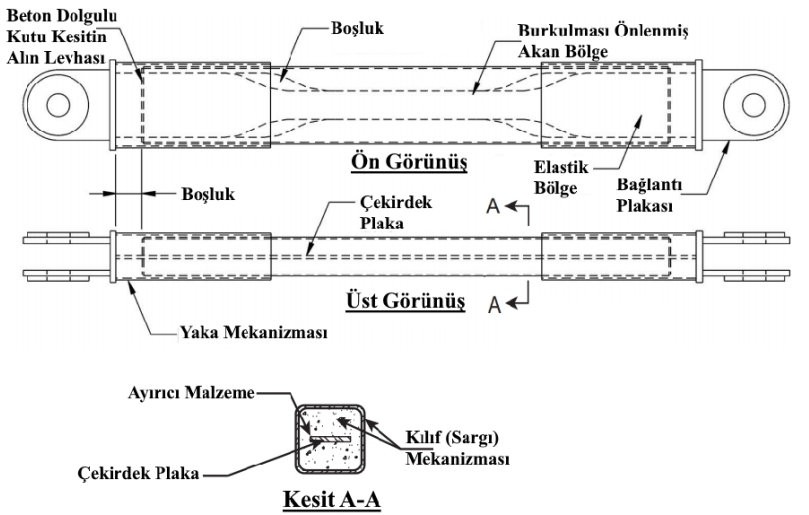
Yapıların sismik etkiler altında can güvenliğini sağlaması yapı mühendisliğinin temel önceliğidir. Bu hedefe ulaşmak için yapıya aktarılan deprem enerjisinin güvenli ve kontrollü bir biçimde sönümlenmesi gerekir. Pasif enerji sönümleyici sistemler hem yeni binaların tasarımında hem de mevcut betonarme ve çelik yapıların güçlendirilmesinde yaygın olarak tercih edilen etkili mühendislik çözümleridir.

Yapılarda yatay yük taşıyıcı sistemlerden biri olan geleneksel çelik çaprazlar, çekme kuvvetleri altında sünek bir davranış sergilerken basınç kuvvetleri altında burkulma sorunu ile karşılaşır.

[1] Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-1918-2786
[2] Doç. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-1213-3092

Basınç etkisindeki bu burkulma durumu elemanda ani dayanım ve rijitlik kayıplarına yol açarak yapının genel deprem performansını zayıflatır (Xie, 2005). Bu yapısal kusuru ortadan kaldırmak amacıyla 1970'li yıllarda Japonya'da yapılan öncü çalışmalarla temelleri atılan burkulması önlenmiş çaprazlar (BÖÇ), yük taşıyan çelik çekirdeğin basınç altında burkulmasını dış bir kılıf mekanizması yardımıyla engeller (Wakabayashi et al., 1973, Kimura et al., 1976). Çekirdek plaka, burkulmayı önleyen mekanizma (BÖM) ve bu iki bileşen arasındaki sürtünmeyi azaltan ayırıcı malzemeden oluşan BÖÇ elemanları, hem çekme hem de basınç yüklemeleri altında kararlı ve simetrik bir enerji sönümleme kapasitesine ulaşır (Watanabe et al., 1988, Wada et al., 1998, Uang & Nakashima, 2004, Fahnestock et al., 2007). Tipik bir BÖÇ elemanının bileşenleri Resim 1'de gösterilmiştir.

Resim 1 Tipik bir BÖÇ elemanı



Kaynak: Wada et al., 1998, Fahnestock et al., 2007 ve Serin, 2025'den derlenmiştir.

Uygulamada en sık karşılaşılan BÖÇ elemanları, çelik veya alüminyum bir çekirdek plakanın harç ya da beton dolgulu çelik bir

tüp içerisine yerleştirilmesiyle üretilir (Tremblay et al., 2006, Avci-Karatas et al., 2018). Sismik performans açısından başarılı olan bu harç dolgulu sistemler, sürdürülebilirlik ve deprem sonrası onarım süreçleri açısından önemli kısıtlamalar barındırır. Harç dolgusu elemanın toplam ağırlığını artırarak özellikle büyük açıklıklı yapılarda ve köprülerde nakliye ile şantiye içi montaj aşamalarını zorlaştırır. Ayrıca harcın priz alma ve kürlenme süreci imalat süresini uzatır. Daha da önemlisi, şiddetli bir deprem sonrasında plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı çekirdek plaka kapalı ve harç dolgulu kılıf içerisinde kaldığı için dışarıdan kontrol edilemez. Hasar alan çekirdek plakanın tek başına değiştirilmesi mümkün olmadığından BÖM yeniden kullanılamaz ve çapraz elemanın tamamı hurdaya çıkar. Literatürde harç veya beton dolgulu kılıfların bulonlarla birleştirilerek yeniden kullanıldığı bazı tasarımlar önerilmiş olsa da, tekrarlı depremler altında dolgu betonunda meydana gelen çatlama ve ezilmeler sistemin performansını düşürmekte ve ek onarım harcı gereksinimi doğurmaktadır (Cao et al., 2020, Bai et al., 2022).

Son yıllarda deprem mühendisliği yaklaşımı sadece can güvenliğini sağlamakla sınırlı kalmayıp yapıların deprem sonrasında hızla ve düşük maliyetle onarılabilmesini de kapsayacak şekilde genişlemiştir. Sürdürülebilir deprem mühendisliği anlayışı, yapısal elemanların onarım süreçlerinde doğal kaynak tüketiminin, inşaat atıklarının, zaman kaybının ve ekonomik maliyetlerin en aza indirilmesini hedefler. Harç dolgulu BÖÇ elemanlarının deprem sonrasında tamamen atığa çıkması, içerdiği priz almış harç nedeniyle geri dönüşüm için kırma ve ayrıştırma işlemlerine ihtiyaç duyması ve yeni elemanların sıfırdan üretilmesi sırasında yaşanan vakit kayıpları bu sürdürülebilirlik hedefleriyle örtüşmemektedir.

Harç dolgulu sistemlerin getirdiği bu ekolojik ve ekonomik sorunları aşmak amacıyla tamamı çelik malzemeden oluşan ve çekirdek plakası değiştirilebilen yenilikçi BÖÇ tasarımları geliştirilmiştir (Eryaşar & Topkaya, 2010, Bozkurt & Topkaya, 2016,

Dehghani & Tremblay, 2017). Bulonlu birleşimlerle bir araya getirilen tamamı çelik BÖM tasarımları, üretim aşamasında harç dökümü ve kürlenme ihtiyacını tamamen ortadan kaldırır (Metelli et al., 2016, Chen et al., 2016). Deprem sonrasında ise kılıf mekanizmasını oluşturan bulonlar kolayca sökülerek iç kısımdaki çekirdek plakanın hasar durumu doğrudan gözlemlenebilir (Wu et al., 2014, Qu et al., 2018). Bu modüler yapı sayesinde hasar gören çekirdek plaka kısa sürede yenisiyle değiştirilirken, dış kılıf mekanizması ve bağlantı elemanları performans kaybı yaşamadan tekrar kullanılır (Serin & Bozkurt, 2025). Böylece hem sıfır harç atığı prensibiyle çevresel zararlar önlenir hem de yapının deprem öncesi performansına minimum maliyet ve işgücü ile kavuşması sağlanır.

Bu kitap bölümünde, harç dolgulu BÖÇ sistemleri ile değiştirilebilir çekirdek plakasına sahip tamamı çelik BÖÇ sistemleri sürdürülebilir deprem mühendisliği ilkeleri çerçevesinde karşılaştırılmıştır. Değerlendirmelerde sıfır beton ve harç atığı oluşumu, kılıf mekanizmasının yeniden kullanılabilirliği, üretim ve onarım süreçlerindeki zaman tasarrufu ile işçilik ve malzeme maliyetleri odak noktası olarak alınmıştır. Deneysel olarak sismik performansı ve yeniden kullanılabilirliği kanıtlanmış olan tamamı çelik bir BÖÇ tasarımı (Serin & Bozkurt, 2025) üzerinden örnek bir harç dolgulu sistem ile somut karşılaştırmalar yapılarak inşaat sektörü için sürdürülebilir çözüm önerileri sunulmuştur.

Harç Dolgulu ve Tamamı Çelik Burkulması Önlenmiş Çaprazların Yapısal Özellikleri

Burkulması önlenmiş çaprazlar, geleneksel çelik çaprazların basınç yükleri altında burkulma nedeniyle yaşadığı ani dayanım ve rijitlik kayıplarını ortadan kaldırmak üzere tasarlanmış yapısal elemanlardır. Standart bir BÖÇ sistemi temel olarak çekirdek plaka,

burkulmayı önleyen mekanizma ve ayırıcı malzeme olmak üzere üç ana bileşenden meydana gelir (Uang & Nakashima, 2004).

Çekirdek plaka, yapıya etkiyen deprem kuvvetlerini taşıyan ve plastik şekil değiştirme ile sismik enerjiyi sönümleyen bileşendir. Genellikle sismik enerji tüketimini artırmak amacıyla sünek çelikten veya alüminyum alaşımlarından üretilir (Tremblay et al., 2006, Usami et al., 2012). Plastik şekil değiştirmelerin bağlantı bölgeleri yerine eleman ortasındaki akma bölgesinde yoğunlaşmasını sağlamak için çekirdek plakalar daraltılmış kesitli, sabit genişlikli, delikli veya kaynaklı bindirmeli gibi farklı geometrilerde imal edilir (Eryaşar & Topkaya, 2010, Piedrafita et al., 2013, Bozkurt & Topkaya, 2016).

Burkulmayı önleyen mekanizma ise çekirdek plakanın basınç kuvvetleri altında hem yerel hem de genel burkulmaya uğramasını kısıtlayan dış kılıf sistemidir. Çekirdek plaka ile dış kılıf arasına yerleştirilen ayırıcı malzeme, eksenel yükün kılıfa aktarılmasını engeller ve iki yüzey arasındaki sürtünmeyi en aza indirir. Ayrıca çekirdek plakanın basınç yüklemesi altında Poisson etkisiyle enine yönde genleşmesine imkan tanıyacak küçük bir boşluk oluşturur. Literatürde bu katman için epoksi, silikon kauçuk, polietilen film ve teflon gibi çeşitli malzemeler kullanılmıştır (Tsai et al., 2004, Özçelik et al., 2015, Bozkurt & Topkaya, 2016).

Uygulamada geleneksel olarak nitelendirilen harç dolgulu BÖÇ tasarımlarında dış kılıf mekanizması, içi beton veya yüksek dayanımlı harç ile doldurulmuş bir çelik boru veya dikdörtgen profilden oluşur. Üretim aşamasında üzerine ayırıcı katman sarılmış olan çelik çekirdek plaka çelik kutu veya boru profil içerisine yerleştirilir ve kalan boşluğa harç dökümü yapılır. Harç prizini aldıktan sonra çekirdek plakayı kesintisiz olarak saran rijit bir sargı ortamı oluşturur. Ancak bu kapalı ve monolitik yapı, elemanın tek parça halinde çalışmasına neden olur. Şiddetli bir deprem sonrasında kılıfın içindeki harç dolgu ve plastik deformasyona uğramış çekirdek

plaka birbirinden ayrılamaz. Bu yapısal özellik, geleneksel BÖÇ elemanlarının deprem sonrasında onarılmasını ve kılıf mekanizmasının tekrar kullanılmasını imkansız hale getirir.

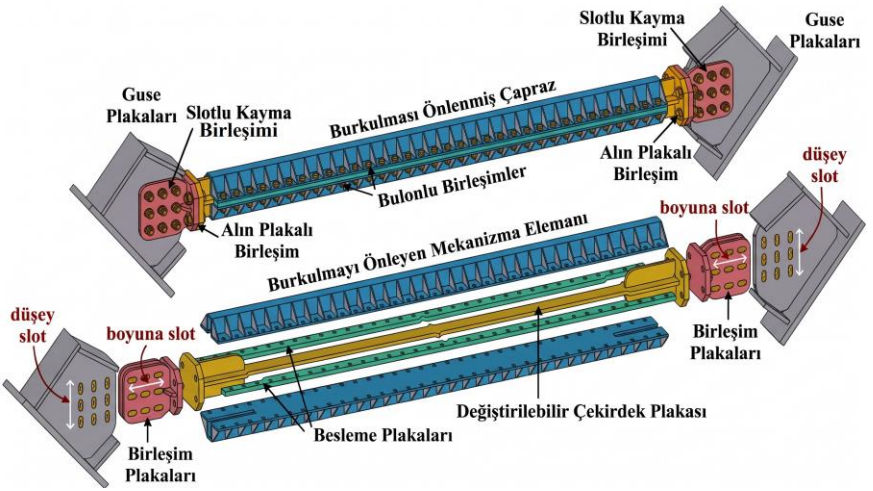
Harç dolgulu sistemlerin getirdiği bu yapısal kısıtlamaları ortadan kaldırmak amacıyla tamamı çelik malzemeden oluşan ve çekirdek plakası değiştirilebilen yenilikçi BÖÇ tasarımları geliştirilmiştir. Tamamı çelik BÖÇ sistemlerinde harç veya beton gibi hiçbir dolgu malzemesi kullanılmaz. Bunun yerine çekirdek plakanın burkulması, birbirine bulonlarla veya kaynakla bağlanan çelik profiller ve plakalar yardımıyla engellenir (Tremblay et al., 2006, Wu et al., 2014, Dehghani & Tremblay, 2017).

Bu bölüm kapsamında yapılan sürdürülebilirlik ve maliyet değerlendirmelerinde, Serin & Bozkurt (2025) tarafından geliştirilen ve deneysel olarak sismik performansı kanıtlanan değiştirilebilir çekirdek plakalı tamamı çelik BÖÇ sistemi esas alınmıştır. Söz konusu sistemde akma bölgesi daraltılmış, S235 çelik sınıfına sahip 18 mm kalınlığında standart bir çekirdek plakası kullanılmıştır. İmalat sürecinde malzemenin iç yapısını ısı girdisiyle bozmamak adına çekirdek plakalar lazer kesim teknolojisiyle üretilmiş ve kaynaklı berkitmeler akma bölgesinin dışına konumlandırılmıştır.

Tamamen çelik bileşenlerden oluşan BÖM, aralarına ayırıcı kılavuz plakalar yerleştirilerek 8.8 sınıfı M20 bulonlarla birleştirilen simetrik iki yarıdan meydana gelir. Her bir yarı, 2730 mm uzunluğundaki 10 mm kalınlıklı taban plakasına iki adet IPE 80 profilin ve 80 mm aralıklı berkitme levhalarının kaynaklanmasıyla teşkil edilmiştir. Kılıf mekanizmasının toplam ağırlığı 249 kg, çekirdek ve uç birleşim plakalarıyla birlikte çapraz elemanın toplam ağırlığı ise 396.5 kg seviyesindedir. Çekirdek plaka ile BÖM taban plakaları arasındaki sürtünmeyi en aza indirmek amacıyla 0.5 mm kalınlığında teflon levhalar kullanılmıştır. Ayrıca elemanın yapı çerçevesine bağlantısını sağlayan düğüm noktalarında, hem çapraz eksenine paralel hem de dik doğrultuda 30 mm genişliğinde slotlu

bulon delikleri açılmıştır. Sürtünme etkili M24 bulonlarla yapılan bu özel birleşim detayı, deprem sonrasında yapıda kalıcı ötelenmeler oluşsa dahi çapraz elemanın çerçeveden kolayca sökülüp yenilenmesine olanak tanır. Geliştirilen bu sistemin bileşenleri ve birleşim detayları Resim 2'de sunulmuştur.

Resim 2 Değiştirilebilir çekirdek plakalı tamamı çelik BÖÇ sistemi



Kaynak: Serin & Bozkurt (2025)

Geliştirilen bu tamamı çelik BÖÇ tasarımının sismik yeterliliği ve kılıf mekanizmasının yeniden kullanılabilirliği, yarı çerçeve deney düzeneğinde AISC 341-22 (American Institute of Steel Construction, 2022) standardına dayalı çevrimsel yükleme protokolü altında test edilmiştir. İlk aşamada BÖÇ numunesi test edilerek çekirdek plakası kopana kadar yüklenmiş, ardından aynı kılıf mekanizması sökülüp içerisine yeni bir çekirdek plakası ve yeni teflon katman yerleştirilerek yeni bir BÖÇ numunesi oluşturulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda hem ilk kullanımdaki BÖÇ numunesinin hem de aynı kılıfın ikinci kez kullanıldığı BÖÇ numunesinin yönetmelik sınırı olan %2 eksenel birim şekil değiştirme oranının iki katına, yani %4 seviyesine kadar kararlı ve simetrik histeretik davranış sergilediği görülmüştür. Her iki

numunede de kümülatif plastik birim deformasyon kapasitesi yönetmelik alt sınırı olan 200 değerini fazlasıyla aşarak 658 değerine ulaşmış ve yaklaşık 1.5 MJ sismik enerji sönümlenmiştir. Bu deneysel bulgular, kılıf mekanizmasının ve bağlantı plakalarının şiddetli bir deprem sonrasında hiçbir yapısal hasar almadan tekrar kullanılabileceğini kanıtlamıştır.

Harç Dolgulu ve Tamamı Çelik BÖÇ Sistemlerinin Çevresel Etkileri

Yapılar küresel ölçekte doğal kaynak tüketiminin, enerji kullanımının ve karbon salınımının en yüksek olduğu alanların başında gelir. Geleneksel yapı tasarımında deprem güvenliği sağlanırken yapısal elemanların çevresel etkileri ve kullanım ömrü sonundaki atık yönetimi genellikle ikinci planda kalmaktadır. Oysa sismik enerji sönümleyici elemanların üretim aşamasından başlayarak deprem sonrası onarım ve bertaraf süreçlerine kadar uzanan yaşam döngüsü, ekolojik sürdürülebilirlik açısından doğrudan belirleyicidir.

Geleneksel harç dolgulu BÖÇ sistemleri, içerdikleri çimento esaslı dolgu malzemesi ve tek kullanımlık kapalı kılıf yapıları nedeniyle çevre üzerinde çok yönlü olumsuz etkiler bırakır. İlk olarak, kılıf içerisine doldurulan beton veya yüksek dayanımlı harcın ana bileşeni olan çimento, üretimi sırasında atmosfere en fazla sera gazı salınımı yapan endüstriyel malzemelerden biridir. Bunun yanı sıra harç üretimi için doğal agrega ve temiz su kaynakları tüketilir.

Deprem sonrasında yapıdan sökülen hasarlı harç dolgulu BÖÇ elemanları, çelik ve priz almış harcın iç içe geçtiği kompozit bir inşaat ve yıkım atığı oluşturur. Bu elemanlardaki çeliğin geri dönüşüme kazandırılabilmesi için dış kılıfın kesilmesi ve içindeki sertleşmiş harcın mekanik kırma yöntemleriyle çelikten ayrıştırılması gerekir. Bu ayrıştırma işlemi hem ek enerji tüketimine

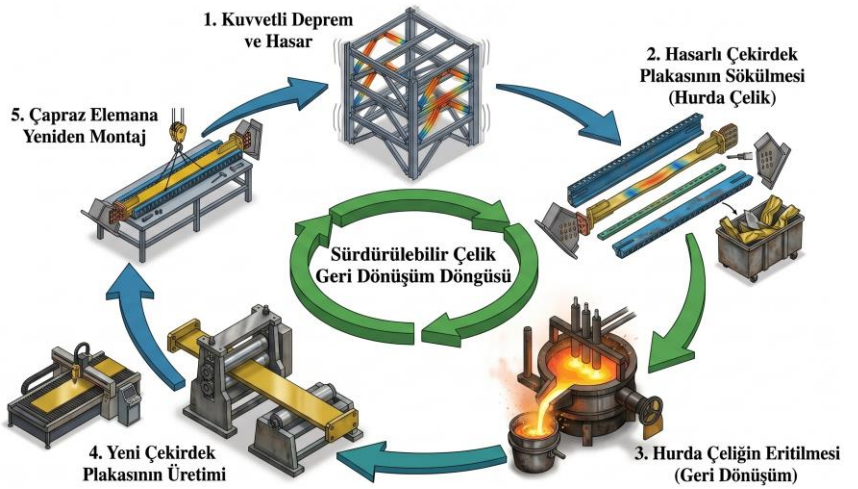
hem de gürültü ve toz kirliliğine sebep olur. Kırma işlemi sonucunda ortaya çıkan yüzlerce kilogramlık atık harç ise yeniden kullanılamadığı için katı atık depolama alanlarına gönderilerek doğada kalıcı moloz yığınları oluşturur. Ayrıca binanın tekrar güvenli hale getirilmesi için hurdaya çıkan çaprazın yerine sıfırdan yeni bir çelik tüp, yeni bir çekirdek plaka ve yeni harç dolgusu üretilmesi gerekir. Bu süreç, hammadde tüketimini ve gömülü karbon salınımını arttırır. Literatürde harç dolgulu çelik kabukların bulonlarla birleştirildiği yenilenebilir tasarımlar araştırılmış olsa da, tekrarlı çevrimsel yüklemeler altında dolgu betonunun çatlayıp ezildiği ve kılıfın yeniden kullanılabilmesi için kimyasal onarım harçlarına ihtiyaç duyulduğu raporlanmıştır (Cao et al., 2020).

Tamamı çelik ve değiştirilebilir çekirdek plakalı BÖÇ tasarımı ise çevreci bir alternatif sunar. Sistemde beton veya harç gibi hiçbir çimento esaslı dolgu malzemesi bulunmadığından, üretim ve onarım süreçlerinde çimento kaynaklı karbon ayak izi sıfırlanır.

Geliştirilen tamamı çelik BÖÇ sisteminin en önemli ekolojik üstünlüğü, kütlesinin büyük çoğunluğunu oluşturan burkulmayı önleyen mekanizmanın doğrudan yeniden kullanılabilmesidir (Serin & Bozkurt, 2025). Geri dönüşüm işlemi, hurda çeliğin yüksek sıcaklıklarda eritilerek yeniden haddelenmesini gerektirdiği için önemli miktarda enerji tüketir. Buna karşılık bir yapı elemanının eritilmeden, olduğu gibi yeniden kullanılması doğaya en az yük getiren sürdürülebilirlik adımıdır. İncelenen 396.5 kg toplam ağırlığa sahip tamamı çelik BÖÇ tasarımında, 249 kg ağırlığındaki çelik kılıf mekanizması ve bulonlar toplam kütlenin yaklaşık %63'ünü oluşturmaktadır. Şiddetli bir deprem sonrasında bu kılıf mekanizması hiçbir eritme veya ağır sanayi işlemine tabi tutulmadan doğrudan tekrar kullanılır. Sadece hasar gören çelik çekirdek plakası ve 0.5 mm kalınlığındaki teflon ayırıcı katman yenilenir. Sistemden çıkarılan hasarlı çekirdek plakası ise üzerinde hiçbir harç veya beton kalıntısı bulunmadığı için herhangi bir kırma ve ayrıştırma işlemine

gerek duyulmadan doğrudan geri dönüştürülebilir saf çelik hurdası olarak metalurji döngüsüne geri kazandırılır. Bu sürdürülebilir çelik geri dönüşüm döngüsü Resim 3'te şematik olarak özetlenmiştir.

Resim 3 Sürdürülebilir Yatay Yük Direnç Sistemi Döngüsü



Kaynak: Google Nano Banana 2 Yapay Zeka aracından yararlanılmıştır.

Harç Dolgulu ve Tamamı Çelik BÖÇ Sistemlerinin Maliyet ve Kaynak Tüketimi

BÖÇ'lerin yalnızca ilk üretim aşamasındaki malzeme giderlerinin dikkate alınması eksik bir yaklaşım oluşturur. Sürdürülebilir deprem mühendisliği perspektifinden gerçekçi bir değerlendirme yapabilmek için elemanın üretim süresi, nakliye ve montaj aşamalarındaki işgücü ihtiyacı, deprem sonrası onarım hızı ve binanın kullanım dışı kalmasından doğan dolaylı ekonomik kayıplar bütüncül bir yaşam döngüsü çerçevesinde ele alınmalıdır.

Bu kapsamda, deneysel olarak sismik performansı ve yeniden kullanılabilirliği doğrulanmış olan tamamı çelik BÖÇ tasarımı ile aynı eksenel akma kapasitesine ve aynı burkulma önleme boyuna sahip geleneksel harç dolgulu çelik tüp BÖÇ sistemi kaynak

tüketimi ve operasyonel maliyetler açısından karşılaştırılmıştır (Serin & Bozkurt, 2025). İncelenen tamamı çelik BÖÇ sisteminde olası akma dayanımı 509 kN, burkulmayı önleyen mekanizma uzunluğu 2730 mm ve elemanın toplam ağırlığı 396.5 kg seviyesindedir. Bu toplam kütlenin 249 kg olan kısmı iki adet IPE 80 profil, 10 mm kalınlığındaki taban plakaları, berkitmeler ve M20 bulonlardan oluşan dış kılıf mekanizmasına aittir. Geriye kalan 147.5 kg ağırlık ise 18 mm kalınlığındaki çekirdek plakasını ve uç birleşim bölgelerini oluşturmaktadır. Aynı çekirdek plakasını sarmak ve eşdeğer burkulma güvenliğini sağlamak üzere tasarlanan geleneksel harç dolgulu kapalı kutu profil bir BÖÇ elemanında ise dış çelik tüp ve içini dolduran priz almış harç kütlesi nedeniyle toplam ağırlık yaklaşık 460 kg seviyesine ulaşmaktadır.

İlk üretim ve şantiye montajı aşamalarında kaynak ve işgücü kullanımı incelendiğinde, harç dolgulu sistemin hem çelik hem de ıslak inşaat işçiliği gerektirdiği görülür. Çelik tüp içerisine harç dökülmesi ve harcın tasarım dayanımına ulaşması için gereken kürlenme süresi, üretim hattında ciddi bir zaman maliyeti ve depolama ihtiyacı yaratır. Ayrıca harç dolgusu nedeniyle ağırlaşan elemanlar, nakliye sırasında ve şantiyede daha yüksek kapasiteli kaldırma ekipmanlarının kullanımını gerektirir. Tamamı çelik BÖÇ tasarımında ise harç dökümü ve kürlenme beklentisi bulunmadığından elemanlar standart çelik atölyelerinde hızla üretilerek doğrudan sahaya sevk edilir. Daha hafif olan yapısı sayesinde nakliye ve şantiye içi montaj süreçlerinde belirgin bir işgücü ve ekipman tasarrufu sağlanır.

İki sistem arasındaki asıl maliyet ve kaynak tüketimi farkı, yapının tasarım ömrü boyunca maruz kalabileceği şiddetli bir deprem sonrasında ortaya çıkar. Harç dolgulu BÖÇ elemanlarında üretimde harcanan tüm malzeme, enerji ve işçilik tamamen kayba uğrar. Binanın yeniden güvenli hale getirilmesi için hasarlı ve ağır elemanların şantiyede kesilerek sökülmesi, oluşan kompozit

molozun sahadan uzaklaştırılması ve sıfırdan yeni BÖÇ elemanlarının üretilip kürlenmesinin beklenmesi gerekir. Haftalar süren bu onarım süreci boyunca binanın kullanılamaması, yapı sahipleri ve kullanıcılar için doğrudan onarım giderlerinden çok daha büyük dolaylı ekonomik kayıplara yol açar.

Değiştirilebilir çekirdek plakalı tamamı çelik BÖÇ sisteminde ise kılıf bulonları açılarak yalnızca hasar gören çelik çekirdek plakası ve 0.5 mm kalınlığındaki teflon ayırıcı katman yenisiyle değiştirilir. Ayrıca sistemden çıkarılan hasarlı çelik çekirdek plakası doğrudan hurda çelik olarak geri kazanıldığı için yeni çekirdek plakasının hammadde maliyetini de kısmen karşılar. Böylece deprem sonrası onarım aşamasında hem malzeme ve işçilik giderleri en aza indirilir hem de binanın kullanım dışı kalma süresi haftalardan saatlere düşürülerek dolaylı ekonomik kayıpların önüne geçilir. İki sistemin kaynak tüketimi, işgücü ihtiyacı ve deprem sonrası yenileme süreçlerine ilişkin karşılaştırma Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1 Eşdeğer kapasitedeki harç dolgulu ve tamamı çelik BÖÇ sistemlerinin kaynak tüketimi ve operasyonel maliyet karşılaştırması

	Harç Dolgulu BÖÇ	**Tamamı Çelik BÖÇ**
Yaklaşık Toplam Kütle	~460 kg	396.5 kg
İlk Üretim Süreci ve Süresi	Çelik imalatı, harç dökümü ve 28 gün kürlenme süresi	Standart çelik imalatı, bekleme süresi olmadan doğrudan sevkiyat
Nakliye ve Montaj İşgücü	Yüksek ağırlık nedeniyle zorlu nakliye ve yüksek vinç kapasitesi ihtiyacı	Hafif yapı sayesinde düşük nakliye yükü ve hızlı montaj
Deprem Sonrası Hasar Tespiti	Kapalı kılıf ve harç nedeniyle iç hasar gözlemlenemez	Bulonlu kılıf açılarak çekirdek plaka doğrudan muayene edilebilir

Deprem Sonrası Değişen Kısım	Çapraz elemanın tamamı yeniden üretilir ve monte edilir	Yalnızca çekirdek plakası ve 0.5 mm teflon katman yenilenir
Oluşan İnşaat Atığı ve Geri Dönüşüm	Ayrıştırılması zor çelik ve harç kompozit atığı, kalıcı moloz	Sıfır harç atığı, doğrudan geri dönüştürülebilir saf çelik çekirdek hurdası
Bina Kullanım Dışı Kalma Süresi	Yeni üretim ve kürlenme nedeniyle daha uzun süre	Minimum kesinti süresi

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Sonuç ve Öneriler

Yapıların sismik tasarımında temel hedef can güvenliğini sağlamak olsa da, modern mühendislik yaklaşımı yapıların deprem sonrasında minimum çevresel etki, düşük maliyet ve yüksek hızla onarılabilmesini de zorunlu kılmaktadır. Bu kitap bölümünde, sismik enerjiyi sönümlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan geleneksel harç dolgulu BÖÇ sistemleri ile değiştirilebilir çekirdek plakasına sahip tamamı çelik BÖÇ tasarımları sürdürülebilir deprem mühendisliği ilkeleri çerçevesinde karşılaştırılmıştır.

Yapılan değerlendirmeler, geleneksel harç dolgulu çelik tüp BÖÇ sistemlerinin sismik enerji sönümleme açısından başarılı olmalarına karşın sürdürülebilirlik, kaynak verimliliği ve deprem sonrası onarılabilirlik bakımından önemli dezavantajlar barındırdığını göstermektedir. Harç dolgusu nedeniyle ağırlaşan bu elemanlar nakliye ve şantiye montajı süreçlerinde daha fazla işgücü ve ekipman gerektirirken, harcın priz alma ve kürlenme süreci de imalat süresini uzatmaktadır. Daha da önemlisi, şiddetli bir deprem sonrasında kapalı ve harç dolgulu kılıf içerisinde yer alan çekirdek plakanın hasar tespiti yapılamamakta ve çekirdek plaka tek başına değiştirilememektedir. Bunun sonucunda dış kılıf mekanizması da çekirdekle birlikte ıskartaya çıkmakta, ayrıştırılması zor kompozit

bir inşaat atığı oluşmakta ve yeni elemanların sıfırdan üretilmesi sürecinde ciddi zaman ve maliyet kayıpları yaşanmaktadır.

Buna karşılık deneysel olarak sismik performansı kanıtlanmış olan değiştirilebilir çekirdek plakalı tamamı çelik BÖÇ konsepti, harç dolgulu sistemlerin getirdiği çevresel ve ekonomik sorunlara kalıcı çözümler sunmaktadır. Sistemde hiçbir çimento esaslı dolgu malzemesinin kullanılmaması sayesinde çimento kaynaklı karbon salınımı, su ve agrega tüketimi ile deprem sonrası moloz oluşumu tamamen sıfırlanmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar, bulonlu birleşimlerle teşkil edilen tamamı çelik kılıf mekanizmasının ve uç bağlantı plakalarının hem ilk kullanımda hem de çekirdek plakası değiştirildikten sonraki ikinci kullanımda yönetmelik sınırlarının iki katı olan %4 eksenel birim şekil değiştirme seviyesine kadar kararlı ve simetrik bir sismik performans sergilediğini doğrulamıştır (Serin & Bozkurt, 2025).

Elemanın toplam ağırlığının yaklaşık %63'ünü oluşturan çelik kılıf mekanizmasının deprem sonrasında eritilmeden, doğrudan olduğu gibi yeniden kullanılabilmesi hammadde ve enerji tüketimini büyük ölçüde azaltmaktadır. Düğüm noktalarında kullanılan her iki yönde 30 mm slotlu bulon delikleri sayesinde, deprem sonrasında yapıda kalıcı kat ötelenmeleri meydana gelse dahi çapraz elemanlar kesme veya kaynak gibi zorlu şantiye işçiliklerine ihtiyaç duyulmadan hızla sökülebilmektedir. Sadece hasar gören çelik çekirdek plakasının ve 0.5 mm kalınlığındaki teflon ayırıcı katmanın yenilenmesiyle sistem birkaç saat içerisinde deprem öncesi performansına geri döndürülebilmektedir. Ayrıca sistemden çıkarılan hasarlı çekirdek plakasının üzerinde harç kalıntısı bulunmadığı için bu parça doğrudan %100 geri dönüştürülebilir saf çelik hurdası olarak ekonomiye geri kazandırılmaktadır.

Sürdürülebilir ve depreme dirençli yapı tasarımının yaygınlaştırılması adına mühendislik pratiği ve gelecek uygulamalar için yeni yapılacak çelik ve betonarme binaların tasarımında veya

mevcut yapıların sismik güçlendirme projelerinde enerji sönümleyici sistem seçilirken yalnızca ilk imalat maliyeti değil, deprem sonrası onarım hızı, atık yönetimi ve kılıfın yeniden kullanılabilirliği de seçim kriteri olarak dikkate alınmalıdır.

Tamamı çelik BÖÇ kullanılan projelerde, ilk üretim aşamasında belirli sayıda yedek çekirdek plakası ve teflon ayırıcı katman üretilerek bina yönetiminde depolanmasıyla büyük bir deprem sonrasında fabrikadan yeni çekirdek üretimi bekleme süresini tamamen ortadan kaldırarak onarımın aynı gün içerisinde tamamlanmasına imkan tanınabilir.

Yeniden kullanılabilir burkulmayı önleme mekanizmasına sahip BÖÇ tasarımlarının yeşil bina sertifika sistemlerinde ve sürdürülebilir yapı şartnamelerinde teşvik edilmesi, inşaat sektörünün karbon ayak izini azaltma hedeflerine doğrudan katkı sağlayacaktır.

Kaynakça

American Institute of Steel Construction. (2022). *Seismic provisions for structural steel buildings (ANSI/AISC 341-22)*. American Institute of Steel Construction.

Avci-Karatas, C., Celik, O. C., & Yalcin, C. (2018). Experimental investigation of aluminum alloy and steel core buckling restrained braces (BRBs). *International Journal of Steel Structures, 18*(2), 650-673. https://doi.org/10.1007/s13296-018-0025-y

Bai, J., Chen, H., Ma, G., & Duan, L. (2022). Development of a four-tube-assembled buckling-restrained brace for convenient post-earthquake damage examination. *Thin-Walled Structures, 180*, 109840.

Bozkurt, M. B., & Topkaya, C. (2016). Development of welded overlap core steel encased buckling-restrained braces. *Journal of Constructional Steel Research, 127*, 151-164. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.07.034

Cao, X. Y., Feng, D. C., Wu, G., & Zeng, Y. H. (2020). Reusing & replacing performances of the AB-BRB with thin-walled concrete-infilled steel shells. *Thin-Walled Structures, 157*, 107069. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107069

Chen, Q., Wang, C. L., Meng, S., & Zeng, B. (2016). Effect of the unbonding materials on the mechanic behavior of all-steel buckling-restrained braces. *Engineering Structures, 111*, 478-493. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.030

Dehghani, M., & Tremblay, R. (2017). Design and full-scale experimental evaluation of a seismically endurant steel buckling-restrained brace system. *Earthquake Engineering*

& Structural Dynamics, 47(1), 105-129. https://doi.org/10.1002/eqe.2941

Eryaşar, E., & Topkaya, C. (2010). An experimental study on steel-encased buckling-restrained brace hysteretic dampers. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 39*(5), 561-581. https://doi.org/10.1002/eqe.959

Fahnestock, L. A., Ricles, J. M., & Sause, R. (2007). Experimental evaluation of a large-scale buckling-restrained braced frame. *Journal of Structural Engineering, 133*(9), 1205-1214. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:9(1205)

Kimura, K., Takeda, Y., Yoshioka, K., Furuya, N., & Takemoto, Y. (1976). An experimental study on braces enclosed by mortar in steel tube and mortal precast plates. *Abstracts of the Annual Convention of the Architectural Institute of Japan*, (s. 1041-1042).

Metelli, G., Bregoli, G., & Genna, F. (2016). Experimental study on the lateral thrust generated by core buckling in bolted-BRBs. *Journal of Constructional Steel Research, 122*, 409-420. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.04.004

Özçelik, R., Dikiciaşık, Y., & Civelek, K. B. (2015). Farklı burkulmayı engelleyen mekanizmaya sahip burkulması engellenmiş çelik çaprazlar. *3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, (s. 1-9). İzmir, Türkiye.

Piedrafita, D., Cahis, X., Simon, E., & Comas, J. (2013). A new modular buckling restrained brace for seismic resistant buildings. *Engineering Structures, 56*, 1967-1975. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.013

Qu, B., Liu, X., Hou, H., & Qiu, C. (2018). Testing of buckling-restrained braces with replaceable steel angle fuses. *Journal of Structural Engineering, 144*(3), 04018001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001985

Serin, B. (2025). *Değiştirilebilir çekirdek plakalı burkulması önlenmiş çaprazların geliştirilmesi.* Doktora Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.

Serin, B., & Bozkurt, M. B. (2025). Development of replaceable core all-steel buckling-restrained braces. *Journal of Constructional Steel Research, 226*, 109247. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.109247

Tremblay, R., Bolduc, P., Neville, R., & DeVall, R. (2006). Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems. *Canadian Journal of Civil Engineering, 33*(2), 183-198. https://doi.org/10.1139/l05-103

Tsai, K. C., Lai, J. W., Hwang, Y. C., Lin, S. L., & Weng, C. H. (2004). Research and application of double-core buckling restrained braces in Taiwan. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, (s. 2179). Vancouver, Canada.

Uang, C. M., & Nakashima, M. (2004). Steel buckling-restrained braced frames. Y. Bozorgnia, & V. V. Bertero (Dü) içinde, *Earthquake engineering from engineering seismology to performance-based engineering* (s. 16-1-16-37). CRC Press.

Usami, T., Ge, H., & Kasai, A. (2008). Overall buckling prevention condition of buckling-restrained braces as a structural control damper. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering.* Beijing, China.

Wada, A., Saeki, E., Takeuchi, T., & Watanabe, A. (1998). *Development of unbonded brace (Nippon Steel's Unbonded Braces).* Nippon Steel Corporation Building Construction and Urban Development Division, Tokyo, Japan.

Wakabayashi, M., Nakamura, T., Katagihara, A., Yogoyama, H., & Morisono, T. (1973). Experimental study on the elastoplastic behavior of braces enclosed by precast concrete panels under horizontal cyclic loading – Parts 1 & 2. *Transactions of the Architectural Institute of Japan, Kinki Branch*, 121-128.

Watanabe, A., Hitomi, Y., Saeki, E., Wada, A., & Fujimoto, M. (1988). Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube. *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, *IV*, s. 719-724. Tokyo-Kyoto, Japan.

Wu, A. C., Lin, P. C., & Tsai, K. C. (2014). High-mode buckling responses of buckling-restrained brace core plates. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 43*(3), 375-393. https://doi.org/10.1002/eqe.2349

Xie, Q. (2005). State of the art of buckling-restrained braces in Asia. *Journal of Constructional Steel Research, 61*(6), 727-748. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2004.11.005

BÖLÜM 10

GELENEKSEL AMPİRİK YAKLAŞIMLARDAN YAPAY ZEKAYA YER HAREKETİ TAHMİN MODELLERİNİN (GMPE) GELİŞİMİ

MEHMET ALPYÜRÜR[1]

GMPE Kavramı ve Deprem Mühendisliğindeki Rolü

Deprem mühendisliğinde Yer Hareketi Modelleri (Ground Motion Models - GMM) olarak da anılan yer hareketi tahmin denklemleri (GMPE), kaynak, yayılım yolu ve yerel zemin özelliklerine bağlı olarak bir sahada beklenen kuvvetli yer hareketi düzeyini (PGA, PGV, PGD, %5 sönümlü elastik spektral ivme $S_a(T)$, Arias İntansitesi I_a vb.) matematiksel olarak tahmin eden bağıntılardır. GMPE'ler, Olasılıksal ve Tanımlamalı (Deterministik) Sismik Tehlike Analizlerinin (PSHA ve DSHA) temel girdisini oluşturmakta; bina yönetmeliklerindeki tasarım spektrumlarının belirlenmesinde ve kentsel risk azaltma stratejilerinde hayati rol oynamaktadır. Bir GMPE, temel olarak yer hareketi şiddet ölçütünü (Intensity Measure-IM; örneğin PGA, PGV, $S_a(T)$ vb.) depremin ana fiziksel parametrelerinin bir fonksiyonu olarak ifade eder. Genel log-normal formülasyonu şu şekildedir:

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-6878-5874

$$\ln(IM) = f_{source}(M) + f_{path}(R, M) + f_{site}(V_{S30}, Z) + f_{fault}(F) + \varepsilon \quad (1)$$

Bu yapıyı oluşturan temel bileşenler şunlardır:

- *Kaynak Etkisi* **(f_{source}):** Depremin büyüklüğüne (M_w) bağlı olarak açığa çıkan toplam enerjiyi ve spektral genliği belirler. Büyük depremlerde genliğin doyuma ulaşması (magnitude saturation) gibi doğrusal olmayan davranışlar bu terimde modellenir.
- *Yol Etkisi* **(f_{path}):** Dalgaların odak noktasından sahayla buluştuğu noktaya kadar katettiği mesafe (R_{jb}, R_{rup}, R_{hyp}) boyunca geometrik yayılma (geometrical spreading) ve anelastik sönümlenme (anelastic attenuation / Q faktörü) nedeniyle enerji kaybetmesini açıklar.
- *Saha ve Zemin Etkisi* **(f_{site}):** Odak kayadan (engineering bedrock) yüzeye ulaşan sismik dalgaların, üst zemin katmanlarında uğradığı genlik büyütmesi (amplifikasyon) veya yüksek kayma gerilmeleri altında gösterdiği doğrusal olmayan (non-linear) zemin davranışını temsil eder. Ana parametre V_{S30} (üst 30 metrenin ortalama kayma dalgası hızı) olmakla birlikte, derin havza etkileri için $Z_{1.0}$ ve $Z_{2.5}$ (1.0 km/s ve 2.5 km/s kayma dalgası hızına ulaşan derinlikler) parametreleri de denkleme dahil edilir.
- *Faylanma Mekanizması* **(f_{fault}):** Odak mekanizmasının (doğrultu atımlı, ters/bindirme, normal faylanma) yer hareketi genliği üzerindeki etkilerini ayırır.

GMPE'ler, yalnızca akademik analizlerin değil, pratik mühendislik uygulamalarının ve yasal mevzuatların da temel omurgasını oluşturur.

- *Sismik Tehlike Analizleri (DSHA ve PSHA):*
    - *Deterministik Analizler (DSHA):* Belirlenen senaryo depremi (M_w) ve en kritik mesafe (R) için sahadaki kilit şiddet parametrelerinin üst sınırlarını belirlemede kullanılır.
    - *Olasılıksal Analizler (PSHA):* Bir bölgedeki bütün olası kaynakların, tekrarlanma oranlarının ve mesafe dağılımlarının birlikte modellenmesiyle, seçilen bir zaman aralığında (örneğin 50 yıl içinde %10 ya da %2 gibi) aşılma ihtimaline karşılık gelen tehlike eğrileri ve tasarım spektrumları bu yolla hesaplanır.
- *Tasarım Spektrumlarının Oluşturulması ve Yönetmelikler:*

Türkiye Deprem Tehlike Haritası (TDTH) ve TBDY-2018 başta olmak üzere, ulusal ve uluslararası bina yönetmeliklerindeki spektral ivme katsayıları (S_{DS}, S_{D1} vb.), sahadaki GMPE hesaplamalarının çoklu model yaklaşımlarıyla (Mantık Ağaçları / Logic Trees) haritalandırılmasıyla türetilir.

- *İvme Kaydı Seçimi ve Ölçeklendirme (Selection ve Scaling):*

Bir yapının doğrusal olmayan zaman tanım alanında (NLTHA) analiz edilmesi için seçilecek gerçek ivme kayıtları, genellikle hedef spektrum (Target Spectrum) veya koşullu ortalama spektrum (Conditional Mean Spectrum - CMS) yaklaşımıyla belirlenir; bu hedef spektrumların türetilmesinde GMPE çıktıları temel girdi olarak kullanılır.

- *Belirsizlik Yönetimi (Aleatory ve Epistemic Uncertainty):*

- *Rastlantısal Değişkenlik (Aleatory Uncertainty - σ_{total}):* Yer hareketinin doğasından kaynaklanan ve engellenemeyen saçılımı ifade eder. GMPE'ler bu belirsizliği grup içi (ϕ) ve gruplar arası (τ) bileşenlere ayırarak olasılıksal risk hesaplarına dahil eder.
- *Bilgi Eksikliğine Dayalı Belirsizlik (Epistemic Uncertainty):* Bölgeye uygun veri yetersizliğinden doğan belirsizliği, mantık ağaçlarında (Logic Trees) farklı GMPE'lere ağırlık katsayıları atayarak minimize etmeye katkı sağlar.

İlk Dönem Ampirik Azalım İlişkileri (1960–1980'ler)

Ampirik yer hareketi tahmin modellerinin (GMPE) tarihsel gelişimi incelendiğinde, 1960–1980 yılları arası ilk verisel veri tabanlarının oluşturulduğu, regresyon tekniklerinin şekillendiği ve olasılıksal tehlike analizlerinin (PSHA) ihtiyaç duyduğu temel matematiksel altyapının kurulduğu dönemdir. Kuvvetli ivme kayıtçılarının yaygınlaşmasıyla birlikte ilk ampirik yer hareketi azalım ilişkileri 1960'ların sonunda ortaya çıkmıştır. Kuvvetli yer hareketi verilerinin oldukça kısıtlı olduğu bu dönemde ilk ilişkiler, yalnızca En Büyük Yer İvmesini (PGA) tahmin etmeye odaklanmış ve birincil parametre olarak deprem büyüklüğü (M) ile uzaklığı (R) esas almıştır.

Esteva ve Rosenblueth (1964): Literatürdeki ilk ampirik azalım ilişkilerinden birini önermişlerdir. Yer hareketinin uzaklıkla sönümünü ve büyüklükle üstel artışını ifade eden genel fonksiyonel formu tanımlamışlardır:

$$PGA = C_1 \cdot e^{C_2 M} \cdot (R + C_3)^{-C_4} \qquad (2)$$

Benzer bir dönemde, *Kanai (1961), Milne ve Davenport (1969):* Japonya ve Kanada verilerini kullanarak benzer log-

doğrusal modeller geliştirmiş, ivme azalımının temelde geometrik yayılma ve malzeme sönümüne dayandığını ortaya koymuşlardır.

1970'ler: Spektral Parametreler ve Zemin Etkisinin Katılımı

1971 San Fernando depremi sonrasında veri sayısının hızla artması, modellerin sadece pik değerleri (PGA) değil, yapısal tepki açısından kritik olan Tepki Spektrumlarını (SA) da tahmin edecek şekilde genişlemesini sağlamıştır.

Schnabel ve Seed (1973): Kaya sahalar için ivme azalım eğrilerini yayımlayarak zemin türünün yer hareketi genliği üzerindeki baskın etkisini vurgulamışlardır. Bir yıl sonra *Trifunac (1976):* Büyüklük, uzaklık ve kaba zemin sınıflamalarını (kaya, sert zemin, yumuşak zemin) içeren Fourier genlik spektrumu ve tepki spektrumu modellerini geliştirmiştir. Bu çizgide, *McGuire (1978):* İstatiksel regresyon analizlerini standartlaştırarak PSHA hesaplamalarına doğrudan entegre edilebilen spektral ivme ilişkilerini türetmiştir.

1980'ler: Metodolojik Devrim ve Fay Yakın Saha Etkileri

1980'li yıllarda veri kalitesinin artmasıyla birlikte, iki aşamalı regresyon teknikleri geliştirilmiş, yeni fay uzaklığı tanımları yapılmış ve yakın saha doyum (saturation) kavramı fonksiyonel formlara eklenmiştir.

Joyner ve Boore (1981): İki aşamalı regresyon (two-stage regression) yöntemini sektöre kazandırmış ve faya olan en yakın yatay uzaklık olarak bilinen Joyner-Boore uzaklığını (R_{jb}) tanımlamışlardır. Aynı yıl, *Campbell (1981):* Ruptür yüzeyine olan en kısa mesafe (R_{rup}) tanımını literatüre sokmuş, yakın sahada ivmenin büyüklükle sınırsız artmayacağını ifade eden "doyum" (saturation) terimini modele eklemiştir. Bu yaklaşıma paralel olarak, *Sadigh vd. (1986):* Kaliforniya verilerine dayalı olarak kaya ve zemin sahalar için ayrı katsayılara sahip spektral azalım ilişkilerini

sunmuşlardır (1997'de nihai makale olarak basılmıştır). Öte yandan, *Idriss (1985):* Büyüklüğe bağlı uzaklık sönüm oranlarını (magnitude-dependent decay) dikkate alan esnek modeller geliştirmiştir.

Bu ilk dönem modelleri, sınırlı ivme veritabanlarına dayanmaları nedeniyle genellikle doğrusal regresyon tekniklerini ve basit noktasal kaynak varsayımlarını kullanmıştır. Aşağıda bu dönemde geliştirilen GMPE'lerin genel karakteristiği ve sınırlandırmaları özetlenmektedir.

1960–1980 dönemi uygulamalarına bakıldığında, tahmin edilen büyüklükler ağırlıklı olarak PGA ve PGV ile sınırlı kalmış, spektral ivme ancak 1970'lerin sonundan itibaren modellere dahil edilebilmiştir. Uzaklık ölçütü olarak başlangıçta yalnızca merkez üssü uzaklığı ve odak uzaklığı kullanılmış; Rjb ve Rrup gibi fay temelli tanımlar ise ancak 1980'lerde literatüre girmiştir. Büyüklük ölçeği olarak yerel magnitüd ve yüzey dalgası magnitüdü tercih edilmiş; zemin koşulları ise Vs30 gibi nicel bir parametre kullanılmaksızın yalnızca "kaya" veya "zemin" gibi kaba kategorilerle temsil edilmiştir. Faylanma mekanizması ise bu dönemde çoğu zaman göz ardı edilmiş ya da sabit kabul edilmiştir.

Çok Parametreli ve Bölgesel Ampirik Modeller (1990–2000'ler)

1990–2000'li yıllar, ampirik yer hareketi tahmin modellerinin (GMPE) basit kestirim denkleminden çıkarak karmaşık, çok parametreli ve tektronik rejimlere özel (bölgesel) formülasyonlara dönüştüğü dönemdir. Bu süreçte kuvvetli yer hareketi veri tabanlarının genişlemesi, veri kalitesinin artması ve PEER (*Pacific Earthquake Engineering Research Center*) gibi kurumların koordinasyonu metodolojik bir devrim yaratmıştır.

1990'lar: Parametrik Çeşitlilik ve V_{s30} Standardizasyonu

1990'larda modeller, doyuma ulaşan yerel büyüklükler (M_L, M_S) yerine fiziksel temelli Moment Büyüklüğü (M_w) ölçeğine geçmiş; zemin koşulları ise kaba nitel tanımlardan V_{s30} (üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı) parametresine evrilmiştir.

Ambraseys vd. (1996): Avrupa ve Orta Doğu verilerini kullanarak bölgesel ölçekte ilk kapsamlı spektral ivme azalım ilişkilerini türetmişlerdir. Aynı dönemde, *Abrahamson ve Silva (1997):* Faylanma mekanizması (doğrultu atımlı, ters, normal) ve asılı blok (*hanging-wall*) etkisini modele dahil eden ilk geniş kapsamlı ilişkilerden birini sunmuşlardır. Buna paralel olarak, *Boore, Joyner ve Fumal (1997):* Zemin etkisini doğrudan V_{s30} değişkenine bağlayan regresyon modelini geliştirerek modern saha sınıflandırmasının temelini atmışlardır. Bu yaklaşımla eş zamanlı olarak, *Sadigh vd. (1997):* Kırılma mekanizması ve saha sınıfı farklarını ayrı katsayılarla tanımlayan, mühendislik pratiğinde uzun yıllar standart kabul edilen modeli yayımlamışlardır.

1990'lı yıllardan itibaren kayıt ağlarının genişlemesi ve fay kırılma fiziğinin daha iyi anlaşılmasıyla GMPE'ler karmaşıklaşmıştır. Abrahamson ve Youngs (1992), deprem içi (*intra-event*) ve depremler arası (*inter-event*) varyasyonları birbirinden ayıran Rastgele Etkiler (*Random-Effects*) regresyon metodolojisini standart hale getirmiştir.

Bu dönemde gelişen modeller (Sadigh vd., 1997; Abrahamson ve Silva, 1997):

- Fay mekanizmalarını (doğrultu atımlı, ters, normal),
- Üst blok (*hanging wall*) ve alt blok (*footwall*) etkilerini,
- Zemin türünü kategorik sınıflandırmalar (Kaya/Zemin) yerine sürekli değişkenlerle ifade etme ihtiyacını modellerine yansıtmıştır.

Küresel Veri Tabanları Çağı ve Modern Ampirik Modeller (2000'ler–Günümüz)

2000'li yıllarda tektonefizyografik rejim ayrımı (Aktif Kabuk, Yitim Zonu ve Kararlı Kıtasal Bölgeler) netleşmiş ve doğrusal olmayan zemin davranışı modellerde açıkça tanımlanmıştır. 2008 yılında tamamlanan NGA-West1 (Next Generation Attenuation) projesi ise veri tabanlarını küreselleştirerek çok parametreli GMPE çağını başlatmıştır.

Akkar ve Bommer (2007): Avrupa ve Akdeniz kuşağı yer hareketi kayıtlarını kullanarak bölgesel faktörlerin ve faylanma tiplerinin spektral genlikler üzerindeki etkisini modellemişlerdir. Bu dönemin en kapsamlı adımı ise *NGA-West1 Modelleri (2008):* Bu dönemde dört ayrı ekip tarafından paralel olarak geliştirilen modeller, ortak bir noktada buluşarak yırtılma üst derinliği (Z_{tor}), sediman havza derinliği ($Z_{1.0}, Z_{2.5}$), doğrusal olmayan zemin tepkisi ve faya göre konum geometrisini (R_x) hesaba katmıştır.

Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) tarafından başlatılan NGA (Next Generation Attenuation) projeleri, GMPE gelişiminde bir dönüm noktası olmuştur. NGA-West1 (2008) ve NGA-West2 (2014) veritabanları, dört ayrı ekibin ürettiği modelleri tek bir çatı altında toplayarak binlerce kaliteli ivme kaydını araştırmacıların hizmetine sunmuştur. Bu küresel modellerin yanında, Avrupa ve Türkiye ölçeğinde geliştirilen Akkar vd. (2014), Kale vd. (2015) ve ESM veritabanına dayanan Kotha vd. (2020) modelleri öne çıkmıştır.

1990'lar ile 2000'li yılların GMPE'leri karşılaştırıldığında belirgin bir metodolojik sıçrama göze çarpar. Büyüklük ölçeği 1990'larda zaten moment büyüklüğüne (Mw) geçmiş olmakla birlikte, 2000'li yıllarda bu ölçeğin dayandığı veri tabanı çok daha geniş ve homojen hale gelmiştir. Zemin parametresi tarafında 1990'ların Vs30 ve kaba sınıf temelli yaklaşımının yerini,

2000'lerde sürekli Vs30 değişkeni ve doğrusal olmayan zemin tepkisi fonksiyonları almıştır. Saha geometrisi 1990'larda yalnızca Rjb ve Rrup ile ifade edilirken, 2000'li yıllarda bunlara Rx, havza derinliği (Z1.0, Z2.5) gibi ilave parametreler eklenmiştir. Fay mekanizması ise 1990'ların nitel kategorilerinden (ters/doğrultu atımlı), 2000'li yıllarda eğim açısı, yırtılma açısı ve asılı blok faktörü gibi sürekli değişkenlerle tanımlanan daha ayrıntılı bir yapıya evrilmiştir.

Modern ampirik GMPE'lerde girdi parametresi olarak:

- V_{s30} (Üst 30 metrenin ortalama kayma dalgası hızı),
- $Z_{1.0}$ ve $Z_{2.5}$ (1.0 km/s ve 2.5 km/s kayma dalgası hızına sahip sediman derinlikleri),
- Doğrusal olmayan zemin davranışı (*non-linear site response*) fonksiyonları yer almaktadır.

Ampirik Modellerin Kısıtları ve Veriye Dayalı Yaklaşımlara Duyulan İhtiyaç

Geleneksel ampirik yer hareketi tahmin modelleri (GMPE) regresyon analizlerine dayalı sağlam bir altyapı sunsa da, önceden tanımlanmış parametrik formlar ve veri kısıtları nedeniyle fiziksel süreçlerin tüm karmaşıklığını temsil etmekte yetersiz kalmaktadır. Bu sınırlamalar, verilerdeki doğrusal olmayan ilişkileri esnek bir şekilde öğrenebilen makine öğrenmesi ve veriye dayalı (data-driven) yaklaşımlara olan ihtiyacı doğurmuştur (Derras vd., 2014). Aşağıda geleneksel ampirik yaklaşımlar ile veriye dayalı modellerin temel özellikleri karşılaştırmalı olarak ele alınmaktadır.

Ampirik Modellerin Temel Kısıtları

- *Fonksiyonel Form Rijitliği:* Geleneksel regresyon modelleri, ivme sönümünü ve büyüklük ölçeklenmesini önceden

varsayılan log-doğrusal veya üstel fonksiyonlara zorlar. Bu rijit yapı, karmaşık kaynak-yol-saha etkileşimlerini aşırı basitleştirir (Douglas, 2003).

- *Veri Seyrekliği ve Ekstrapolasyon Riski:* Büyük büyüklükteki ($M_w > 7.5$) ve fay yakın sahasındaki ($R_{rup} < 10$ km) ivme kayıtlarının azlığı, modellerin bu kritik bölgelerde fiziksel olarak tutarsız tahminler (örneğin aşırı doyum hataları) üretmesine yol açar.
- *Aşırı Parametreleşme ve Çoklu Doğrusallık***:** Modellere yeni parametreler ($Z_{1.0}$, $Z_{2.5}$, Z_{tor}, R_x) eklendikçe, regresyon katsayıları arasında yüksek korelasyon (multicollinearity) oluşur ve model kararsızlaşır.
- *Durağan Kalıntı Belirsizliği (σ):* Veri tabanları büyüse ve yeni parametreler eklense bile, ampirik modellerin standart sapması (σ_{total}) belirgin bir şekilde düşürülememekte, rastlantısal (aleatory) belirsizlik yüksek kalmaktadır (Kotha vd., 2016).

Veriye Dayalı Yaklaşımlara Duyulan İhtiyaç ve Sağladığı Avantajlar

- *Esnek ve Parametresiz (Non-parametric) Modelleme:* Yapay Sinir Ağları (YSA), Rastgele Orman (RF) ve XGBoost gibi algoritmalarda önsel bir matematiksel denklem varsayımı yoktur; model, girdi ve çıktı arasındaki ilişkiyi doğrudan veriden öğrenir.
- *Yüksek Boyutlu Veri İşleme:* Veriye dayalı yaklaşımlar, zemin profilinin tamamı (V_s profili), spektral içerikler ve 3B hız modelleri gibi çok sayıda karmaşık girdiyi aşırı uyum (overfitting) riski olmadan işleyebilir.
- *Fizik Destekli Makine Öğrenmesi (PINN):* Veri kısıtının olduğu bölgelerde fizik kurallarını (sönüm ilkeleri, sınır

şartları) kayıp fonksiyonuna (loss function) dahil ederek hem veriden öğrenen hem de fiziksel olarak mantıklı tahminler yapan hibrit modeller kurulabilmektedir.

Geleneksel ampirik modeller ile makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar arasındaki fark beş eksende özetlenebilir. Model yapısı açısından ampirik modeller önceden tanımlanmış parametrik denklemlere dayanırken, veriye dayalı modeller parametresiz ve veri odaklı esnek mimariler kullanır. Girdi kapasitesi bakımından ampirik modeller Mw, R ve Vs30 gibi sınırlı sayıda değişkenle çalışırken, ML modelleri çok boyutlu ve karmaşık veri setlerini işleyebilir. Yakın saha ve büyük büyüklük senaryolarında ampirik modellerin ekstrapolasyon hatası yüksek kalırken, ML modelleri veri odaklı desen tanıma sayesinde bu bölgelerde daha güçlü bir performans sergileyebilmektedir. Açıklanabilirlik açısından ise durum tam tersi bir eğilim gösterir: ampirik modeller açık matematiksel formülasyonları sayesinde yüksek açıklanabilirliğe sahipken, ML modelleri SHAP veya LIME gibi açıklanabilir yapay zeka yöntemlerine ihtiyaç duyar. Son olarak belirsizlik yönetiminde ampirik modeller sabit veya basit varyans yapıları kullanırken, ML modelleri derin öğrenme ve Bayesyen yaklaşımlarla daha dinamik bir belirsizlik temsiline olanak tanır.

Bu kısıtlar, herhangi bir fonksiyonel form dayatması yapmaksızın karmaşık ve lineer olmayan ilişkileri öğrenebilen Makine Öğrenmesi (ML) ve Yapay Zeka (AI) yaklaşımlarının kullanımını tetiklemiştir.

Yer Hareketi Tahmininde Yapay Zeka ve Makine Öğrenmesi Yöntemleri

Makine Öğrenmesine Genel Bakış ve GMPE ile Paralellikler

Geleneksel GMPE geliştirme süreci esasen bir istatistiksel regresyon işlemidir. Makine öğrenmesi (ML) ise yüksek boyutlu girdi matrisleri ($\mathbf{X} = \{M_w, R_{jb}, V_{s30}, \dots\}$) ile hedef büyüklük ($Y =$

$\ln(IM)$) arasındaki çok boyutlu transfer fonksiyonunu veriden öğrenen bir denetimli öğrenme (*supervised learning*) yaklaşımı sunar.

Geleneksel Makine Öğrenmesi Algoritmaları

Yapay Sinir Ağları (ANN / MLP): Deprem mühendisliğinde ML kullanımının ilk örneklerindendir. Güllü ve Erçelebi (2007) Türkiye verileri üzerinde, Derras vd. (2012, 2014) ise Avrupa ve NGA veritabanlarında Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) mimarilerini kullanarak spektral ivme ve non-elastik tepki spektrumlarını başarıyla tahmin etmişlerdir.

Destek Vektör Regresyonu (SVR): Düşük boyutlu veri setlerinde küresel optimizasyon sağlama yeteneğiyle öne çıkar (Gandomi vd., 2011).

Karar Ağacı Tabanlı Topluluk (Ensemble) Modelleri:

Random Forest (Rastgele Orman): Trugman ve Shearer (2018), Karar Ağaçları topluluğunun ampirik modellere kıyasla artık varyansını önemli ölçüde düşürdüğünü göstermiştir.

Gradient Boosting (XGBoost, LightGBM, CatBoost): Güncel çalışmalarda (Kong vd., 2019), karmaşık zemin-yapı etkileşimleri ve yer hareketi tahmininde en yüksek R^2 ve en düşük RMSE değerlerini veren algoritmalar olarak öne çıkmaktadır.

Derin Öğrenme (Deep Learning) Yaklaşımları

Derin Sinir Ağları (DNN): Çok sayıda gizli katman (> 3) kullanarak yüksek dereceden non-lineer etkileşimleri modeller.

Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN / LSTM / GRU): Yer hareketinin spektral periyotlar boyunca gösterdiği sürekliliği ($S_a(T)$ spektrumu) zaman dizisi benzeri bir ardışıklıkla öğrenmek için kullanılır.

Evrişimli Sinir Ağları (CNN): Ham ivme zaman serilerinden veya faya ait 2B/3B geometrik görüntülerden doğrudan özellik çıkarımı gerçekleştirir.

Yapay Zeka Tabanlı GMPE Geliştirme Metodolojisi ve İş Akışı

Yapay zeka tabanlı bir GMPE geliştirilirken izlenecek metodolojik iş akışı 5 temel adımdan oluşur:

[Veri Hazırlığı ve Filtreleme] ➔ [Öznitelik Mühendisliği] ➔ [Gruplandırılmış Veri Bölümleme] ➔ [Hiperparametre Optimizasyonu] ➔ [Belirsizlik ve Artık Analizi]

Veri Hazırlığı ve Ön İşleme (Preprocessing)

- Verilerin homojenleştirilmesi (AFAD, NGA-West2 veya ESM veritabanlarından gürültüden arındırılmış ivme kayıtlarının seçilmesi).
- Filtre frekans sınırları (f_{hp}, f_{lp}) dikkate alınarak kullanılabilir periyot aralığının belirlenmesi.
- Aykırı değerlerin (*outliers*) Tukey veya Isolation Forest yöntemleriyle tespiti.

Öznitelik Mühendisliği (Feature Engineering)

Girdi matrisi X şu temel fiziksel bileşenleri barındırmalıdır:

Kaynak (S): Moment Büyüklüğü (M_w), Odak Derinliği (Z_{tor}), Fay Mekanizması (RAK).

Yol (P): R_{jb}, R_{rup}, R_{hyp}, Anelastik Azalım Parametreleri.

Saha (G): V_{s30}, $Z_{1.0}$, $Z_{2.5}$, Baskın Periyot (T_0).

Veri Bölümleme ve Veri Sızıntısını (Data Leakage) Önleme

Geleneksel rastgele veri ayırma (*Random Train-Test Split*) sismoloji verilerinde **veri sızıntısına** yol açar. Aynı depreme ait ivme

kayıtlarının hem eğitim hem test setine düşmesi modelin ezberlemesine (*overfitting*) neden olur. Bu nedenle **GroupKFold (Event-Based Splitting)** uygulanmalı; belirli deprem olayları tamamen test setinde tutulmalıdır.

Hiperparametre Optimizasyonu

Ağ derinliği, öğrenme oranı (*learning rate*), ağaç sayısı (*n_estimators*) gibi parametreler Bayesyen Optimizasyon (*Optuna* veya *BayesianOptimization* kütüphaneleri) kullanılarak K-katlı çapraz doğrulama (K-Fold Cross Validation) ile optimize edilmelidir.

Belirsizlik Analizi (Aleatory Variability)

Makine öğrenmesi modelleri toplam artığı (ϵ) tahmin eder. Ancak sismik tehlike analizinde kullanılabilmesi için toplam varyansın (σ_{total}^2), depremler arası (τ^2) ve deprem içi (ϕ^2) bileşenlerine ayrıştırılması gerekir:

$$\sigma_{total}^2 = \tau^2 + \phi^2 \qquad (3)$$

Bu işlem, ML modelinin tahmin artıkları üzerine *Karışık Etkili Modeller (Mixed-Effects Regression)* uygulanarak gerçekleştirilir.

Gelişmekte Olan Yönler ve Açık Araştırma Alanları

Yukarıda özetlenen iş akışı, mevcut ML-GMPE literatürünün büyük bölümünü kapsasa da, alanın hâlâ olgunlaşmakta olan ve gelecekteki uygulamalar için doğrudan potansiyel taşıyan dört yönü ayrıca vurgulanmayı hak etmektedir:

- *Transfer Öğrenmesi ve Simülasyon Destekli Veri Artırma:* Kayıt yoğunluğunun düşük olduğu bölgelerde (ör. Doğu Anadolu fay sistemi), büyük küresel veri tabanları (NGA-West2, ESM) üzerinde önceden eğitilmiş ağların ince ayar (fine-tuning) yoluyla yerel veri setlerine uyarlanması ve

stokastik/fiziks tabanlı simülasyonlardan üretilen sentetik kayıtlarla eğitim setinin zenginleştirilmesi, veri seyrekliğinden kaynaklanan ekstrapolasyon riskine somut bir çözüm sunmaktadır.

- *Artık-Düzeltmeli Hibrit Modeller:* ML algoritmasını sıfırdan bir GMPE olarak değil, geleneksel bir modelin (ör. NGA-West2 ailesi) kalıntılarını (residuals) öğrenen bir düzeltme katmanı olarak konumlandırmak; ekstrapolasyon bölgelerinde ampirik modelin fiziksel kararlılığını korurken, veri yoğun bölgelerde ML'nin örüntü yakalama gücünden yararlanılmasını sağlar (Kong vd., 2019).
- *Non-ergodik ve Mekansal Olarak Değişken Modelleme:* Klasik ergodik varsayımını terk ederek istasyona ve yola özgü sistematik etkileri (site-to-site, path-to-path bileşenleri) ayrıştıran non-ergodik yaklaşımlar (Kotha vd., 2016), ML'nin yüksek boyutlu girdi işleme kapasitesiyle birleştirildiğinde, bu bölümde sunulan depremler-arası/deprem-içi varyans ayrıştırmasının ötesine geçen ilave bir belirsizlik azaltma potansiyeli taşımaktadır.
- *Derin Bayesyen ve Dağılım Tabanlı Belirsizlik Nicelemesi:* Karışık etkili artık analizine ek olarak, Monte Carlo Dropout, derin topluluk (deep ensemble) ve nicel regresyon (quantile regression) gibi epistemik belirsizliği doğrudan model çıktısından üreten teknikler, özellikle veri seyrek bölgelerde (büyük deprem büyüklüğü ve fay yakın sahası gibi) tahmin güvenilirliğinin raporlanmasında tamamlayıcı bir araç sunar.

Model Performans Değerlendirmesi ve Fiziksel Tutarlılık Kontrolleri

İstatistiki Başarım Ölçütleri

Modellerin başarısı tek başına R^2 ile ölçülemez. Şu istatistiksel parametreler birlikte değerlendirilmelidir:

- *Kök Ortalama Kare Hata (RMSE):*

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\ln IM_{obs,i} - \ln IM_{pred,i}\right)^2} \qquad (4)$$

- *Ortalama Mutlak Hata (MAE)*
- *Logaritmik Artık Analizi (R_i):*

$$R_i = \ln\left(IM_{obs,i}\right) - \ln\left(IM_{pred,i}\right) \qquad (5)$$

Artıkların M_w, R_{jb} ve V_{s30} ile değişiminde eğimin sıfıra yakınlığı (tarafsızlık / *unbiasedness*) denetlenmelidir.

Fiziksel Tutarlılık Kontrolleri (*Sanity Checks*)

Yapay zeka modelleri verideki matematiksel örüntüyü öğrenirken fiziksel gerçeklikle çelişen sonuçlar üretebilir (*non-physical behavior*). Bu nedenle eğitilen ML-GMPE modeline şu sentetik testler uygulanmalıdır:

- *Mesafe Azalım Tutarlılığı:* M_w sabit tutulduğunda, R_{jb} arttıkça IM değerinin monotonik olarak azalması gerekir.
- *Büyüklük Doygunluğu (Magnitude Saturation):* Büyük büyüklüklerde ($M_w > 7.5$), faya yakın mesafelerde ivme genliğinin artış hızının doymaya ulaşması kontrol edilmelidir.
- *Zemin Büyütmesi Tutarlılığı:* Düşük V_{s30} değerlerinde yüksek spektral ivme büyütmesi elde edilmeli, ancak yüksek

PGA değerlerinde lineer olmayan zemin davranışı sönümlemesi gözlemlenmelidir.

Açıklanabilir Yapay Zeka (XAI) ve Fizik Kısıtlı Modeller (PINN)

"Kara Kutu" (*Black-Box*) Eleştirisi

Geleneksel mühendislik disiplinleri, karar süreçlerinde şeffaflık arar. Derin öğrenme ve Karmaşık Topluluk Modelleri yüksek tahmin başarısı sunsa da "kara kutu" olmaları nedeniyle kritik altyapıların sismik tasarımında doğrudan kullanımda dirençle karşılaşmaktadır.

Açıklanabilir Yapay Zeka (XAI) Yöntemleri

Bu güvensizliği aşmak için XAI teknikleri ML-GMPE modellerine entegre edilmektedir:

- *SHAP (SHapley Additive exPlanations):* Oyun teorisine (Shapley, 1953; Lundberg ve Lee, 2017) dayanan SHAP, her bir girdi parametresinin (M_w, R_{jb}, V_{s30}) üretilen tahmin üzerindeki marjinal katkısını nicel olarak hesaplar.
- *LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations):* Belirli bir veri noktası etrafında modeli yerel olarak açıklanabilir kılan doğrusal yaklaşımlar sunar.

Fizik Bilgili Sinir Ağları (Physics-Informed Neural Networks - PINNs)

Yapay zeka ile sismoloji arasındaki en ileri köprü PINN mimarileridir (Raissi vd., 2019). Standart bir sinir ağında kayıp fonksiyonu (*loss function*) sadece veri hatasını (MSE_{data}) minimize ederken; PINN modelinde kayıp fonksiyonuna fiziksel kısıtlar eklenir:

$$\mathcal{L}_{total} = \mathcal{L}_{data} + \lambda_1 \mathcal{L}_{wave_equation} + \lambda_2 \mathcal{L}_{monotonicity} \quad (6)$$

Bu sayede model, verinin az olduğu alanlarda (örn. $M_w > 8.0$ veya $R_{jb} < 5$ km) bile fizik kurallarına (dalga yayılım denklemleri, enerji korunumu, monotonik azalım) aykırı tahminler üretemez.

Sonuçlar ve Gelecek Vizyonu

Deprem mühendisliğinde yer hareketi tahmin modelleri (Ground Motion Prediction Equations – GMPE), yalnızca akademik bir araç değil, aynı zamanda mühendislik uygulamalarının ve yasal düzenlemelerin temel dayanak noktasıdır. Bu modeller, kaynak özellikleri, dalga yayılım yolları ve yerel zemin koşullarını dikkate alarak, belirli bir sahada beklenen kuvvetli yer hareketini matematiksel bağıntılarla öngörür. Böylece, olasılıksal ve deterministik sismik tehlike analizlerinin vazgeçilmez girdisini oluşturur; bina yönetmeliklerindeki tasarım spektrumlarının belirlenmesinde ve kentsel risk azaltma stratejilerinin geliştirilmesinde kritik bir rol oynar.

GMPE'lerin tarihsel gelişimi incelendiğinde, 1960'lardan itibaren ivme kayıt cihazlarının yaygınlaşmasıyla birlikte ilk ampirik azalım ilişkilerinin ortaya çıktığı görülür. Bu dönemde modeller, çoğunlukla deprem büyüklüğü ve uzaklık parametrelerine dayalı basit fonksiyonel formlar kullanmış, ancak veri kısıtlılığı nedeniyle zemin koşulları ve faylanma mekanizması gibi faktörler göz ardı edilmiştir. 1970'lerden itibaren spektral parametrelerin ve zemin etkilerinin modellere dahil edilmesiyle daha gerçekçi tahminler yapılmaya başlanmış, 1980'lerde ise iki aşamalı regresyon teknikleri ve yakın saha doyum kavramı literatüre girmiştir. 1990'lı yıllar, moment büyüklüğü ölçeğine geçiş ve Vs30 parametresinin standart hale gelmesiyle metodolojik bir sıçrama yaratmış; 2000'li yıllarda ise küresel veri tabanlarının oluşturulması ve NGA-West projeleriyle çok parametreli, bölgesel ve doğrusal olmayan zemin davranışını içeren modern modeller geliştirilmiştir.

Bununla birlikte, geleneksel ampirik modellerin fonksiyonel form rijitliği, veri seyrekliği ve yüksek belirsizlik düzeyi gibi sınırlamaları, makine öğrenmesi ve yapay zekâ tabanlı yaklaşımlara olan ihtiyacı doğurmuştur. Yapay sinir ağları, rastgele ormanlar ve gradient boosting algoritmaları, karmaşık kaynak-yol-saha etkileşimlerini esnek biçimde öğrenebilmekte; derin öğrenme yöntemleri ise ivme zaman serilerinden doğrudan özellik çıkarımı yaparak daha güçlü tahminler sunmaktadır. Ayrıca, fizik bilgili sinir ağları (PINN) ve açıklanabilir yapay zekâ (XAI) teknikleri, modellerin hem yüksek doğruluk hem de mühendislik açısından şeffaflık sağlamasına katkıda bulunmaktadır.

Sonuç olarak, GMPE'lerin evrimi, klasik regresyon temelli yaklaşımlardan veri odaklı ve fiziksel kısıtlı hibrit modellere doğru ilerlemektedir. Geleceğin sismik tehlike değerlendirmeleri, verinin sunduğu esnek öğrenme gücü ile fiziğin sağlam sınırlarını birleştiren bu hibrit sistemlere dayanacak; böylece daha güvenilir, açıklanabilir ve sahaya özgü deprem tehlike haritalarının oluşturulmasına olanak tanıyacaktır.

Yer hareketi tahmin modellerinin ampirik regresyon denkleminden veri yönelimli ve fiziksel kısıtlı yapay zeka sistemlerine evrimi, sismik tehlike analizinde yeni bir paradigma başlatmıştır. Bu dönüşüm, geleneksel yöntemlerin güvenilirliği ile modern algoritmaların yüksek tahmin kapasitesini birleştiren hibrit bir geleceğe işaret etmektedir.

Geleneksel GMPE'lerin Sürdürülebilir Rolü

Geleneksel GMPE'ler, fiziksel olarak açıkça tanımlanabilen parametrik yapıları ve mühendislik pratiğindeki köklü geçmişleri sayesinde Olasılıksal Sismik Tehlike Analizlerinin (PSHA) temel taşı olmaya devam etmektedir. Düzenleyici kurumlar ve ulusal bina yönetmelikleri (örneğin TBDY-2018, Eurocode 8, ASCE 7)

tarafından resmi kabul görmüş olmaları, bu modellerin hukuki ve teknik standart belirleyici konumunu korumasını sağlamaktadır.

Yapay Zeka Tabanlı Modellerin Sunduğu Metodolojik Sıçrama

Yapay zeka ve makine öğrenmesi yaklaşımları, veri setlerindeki doğrusal olmayan karmaşık ilişkileri ve kaynak-yol-saha etkileşimlerini önceden varsayılmış rijit fonksiyonel formlara zorlamadan öğrenir.

Belirsizlik Yönetimi: Karma etkili (mixed-effects) analizlerle desteklenen algoritmalar, modellerdeki rastlantısal belirsizliği ve artık varyansı ($\sigma_{total} = \sqrt{\tau^2 + \phi^2}$) belirgin ölçüde düşürür.

Mevcut GMPE yaklaşımı ile literatürün işaret ettiği gelecek vizyonu üç eksende karşılaştırılabilir. Model mimarisi açısından bugün ya parametrik regresyona ya da saf veri odaklı "kara kutu" algoritmalara dayanılırken, gelecekte dalga yayınım fiziği ve sönüm sınırlarıyla kısıtlanmış PINN mimarilerinin yaygınlaşması beklenmektedir. Açıklanabilirlik boyutunda mevcut durumda katsayılar üzerinden sınırlı bir fiziki yorumlama yapılabilirken, geleceğin modellerinin SHAP ve LIME gibi XAI yöntemleriyle kararlarının fiziksel gerekçesini sunan şeffaf yapılara dönüşmesi öngörülmektedir. Yönetmelik uyumu açısından ise bugünkü statik ve bölgesel ortalamalara dayalı haritaların yerini, sahaya özgü (site-specific) ve veri zenginliği yüksek, daha esnek sismik tehlike haritalarının alması beklenmektedir.

Çok Boyutlu Veri Entegrasyonu: Tek bir V_{s30} değeri yerine tüm V_s derinlik profilini, 3B sediman havza geometrilerini ($Z_{1.0}, Z_{2.5}$) ve sismik ağ kayıtlarını doğrudan işleme kapasitesine sahiptir.

Gelecek Vizyonu: PINN ve XAI Destekli Hibrit Yaklaşımlar

Geleceğin sismik tehlike değerlendirmeleri, geleneksel yöntemlerin fiziki doğrulanabilirliği ile yapay zekanın yüksek temsil gücünü sentezleyen hibrit sistemlere dayanacaktır.

Verinin sunduğu esnek öğrenme gücü ile fiziğin sarsılmaz koruma sınırlarını birleştiren bu hibrit modeller, yeni nesil sismik tehlike haritalarının oluşturulmasında ve depreme dirençli yapı tasarım standartlarının geliştirilmesinde temel rol oynayacaktır.

Kaynakça

Abrahamson, N. A ve Silva, W. J. (1997). Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 94-127.

Abrahamson, N. A ve Youngs, R. R. (1992). A stable algorithm for regression analysis using the random effects model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(1), 505-510.

Akkar, S. ve Bommer, J. J. (2007). Empirical Prediction Equations for Peak Ground Velocity Derived from Strong-Motion Records from Europe and the Middle East. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(2), 511–530

Akkar, S., Sandıkkaya, M. A. ve Bommer, J. J. (2014). Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(1), 359-387.

Ambraseys, N. N., Simpson, K. A. ve Bommer, J. J. (1996). Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering ve Structural Dynamics*, 25(4), 371-400.

Campbell, K. W. (1981). Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6), 2039-2070.

Derras, B., Bard, P. Y., Cotton, F. ve Bekkouche, A. (2012). Adapting the neural network approach to PGA prediction: An example based on the KiK-net data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(4), 1446-1461.

Derras, B., Bard, P. Y. ve Cotton, F. (2014). Towards fully data-driven ground-motion prediction models for Europe. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(1), 495-516.

Douglas, J. (2003). Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates. *Earth-Science Reviews*, 61(1-2), 43-104.

Esteva, L. ve Rosenblueth, E. (1964). Espectros de temblores a distancias moderadas y grandes. *Boletín Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*, 2(1), 1-18.

Gandomi, A. H., Alavi, A. H., Mousavi, M. ve Tabatabaei, S. M. (2011). A hybrid computational approach to derive new ground-motion prediction equations. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(4), 717-732.

Güllü, H. ve Erçelebi, E. (2007). A neural network approach for attenuation relationships: An application using Turkish strong ground motion dataset. *Engineering Geology*, 93(3-4), 65-81.

Joyner, W. B. ve Boore, D. M. (1981). Peak acceleration and velocity from strong-motion records including the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bulletin of the seismological Society of America*, *71*(6), 2011-2038.

Idriss, I. M. (1985). Evaluating seismic risk in engineering practice. *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, 12-16 August 1985.

Kanai, K. (1961). An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motions. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 39, 85-95.

Kale, Ö., Akkar, S., Ansari, A. ve Hamzehloo, H. (2015). A ground-motion predictive model for Iran and Turkey for horizontal PGA, PGV and 5%-damped response spectrum: Investigation of possible regional effects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(2A), 963-980.

Kong, Q., Trugman, D. T., Ross, Z. E., Bianco, M. J., Meade, B. J. ve Gerstoft, P. (2019). Machine learning in seismology: Turning data into insights. *Seismological Research Letters*, 90(1), 3-14.

Kotha, S. R., Bindi, D. ve Cotton, F. (2016). Partially non-ergodic region-specific GMPE for Europe and Middle-East. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(4), 1245-1263.

Kotha, S. R., Weatherill, G., Bindi, D. ve Cotton, F. (2020). A regionally-adaptable ground-motion model for shallow crustal earthquakes in Europe. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18, 4091–4125.

Lundberg, S. M. ve Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30.

McGuire, R. K. (1978). Seismic ground motion parameter relations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104(4), 481-490.

Milne, W. G. ve Davenport, A. G. (1969). Distribution of earthquake risk in Canada. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 59(2), 729-754.

Raissi, M., Perdikaris, P. ve 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, 686-707.

Sadigh, K., Egan, J. A. ve Youngs, R. R. (1986). Specification of ground motion for seismic design of long period structures. *Earthquake Notes*, 57(1), 13.

Sadigh, K., Chang, C. Y., Egan, J. A., Makdisi, F. ve Youngs, R. R. (1997). Attenuation relations for shallow crustal earthquakes

based on California strong motion data. *Seismological Research Letters*, 68(1), 180-189.

Schnabel, P. B ve Seed, H. B. (1973). Accelerations in rock for earthquakes in the western United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 63(2), 501-516.

Shapley, L. S. (1953). A value for n-person games. In H. W. Kuhn ve A. W. Tucker (Eds.), Contributions to the Theory of Games II (pp. 307-317). Princeton University Press.

Trifunac, M. D. (1976). Preliminary analysis of the peaks of strong earthquake ground motion–dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(1), 189-219.

Trugman, D. T. ve Shearer, P. M. (2018). Strong correlation between stress drop and peak ground acceleration for recent M 1–4 earthquakes in the San Francisco Bay area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(2), 929-945.


BİDGE