

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

DEPREM, ZEMİN VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ

EDİTÖR

PROF. DR. ERCAN ÖZGAN

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • Eda Altunel

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

Birinci Basım / First Edition • © Nisan 2025

ISBN • 978-625-5897-04-6

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 42488

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ALANINDA
ULUSLARARASI
ÇALIŞMALAR

DEPREM, ZEMİN VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ

EDİTÖR

PROF. DR. ERCAN ÖZGAN

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

SİSMİK TEHDİTLER VE KARAYOLU YAPILARI: HASAR MEKANİZMALARI VE MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMLARI

Kürşat YILDIZ —1

Bölüm 2

ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ JETGROUT UYGULAMA KOLONLARI İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME

Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER —17

Bölüm 3

ZEMİNİN KAYMA MUKAVEMETİ PARAMETRELERİNDEKİ DEĞİŞİMİN İSTİNAT DUVARININ DAYANIMINA ETKİSİ

Burak YEŞİL, Tuncay KAP —37

Bölüm 4

HIZLI TARAMA YÖNTEMİ İLE RİSKLİ BİNA TESPİTİ, DÜZCE İLİ ÖRNEĞİ

Hüseyin BAYRAKTAR —55

Bölüm 5

DEPREM BÖLGELERİNDE KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON KULLANIMININ KALIP BASINCINA ETKİSİ

Tuncay KAP, Metin ARSLAN —73

Bölüm 1

SİSMİK TEHDİTLER VE
KARAYOLU YAPILARI:
HASAR MEKANİZMALARI
VE MÜHENDİSLİK
YAKLAŞIMLARI

Kürşat YILDIZ¹

¹ Doç. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat
Mühendisliği Bölümü <https://orcid.org/0000-0003-2205-9997>

1. Giriş

Depremler, yer kabuğunda meydana gelen ani enerji boşalmaları sonucu ortaya çıkan ve geniş çaplı yapısal hasarlara neden olabilen doğa olaylarıdır. Özellikle aktif fay hatları boyunca yer alan kara yolları, bu sismik hareketlerden doğrudan etkilenmekte ve büyük çaplı altyapı kayıpları yaşanabilmektedir. Karayolu sistemleri, bir ülkenin ulaşım ağının temel bileşeni olup ekonomik ve sosyal kalkınma açısından kritik bir öneme sahiptir. Ancak, depremler sonrası meydana gelen yıkımlar, yalnızca fiziksel hasarla sınırlı kalmayıp, lojistik, acil müdahale ve ekonomik faaliyetlerin sekteye uğramasına da yol açmaktadır. Bu durum, karayolu altyapısının sismik dayanıklılığını artırmayı stratejik bir zorunluluk haline getirmektedir.

Türkiye, jeolojik yapısı itibarıyla yüksek sismik risk taşıyan bir bölgedir. Ülkenin çeşitli bölgelerinde geçmiş yıllarda meydana gelen büyük ölçekli depremler, kara yolu altyapısına olan etkilerini gözler önüne sermiştir. 1999 Kocaeli Depremi ve 2023 Kahramanmaraş Depremleri gibi doğa olayları; köprülerin çökmesi, viyadüklerin zarar görmesi ve ana ulaşım hatlarının devre dışı kalması gibi kritik sonuçlara yol açmıştır. Bu tür doğa olayları, afet sonrası arama-kurtarma çalışmalarını ve acil yardım faaliyetlerini olumsuz yönde etkilemekte, aynı zamanda ekonomik kayıpları da artırmaktadır.

Bu bölümde, kara yolu altyapısının depremden nasıl etkilendiği kapsamlı bir şekilde ele alınacaktır. Öncelikle, deprem dalgalarının kara yolu sistemlerine etkisi açıklanacak, ardından zemin-yapı etkileşimi bağlamında hasar mekanizmaları değerlendirilecektir. Yazımızda karayolu üstyapısı, köprüler, viyadükler ve tüneller gibi kritik yapılar özelinde hasar türleri ele alınarak, sismik tehditlere karşı alınabilecek mühendislik önlemleri üzerinde durulacaktır. Son olarak, kara yolu altyapısının depreme karşı dayanıklılığını artırmak adına uygulanabilecek güçlendirme yöntemleri, erken uyarı sistemleri ve afet sonrası müdahale stratejileri tartışılacaktır.

2. Deprem-Karayolu etkileşimi

Deprem dalgaları bilindiği üzere öncelikle zemine ve daha sonra zemin üzerindeki her türlü yapıya dinamik kuvvetler uygulamak suretiyle etki mekanizması geliştirirler. Bu dinamik etki mekanizması hem zeminde hem de üzerindeki yapılarda yapısal birtakım bozulmalara sebebiyet verir.

Deprem zemin ilişkisinde karşımıza çıkacak problemleri kabaca iki ana başlıkta ifade edebiliriz. Bunlardan birincisi statik yükler “taşıma gücü,

zemin oturması, şev stabilitesi vb.” sorunlar oluştururken ikincisi dinamik yükler ki “sıvılaşma, zemin büyütmesi, dinamik yamaç stabilitesi gibi temel problemleri meydana getirmektedir. (Chopra, 2012).

Deprem oluşturduğu dinamik kuvvetler, yukarıda bahsi geçen temel problemler nedeniyle karayolu alt yapısında çeşitli hasarlar oluşturabilirler. Bu hasar oluşumları sadece deprem dalgalarının genlik ve frekans özelliklerine bağlı olmayıp aynı zamanda depremin serisi ve zeminin karakteristik özellikleriyle de yakinen ilişkilidir.

Depremin karayolu ile olan etkileşimini daha iyi açıklayabilmek için deprem dalgalarının türleri hakkında bilgi sahibi olmak gerekir. Bu dalga türleri; Body Waves (P ve S dalgası) ve Surface Waves (Rayleigh ve Love dalgaları) iki ana başlıkta ele alınmaktadır. P dalgası yer kabuğu içerisinde zemin üzerinde sıkıştırma ve gerilme etkisi ile yayılırken S dalgası kesme davranışı sergileyerek zeminde yanal yer değiştirmeye yol açar. Surface Waves yani yer yüzeyinde veya yer yüzeyine daha yakın derinliklerde büyük deformasyonlara yol açan dalgalardır. Bilhassa zayıf zeminlerde geri dönüşü mümkün olmayan hasarlara neden oldukları bilinmektedir (Kramer, 1996).

Deprem dalgalarının oluşturduğu dinamik kuvvetler karayolu alt yapısında ani kuvvet aktarımlarını ve tekrarlı yükleme şeklinde meydana gelir. Meydana gelen bu yükleme şekli tipik karayolu altyapısında tabii zeminden varsa dolgu tabakasına iletilerek karayolu alt yapısında gerilme deformasyonları, yorulma hasarları, yanal değiştirmeler vb. hasarlara yol açabilmektedir (Bozorgnia ve Bertero (2004).

Performansa dayalı deprem mühendisliği ilkeleri dikkate alınarak karayolu alt yapısındaki bu etkileşim sayısallaştırılmalıdır. Sayısal modeller kurulurken bağımlı ve bağımsız değişkenler eksiksiz belirlenmeli bunları ileri sayısal yöntemler kullanılarak değerlendirilmelidir.

Karayolu yapısını bütüncül olarak değerlendirdiğimiz zaman, depremin oluşturduğu dinamik kuvvetlerin karayolu alt yapısında meydana getirdiği hasarların yansımalarını, tipik karayolu üst yapısı elemanları olan alt temel, temel ve kaplama tabakalarında da görmemiz kaçınılmaz olacaktır. Karayolu alt yapısı ve üst yapısı farklı malzeme özelliklerine sahip olduklarından dinamik deprem yükleri aynı hasar mekanizmasını oluşturmayabilir. Bazen deprem kuvvetlerinden hiç etkilenmediğini düşündüğümüz bir karayolunun alt yapı hasarı aldığı ileren zaman içerisinde tekrarlı trafik yükleri altında ortaya çıkabilmektedir. Benzer durum deprem sonrası üst yapı hasarlarının gözlemlendiği bir karayolu kesitinin alt yapısında herhangi bir hasar mekanizmasına rastlanmayabilir.

Ülkemizin önemli bir bölümü yüksek sismik aktivite alanlarında yer almakta ve karayolu ağının büyük bir kısmı deprem riski altındaki g zerg ahlardan geçmektedir. Türkiye'nin farklı bölgelerini etkileyen deprem tehlike haritaları ve bu haritaların karayolu g zerg ah planlamasında kullanılmasının gerekliliği vurgulanmaktadır (AFAD (2018). Fay hatlarının konumları ve zemin yapıları hakkında detaylı bilgiler sunarak, karayolu projelerinin tasarım aşamasında yerel zemin koşullarına özel çözümler üretilmesinin önemine işaret edilmektedir (MTA (2016). Özellikle zayıf zeminlerin ve yüksek yeraltı su seviyesinin h kim olduğu bölgelerde, sismik dalgaların zeminle etkileşimi sonucu ortaya çıkan oturmalar, kaymalar ve sıvılaşma riskleri, karayolu alt ve üst yapısını büyük  lde tehdit edebilmektedir.

Yukarıda ifade edilen bilgi ve belgeler işığında; Deprem Karayolu- etkileşiminin karayolu üst ve alt yapısını meydana getiren malzeme davranışından ibaret olmadığını, yapısal tasarım ilkeleri, jeoteknik incelemeler, saha testleri, laboratuvar deneyleri ve ileri sayısal modelleme tekniklerini içeren çok disiplinli bir yaklaşıma ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Ancak bu Şekilde en çok tercih edilen ulaşım modu olarak karayolunun hizmet ömrünü uzatmak deprem sonrasında oluşabilecek ekonomik ve sosyal kayıpları asgari düzeye indirmek mümkün olabilmektedir.

3. Deprem Kaynaklı Karayolu Hasarları

Deprem kaynaklı karayolu alt ve üst yapısında meydana gelen hasarlar, depremin büyüklüğü, karayolunun deprem merkez üssüne uzaklığı, karayolunun üzerine inşa edildiği zemin koşulları, karayolunun tasarım ilkelerine uygunluğu ve hizmet ömrü süresince bakım, onarım durumuyla doğrudan ilişkilidir. Deprem kaynaklı hasar türleri ise karayolunun yapısal elemanlarının durumu ve zemin koşullarına göre farklılıklar gösterir.

3.1. Deprem-Zemin ilişkisine bağlı karayolu alt ve üst yapı hasarları

Türkiye karayolu ağının neredeyse tamamı, farklı jeolojik dönemlerde oluşmuş kompleks zeminler üzerine ve/veya yakın çevresine inşa edilmiştir. Bu konuda Maden Teknik Arama Enstitümüz,  lkemiz fay zonlarını ve yakın çevresini zemin özelliklerine göre haritalandırmıştır.

Türkiye gibi deprem kuşağında bulunan ülkelerde, karayolu altyapısının deprem etkisi altında performans kriterleri belirlenmeli ve bu kriterlere göre karayolu tasarım ilkeleri tanımlanmalıdır. Deprem dalgaları, bilhassa karayolu zemini ve temel malzemelerinin taşıma gücünü kaybetmesine, aşırı oturmaların meydana gelmesine, aksenal kayma sorunları-

na ve sıvılaşma gibi en yaygın mühendislik problemlerine yol açabilmektedir. Bu problemler yol platformunun stabilitesini bozduğundan yolun hizmet sürekliliğini tehlikeye atmaktadır.

Depremın meydana getirdiği sismik dalganın şiddetine göre zeminlerde; sıvılaşma, diferansiyel oturma ve zemin kayması meydana gelir. Özellikle kumlu ve doygun zeminlerde dane arası boşluk suyu basıncının artışı mekanizması sonucu oluşan sıvılaşma, zemin taşıma gücünü büyük ölçüde azaltır. Bu durum ise karayolu alt yapısında ani oturmalara, çatlaklara ve yanal yayılmalara sebebiyet verir (Seed & Idriss, 1971). Deprem zemin etkileşimi zeminin farklı tabakalarına farklı davranışlar sergileyecektir (Kramer, 1996).

Zemin tabakalarının farklı oturması olarak tanımlanan diferansiyel oturma karayolu üst yapısında dalgalanmalar ve çatlaklara yol açar. (Şekil 1).



Şekil 1. Deprem sonrası karayolunda diferansiyel oturma-sıvılaşma-zemin kayma hasarları “Yazar tarafından hazırlanmıştır.”

Buraya kadar deprem zemin ilişkisi ekseninde karayolu alt yapısı etkileşimini ve bunun neticesinde oluşan hasar türlerinden bahsedildi. Karayolu altyapısı üzerine kurulan, asfalt ve/veya beton kaplama tabakaları ile bunlara tabanlık eden temel tabakaları da karayolu üst yapısı olarak adlandırılır. Gerek yapılan saha çalışmaları gerekse laboratuvar çalışmaları yol üst yapı kaplama tabakalarının tekrarlanan yüklere maruz kalması, özellikle sıcak karışım asfalt kaplamalarda yorulma çatlak hasarına ve en nihayetinde kalıcı deformasyonlara sebep olmaktadır. Yorulma çatlak hasarı normalde tek sefer uygulandığında herhangi bir hasar meydana getirmeyecek seviyede olan, ancak tekrarlı şekilde uygulandığında çatlak veya kırılma şeklinde hasar oluşturma durumudur. Bu durum, karayolu üst yapısında hem deprem öncesi araçlar tarafından uygulanan tekrarlı yükler hem de deprem esnasında meydana gelen tekrarlı yükler sonu-

cunda yorulma çatlaklarının tetiklendiği bilinmektedir Şekil 2. Yorulma çatlakları bilhassa kendisini boyuna çatlaklar, yol yüzeyinde dağlanma (ondülasyon) ve çökme şeklinde kalıcı hasarlar şeklinde göstermektedir (Mamdouh, 2018), Priestley, Seible ve Calvi 2007).



*Şekil 2. Deprem sonrası yorulma etkisine maruz kalan karayolu hasar türleri
“Yazar tarafından hazırlanmıştır.”*

Karayolu üst yapısının bileşenlerini yukarıdan aşağıya doğru ele aldığımızda, aşınma ve binder tabakalarının bitüm kaynaklı esnek davranışı doğru tasarlandığında küçük tekrarlı yüklerin meydana getirdiği titreşimleri absorbe edebilmektedir. Bu durum deprem kaynaklı sismik dalgaların titreşimini absorbe etmekte yeterli kalmayarak her iki sıcak karışım tabakasında da hasara yol açmaktadır.

Son zamanlarda bitümlü sıcak karışımlara alternatif olarak geliştirilen, bir takım avantaj ve dezavantajları ortaya konulan çimento esaslı rijit yol üst yapısı veya diğer adıyla beton kaplamalarda ise durum tamamen farklı seyretmektedir. Plakalar şeklinde inşa edilen beton yol kaplamaları arasındaki derzlerin uygun tasarlanmaması, zeminde diferansiyel oturmalar beton plaklarda kırılma hasarları meydana getirmektedir. (AASHTO, 2012).



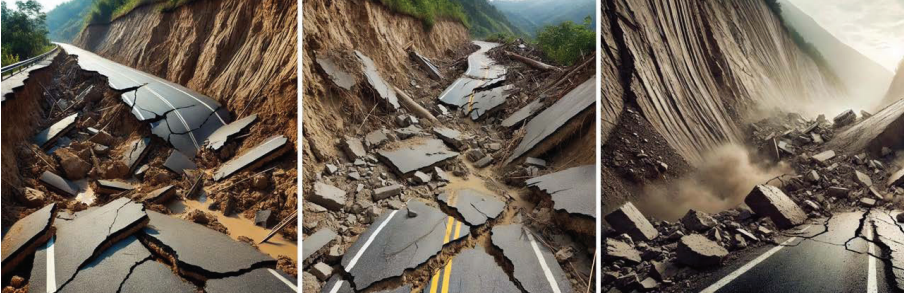
Şekil 3. Deprem sonrası rijit yol üst yapısı hasar türleri “Yazar tarafından hazırlanmıştır.”

Yukarıda, 3. şekildeki görseller deprem sonrası rijit üst yapıli beton yolların karşılaştığı en yaygın yapısal bozulmaları temsil etmektedir. Bunlar levha (plaka) yer değiştirmesi (slab displacement), şiddetli yüzey kırıkları (severe surface fractures), beton yüzeyde seviye farklılıkları (misalignment of concrete slabs) ve deprem kaynaklı plaka ayrışması (joint failure & separation) olarak sıralanabilir.

Karayolu üst yapısının en alt tabakası olan temel ve alt temel tabakalarda yukarıda ifade ettiğimiz tabaka türlerinde bitüm ve çimento gibi bir bağlayıcı söz konusu değildir. B u n l a r tamamen granüler veya stabilize malzemeden oluşmaktadır. Anılan tabakaların depremde oluşabilecek yatay ve düşey yükleri karşılayabilme kabiliyetleri yol üst yapı hasarında belirleyici rol oynar (Gazetas, 1991).

Deprem etkisiyle karayolunda oluşan tipik hasar çeşitleri, farklı tabakaların farklı frekanslarda meydana getirdikleri titreşimlerden kaynaklı dikey ve yatay çatlak oluşumlarıdır. Bir diğer durumda şev stabilitesinin bozulmasıyla dolgu malzemesinin yol kenarlarına akması olarak karşımıza çıkarken, en bariz ve en tahrip edici olanı sismik dalgaların tekrarlı yüklenmelerinden kaynaklı kaplama üzerinde dalgalanma şeklinde görülebilir. (Chopra, 2017 Kramer, 1996, Huang, 2004).

Tüm bu deprem zemin etkileşimlerinin karayoluna vermiş olduğu hasarların yanı sıra, Şekil 4’de görebileceğimiz türden hasarlar; deprem esnasında veya sonrasında stabilitesi bozulan yamaçlarda, büyük zemin kütlelerinde yer değiştirme veya stabilitesi bozulmuş şevlerde kaymalar meydana gelebilir (Gazetas, 1991).



Şekil 4. Deprem sonrası karayollarında stabilitesi bozulmuş yamaç ve şev hasarları “Yazar tarafından hazırlanmıştır.”

3.2. Deprem etkisi altında karayolu sanat yapılarında meydana gelen hasarlar

Ulaştırma bilim dalınca menfezler, hendek, istinat duvarları, köprüler, dere ıslah yapıları ve benzeri küçük ölçekte arazi üzerinde güzergâh geçiş problemlerini çözmek üzere inşa edilen yapılar sanat yapıları olarak değerlendirilmektedir. Deprem esnasında sanat yapılarının taşıyıcı ve zeminle etkileşimde olduğu elemanları hasar görebilir. Sismik itki kuvvetleri sanat yapılarının taşıyıcı elemanlarını hasara zorlarken, zemin basıncı kuvvetleri ise sanat yapılarının zeminle etkileşimde olduğu kısımlarda hasara yol açabilir (Wang, 1993).

Sismik itki kuvvetlerinin yatay yönde istinat duvarına etki etmesi durumunda, duvar kuvvetin döndürme etkisine ve kesme kuvvetlerine maruz kalır. Bu etki Şekil 5’deki temsili görsellerde olduğu gibi yetersiz drenaj ve zayıf arka dolguyla birleşmesi durumunda istinat duvarının göçmesi ve/veya bütüncül bir devrilme ile sonlanabilir (Mononobe-Okabe Teorisi, Okabe, 1926; Mononobe & Matsuo, 1929).



Şekil 5. Deprem etkisine maruz kalmış beton ve taş duvar istinat hasarı “Yazar tarafından hazırlanmıştır.”

Karayolu güzergâhları belirlenirken bazen bir akarsu bazen başka köy yolu bazen de hayvanların geçiş güzergâhlarıyla kesişebilmektedir. Böylesine durumlarda menfezler, yolların altına veya yanına yerleştirilir. Bu uygulama sel ve taşkın gibi doğal afet durumlarında suyun akışını düzenleyerek karayolunun hasar almasını önler. Menfez, karayolunun hasar almasını önlemeye çalışırken öte yandan kendisi de olası bir depremde zarar görebilir. Deprem kaynaklı menfez hasar mekanizması genellikle, zeminde meydana gelen farklı oturmalar ve kesme deformasyonları şeklinde meydana gelmektedir (Şekil 6). Bu da karayolu sanat yapısı olarak anılan menfezin çökmesine veya bölgesel çatlama yol açabilir FHWA (2006).



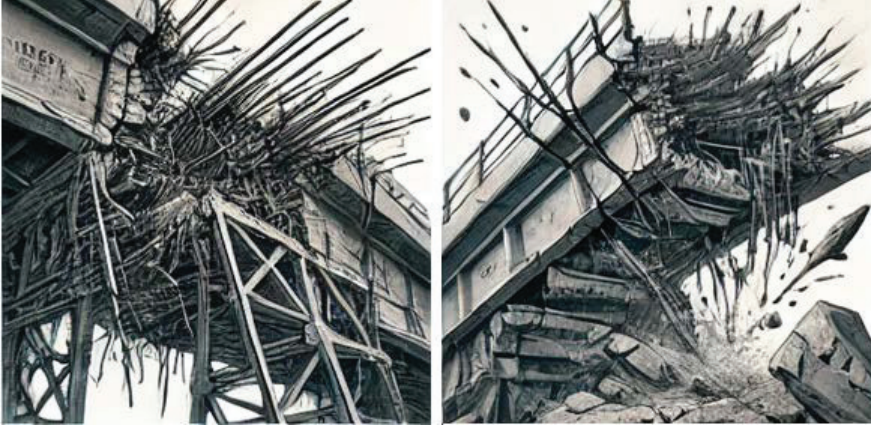
Şekil 6. Deprem etkisine maruz kalmış menfez hasarları “Yazar tarafından hazırlanmıştır.”

Deprem etkisiyle karayolu sanat yapılarında en çok görülen hasar oluşumları; çatlak tipi ayrışmalar, temel oturması ve kaymaya eşlik eden devrilme göçmeleri olarak sıralanabilir. Bu hasar tipleri, özellikle dayanma yapılarında sıklıkla görülür. İstinat duvarları imal edildiği yapı malzemesine göre alınacak birtakım önlemler sayesinde depreme daha dayanıklı hale getirilebilir.

3.3. Deprem etkisi altında köprü ve viyadük hasarları

Karayolu ağının stratejik yapıları olarak bilinen köprü ve viyadüklerin deprem performansı son derece önemlidir. Sismik yüklemeler bu stratejik yapılara bazen lokal hasar bazen de tam göçmeye sebebiyet verecek hasarlar verebilmektedir. Köprü ve viyadüklerin bu hasar türlerine karşı koyabilmesini deprem performansı olarak tanımlarsak, deprem performansını etkileyen parametreleri taşıyıcı sistem Rijitliği, temel zemin etkileşimi ve sismik dayanım kapasitesi şeklinde sıralayabiliriz (Priestley, Seible ve Calvi (1996).

Köprü ve viyadüklerin deprem etkisi altında en sık rastlanan hasar mekanizmaları; betonarme ayaklarda oluşan kesme çatlakları, donatı ezilmeleri ve mesnet yataklarının yerinden fırlaması olarak sayılabilir (Şekil 7). Hasar mekanizması köprü viyadük alt yapısında bu Şekilde geliŐirken üst yapı elamanlarında ise dilatasyon derzleri ve genleŐme ekipmanlarında yeterli boŐluĐun bırakılmaması deprem kuvvetlerinin oluşturduğu salınım sırasında tabliyelerin kenarlarının birbirine çarparak ezilme hasar tiplerinin oluşmasına yol açmaktadır. Köprü ve viyadük tabliyelerinin özellikle de elik kiriŐli sistemlerde kaynak ve cıvata birleŐim kısımlarında meydana gelen tekrarlı y k, bu bölgelerde yorulma çatlaklarına ve Şekil 8'deki gibi plastik mafsallaŐmalara sebep olmaktadır (NEHRP, 2020, (AASHTO, 2020, (Priestley et al., 1996).



Şekil 7. Deprem etkisi altında köprü ve viyadüklerde rastlanan muhtemel hasar  rneği “Yazar tarafından hazırlanmıştır.”

Köprü ve viyadüklerin karayolu ağında yapısal fonksiyonu gereği geniş açıklıklar, yüksek ayaklar veya mesnetler barındırması; aynı zamanda sınırlı Rijitlik ve sönümlenme yeteneğinin olması, bu yapıları deprem yönünden en riskli yapılar haline getirmiştir. Bu risk deprem sırasında köprü açıklıklarının daha büyük yer deĐiŐtirmelere yol amasına bu durumun ise taşıyıcı sistemlerde büyük kesme ve eğilme gerilmelerinin doğmasına sebebiyet verir (FEMA, 2000).



Şekil 8. Deprem etkisi altında köprü ve viyadüklerde rastlanan mesnet yatağı hasar örneği “Yazar tarafından hazırlanmıştır.”

Deprem yükleri her türlü yapıda farklı sismik talep oluşturur. Bu sismik talep, her coğrafyada farklı talepler doğurduğu gibi, her çeşit yapı tipinde de farklı talepler meydana getirmektedir. Bu nedenle kendi coğrafyamızda hele hele köprü ve viyadük gibi özel yapılarda sismik talep kesinlikle göz ardı edilmemelidir. Özellikle köprülerin mesnet ve bağlantı bölgeleri sismik talebe uygun tasarlanmalıdır. Mesnetler, bağlantı elemanları ve üst yapıya kadar olan bütün elemanların sismik talebe karşılık verecek esneklik ve enerji yutma kapasitesine sahip detayların kullanılması kaçınılmaz bir zorunluluktur. Aksi durum ani ve yıkıcı hasarların oluşmasına yol açabilir (Priestley ve ark. (2007), AASHTO (2011))

3.4. Deprem etkisi altında tünel hasarları

Karayolu ağında yeraltı yapısı olarak karşımıza çıkan tüneller daha önce bahsi geçen karayolu yapılarına göre farklı dinamik koşullara maruz kalır. Tüneller hem jeolojik hem de sismik etkiler açısından son derece hassas yapılardır. Sismik dalgaların zemin içerisindeki ilerleyişi jeolojik katmanların özellikleriyle doğrudan ilişkili olduğu bilinen bir gerçektir. Bu durumda tünelin inşa edildiği bölgede bulunan jeolojik katmanların türü, deprem dalgalarının yapıya vereceği hasarla da doğrudan ilişkilidir. Örneğin siltli veya kumlu zeminlerde, sismik dalga ilerleyişi tünelin astarında çatlak, ezilme meydana getirerek tünel içerisinde su sızıntısına yol açabilir. Su sızıntısı, tünel yapılarını servis ömrünü kısaltan uzan vadede bozulmaları tetikleyen birincil faktör olarak bilinir (Kramer, 1996). Özellikle fay zonlarına veya yüksek yeraltı su seviyesine sahip bölgelere yakın inşa edilen tünellerde, deprem kaynaklı hasar riski daha yüksektir Dowding, C.H. and Rozen, A. (1978)

Yeraltı yapısı olarak tünellerin deprem yükleri karşısındaki davranışını etkileyen faktörler arasında; zemin ayrışma durumu, tabaka düzeni ve mevcut diskontinuiteler  ncelikliyen tünel geometrisi ve derinliği de dikkate alınması gereken önemli faktörler arasındadır. Uzun ve yatay doğrutuda ilerleyen tünellerde gerilme yoğunluğu artarken, derin tüneller sismik titreşimlerden daha az etkilenmektedir (Palmstrom & Stille, 2007). (Kramer, 1996).



şekil 9. Deprem etkisi altında karayolu tünel yapısında boyuna ve dairesel hasar  rneği “Yazar tarafından hazırlanmıştır.”

Deprem kaynaklı tünel hasarları; tünel çeperlerinde boyuna gerilmelerin yoğunlaştığı bölgelerde kendisini boyuna ve dairesel çatlak şeklinde görülürken segmentli tünel kaplamalarında derzlerin hasar alması, su sızıntısı ve kaplamalarda bozulma şeklinde kendini gösterir (şekil 9). Bunların dışında depremle birlikte yeraltı su basıncı hareketliliği yer ve y n değiştirerek tünel içerisine su sızıntısı yapabilir. Tünel içerisine sızan bu su, betonarme veya elik fiber takviyeli beton kaplamalar ile segmentli tünel kaplama sistemlerin de hem çeliğin hem betonun korozyona uğramasına yol açarak tünel hasarına sebebiyet verir (MCEER, 2003).

4. SONUÇ

Yer kabuğu hareketlerinin meydana getirdiği enerjinin ani bir şekilde boşalması ile ortaya çıkan doğa olayı olarak tanımladığımız deprem çerçevesinde; karayolu zemin ilişkisi hasarları, karayolu alt ve üst yapı hasarları, karayolu sanat yapısı hasarları, köprü ve viyadük hasarları ile karayolu tünel hasarlarının değerlendirildiği bu bölümde;

Deprem nedeniyle karayolu zemininde meydana gelebilecek her türlü hasar önemli ölçüde ekonomik kayıplara neden olmakla kalmayıp ulaşımında aksaklıklara da neden olacaktır. Doğru planlanmış bir zemin etüdü ile tasarım ve dosdoğru bir uygulama süreci bu riskleri ortadan kaldırılabılır veya en aza indirebilir. Tüm bu iş ve işlemler için en güncel bilimsel çalışmalar ışığında ilgili yönetmelikler güncellenmelidir.

Deprem etkisi altındaki yol üst yapılarının hasar mekanizmasının engellenmesi tasarım, malzeme seçimi, uygulama aşamalarında alınan önlemlere bağlıdır. İleri yapı malzemeleri modern tasarım ilkeleriyle birleştirilerek depremlerde oluşması muhtemel üstyapı hasarları en aza indirgenebilir. Deprem sonrası karayolunun hizmet dışı kalmasına sebep olan kritik noktalar arasında önde gelen sanat yapılarının deprem performansları artırılmalıdır. Bu da tasarım aşamasında iyi bir zemin etüdü, zemin etüdü ile hizmet sınıfına uygun tasarım sonrasında düzenli bakım ve onarım faaliyetleri ile mümkündür.

Halihazırdaki köprü ve viyadüklerin deprem performansları belirli periyotlarda değerlendirilmelidir. İhtiyaç duyulması halinde modern teknikler ve güncel mühendislik yaklaşımları kullanılarak köprü ve viyadükler güçlendirilmeli, bakım ile onarımları yapılmalıdır. Bu iş ve işlem prosesi karayolu ağının sürdürülebilirliği ve kamu güvenliği açısından hayati öneme sahiptir.

Karayolu ulaşım ağının özellikle zorlu arazi koşullarında olmazsa olmazlarından biri olan tünellerin, deprem performans fonksiyonu oldukça karmaşıktır. Sismik risklerin yüksek olarak belirlendiği bölgelerde jeolojik ve jeoteknik analizlerin titizlikle yapılması, güncel modern malzeme seçimi ve güncel mühendislik teknolojilerinin kullanılması, doğru kaplama tasarım seçimi sonrasında düzenli bakım, onarım ile izleme yöntemleri tünellerin deprem performansını güvenli seviyelere taşıyabilir.

Deprem nedeniyle karayolu yapısında oluşabilecek hasarlar, ciddi ekonomik ve lojistik kayıplara neden olabilmektedir. Doğru planlanmış bir zemin etüdü, uygun tasarım ilkeleri ve modern mühendislik teknikleri ile bu riskler en aza indirilebilir. Karayolu altyapısının depreme karşı dayanıklılığını artırmak için zemin iyileştirme, sismik izolasyon sistemleri,

performansa dayalı tasarım ve akıllı yapı malzemeleri gibi çeşitli mühendislik yaklaşımlarının kullanılması gerekmektedir. Özellikle sivil inşaat riski yüksek zeminlerde drenaj sistemleri, taş kolonlar ve derin zemin iyileştirme teknikleri uygulanarak taşıma gücünün artırılması sağlanabilir. Köprüler ve viyadüklerde kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler ve sarkaç tipi mesnet sistemleri gibi sismik izolasyon çözümleri kullanılarak deprem sırasında oluşan enerjinin yapıya aktarımı minimize edilebilir. Karayolu üstyapısında ise yüksek performanslı asfalt ve polimer modifiye bitüm kaplamalar kullanılarak çatlama ve deformasyon riski azaltılabilir. Ayrıca, tünel ve istinat yapılarında fiber takviyeli beton ve yüksek süneklikli çelik takviyeler gibi yenilikçi malzemeler tercih edilerek dayanıklılık artırılabilir. Tüm bu mühendislik çözümlerinin yanı sıra, erken uyarı sistemleri, gerçek zamanlı yapısal sağlık izleme sensörleri ve sismik risk haritaları gibi dijital teknolojilerin entegre edilmesiyle, afet öncesi ve sonrası müdahaleler daha etkin hale getirilebilir.

Sonuç olarak, deprem etkilerinin karayolu sistemlerinde yarattığı hasarları minimize etmek için disiplinler arası bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmaktadır. Geoteknik mühendisliği, yapı mühendisliği ile sismoloji alanlarında gerçekleştirilmiş en güncel araştırmalar ışığında, sürdürülebilir ve dayanıklı karayolu tasarımları geliştirilmeli ve bu tasarımlar uygulanmalıdır. Gelecekte bu konuda yapılacak çalışmalar, daha iyi mühendislik çözümleri üretmek ve afet yönetim sistemlerini daha etkin hale getirmek için odaklanılması gereken kritik alanları belirlemelidir.

KAYNAKÇA

- AASHTO. (2012). *AASHTO guide for design of pavement structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2020). *AASHTO LRFD bridge design specifications* (9th ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASCE. (2017). *2017 infrastructure report card*. American Society of Civil Engineers.
- ASCE. (2016). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures* (ASCE 7-16). American Society of Civil Engineers.
- Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of structures* (5th ed.). Prentice Hall.
- Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2019). *Jet grouting technology*. CRC Press.
- Dowding, C. H., & Rozen, A. (1978). Damage to rock tunnels from earthquake shaking. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104(GT2), 175-191.
- FEMA. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings* (FEMA 356). Federal Emergency Management Agency.
- FHWA. (2006). *Retaining walls and steep reinforced slopes* (Publication No. FHWA-HI-99-011). Federal Highway Administration.
- Gazetas, G. (1991). Foundation vibrations. In H. Fang (Ed.), *Foundation engineering handbook* (pp. 553-593). Van Nostrand Reinhold.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Pearson.
- Itasca Consulting Group Inc. (2019). *Fast Lagrangian analysis of continua* (FLAC) (Version 9.0). Itasca Consulting Group Inc.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.
- MCEER. (2003). *Seismic retrofit of tunnels*. MCEER Research Progress and Accomplishments.
- Mitchell, J. K., & Huber, T. R. (1985). Performance of a stone column foundation. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(2), 205-223.
- Monismith, C. L. (1978). Asphalt mixture behavior in repeated flexure. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 47, 297-329.
- NEHRP. (2020). *Recommended seismic provisions for new buildings and other structures* (FEMA P-2082). National Earthquake Hazards Reduction Program.
- Okabe, S. (1926). General theory of earth pressures. *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, 12(1), 123-134.
- Palmstrom, A., & Stille, H. (2007). *Rock engineering*. Thomas Telford Publishing.
- Priestley, M. J. N., Seible, F., & Calvi, G. M. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*. John Wiley & Sons.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9), 1249-1273.

- Seible, F., Priestley, M. J. N., & Hegemier, G. A. (1997). Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets. *Journal of Composites for Construction*, 1(2), 52-62.
- T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2020). *Karayolları teknik şartnamesi*.
- Türkiye Deprem Yönetmeliği. (2019). *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD)*.
- Topçu, İ. B., & Türkel, S. (2007). *Zemin iyileştirme yöntemleri*. Uludağ Üniversitesi Yayınları.
- USGS. (2021). *Earthquake hazards program*. United States Geological Survey.
- Wang, G. (1993). *Seismic analysis of retaining walls, buried structures, embankments, and integral abutments* (NCHRP Report 343).
- Mononobe, N., & Matsuo, H. (1929). On the determination of earth pressures during earthquakes. *Proceedings of the World Engineering Congress*, 9, 177-185.
- Mamdouh, A. (2018). Modelling of asphalt pavement damage accumulation under repeated loading. *Construction and Building Materials*, 178, 141-151.

Bölüm 2

ZEMİN İYİLEŞTİRME
YÖNTEMLERİ
JETGROUT UYGULAMA
KOLONLARI İLE ZEMİN
İYİLEŞTİRME

Ayşe Bengü SÜNÜL GÜNER¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü ORCID NO: 0000-0002-3131-7997

Günümüzde büyük şehirlerde nüfus sayısında artış ve buna bağlı alan seçimi ve kentleşme; deprem riski taşıyan zayıf zemin özellikli alanlarda yüksek katlı yapılaşmayı arttırmaktadır. Bu tip zayıf zeminlerde yapım sırasında temel zeminlerinde çıkan problemlerin bertarafı için zemin iyileştirme uygulamalarından çözüm beklenmektedir. Yapımı planlanan inşaat proje alanlarındaki doğal zeminlerin taşıma gücü yetersizliği, oturma problemleri, deprem durumunda ortaya çıkan sıvılaşma ve zayıf zeminlerin bazı mühendislik parametrelerini karşılamaması üzerine; bu zeminlerde iyileştirme yapılması zorunlu hale gelmektedir.

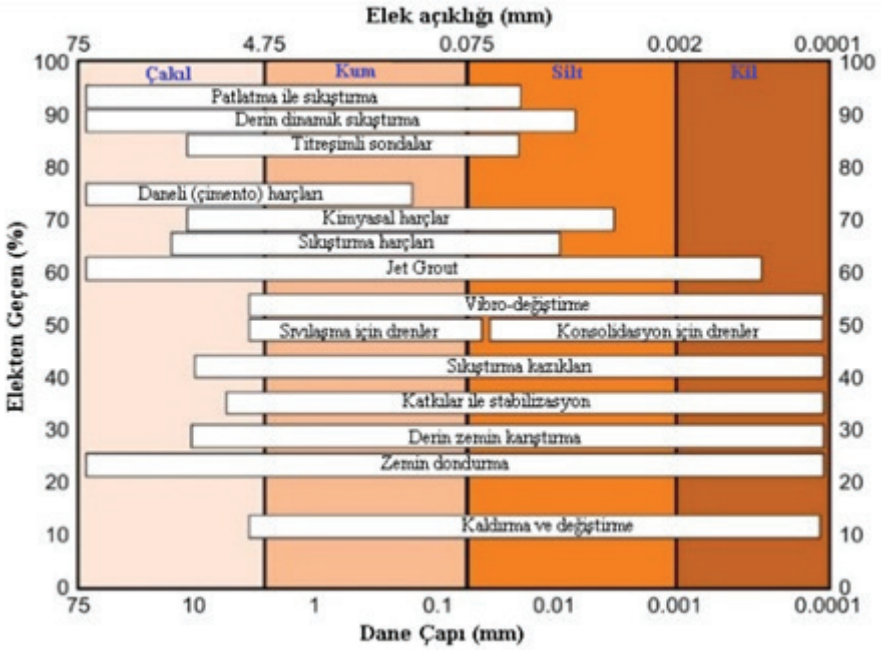
Zeminlerde iyileştirme yöntemi; milattan önce 3000 yılına dayanan ve inşaat mühendisliği geoteknik uzmanları tarafından kullanılmaya başlanan en farklı yöntemleri içeren inşaat mühendisliği disiplinlerinden birisidir. Bahsi geçen yöntemler; günümüzde zayıf zemin özelliklerinin iyileştirilmesini hedefler, temel zemininde olması muhtemel oturmaların izin verilen sınırlar dahilinde gerçekleştirir, taşıma gücü zayıf zeminlerin yük taşıma kapasitesini artırır, tünel yapılarında tünel çevresinde yer alan zeminini iyileştirmek için kullanılır, yamaç stabilitesini artırmak için kullanılan farklı birkaç yöntemi kapsamaktadır. Bu yöntemler seçilirken yapım maliyetleri ve uygulama kolaylığı yanı sıra teknoloji kısıtlamaları ve ekipman desteği beraber değerlendirilmektedir (Selçukhan ve Ekinci, 2021).

Zemin iyileştirme çalışmaları genellikle zemin etüdü tamamlandıktan sonra proje sahasında yapılacak yapıdan kaynaklı gerilmeler, gerilmeleri zemine aktaracak temel türü ve temelin inşa edileceği zeminin türü birlikte değerlendirilerek seçilmelidir. Belirlenen bu şartlar inşaat alanında; saha koşulları, yapı etrafında bulunan bina temeli, zemin yeryüzü derinliği, bölgenin sismisitesi ve taşıma gücü-oturma değerleri gibi değişkenler dikkate alınarak belirlenmelidir. En uygun yönteminin seçimi zemine, temel-üst yapı koşullarına ve çevresel faktörlere dayanmaktadır. Zeminlerde yapılacak iyileştirme başarısı; iyileştirmeye esas parametreler, pratikte arazi uygulamaları, yeni teçhizat ve malzemeler ayrıca yapım teknolojilerinin gelişimine paralel günümüzde ekipman tedariki konusunda da ilerleme kaydetmektedir (Terashi ve Juran, 2000, Charles, J.A. 2002).

Problemler zeminlerde kullanılacak zemin iyileştirme yöntemleri birçok bilimsel çalışma ile farklı şekillerde değerlendirilmiştir. Bu çalışmaların inşaat mühendisleri açısından en kabul göreni ise, Mitchel (1981) tarafından hazırlanan değerlendirmedir. Mitchel (1981) zemin iyileştirme yöntemlerini altı ana başlık altında toplamaktadır; (1) Kohezyonsuz zeminin yerinde derin kompaksiyonu, (2) ön yükleme, (3) enjeksiyon ve harç (derz) dolgu, (4) katkı maddeleri, (5) termal iyileştirme ve son ola-

rak (6) geotekstiller veya geosentetikler ile güçlendirme başlıkları altında toplanmaktadır.

Günümüzde yapılan değerlendirmelere göre zemin cinslerine göre ve zeminde var olan problemlere göre zemin iyileştirme yöntemleri gruplandırılmıştır. Bu yöntemler -dane boyutu ve -ağırlıkça yüzde geçen ince dane olarak düzenlenmiş hali Şekil 1’de sunulmuştur. (Nicholson, 2015). Zemin iyileştirmesine esas problemler için en uygun yöntem seçimi dane boyutuna göre elek açıklığı-elekten geçen ve zemin türü dikkate alınarak hazırlanmış tabloda verilmiştir.



Şekil 1. Farklı zeminler için dane boyutlarına göre uygulanabilen zemin iyileştirme yöntemleri. (Nicholson, 2015)

Zeminlerde iyileştirmesi uygulanırken seçilen yöntemin hangisinin en başarılı olacağı, yöntem ve iyileştirme teknikleri belirlenmesinde, zeminin hangi parametresinin öncelikle olarak iyileştirilmesi gerektiğine karar verilerek başlanır. Holtz ve arkadaşları. (2001) yaptıkları çalışmada farklı zemin türleri için uygulanabilir olan zemin iyileştirme yöntemlerini Tablo 1’de önceki çalışmalarda farklı olarak özetlemişlerdir.

Tablo 1. Farklı zemin türlerine uygulanabilir zemin iyileştirme yöntemleri (Holtz ve ark. (2001))

İyileştirme Yöntem ve Teknikleri	İyileştirme Yöntemi Sınıflandırması	Uygulanabilir Zeminler	Başlıca Uygulama Alanları	Çeşitleri ve Açıklamaları
Gerilme Azaltma	Gerilme Azaltma	Bütün Zeminler	Dolgular Şevler	Hafif Dolgu Malzemeleri
Zemini Kaldırma Ve Yeniden Yerleştirme	Zemini Kaldırma Ve Yeniden Yerleştirme	Yumuşak Kohezyonlu Zeminler Organik Zeminler Turba	Dolgular Küçük Yapılar	Kontrollü Kazı Veya Patlatma İle Tüm Derinlik Veya Kısmı Olarak Yer Değiştirme
Kurutma	Konsolidasyon	Killer Siltler Muhtemel Turba	Temeller Kazılar	Aktif Su Çekme Pompalama
Aşırı Yükleme Ön Yükleme	Konsolidasyon	Killer Siltler Muhtemel Turba	Temeller Kazılar	Düşey Drenli Veya Drensiz Vakumlu Ön Yükleme
Düşey Drenler	Konsolidasyon	Killer Siltler	Temeller Kazılar	Kum Drenler Prefabrik Geokompozit Drenler
Katkı İle Stabilizasyon	Kimyasal	Siltler Killer Özellikle Şişen	Karayolu Alt Temel Havaalanı Kaldırımları Ve Erozyon Kontrolü	Kireç Portland Çimentosu Diğer Kimyasallar Ve Uçucu Kül İle Yüzeysel Sığ İyileştirme
Kireç Ve Kireç Çimento Kolonları	Kimyasal	Siltler Killer	Dolgular Temeller Kazılar	
Derin Zemin Karıştırma	Kimyasal	Bütün Zemin Türleri	Derinkazılar Hendekler	Çimento Ve Çimento Bentonit Karışımları
İçitimi Ve Sısdırma Enjeksiyonu	Kimyasal	Fisürlü Kaya Tüm Daneli Zeminler İri Siltler Dahil	Temeller Hendekler Sıvılaşmayı Azaltma Çevresel İyileştirme	Portland Ve Mikro Çimentolar Kimyasallar Bitüm Silikat Akirilat Vb.

Schaefer ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada; kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerini kullanım amaçlarına göre Tablo 2'deki gibi düzenlemişlerdir.

Tablo 2. Zemin iyileştirme yöntemleri ve kullanım amaçları (Schaefer ve ark, 2012).

Kategori	Amaç	Yöntem
Yoğunlaştırma	Zemin Yoğunluğunu, Taşıma Kapasitesi ve Sürtünme Kuvvetini Arttırmak, Zemin Sıvılaşma Direncini Arttırmak, Zeminlerin Sıkışabilirliğini Azaltmak, Kohezyonlu Zeminlerin Mukavemetini Arttırmak	Titreşimli Sıkıştırma Dinamik Sıkıştırma Patlatmalı Sıkıştırma Sıkıştırma Enjeksiyonu Yüzey Sıkıştırması
Konsolidasyon	Konsolidasyonu Hızlandırmak, Oturmaı Azaltmak ve Mukavemeti Arttırmak	Drenaj Olmadan Önyükleme Dikey Drenler İle Ön Yükleme Vakumlu Konsolidasyon Elektro Ozmoz
Yük Azaltma	Temel Zeminlerindeki Yükü Azaltma Oturmaı Azaltmak Şev Stabilitesini Arttırmak	Köpüklü Beton Hafif Dolgular Lastik Talaşları Vb.
Güçlendirme	Mühendislik Özelliklerini İyileştirmek İçin Zemine Takviye Elemanları Dahil Etmek , Yanal Stabilite De Saplamak	Mekanik Stabil Zemin Zemin Çivisi Ankraj Mikro Kazıklar Lif Takviyesi Jetgrout Taş Kolonlar Geosentetik Takviyeli Dolgu
Kimyasal İyileştirme	Yoğunluğu Arttırmak Basınç ve Çekme Mukavemeti Arttırmak Boşluk Doldurma Ve Sızıntı Hendekleri Oluşturma	Parçalı ve Kimyasal Enjeksiyon, Kütle Dolgu Jet Enjeksiyonu Derinkarıştırma Çatlak Enjeksiyonu Kireç Sütunları
Termal Stabilizasyon	Kayma Mukavemeti Arttırmak	Zemin Dondurma Zemin Isıtma
Biyoteknik Stabilizasyon	Mukavemeti Arttırmak Güçlendirme	Takviye Bitki Örtüsü Mikrobiyal Yntemler

Zemin iyileştirme yöntemlerini farklı açılardan sınıflandıran diğer bir çalışmada Das (1983) tarafından hazırlanmıştır. Das'a göre zemin iyileştirme yöntemleri: derin ve yüzeysel sıkıştırma, olarak şu şekilde sıralanabilmektedir; ön yüklem, kum drenleri, vibroflotasyon, katkı stabilizasyonu, taş-kum kolonlar, jet grout ve kompaksiyon kazıkları kullanımı şeklindedir. Kempfert ve Gebreselassie (2006); Das (1983)'dan aldıkları yöntemleri daha ayrıntılı olarak Şekil 2'deki gibi güncellenmişlerdir.



Şekil 2. Das (1983) den geliştirilen zemin iyileştirme yöntemleri (Kempfert ve Gebreselassie, 2006).

Selçukhan ve Ekinci (2021); zemin iyileştirme yöntemlerini özelliklerine ve kullanım koşullarına göre Tablo 3 de verilen şekilde oluşturmuşlardır. Tabloda verilenlere göre; iyileştirilecek zeminler için uygulama; üç yıldız (iyi), iki yıldız (orta), bir yıldız (az) ve 0 yıldız (uygun değil) olarak kategoriye ayrılmıştır. Ayrıca uygulanan yöntemlerin ne kadar sık kullanılabilirdiği, yöntemin uygulama süresi, uygulama maliyeti ve imalat sonrası arazi yani yerinde yapılacak deneyler ile kontrol gerektiği ve sürdürülebilirlik faktörlerinin olduğu kısımda; üç yıldız (yüksek), iki yıldız (orta) ve bir yıldız (düşük) olarak belirtilmiştir.

Tablo 3. Uygulanan yöntemlerin değerlendirilmesi (Selçukhan ve Ekinci, 2021).

Yöntemler	Zemin		Amaç					Kalıtımın Sağlığı	Uygulanma Sıklığı	Maliyet	Kontrol Gerekliliği	Sarılabilecek Risk
	Kolaylaşma	Kolaylaşmaz	Tanıma Kapı Sıklığı	Oranım	Sıvı İyileştirme	Güçlendirme	İstisnai Yapılan					
Dinamik Kompaksiyon	-	***	***	**	***	-	-	**	**	*	***	*
Vibro Kompaksiyon	-	***	***	**	***	-	-	**	*	**	***	*
Patlatma ile Kompaksiyon	**	***	**	**	**	-	-	*	*	*	***	*
Yüzey Kompaksiyon	**	**	***	**	-	**	-	***	***	**	***	*
Hafif Madde ile Yer Değiştirme	***	-	**	**	-	-	-	**	**	*	*	*
Yatay Drenler ile Önyükleme	***	-	**	***	-	-	-	*	***	**	**	**
Vakum ile Önyükleme	***	-	***	***	-	-	-	*	**	**	**	***
Taş Kolonlar	**	***	***	**	**	-	-	***	*	*	*	*
Kum Kompaksiyon Kazıkları	***	***	***	*	***	-	-	*	**	**	**	-
Geotekstil ile Güçlendirilmiş Kolonlar	***	-	***	*	-	-	-	*	**	**	**	-
Katkı Maddeleri ile (Derin) Karıştırma	***	***	***	**	**	**	-	*	*	**	**	*
Jet Harç Enjeksiyonu	**	***	***	**	***	**	-	***	*	*	**	*
Geosentetikler ile Mekaniksel İyileştirme	**	***	**	*	-	-	***	**	***	**	*	-
Zemin Ankraj ve Çivileri	**	**	*	*	-	-	***	***	***	***	**	-

Zemin iyileştirme yöntemleri; JETGROUT KOLONU UYGULAMASI

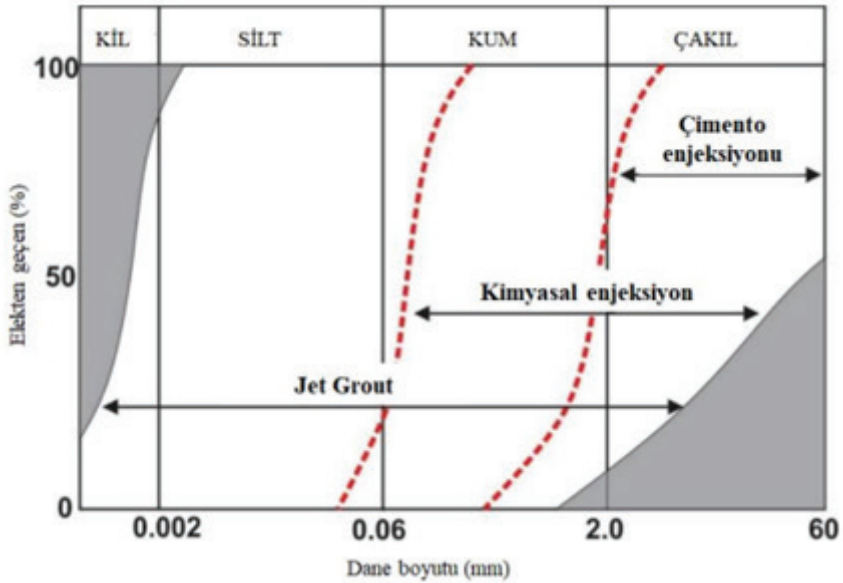
İnşaat mühendisliği kapsamında uygulanan zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan jet grout İlk olarak Pakistan’da bir mühendislik firması olan Cementation Co. Tarafından uygulanmış yönteminin kayıtlara geçen ilk uygulaması 1950’li yıl olarak bilinmektedir. 1965’li yıllarda Japonya’da mühendislik ve inşaat şirketleri Yamakado Kardeşler tarafından iki önemli japon yerleşim alanında (Tokyo ve Yokohama) temel kazı alanlarında kullanılmıştır. İlk uygulama, Tokyo gökdelen inşaatında 1960’lı yıllarda, diğer uygulamalar günümüze kadar devam etmektedir. yakın zamanda Avrupa ve Türkiye’de yaygın kullanılan bir zemin güçlendirme yöntemi olarak inşaat endüstrisine girmiştir. Avrupa’da 1970’lerde jet grout yöntemi popüler hale gelmiş ve İtalya ve İspanya’da zemin iyileştirmede yaygın olarak uygulanarak tarihi binaların restorasyonu gerçekleştirilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri’nde 1980’lerin sonunda New York’ta gökdelen inşaatında temel kazısında ve Seattle liman bölgesinde jetgrout kolonu uygulamasının kullanıldığı kayıtlar mevcuttur (Croce ve ark, 2014). Ülkemizde ise kullanımına 1980’li yılların sonunda kullanıma başlamasıyla bbaşlanmış, günümüzde yaygın kullanım alanı bulmaktadır.

Jet grout iyileştirme tekniği tüm iyileştirme teknikleri içinde ekonomik, hızlı ve güvenlik açısından çoğunlukla ilk tercih edilen yöntem olmuştur (Çınar, 2014; Lunardi, 1997). Jet grout yöntemi, tanım olarak yüksek basınçla üretilen kolonların iyileştirilmesi esasına dayanır. Bu kolonların çapı ve dayanım özellikleri, zemin parametreleri arasında optimizasyon yapılarak, araştırma ve deneyler sonucunda elde edilen uygulama parametreleri ile seçilen jet grout tekniğine doğrudan bağlı olmaktadır.

Yöntemin uygulanması; iyileştirilmek istenen zeminin projeye bağlı olarak, istenilen derinliğe kadar iletilen delikli tijlerden yüksek basınçta çimento şerbeti enjekte edilerek dipten yukarı çekilmesi sonucunda; bu derinlikten yüzeye kadar beton kolonlar oluşturulması işlemidir. Öngörülen çap ve derinlikte delgi yapılarak ve jet grouting ekipmanı kullanılmak suretiyle mevcut zemin içinde zemin ve çimento karışımı (soilcrete) kolon elde edilmesi yöntemin esasıdır (Lunardi, 1997; Sünbl & Mungan, 2018). Jet grout uygulaması; farklı dane boyutlarına sahip çakıl, kum, kil ve silt gibi problemli olan tüm zeminlerde uygulanabilir. Özellikle zemin sıvılaşması, temel taşıma gücü ve zeminde geçirimsizlik gibi problemlerin giderilmesindeki ve ayrıca mevcut yapı temelleri altındaki zeminlerde uygulanabilir olması açısından tercih edilir.

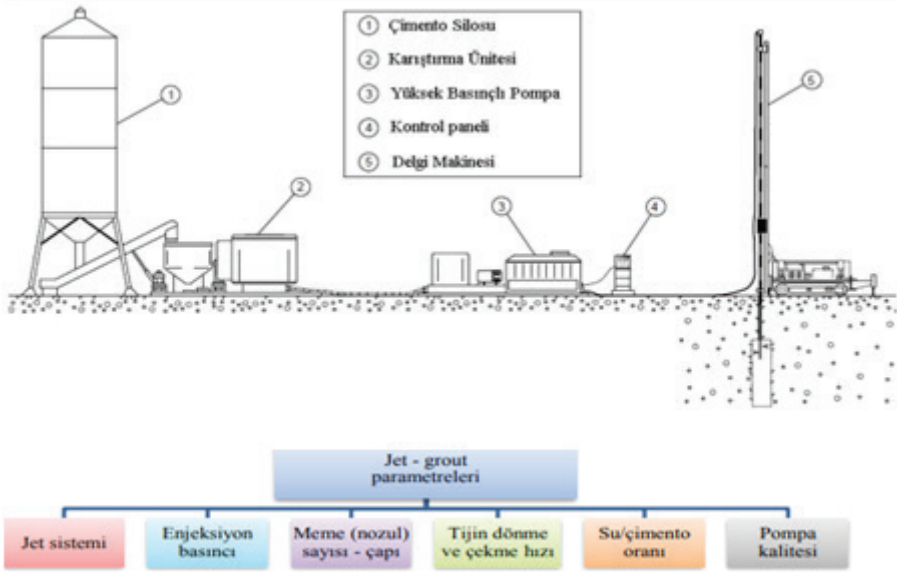
Durgunoğlu (2004) çalışmasında uygulamanın kullanım amaçlarını özetlemektedir. Bu çalışmaya göre; uygulanan yöntemin temel zemini, dolgular ve döşemeler altında: taşıma gücü ve deplasman kontrolü yapmak için, köprü temelleri veya yaklaşım dolguları altında düşey yükleri taşınmasını sağlamak, zeminde oturma kontrolü ve kazık yüzey sürtünmesini azaltmak için, deniz yapılarında çekme kuvvetine karşı dirençli eleman olarak ve kazı alanlarında ağırlık tipi istinad oluşturularak yanal toprak basıncı kuvvetlerini azaltmak amacıyla kullanıldığından bahsedilmektedir. Yumuşak kil kazılarında hafriyat öncesi temel tabanında oluşturulan payanda gibi, temel kazısında yeraltı zemin suyunu dengede tutmak için, ayrıca eğimli yamaçlarda ve tünel kazısında yüzeydeki zayıf koşullara sahip zeminin iyileştirilmesi için zeminde takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Yapı etrafında veya altındaki zeminlerde deprem durumunda ince suya doygun kumlarda zemin sıvılaşma potansiyelini azaltmak amacıyla ve zeminde oluşan kayma gerilmelerine karşı mukavemet kazandırmak amacıyla ayrıca düşey ve yatay yerdeğiştirmelerin azaltılması için tercih edilmektedir.

Passlick ve Doerendahl (2006) tarafından yapılan çalışmayla jet grout yönteminin uygulama tercihi seçininde yararlanılan zemin türüne göre uygulanabilirlik aralığı Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 3 jet grout kolonlarının zemin türüne göre uygulanabilirlik aralığı (Passlick ve Doerendahl, 2006)

Jet grout kolonları çalışma prensibi delgi ve enjeksiyon olarak iki kısma ayrılır. Delgi sırasında, sondaj tiji (küçük çaplı delme borusu) yüzeyden itibaren yüksek basınçla gönderilen su ile zemine verilerek zemin delinir. Enjeksiyon sırasında ise sondaj tijindeki nozullardan, çimento-su karışımı jet grout harcı yüksek basınçla zemine gönderilir. Sondaj tiji, kendi çevresinde döndürülerek yüzeye çekilir ve istenilen derinliğe gelindiğinde sonlandırılır. Yüksek basınçla zemine gönderilen enjeksiyon malzemesi zemin sıkılığına göre değişen çaplarda dairesel kesitli ve farklı mukavemet özelliklerine sahip jet grout kolonları oluşturur. Oluşturulan kolon boyutları; zemin özelliklerine, tijin çekme ve dönme hızına, enjeksiyon basıncı ve içeriğine bağlı, enjeksiyon debisine ve nozul çapı ve adedine bağlı olarak seçilmektedir (Melegari ve Garassino, 1997). Jet grout kolonları temel altı sıkıştırılmış dolgu malzemesi ile 30-60 cm kalınlığında uygulanır ve kolon başları hasar görmeden drenaj sağlanabilirken, kolonlar aracılığıyla yükler uniform olarak zemine aktarılmaktadır (Schlosser ve Collins, 2001). İmalat işlemleri için gerekli kullanım ekipmanları ve isimleri Şekil 4’de sunulmuştur (Lunardi, 1997).



Şekil 4 Jetgrout uygulama ekipmanları. (Lunardi, 1997)

Şekil 4’de bahsi geçen imalat aşamalarındaki ekipmanların işlevleri şu şekilde açıklanabilir.

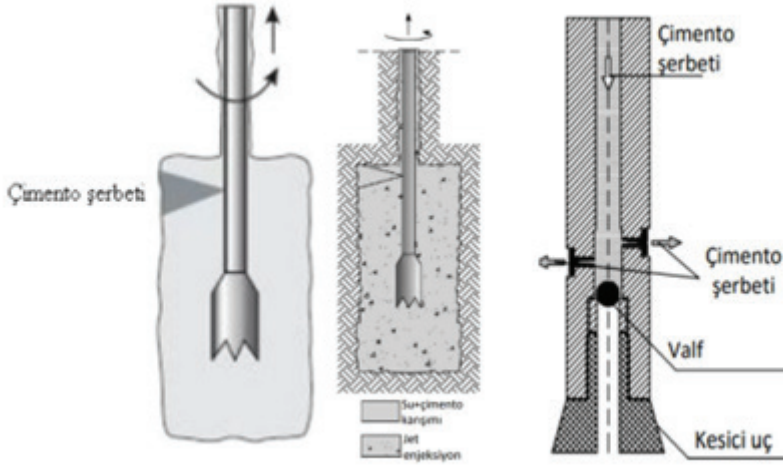
Delgi makinesi; istenilen derinliğe kadar delgi yapılarak dipten yüze jet grout kolonu oluşturur. Pompa ünitesi; jet grout kolonu oluşturabilmek için yüksek basınçlı yüksek güce (300–500 beygir gücü) sahip bir pompa içeren jet grout ünitesidir.

Mikser ünitesi; kolon için gerekli karışımı önceden hesaplanan oranda tartarak karıştırabilen ve pompa ünitesini besleyen bir mikser ve dinlendiriciden oluşur.

Çimento silosu; mikser ünitesine istenilen düzeyde çimento aktaran, harç üretimi yapan ve dökme çimento depolayan çimento taşıma bandıdır. Ayrıca sistemde su ihtiyacını karşılayan 15–25-ton kapasiteli su tankı havuzu bulunmaktadır.

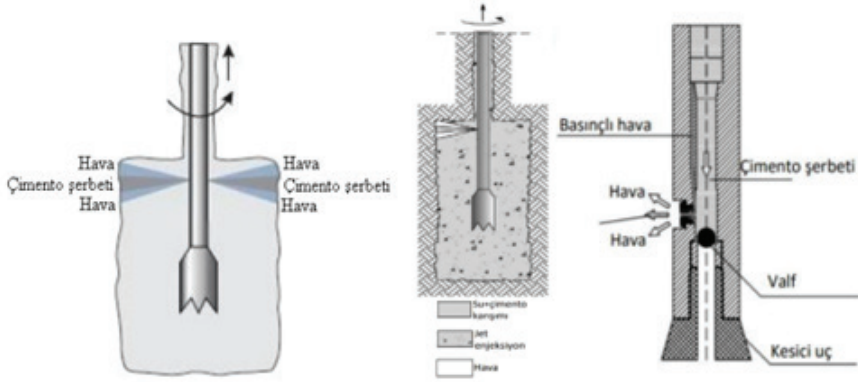
Jet grout kolonu uygulama tekniği, takviye edilen akışkan miktarına göre Durgunoğlu (2004) tarafından Jet-1, Jet-2 ve Jet-3 olarak sınıflandırılmıştır. Günümüzde Jet-1 ve Jet-2 özellikle İtalya zeminlerinde, Jet-3 ise Japonya zeminlerinde kullanım alanı bulmaktadır. Günümüzde yüksek kolon çapları ihtiyacından kaynaklı dördüncü teknik olan Süper Jet geliştirilmiş ve kullanılmaktadır. (Lunardi, 1997).

Uygulama tekniği olan Jet 1 (Monofluid); delgi ve enjeksiyon uygulamasında tek akışkanlı (monofluid) çimento şerbeti tek kanallı tijle, yüksek basınç etkisi ile zemine gönderilir. Jet 1 enjeksiyonu zemine çimento püskürtmek için tek veya çift nozulun kullanıldığı, çapı 2 – 5 mm olan yaklaşık olarak 200 m/s hız ve 300 - 600 bar basınç ile zemini keserek, açılan yerleri yine aynı hız ve basınçta çimento enjeksiyonuyla doldurulması ile istenilen çapta kolonlar zemin içinde oluşturulur. Bu yöntemde kolonlar dakikada 15–100 cm çekme hızı ve 5–15 rpm dönme hızı ile oluşturulur. Kumlu ve çakıllı zeminlerde daha başarılı uygulandığı için tercih edilmektedir. Kil içeren zeminlerde 600–800 mm ve çakıl içeren zeminlerde 1000 mm çapında kolonlar oluşturulmaktadır (Croce ve Flora, 2000). Jet-1 sistem uygulaması Şekil 5’de verilmiştir (Croce ve ark, 2014).



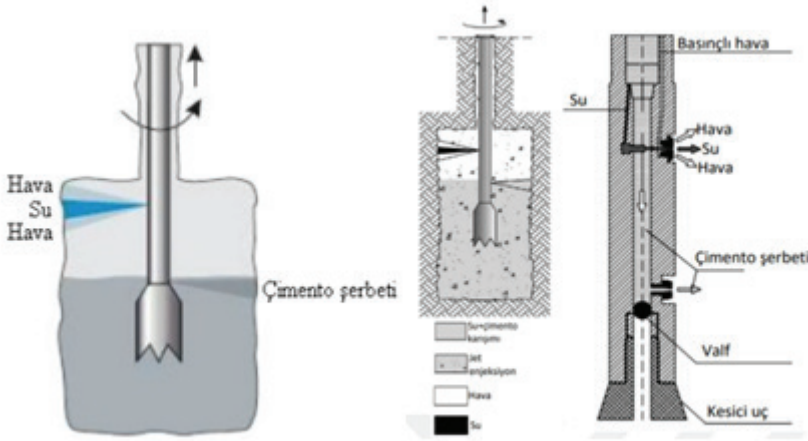
Şekil 5. Jet-1 (tek akışkanlı). (Croce ve ark,2014).

Uygulama tekniği olan Jet 2 (Bifluid); Çift akışkanlı (bifluid) Jet-2 tekniği jet-1'e ek olarak iç içe geçmiş iki boru sistemi kullanılarak, ikinci bir akışkanın dahil edilmesi ile uygulanan jet grout kolonu oluşturma tekniğidir. İç içe geçmiş tijde içeriden 400–550 bar basınç ile çimento püskürtürken, dışarıdaki borudan 10–12 bar basınçlı hava püskürtülür. Jet-2 yönteminde uygulanan iki farklı basınç; çimento harcını daha uzak yerlere gönderebildiği için jet- 1'e göre %70 daha geniş çaplı kolonlar oluşturulabilir. Orta-sıkı zemin türlerinde 100cm çaplı kolonlar imal edilebilirken, gevşek zemin türlerinde ise 180cm çaplı kolonlar imal edilebilir. Bu yöntemle imal edilen kolonlar çimento şerbetinde artan hava içeriği nedeniyle Jet1 ile imal edilen kolonlara göre daha düşük mukavemetli olmaktadır. Kolon dakikada 10–30 cm çekme hızı ve 4–8 rpm dönme hızı kullanılarak oluşturulmaktadır. Jet- 2 kohezyonlu zeminlerde Jet-1'e göre daha başarılıdır. (Al, 2018; Çınar, 2014; Küsin, 2009; Toprak, 2005) Jet 2 sistem uygulaması Şekil 6'da verilmiştir (Croce ve ark, 2014).



Şekil 6. Jet-2 (çift akışkanlı). (Croce ve ark, 2014).

Uygulama tekniği olan Jet 3 (Trifluid); Üç akışkanlı (trifluid) olarak uygulanan teknikle; çimento şerbetine ve basınçlı havaya ek olarak suyun eklenmesiyle iç içe geçmiş üç boru kullanılarak uygulanan ve bu üç akışkanın eş zamanlı olarak zemin içerisinde iç borudan su, orta borudan hava ve en dış borudan çimento olacak şekilde enjekte edilmesiyle uygulanmaktadır. Ortadaki borudan 400–600 bar basınca sahip su enjekte edilirken, dıştaki borudan 8–12 bar basınçlı hava ve farklı bir nozzle ile 30–80 bar basınçla çimento şerbeti ise en alttan edilmektedir. Uygulama sonrası 200cm çaplı kolonlar imal edilebilmektedir. Kohezyonlu zeminlerde 200–250 cm çapa sahip jet grout kolonları oluşturulabilmektedir. (Al, 2018; Çınar, 2014; Gürleyik, 2018; Küsin, 2009; Toprak, 2005). Tasarlanan jet grout kolonu, akışkanlar ve zeminin aşındırılması ile dakikada yaklaşık 6–15 cm çekme hızı ve 4–8 rpm dönme hızı uygulanarak oluşturulur. Jet 3 sistem uygulaması Şekil 7’de verilmiştir (Croce ve ark, 2014).



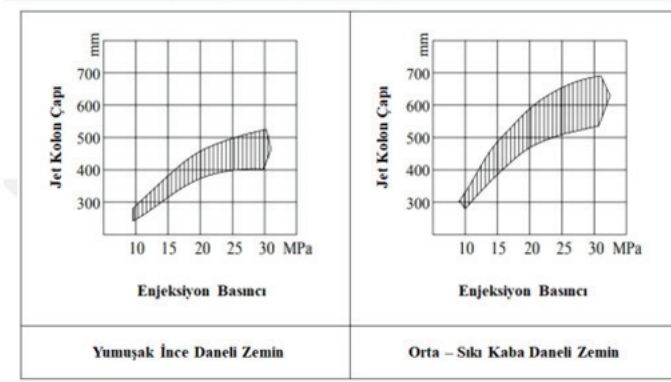
Şekil 7. Jet-3 (üç akışkanlı). (Croce ve ark, 2014).

Uygulama tekniği olan Süper Jet; Jet-2 tekniğinin benzeri olarak çimento şerbeti ve basınçlı hava ile uygulanmaktadır. Günümüzde gelişmekte olan bu yöntem 300–500 cm çapa sahip kolonlar oluşturabilmek için uygulanmaktadır. Süper jet uygulamasında diğer yöntemlerden farklı olarak daha büyük çaplı nozzullar kullanılarak, daha düşük tıj dönme ve çekme hızı tercih edilerek kolonlar imal edilmektedir. Süper jet uygulamasında dönüş hızı 3-4 devir/dakika, çekme hızı dakikada 7 mm ve enjeksiyon basıncı 40 MPa şeklinde uygulandığında imala edilen kolon çapı yaklaşık 400cm olarak elde edilmektedir. Özellikle yeraltı suyu akış yönü yatayda olan zeminlerde suyun kontrolü, geçirimsizlik perdesi uygulaması gerektiği durumlarda ayrıca sıvılaşma riski bulunan zemin tabakalarını iyileştirirken tercih edilmektedir (Dirican, 2018).

Tablo 4. Jetgrout yöntemleri için parametreler (Lunardi, 1997)

Teknik	Akışkan	Basınç (bar)	Nozzle Adet ve Çap (adet, mm)	Çekme Hızı (cm/dak)	Dönme Hızı (r.p.m.)	Su-Çimento Oranı	Pompa Kapasitesi (lt/dak)
Jet - 1	Çimento şerbeti	400 - 550	1-2 x 2-5	15 - 100	5 - 15	1,0 - 1,5	700 - 600
Jet - 2	Çimento şerbeti	400 - 550	1-2 x 2-5	10 - 30	4 - 8	1,0 - 1,5	700 - 600
	Hava	10 - 12	-	10 - 30	-	-	4000 - 10000
Jet - 3	Çimento şerbeti	50 - 100	1-2 x 4-5	6 - 15	4 - 8	1,2 - 1,5	80 - 200
	Hava	10 - 12	-	6 - 15	-	-	4000 - 10000
	Su	400 - 500	1-2 x 2-3	6 - 15	-	-	40 - 100

Jet grout kolonu imalat aşamasında kolon çapı ve homojen süreksiz bir kolon elde edilmesi için uygulayıcı tarafından tecrübeye dayalı dik-kat edilmesi gereken en önemli parametre uygulanan enjeksiyon basıncı değeridir. Erkan (2013) çalışmasında; üç farklı aralıktaki enjeksiyon basınçlarında (düşük:200–250bar–orta:300–400bar–yüksek:400–700bar) elde edilen kolonların çapındaki artışın basıncın artışıyla doğru orantılı olduğundan bahseder. Bu ilişki ayrıca şekil 8' de verilmektedir.



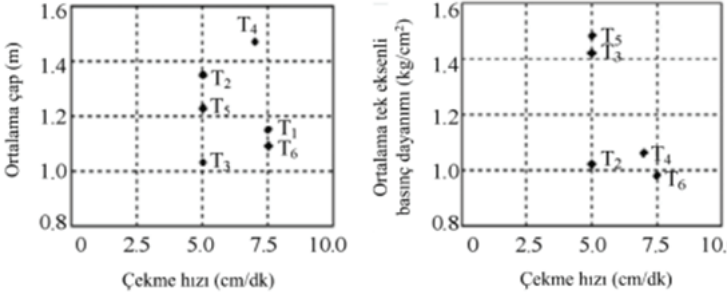
Şekil 8. Jet kolonlarında çap ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki (Erkan, 2013)

Bu çalışmaya göre enjeksiyon basıncı farklı zemin türleri söz konusu olduğunda tek başına yeterli olmaz ve uygulanan enjeksiyon basıncındaki yükselme, kolon çapını arttıramaz ve homojen bir kolon elde edilemez; bu durumda enjeksiyon basıncının yanı sıra kolon imalatı sırasında tijde oluşacak dönme hızı, operatörün çekme hızı da homojen kolon imalatında önemli parametrelerdir.

Nozul sayısı ve çapı; kolon oluşturulması sırasında enjeksiyon harcının basınç ile zemine gönderilmesini sağlayan deliklerden oluşur. Enjekte edilen harcın enerjisi, debisi ve enjeksiyon basıncı ile ilişkilidir. Buna göre nozul çapı daraldıkça, basınçla püsküren harç daha büyük alana yayılabilmektedir. (Dirican, 2018; Erkan, 2013).

Tijin dönme ve çekme hızı; sürekli homojen kolonlar oluşturulabilmesi için enjeksiyon harç içeriği ayrıca tijin dönme/çekme hızı gibi ayarlanabilmektedir. Tijin dönme hızı, istenilen derinliğe ulaşıldıktan sonra aşağıdan yukarıya doğru belirlenen, dakikada geçen devir sayısı ve hızıdır. Tijin dönme hızı ve çekme hızı jet türüne ve enjekte edilecek harç miktarına göre belirlenmektedir. Daha geniş çaplı jet grout kolonları

oluşturmak için Jet-2 ve jet-3 teknikleri kullanılmaktadır. Nikbakhtan ve ark. (2010) tarafından sunulan çalışmada, kolon uygulama tij çekme hızı - kolon çapı ve tij çekme hızı - tek eksenli basma dayanımı arasındaki ilişkiler Şekil 9' da verilmektedir.



Şekil 9. Tij çekme hızı ve tek eksenli basma dayanımına etkisi (Nikbakhtan ve ark. (2010))

Uygulanan su/çimento oranı; jet türü, önceden belirlenen zemin mukavemeti ve tercih edilen iyileştirme türüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Lunardi (1997) çalışmasında Jet 1 ve Jet 2 için su/çimento oranı 1,0 – 1,5 aralığında, Jet 3 sistemi için de 1,2 – 1,5 aralığında olması gerektiği belirtilmiştir. Su/çimento oranının %70'in altında hesaplandığı durumda uygulanacak harca akışkanlığı arttıran ve geçirimsiz bir perde gibi davranan bentonit katılabilmektedir.

Melegary ve Garassino (1997) çalışmalarında çimento ağırlığının %0,4 ile %1 arasında olmasını önermektedirler. Ayrıca çimentoya eklenmesi gereken katkı malzemeleri (akışkanlaştırıcılar, priz geciktiriciler, viskozite düzenleyiciler vb.) için bu oran çimento ağırlığının %0,03 ile %0,04 arasında olmaktadır. Kolonları oluşturan çimento oranı kumlu zeminler için; 150 – 250 kg/m³, silt ve siltli kumlu zeminler için; 200 – 275 kg/m³, killi zeminler için; 250 – 350 kg/m³ ve organik silt ve turba zemini için 300 - 400 kg/m³ olarak kullanılmaktadır. (Burke, 2004).

Genel olarak her zemin tipinde uygulanabilir olan Jetgrout yöntemi; en gevşek zemin ortamından kaya ortamına kadar tüm uygulamalarda, hafif ve küçük ekipmanlar uygulanabilir olduğundan yaygın kullanım alanı bulabilmektedir. Makineler küçük boyutlu olduğunda mevcut bina bodrumunda, bitişik parsel yapılar arasında dar zemin tabakalarında ve hassas veya tarihi yapılar yakınında rahatlıkla uygulanabilir. Çevre dostudur; gürültüsüzdür ve kimyasal olarak toprağı kirletmez. Yöntem ile düşey duvarlar yapılabildiği gibi yatay, eğimli ve dik duvarlar da yapılabilmektedir.

Uygulamanın zayıf noktası; genellikle uniform zeminlerde başarılı olmasına rağmen heterojen ve farklı sıklıkta zeminlerin sıralandığı zemin profillerinde süreklilik sağlanamamaktadır. İmal edilen kolon çap ve mukavemetlerinde meydana gelecek beklenilmeyen farklılıklara dikkat edilmelidir. TS EN 12716 Özel Geoteknik. Uygulamalar-Jet Enjeksiyon tasarımı yararlanabilecek bir standarttır. Ancak uygulama henüz gelişme aşamasındadır. Bundan dolayı kesin kurallar mevcut değildir ancak yapılan uygulamalardan elde edilen sonuç ve gözlemlerden yararlanılarak, tecrübeye dayalı tasarımlar kullanılmaktadır.

KAYNAKLAR

- Seçukhan, O., & Ekinci, A. (2021). Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Yaygın Kullanımına Bağlı Değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi* (23), 481-496.
- Terashi, M., & Juran, I. (2000). Ground Improvement-State of the Art, Proceedings of GeoEng2000. Melbourne, Australia. 1: 461-519.
- Nicholson, P. G. (2014). Soil improvement and ground modification methods. Butterworth-Heinemann.
- Holtz, R. D., Shang, J. Q., & Bergado, D. T. (2001). Soil improvement. *Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook*, 429-462.
- Schaefer, V.R., Mitchell, J.M., Berg, R.R., Filz, G.M., and Douglas, S.C. (2012). Ground Improvement in the 21st Century: A Comprehensive Web-Based Information System. *Geotechnical Engineering State of the Art and Practice, Keynote Lectures from GeoCongress 2012*, Editors: K. Rollins and D. Zekkos, Geotechnical Special Publication No. 226, Geo-Institute of ASCE, Reston, VA, pp. 292-293.
- Das, B. M. (1983). A procedure for estimation of uplift capacity of rough piles. *Soils and Foundations*, 23(3), 122-126. https://doi.org/10.3208/sandf1972.23.3_122
- Kempfert, H. G., & Gebreselassie, B. (2006). *Excavations and foundations in soft soils*. Springer Science & Business Media.
- Croce et al., 2014, P Croce, A Flora, G Modoni, *Jet-grouting-technology: design and control*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA (2014), p. 283
- Charles, J.A. (2002). Ground Improvement: The Interaction of Engineering Science and Experience-based Technology. *Géotechnique*, 52(7): pp. 527-532.
- Çınar, H. (2014). 'Zemin İyileştirmesinde Jet Grout Yöntemi ve Uygulamaya Yönelik Proje Çalışmaları', Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye.
- Lunardi, P. (1997). Ground improvement by means of jet grouting. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement*, 1(2), 65-85. <https://doi.org/10.1680/gi.1997.010201>
- Sünbül, A. B., & Mungan, H. (2018). Sonlu Elemanlara Dayalı Dinamik Analiz; Zemin İyileştirme- Derin Temel Örneği. 6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineerind and Science, 206-215.
- Durgunoglu, H. T. (2006, Nisan). Utilization of high modulus columns in foundation engineering under seismic loadings. In *US 8th National Conference on Earthquake Engineering*, İstanbul, Türkiye
- Passlick, T. and Doerendahl, K. (2006). "Quality assurance in jet-grouting for a deep-seated slab in Amsterdam." *Conference on Piling and Deep Foundations*, Amsterdam, Netherlands, Technical Paper 68-55E.
- Melegari, M., & Garassino, A. (1997). Soil improvement by jet-grouting. *Ground Improvement*, 1(3), 105-116.

- Mitchel J. K. (1981). Soil improvement state-of-the-art report [C]. In Proceedings 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (pp. 509-521). Balkema.
- Croce, P., & Flora, A. (2000). Analysis of single fluid jet grouting. *Géotechnique*, 50(6), 739-748. <https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.6.739>
- Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2014). *Jet grouting: technology, design and control*. CRC Press.
- Al, N. (2018). 'Zemin İyileştirme Teknikleri: Bir Uygulama Örneği', Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.
- Küsin, C. C. (2009). 'Jet Grout Yöntemi ile İyileştirilen Zeminlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Sayısal Analizi', Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye.
- Toprak, B. (2005). 'Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Yeraltı Su Seviyesinin Düşürülmesinde Well-Point Metodunun Kırıkkale İlinde Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi', Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, Türkiye.
- Gürleyik, N. A. (2018). 'İnce Daneli Zeminlerde Tekil Jet Kolon Tasarımı', Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, Türkiye.
- Dirican, H. (2018). Farklı Yapı Yükleri Altında Kazıklı Temel ve Jet Grout Uygulamasının Karşılaştırılması [Yüksek lisans tezi]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
- Erkan, İ. H. (2013). Jet grout kolonların performansını etkileyen faktörlerin deneysel olarak araştırılması [Doktora tezi]. Selçuk Üniversitesi.
- B Nikbakhtan, K Ahangari, Field study of the influence of various jet-grouting parameters on soilcrete unconfined compressive strength and its diameter, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47 (4) (2010), pp. 685-689
- Burke, G. K. (2004, 29-31, Aralık). Jet grouting systems: advantages and disadvantages. In *GeoSupport 2004: Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods, and Specialty Foundation Systems* (pp. 875-886) içinde. American Society of Civil Engineers. Orlando, Florida, United States. [https://doi.org/10.1061/40713\(2004\)75](https://doi.org/10.1061/40713(2004)75)

Bölüm 3

ZEMİNİNİN KAYMA
MUKAVEMETİ
PARAMETRELERİNDEKİ
DEĞİŞİMİN İSTİNAT DUVARININ
DAYANIMINA ETKİSİ

Burak YEŞİL¹, Tuncay KAP²

1 Öğretim Gör., İnşaat Bölümü, Düzce Meslek Yüksekokulu,
Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye (ORCID: 0000-0001-5320-
9359) burakesil@duzce.edu.tr

2 Dr. Öğretim Üyesi., İnşaat Bölümü, Düzce Meslek Yükse-
kokulu, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye (ORCID: 0000-
0003-1832-0662)

1. Giriş

Mühendislik ve geoteknik disiplinleri, zemin mekaniği alanının karmaşık ve çok sayıda farklı unsurlarını derinlemesine anlayabilmek amacıyla kapsamlı bir şekilde detaylı bir analize ihtiyaç duymaktadır. Bu analiz, zemin mekaniğinin yapı güvenliğini nasıl etkilediğini ve bu durumun önemini tanımlamak için gereklidir. Zemin mekaniği, yeraltı su hareketleri, zemin yapısı, yoğunluğu ve dayanıklılığı gibi fiziksel özelliklerin yani sıra, bu süreçte içsel sürtünme açısı ile kohezyon değerlerinin de önemli bir rol oynadığı karmaşık bir alan olarak dikkat çeker. Özellikle istinat duvarlar gibi yapılar, zemin üzerindeki yükleri dengeleyebilmek için, bu parametrelerin nasıl işlediğini incelemek ve analiz etmek kritik bir öneme sahiptir. Bu analizler, yapının stabilitesini sağlamak açısından hayati bir önem taşır ve ilgili mühendislik uygulamalarının başarıyla gerçekleştirilmesine olanak tanır. Zemin mekaniği kapsamında, zemin türleri ve özellikleri üzerinde yapılan titiz çalışmalar, mühendislik uygulamalarında karşılaşılabilecek potansiyel sorunları önceden saptamak ve çözüm geliştirmek adına son derece büyük bir katkı sağlamaktadır. Böylece, mühendislik projelerinin başarıyla tamamlanması ve yapıların dayanıklılığının artırılması hedeflenmektedir. Bu süreçte, alanında uzman mühendislerin ve bilim insanlarının katkıları, zemin mekaniği ile ilgili yeni bulguların ve yıllar içinde gelişen teorilerin sürekli olarak ortaya çıkmasına yardımcı olmaktadır. Bu alandaki araştırmalar, sürekli olarak geliştirilen yeni teknikler ve yöntemlerle desteklenerek, zemin mekaniğinin daha iyi anlaşılmasına ve uygulamalarının çeşitlenmesine katkıda bulunmaktadır.

İstatiksel olarak, içsel sürtünme açısı, zemin taneciklerinin birbirine olan sürtünmesinin bir ölçüsü olup zemin yapıların stabilitesinde temel bir belirleyicidir. Zemin içindeki bu açı, birçok dış faktörden etkilenir; zemin türü, tanecik boyutu ve şekli gibi parametreler, sürtünme açısını doğrudan etkileyerek yapıların dayanıklılığı üzerindeki etkilerini şekillendirir. Kohezyon ise zemin tanecikleri arasındaki çekim kuvvetidir ve zemin yapısının mukavemetini artırmakta önemli bir rol oynar.

Kohezyon değerinde meydana gelen değişiklikler, özellikle su içerik değişkenlikleri ve zemin dengesizlikleri, istinat duvarlarının stabilitesini etkileyebilir.

İstatiksel analizlerde, içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin standart boyutlardaki istinat duvarı üzerindeki etkisinin incelenmesi, bu yapıların tasarım süreçlerini optimize etmekte fayda üretir. Bu bağlamda, zemin mekaniği ve yapı mühendisliğinin entegre bir perspektiften ele alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Analizler, yalnızca mevcut

mühendislik standartlarına uyum sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda gelecekte daha dayanıklı ve güvenli yapıların inşasına yönelik yenilikçi çözümler geliştirmeye de imkân tanır. Dolayısıyla, bu çalışma, zemin mekaniği ile inşaat mühendisliği arasında bir köprü oluşturarak, istinat duvarları için gerekli olan tasarım kriterlerini belirlemede önemli bir kaynak sunacaktır.

1.1. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Araştırmanın amacı, zemin mekaniğinde içsel sürtünme açısının ve kohezyon değerlerinin standart boyutlardaki istinat duvarı analizlerine etkisini kapsamlı bir şekilde incelemektir. Zemin mekaniği, inşaat mühendisliği alanında kritik bir öneme sahip olup, yapıların güvenliği ve stabilitesi için temel oluşturur. İstinat duvarları, zemin ve su yüklerinin etkisi altında sağlam bir destek sağlamak amacıyla inşa edilen yapılar olarak, genellikle değişken zemin koşulları ve mühendislik uygulamaları ile etkileşim içerisindedir. Bu bağlamda, içsel sürtünme açısı ve kohezyon, zeminlerin dayanıklılığı ile doğrudan ilişkilidir ve yapıların performansını belirleyen başlıca faktörler arasında yer alır. Ayrıca zemin parametrelerinin etkisinin sistematik bir şekilde değerlendirilmesi ile derinleşmektedir. Bu çalışma, mühendislik pratiğinde daha güvenilir ve doğru zemin analizleri yapılmasına katkıda bulunarak, istinat duvarlarının mühendislik tasarımında karşılaşılabilecek sorunların önlenmesini hedeflemektedir. İçsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri, zemin stabilitesini etkileyen dinamik faktörler olduğundan, farklı zemin türleri ve yapı kombinasyonları üzerindeki sonuçları anlamak, uzmanlara ve uygulayıcılara önemli veriler sunmaktadır.

Bu araştırma, zemin mekaniği alanında metodolojik bir yenilik sunarak, istinat duvarı analizlerini daha geniş bir perspektiften ele almayı amaçlamaktadır. Özellikle, standart boyutlardaki istinat duvarlarının proje bazında karşılaştığı zorlukları irdeleyerek, mühendislik uygulamalarında bu tür yapıların tasarımında dikkate alınması gereken kritik unsurları vurgulamaktadır. Dolayısıyla, araştırmanın bulguları, gelecekteki mühendislik uygulamaları için bir referans noktası oluşturacak ve zemin mekaniği üzerine gerçekleştirilecek daha ileri düzeydeki çalışmalar için de bir temel teşkil edecektir.

1.2. Literatür incelemesi

İstinat duvarları, özellikle mühendislik uygulamalarında zemin mekaniği açısından önemli bir yapı elemanıdır. Zemin mekaniği bağlamında, içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri, bu yapıların dayanıklılığı ve stabilitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Literatürde, bu iki parametrenin çeşitli zemin türleri üzerindeki etkilerine dair çok sayıda

çalışma bulunmaktadır. Terzaghi ve Peck (1967), zeminlerin mekanik davranışlarının tanımlanmasında içsel sürtünme açısı ile kohezyonun kritik önemi olduğunu vurgulamışlardır. Zemin davranışını etkileyen bu parametrelerin, istinat duvarlarının tasarımında göz önünde bulundurulması gerektiği sonucuna varmışlardır. İstinat duvarlarının stabilitesi, üzerlerine etki eden kayma mukavemeti parametreleriyle doğrudan ilişkilidir. (Terzaghi, 1943; Duncan & Wright, 2005).

Kayma mukavemeti teorisinin temel taşları Rankine (1857) ve Coulomb (1776) tarafından geliştirilmiştir. Daha sonra Terzaghi (1943), zemin mekaniği üzerine yaptığı çalışmalarla istinat duvarlarında kayma mukavemeti parametrelerinin önemini vurgulamıştır. Ding vd. (2025), kayma mukavemeti arttıkça istinat duvarlarının güvenlik katsayısının arttığını göstermiştir. Zhang vd. (2025), içsel sürtünme açısının düşmesiyle istinat duvarlarının stabilitesinin azaldığını bulmuştur. Saba vd. (2025), su içeriği ile kayma mukavemeti arasındaki ilişkiyi inceleyerek, su içeriği arttıkça kayma mukavemetinin azaldığını göstermiştir.

Özellikle, zemin verimlilik karakteristikleri ile yapıların stabilitesi arasındaki ilişkiyi ele alırken, Terzaghi ve Peck'in (1967) çalışmaları, mevcut analiz yöntemlerini ve tasarım kriterlerini genişletmiştir. Çeşitli araştırmalar, içsel sürtünme açısının ve kohezyonun, istinat duvarlarının taşıma kapasitesi, oturma gibi davranışlarını belirlemedeki kritik etkilerini ortaya koymaktadır. Bowles (1996), zemin mekaniği prensiplerine dayalı olarak kompleks değişkenlerin bir arada değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, araştırmaların çoğu, fiziksel ölçümler ve laboratuvar testlerinin yanı sıra, numerik modelleme tekniklerinden yararlanarak, bu parametrelerin etkilerini daha iyi deşifre etmekte ve böylece sektördeki değişikliklere yanıt verecek dinamik tasarımların geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Kohezyon, zemin parçacıkları arasındaki çekim kuvvetlerinin bir sonucu olup, genellikle nem, zemin bileşimi gibi faktörlerden etkilenir. İçsel sürtünme açısı ise, zeminlerin yük altında nasıl davrandığını anlamak için kritik bir parametredir. Özellikle farklı zemin türlerinde, bu değerlerin değişkenlik göstermesi, mühendislerin zemin analizlerini daha da karmaşık hale getirmektedir. Örneğin, zayıf kohezyona sahip kumlu zeminlerde içsel sürtünme açısının etkisi, istinat duvarlarının stabilitesi üzerinde önemli değişikliklere yol açabilir. Bununla birlikte, literatürde, kohezif zeminlerin kombinasyonlarının, istinat duvarlarının güvenliğini artırmayı amaçlayan tasarım stratejilerinde nasıl optimize edilebileceğine dair çeşitli öneriler de mevcuttur.

Sonuç olarak, içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin zemin mekaniği ve istinat duvarı analizleri üzerindeki etkileri, mühendislik literatüründe sıkça ele alınan bir tema olmuştur. Bu parametrelerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, mühendislik tasarımlarının etkinliğini artırmakta ve zemin yapı etkileşimlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Gelecek çalışmaların, bu iki temel parametre arasındaki etkileşim ve mevcut literatürdeki boşluklar üzerinde yoğunlaşarak, daha güvenli ve verimli yapıların geliştirilmesine katkı sağlaması umulmaktadır.

1.3. Yöntem

Bu çalışmada, zemin mekaniğinde içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin standart boyutlardaki istinat duvarı analizlerine etkisini araştırmak amacıyla bir araştırma yapılmıştır. İlk aşamada, uygun zemin sınıflandırması için standart yöntemler kullanılacak olup, bu süreçte değişik içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri dikkate alınarak standart boyuttaki istinat duvarına olan etkilerini ortaya sunacaktır. İstinat duvarlarının stabilite analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, her bir standart boyut için özel hesaplamalar ve analizler yapılarak farklı yük koşullarına karşı dayanıklılıkları değerlendirilmiştir. Analizde 2018 deprem yönetmeliği (TBDY, 2018) kapsamında, STA4CAD (STA4cad-14.1) yazılımı kullanılarak, zemin ve duvar etkileşimlerinin dinamikleri irdelenmiştir. Ayrıca, çeşitli senaryolar altında, içsel sürtünme açısı ve kohezyon gibi parametrelerin değişen değerlerinin istinat duvarlarının performansına etkileri değerlendirilmiştir.

2. Zemin Mekaniği Temelleri

Zemin mekaniği, zeminlerin yük taşıma kapasitesi, deformasyon davranışı ve yeraltı su hareketlerinin zemin üzerindeki etkilerini anlamak için çeşitli teorik ve deneysel yöntemler kullanır. Zemin mekaniğinin ana bileşenleri arasında zemin tipi, tanecik büyüklüğü, içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri yer almaktadır. Bu faktörler, zeminlerin stabilite analizi ve yapısal uygulamalardaki davranışlarının belirlenmesinde kritik öneme sahiptir.

Zemin mekaniği için en önemli kavramlardan biri, zeminlerin hem doğal hem de yapay yükler altında nasıl davrandığıdır. Zeminlerin yük taşıma kapasitesini belirlemek için Mohr-Coulomb kriteri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu kriter, bir zemin içindeki sürtünme açısını ve kohezyonu kullanarak, zemin yüzeyindeki kayma eğilimlerini değerlendirir. İçsel sürtünme açısı, zemin parçacıkları arasındaki sürtünmenin derecesini ifade ederken, kohezyon, zemin parçacıklarının birbirine olan çekim gücünü tanımlar. Bu iki değer, özellikle istinat duvarları gibi mühendislik

yapılarının güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde tasarlanmasında hayati öneme sahip faktörlerdir.

Gelişmiş zemin mekaniği teorileri, geniş ölçekte zemin davranışlarını modelleyebilmek için çeşitli mühendislik uygulamalar ile ilişkilendirilmiştir. Örneğin, zemin hava koşullarına, yüklenme süresine ve diğer çevresel etkenlere tepki verirken, bu değişkenlerin analizi, istinat duvarlarının tasarım sürecinde göz önünde bulundurulmalıdır. Zemin mekaniği, sadece mühendislik tasarımında değil, aynı zamanda zemin stabilitesi ve altyapı projelerinin başarısında kritik bir rol oynar. Günümüz mühendislik uygulamalarında, bu temel bilgilerin net bir şekilde kavranılması, zemin mekaniği ile ilgili projelerin başarıyla yürütülmesi açısından büyük bir anlam taşımaktadır.

2.1. İçsel Sürtünme Açısı ve Kohezyon Değerleri

İçsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri, zemin mekaniği alanında kritik öneme sahip parametrelerdir. Bu değerler, zemin bulgularının davranışını ve istinat duvarları gibi yapısal elemanların stabilitesini belirlemede temel belirleyicilerdir. İçsel sürtünme açısı, zemin partikülleri arasındaki sürtünme kuvvetinin ortaya çıkmasında etkili olan açıdır ve tipik olarak zemin türüne bağlı olarak değişir. Kuru ve granüler zeminlerde yüksek içsel sürtünme açısı değerleri gözlemlenirken, kil zeminlerde bu değerler daha düşük olabilmektedir. Bu açının etkisi, özellikle yüklenme koşulları altında zemin dayanımının hesaplanmasında dikkate alınır. Farklı zemin türleri, farklı içsel sürtünme açılara sahip olduğundan, bu parametrenin belirlenmesi zemin analizi ve istinat yapısının güvenliği için elzemdir.

Kohezyon ise, zemin tanecikleri arasındaki çekim kuvvetinin bir sonucudur ve genellikle zeminlerin doğal su içeriği ve yapısı ile ilgilidir. Kohezyon değeri, zemin gruplarındaki bağlanma gücünü ifade eder ve genellikle kil zeminler gibi ince tanecikli zeminlerde daha belirgin bir şekilde karşımıza çıkar. Kohezyonun yüksek olması, yer altı su seviyesinin aşağıda kalmasına koşut olarak, yapısal dayanıklılığı artırır ve bu da istinat duvarlarını daha güvenilir hale gelmesini sağlar. Kuramsal bakımdan, kohezyon ve içsel sürtünme açısının kombinasyonu, zeminlerin mühendislik hesaplamalarındaki dayanım kriterlerini etkileyerek istinat yapılarının tasarımında kritik bir rol oynamaktadır.

Bu iki kavramın zemin mekaniğindeki analitiği, yapılan istinat duvarı analizlerinde belirleyici bir çerçeve oluşturur. İçsel sürtünme açısının doğru bir şekilde belirlenmesi, kohezif ve granüler zeminlerin stabilize davranışlarının tahmin edilmesinde önemli bir süreçtir. Bu bağlamda, mühendislik uygulamalarında zemin özelliklerindeki değişimlerin göz

önünde bulundurulması, yapıların uzun ömürlülüğü ve güvenliği açısından kritik bir gereklilik haline gelir. İstatistiksel veriler ve saha testleri ile elde edilen bu değerler, karmaşık mühendislik yapılarının tasarımında rekabet avantajı sağlar ve bu tür yapıların karşı karşıya olduğu doğal yüklerin daha etkin bir şekilde yönetilmesine olanak tanır. Zeminlerde meydana gelen Kayma mukavemeti Mohr-Coulomb bağıntısı ile ifade edilir (Eş 1).

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad [1]$$

Bu bağıntıda; " τ " zeminde meydana gelen kayma gerilmesi, " c " zeminin kohezyon katsayısı, " σ " zeminde meydana gelen basınç gerilmesi ve " ϕ " zeminin içsel sürtünme açısıdır.

2.2. İstinat Duvarı ve Temel Kavramlar

İstinat duvarları, zemin ve diğer yapıların stabilitesini sağlamak için inşa edilen mühendislik yapılarıdır. Bu yapıların temel amacı, yatay zemin basıncını karşılayarak eğilimli yüzeylerden doğabilecek zemin-toprak kaymalarını önlemektir. İstinat duvarları, yeraltı su seviyeleri, zeminin doğal yapısı, çevresel koşulları ve uygulama amaçlarına göre çeşitli tasarım ilkeleri ve malzemeler kullanılarak inşa edilir. Genellikle beton, taş veya prefabrike elemanlardan yapılırlar ve farklı yük taşıma kapasitelerine sahip olabilmek için spesifik geometrik şekillerde tasarlanabilirler. Bu çalışmada, tasarımı tarafımızca yapılan betonarme bir istinat duvarı örneği üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir.

İstinat duvarlarının temel kavramları arasında içsel sürtünme açısı " ϕ " ve kohezyon " c " değerleri önemli bir yer tutar. İçsel sürtünme açısı, zemin parçacıklarının birbirine olan sürtünme özelliklerini belirlerken, kohezyon değeri zemin parçacıkları arasında oluşturulan yapısal bağları ifade eder. Bu iki parametre, zemin mekaniği açısından kritik öneme sahiptir, çünkü zemin stabilitesini ve istinat duvarlarının etkinliğini doğrudan etkiler. İçsel sürtünme açısı yüksek olan zemin, daha fazla yük taşıma kapasitesine sahipken, kohezyonsuz ya da düşük kohezyon değerine sahip zeminlerde (kum, kum karışımı zeminler gibi) istinat duvarlarının tasarımı ve analizi karmaşık hale gelebilir.

İstinat duvarlarının tasarımında, zemin tipinin ve özelliklerinin yanı sıra, duvarın yük taşıma kapasitesi, yüksekliği ve eğimi gibi faktörler de dikkate alınmalıdır. Statik ve dinamik yükler, duvarın dayanımını doğrudan etkileyebileceğinden, bu faktörlerin incelenmesi ve hesaplanma-

sı, güvenli bir yapı tasarımı için şarttır. Ayrıca, istinat duvarı sisteminin uzun ömürlü olması ve çevresel etkilerden korunması için kalite kontrol-lü malzeme seçimi ve uygun drenaj sistemlerinin planlanması gerekir. Bu bağlamda, içsel sürtünme açısı ve kohezyon katsayısı değerlerinin belirlenmesi, istinat duvarlarının tasarım ve analizi aşamasında kritik rol oynar ve istinat duvarlarının dayanımlarını önemli ölçüde etkiler. İçsel sürtünme açısı ve kohezyon katsayısının büyük olması istinat duvarının dayanımını artırırken bunların küçük olması dayanımı azaltmaktadır.

İstinat duvarlarının hesap ve analizlerinde içsel sürtünme açısına bağ-lı olarak zeminde oluşan basıncın hesabında zemin basınç katsayıları elde edilmiştir. Analizlerin bir kısmında da dikkate alınan Coulomb-Kama teorisinin yanında Rankine teorisine göre aktif ve pasif zemin basıncı katsayıları aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir (Eş 2 ve 3).

$$K_a = tg^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad [2]$$

$$K_p = tg^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad [3]$$

Doğal zemin yüzeyi yatay ile bir açı (β) yapmış ve arazi eğimli bir arazi ise aktif ve pasif zemin basıncı katsayıları aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Eş 3 ve 4).

$$K_a = \cos \beta * \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}} \quad [3]$$

$$K_p = \cos \beta * \frac{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}} \quad [4]$$

Yukarda ki ifadede yer alan K_a : aktif zemin basıncı katsayısı, K_p : pasif zemin basıncı katsayısı, β : eğimli arazinin-zeminin yatay ile yaptığı açı ve ϕ : zeminin içsel sürtünme açısıdır.

3. İstinat Duvarı Analizlerinde Kullanılan Parametreler

3.1. Şekillerin ve Grafiklerin Analizi

Şekillerin ve grafiklerin analizi, zemin mekaniğinde içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin standart boyutlardaki istinat duvarı analizlerine etkisini anlamak açısından hayati bir aşamadır. Bu analiz hem

teorik hem de pratik uygulamalarda, zemin ve yapı etkileşimini görselleştirmenin önemli bir aracıdır. Şekiller genellikle zemin özelliklerinin, yer altı su seviyelerinin ve yapı yüklerinin grafiksel temsilleri olarak tasarlanırken, bu temsillerin doğru yorumlanması yapı tasarımında kritik bir rol üstlenir.

Grafiklerde, içsel sürtünme açısı ve kohezyonun zemin yapısındaki değişimleri nasıl etkilediğini net bir biçimde ortaya koyar. Örneğin, farklı zemin tipleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler, genelde bir veya daha fazla değişken arasında ilişkiyi göstermek için histogramlar, çalışma grafiklerini ya da dağılım eğrilerini kullanır. Bu grafiklerden elde edilen bilgiler, mühendislik hesaplamalarında kullanılan parametrelerin doğruluğunu artırmak için referans noktaları sağlar. Öte yandan, bu verilerin doğru bir şekilde grafikleştirilmesi, tasarım aşamasında karşılaşılabilecek sorunları öngörmek ve yapısal güvenliği sağlamak adına önemlidir.

Şekiller ve grafikler, zemin mekaniği çalışmalarında kritik bir analiz aracı olarak işlev görür. Bu görsel temsil araçları, mühendislerin zemin koşullarını daha iyi anlamalarına yardımcı olurken; içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin istinat duvarları üzerindeki etkilerini belirlerken, projenin genel sağlamlığını ve güvenilirliğini artırır. Her bir grafik, detaylı bir inceleme ile desteklenmelidir; bu sayede mühendislik tasarımlarındaki belirsizlikler minimize edilerek, zemin mekaniğinin sunduğu potansiyel tehlikelerin önüne geçilmesi hedeflenir.

3.2. Kayma Mukavemeti Parametrelerinin Belirlenmesi

Kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi, zemin mekaniği ve inşaat mühendisliği uygulamalarında kritik bir öneme sahiptir. Bu parametreler, zemin özelliklerini ve istinat yapılarının davranışını etkileyen temel unsurlardan biridir. Kayma mukavemeti, bir malzemenin deformasyona karşı gösterdiği direncin bir ölçüsü olarak kabul edilir ve özellikle zeminlerin stabilite analizlerinde belirleyici rol oynamaktadır. Kayma mukavemeti, genellikle içsel sürtünme açısı ve kohezyon değeri ile ifade edilir. İçsel sürtünme açısı, zemin partikülleri arasındaki sürtünme kuvvetlerinin etkisini yansıtırken, kohezyon, zemin parçacıkları arasındaki yapışkan etkileşimleri tanımlar.

Kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için doğru test ve metodların seçilmesi, zemin mühendisliği uygulamalarının başarısı açısından elzemdir. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen üç eksenli basınç testleri, kesme kutusu testleri ve benzeri deneyler, içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu testler, zemin davranışının dinamik özelliklerini değerlendirmek ve

çeşitli yükleme koşulları altında zemin stabilitesini tahmin etmek için kritik veriler sunar. Ayrıca, doğal zemin koşullarına benzer simüle edilmiş ortamlar oluşturularak, daha gerçekçi sonuçlar elde etme imkânı sağlar.

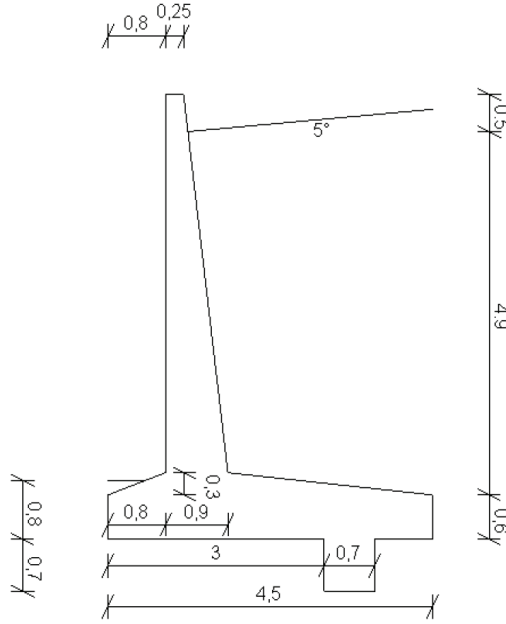
Kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi, yalnızca zemin kaynaklı etkilerin anlaşılmasıyla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda istinat duvarı analizi ve diğer yapıların tasarımında önemli bir rol oynar. Bu parametrelerin doğru tanımlanması, tasarım aşamasında gereken güvenlik faktörlerinin belirlenmesine ve yapısal bütünlüğün sağlanmasına katkıda bulunur. Dolayısıyla, kayma mukavemeti parametrelerinin doğru bir şekilde hesaplanması, inşaat mühendisliğinde projelerin güvenilirliğini ve sürdürülebilirliğini artırarak, uzun vadeli yapıların performansını optimize etmektedir.

Tarafımızca tasarlanan istinat duvarının dayanım hesabında aşağıdaki tabloda (Tablo 1) gösterilen kohezyon katsayıları ve içsel sürtünme değerlerinin kombinasyonları zeminin kayma dayanımı parametreleri olarak kullanılmıştır. Zeminin kohezyon katsayısı 0, 10, 20, 30 ve 40 seçilirken her bir kohezyon katsayısı için içsel sürtünme katsayısı da 0, 10, 20, 30 ve 40 seçilerek beş farklı durum oluşturulmuştur. Bu şartlarda oluşturulan kohezyon katsayısı ve içsel sürtünme açısında ki değişimlerin tasarlanan istinat duvarının dayanımı üzerindeki etkileri ve dayanımda ki değişimler tespit edilmiştir. Bu değişimlere bağlı olarak tasarlanan istinat duvarının boyutlarında meydana gelen değişimler de Şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Analizde kullanılan kayma mukavemeti parametreleri

Parametre	Değer 1	Değer 2	Değer 3	Değer 4	Değer 5
Kohezyon (c) (kPa)	0	10	20	30	40
İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) (°)	-	0	0	0	0
	10	10	10	10	10
	20	20	20	20	20
	30	30	30	30	30
	40	40	40	40	40

Farklı zemin taşıma gücü parametrelerinin istinat duvarının analizi ve boyutlarında ki değişimi ile ilgili hesaplamalar için tasarlanan istinat duvarı modeli aşağıda gösterilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Analizlerde kullanılan istinat duvarı boyutları (m)

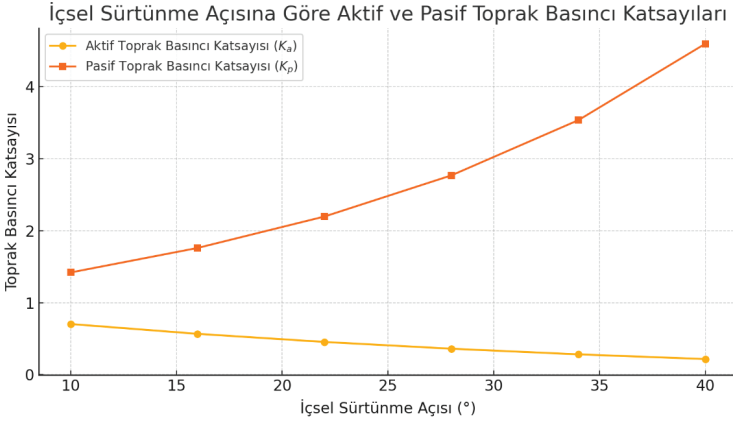
Tasarlanan istinat duvarı modelinde, duvar topuğu 80 cm dışarı doğru uzatılarak devrilmeye karşı direnç arttırılırken, duvarın toprakla temas halinde olan yüzeyi tepe 25 cm genişliğinde iken 4,9 m derinlikte 65 cm arttırılarak 90 cm'e çıkartılmış ve oluşturulan eğimli yüzey ile duvarda oluşacak devrilme momentinin etkisi azaltılmış, İstinat duvarı yatay yönde zeminin içine doğru 2,8 m uzatılarak $[(4,5 - (0,9 + 0,8)) = 2,8 \text{ m}]$ istinat duvarının öne doğru devrilmesine neden olacak devrilme momenti azaltılmış ve ayrıca istinat duvarının tabanında 0,7 derinlik ve 0,7 m genişliğinde zemine gömülen dış oluşturularak istinat duvarının yatay zemin itme kuvvetleri nedeni ile yatay yönde kayarak ötelenmesi önlenerek ideal bir istinat duvarı modeli oluşturulmuştur. Zeminin değişen kayma direnci parametrelerine bağlı olarak tasarlanan istinat duvar modelinin tüm analiz sonuçları aşağıdaki tabloda gösterilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. İstinat duvarının farklı kayma mukavemeti parametrelerine göre analizlerinin sonuçları

İçsel Sürtünme Açısı $\phi = 0^\circ$ İçin Hesap Sonuçları	c	ϕ	c	ϕ	c	ϕ	c	ϕ
	(kPa)	($^\circ$)	(kPa)	($^\circ$)	(kPa)	($^\circ$)	(kPa)	($^\circ$)
	10	0	20	0	30	0	40	0
Kayma analizi (Statik yükler altında)	Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz	
Kayma analizi (Dinamik yükler altında)	Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz	
Zemin emniyet gerilmesi (Ölü yükler altında)	Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz	
Zemin emniyet gerilmesi (Deprem yükleri altında)	Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz	
Devrilme analizi (depremsiz)	Yeterli		Yeterli		Yeterli		Yeterli	
Devrilme analizi (depremlı)	Yeterli		Yeterli		Yeterli		Yeterli	
Toptan göçme analizi (Ölü yükler altında)	Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz	
Toptan göçme analizi (Deprem yükleri altında)	Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz	
Yaklaşık beton miktarı (m3)	68,35							
Yaklaşık donatı miktarı (kg)	6.334,00							
İçsel Sürtünme Açısı $\phi = 10^\circ$ İçin Hesap Sonuçları	c	ϕ	c	ϕ	c	ϕ	c	ϕ
	(kPa)	($^\circ$)	(kPa)	($^\circ$)	(kPa)	($^\circ$)	(kPa)	($^\circ$)
	10	10	20	10	30	10	40	10
Kayma analizi (Statik yükler altında)	Yeterli		Yeterli		Yeterli		Yeterli	
Kayma analizi (Dinamik yükler altında)	Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz	
Zemin emniyet gerilmesi (Ölü yükler altında)	Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz	
Zemin emniyet gerilmesi (Deprem yükleri altında)	Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz		Yetersiz	
Devrilme analizi (depremsiz)	Yeterli		Yeterli		Yeterli		Yeterli	
Devrilme analizi (depremlı)	Yeterli		Yeterli		Yeterli		Yeterli	
Toptan göçme analizi (Ölü yükler altında)	Yetersiz		Yeterli		Yeterli		Yeterli	
Toptan göçme analizi (Deprem yükleri altında)	Yetersiz		Yeterli		Yeterli		Yeterli	
Yaklaşık beton miktarı (m3)	68,35							
Yaklaşık donatı miktarı (kg)	6.307,00							
İçsel Sürtünme Açısı $\phi = 20^\circ$ İçin Hesap Sonuçları	c	ϕ	c	ϕ	c	ϕ	c	ϕ
	(kPa)	($^\circ$)	(kPa)	($^\circ$)	(kPa)	($^\circ$)	(kPa)	($^\circ$)
	10	20	20	20	30	20	40	20
Kayma analizi (Statik yükler altında)	Yeterli		Yeterli		Yeterli		Yeterli	
Kayma analizi (Dinamik yükler altında)	Yeterli		Yeterli		Yeterli		Yeterli	
Zemin emniyet gerilmesi (Ölü yükler altında)	Yeterli		Yeterli		Yeterli		Yeterli	

Zemin emniyet gerilmesi (Deprem yükleri altında)	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Devrilme analizi (depremsiz)	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Devrilme analizi (depremlı)	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Toptan göçme analizi (Ölü yükler altında)	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Toptan göçme analizi (Deprem yükleri altında)	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Yaklaşık beton miktarı (m3)	68,35							
Yaklaşık donatı miktarı (kg)	6.289,00							
İçsel Sürtünme Açısı $\phi=30^\circ$ İçin Hesap Sonuçları	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)
	10	30	20	30	30	30	40	30
Kayma analizi (Statik yükler altında)	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Kayma analizi (Dinamik yükler altında)	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Zemin emniyet gerilmesi (Ölü yükler altında)	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Zemin emniyet gerilmesi (Deprem yükleri altında)	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Devrilme analizi (depremsiz)	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Devrilme analizi (depremlı)	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Toptan göçme analizi (Ölü yükler altında)	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Toptan göçme analizi (Deprem yükleri altında)	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Yaklaşık beton miktarı (m3)	68,35							
Yaklaşık donatı miktarı (kg)	6.280,00							
İçsel Sürtünme Açısı $\phi =10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ ve $c=0$ kPa İçin Hesap Sonuçları	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)
	0	10	0	20	0	30	0	40
Kayma analizi (Statik yükler altında)	<i>Yetersiz</i>	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Kayma analizi (Dinamik yükler altında)	<i>Yetersiz</i>	<i>Yetersiz</i>	Yeterli	Yeterli				
Zemin emniyet gerilmesi (Ölü yükler altında)	<i>Yetersiz</i>	<i>Yetersiz</i>	Yeterli	Yeterli				
Zemin emniyet gerilmesi (Deprem yükleri altında)	<i>Yetersiz</i>	<i>Yetersiz</i>	Yeterli	Yeterli				
Devrilme analizi (depremsiz)	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Devrilme analizi (depremlı)	Yeterli	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Toptan göçme analizi (Ölü yükler altında)	<i>Yetersiz</i>	<i>Yetersiz</i>	Yeterli	Yeterli				
Toptan göçme analizi (Deprem yükleri altında)	<i>Yetersiz</i>	Yeterli	Yeterli	Yeterli				
Yaklaşık beton miktarı (m3)	68,35	68,35	68,35	68,35				
Yaklaşık donatı miktarı (kg)	6.378,00	6.334,00	6.307,00	6.289,00				

Zeminin kayma parametrelerinden kohezyon katsayısı ile istinat duvarının güvenlik katsayısı arasında pozitif yönde mükemmel bir ilişki olduğu aşağıda ki grafikten de görülmektedir. Zeminin kohezyon katsayısı arttıkça istinat duvarının devrilmeye karşı direncini gösteren güvenlik katsayısı da doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu durumda zeminin kohezyon katsayısının büyük değerler alması durumunda tasarlanan istinat duvarının daha güvenli hale geldiği görülmektedir.



Şekil 2. İçsel sürtünme açısının aktif zemin basıncı katsayısı ve pasif zemin basıncı katsayısı üzerindeki etkisi

Şekil 2, içsel sürtünme açısının aktif zemin basıncı katsayısı ve pasif zemin basıncı katsayısı üzerindeki etkisini göstermektedir.

Bu grafikte; İçsel sürtünme açısı arttıkça, aktif zemin basıncı katsayısı düşmektedir. Bu durum, zeminin daha dayanıklı hale gelmesiyle açıklanabilir. Daha yüksek içsel sürtünme açısı, zeminin kaymaya karşı direncini artırır ve böylece istinat duvarına uygulanan aktif basıncı azaltır. Örneğin, içsel sürtünme açısı 10° iken aktif zemin basıncı katsayısı yaklaşık 0,47 olurken, içsel sürtünme açısı 40° iken aktif zemin basıncı katsayısı yaklaşık 0,22 olmaktadır. Yani aktif zemin basıncı katsayısının azaldığı anlaşılmıştır.

İçsel sürtünme açısı arttıkça pasif zemin basıncı katsayısı yükselmektedir. Pasif zemin basıncı, istinat duvarının geriye doğru itilmesi durumunda oluşur. Yüksek içsel sürtünme açısı olan zeminler daha fazla direnç gösterdiğinden, pasif zemin basıncı daha büyük olur. Örneğin, içsel sürtünme açısı 10° iken pasif zemin basıncı katsayısı yaklaşık 2,12 olur-

ken, içsel sürtünme 40° iken pasif zemin basıncı katsayısı yaklaşık 4,6 olmaktadır. Yani pasif zemin basıncı katsayısı arttığı anlaşılmıştır.

İstinat duvarı tasarımında, içsel sürtünme açısı yüksek olan zeminler tercih edilmelidir. Çünkü bu durum aktif basıncı düşürerek duvar üzerindeki yükü azaltır. Kohezyonun etkisi, aktif ve pasif basınçlar kadar belirgin olmasa da özellikle zayıf zeminlerde kayma mukavemetini artırarak stabiliteyi artırabilir. Yumuşak zeminlerde, içsel sürtünme açısı düşük olduğundan, aktif zemin basıncı daha yüksek olur ve istinat duvarı daha fazla yük altında kalır.

Bu analizler, istinat duvarı tasarımlarında içsel sürtünme açısının ne kadar kritik olduğunu ve doğru zemin türünün seçilmesinin yapısal stabilite açısından büyük önem taşıdığını göstermektedir.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma, standart boyutlardaki istinat duvarlarının tasarımında kullanılan içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin etkilerini sistematik bir şekilde incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, zemin özelliklerinin duvar yapılarına olan etkisini açığa çıkararak, mühendislik uygulamalarında dikkate alınması gereken önemli parametrelerin belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

Analizler, içsel sürtünme açısının artışı ile istinat duvarının gömülü derinliğinin, yapının güvenliğini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Yüksek sürtünme açıları, zemin ile yapının etkilenimini güçlendirirken, daha düşük sürtünme açılarının zemin kayması riskini artırdığı gözlemlenmiştir. Öte yandan, kohezyon değerinin, özellikle nemli zemin koşullarında kritik bir öneme sahip olduğu, duvarın entegresini sağlamakta etkili olduğu belirlenmiştir. Kohezyon değerinin artışı, istinat duvarının yük taşıma kapasitesini yükseltmekle kalmayıp, dayanıklılığı da artırarak zemin kaymalarının önüne geçilmesinde önemli bir etken olarak değerlendirilmiştir.

Bu bulgular, inşaat mühendisliğinde sürdürülebilir yapı tasarımının artırılmasına ve zemin mekaniği uygulamalarının daha etkin hale gelmesine olanak tanımaktadır. Dolayısıyla, zemin mekaniği parametreleri üzerinde daha fazla araştırma yapmanın, mühendislik uygulamalarına sağlayacağı katkılar, inşaat sektörünün gelişiminde belirleyici bir rol oynayacaktır.

İçsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri, zemin mekaniği bağlamında, istinat duvarı tasarımında kritik rol oynamaktadır. Zeminlerin stabilize analizi açısından, içsel sürtünme açısı, bir zemin parçasının kayma

dayanımını belirleyen temel bir parametredir. Bu açı, zemin taneciklerinin birbirleriyle olan etkileşim derecesini yansıtarak, yüklerin zemine yüklenme şekli üzerinde belirleyici bir etki yaratır. Yüksek içsel sürtünme açısına sahip zeminler, daha yüksek yük taşıma kapasitesine ve dolayısıyla daha az sıvılaşma riski taşır. Bu durum, istinat duvarlarının arkasındaki zeminlerin güvenliğini artırır ve yapısal bütünlüğü destekler.

Diğer yandan, kohezyon, zemin taneciklerinin birbirine yapışma yeteneğini ifade eder ve zeminlerin kayma direncinde önemli bir faktördür. Kohezyon değerinin yükselmesi, zemin içindeki bağların güçlenmesi anlamına gelir. Bu da istinat duvarların güvenli bir temel oluşturmasını sağlar. Özellikle, kil zeminlerdeki kohezyon, duvarın arkasındaki zemin profilinin stabilitesini sağlamakta kritik bir rol oynar. Kohezyonlu zeminlerde, sürtünme açısının etkisi daha belirgin hale gelir, çünkü bu iki faktör birlikte değerlendirildiğinde zeminin toplam kayma direncinin arttığını göstermektedir.

Sonuç olarak, içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri, istinat duvarı tasarımı ile ilgili analizlerde bir arada ele alınması gereken unsurlardır. Bu iki parametrenin etkileşimi, zeminlerin davranışlarını anlamak ve yapısal mühendislikte güvenli tasarımlar oluşturmak açısından kritik bir öneme sahiptir.

İstatiksel ve dinamik analizlerde bu değerlerin doğru bir şekilde belirlenmesi, olumsuz zemin koşullarının üstesinden gelinmesine ve inşaat projelerinin sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla, mühendislik uygulamalarında bu faktörleri göz önünde bulundurmak, istinat duvarlarının başarısı için gereklidir.

Literatürde de geleneksel analiz ve modern tasarım yaklaşımları arasındaki farklara odaklanma öne çıkmaktadır. Bu farklılıklar, genellikle zemin koşullarının karmaşıklığı ve değişkenliği nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Kurumsal standartlar, düzenleyici çerçeveler ve mühendislik uygulamalarının değişimi hakkındaki çalışmalar, istinat duvarlarının güvenliğini sağlamak açısından daha bütüncül bir yaklaşım geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Özellikle farklı zemin türleri ve koşulları altında bu parametrelerin belirlenmesi, istinat duvarlarının performansını etkileyen temel unsurlar arasında yer alır. Gelecek araştırmalarda, laboratuvar çalışmalarıyla birlikte, gerçek sahada yapılan deneyler ve incelemeler aracılığıyla zemin davranışlarının daha iyi anlaşılması hedeflenmelidir.

Ayrıca, istinat duvarlarının tasarımında kullanılan mevcut hesaplama yöntemlerinin güncellenmesi önerilir. Son yıllarda gelişen bilgis-

yar destekli mühendislik yazılımları, metaforik olarak, karmaşık zemin davranışlarını simüle etme kapasitesine sahiptir. Bu nedenle, parametrik analizlerle içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin farklı kombinasyonları altında duvar performanslarının incelenmesi, mühendislik uygulamaları açısından büyük fayda sağlayabilir. İleri düzeydeki modelleme teknikleri, mühendislerin yapısal güvenliğin artırılması ve optimizasyonu yönündeki çalışmalarda daha bilinçli kararlar almalarına yardımcı olacaktır.

Son olarak, saha gözlemleri ve uzun dönem performans analizleri, önerilen yeni yöntemlerin sahada ne denli etkili olduğunu doğrulamak adına kritik öneme sahiptir. Zaman içerisinde zemin koşullarındaki değişimlerin istinat duvarları üzerindeki etkileri izlenmeli ve ortaya çıkan veriler, gelecekteki tasarım standartlarının belirlenmesine ışık tutmalıdır. Bu yaklaşım, yapı mühendisliği alanında tamamen yenilikçi ve bilimsel temellere dayalı bir ilerlemeyi teşvik ederek hem mevcut yapıların güçlendirilmesini hem de yeni projelerin daha sağlam bir temelle inşa edilmesini sağlayacaktır.

5. KAYNAKLAR

- Coulomb, C. A. (1776). Essay on an application of the rules of maxima and minima to some problems of statics related to architecture. Paris, France: Author.
- Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). Soil Strength and Slope Stability. John Wiley & Sons.
- Ding, L., Xiao, C., Meng, X., & Gao, S. (2025). Upper bound stability analysis of tiered geosynthetic-reinforced soil wall. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- J.E. Bowles (1996), *Foundation Analysis and Design* (5th ed.), McGraw-Hill, Inc., Singapore
- Rankine, W. J. M. (1857). On the Stability of Loose Earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*.
- TBDY (2018), “Deprem etkisi altında binaların tasarımı için esaslar”, Çevre Şehircilik Bakanlığı, Ankara, Türkiye.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practise*, Second ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Saba, H. R., Mahbod, A., & Lajvardi, H. (2025). *Journal of Urban Management and Energy Sustainability*.
- Sta4CAD (Sürüm v14.1), Sta Bilgisayar Mühendislik Müşavirlik Ltd. Şt., İstanbul, Türkiye.
- Wibowo, A. S. (2024). Triaxial Test in Gap-Graded Soil. *ResearchGate*.
- Zhang, Z., et al. (2025). Study on the stability of excavation process of permafrost subgrade slope in Alpine region. *Scientific Reports*.

Bölüm 4

HIZLI TARAMA YÖNTEMİ İLE
RİSKLİ BİNA TESPİTİ, DÜZCE İLİ
ÖRNEĞİ

Hüseyin BAYRAKTAR¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Düzce Üniversitesi Kaynaşlı MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 81900, Düzce, Türkiye, huseyinbayraktar@duzce.edu.tr , ORCID ID: 0000 0001 7277 0838

1. Giriş

İnsanca yaşamının önemli bir bölümünü güvenli yaşam oluşturmaktadır. İnsanlar kendini herhangi bir alanda güvenli hissetmediklerinde toplum içerisinde sürekli huzursuzluk egemen olabilmektedir. Güvenlik problemi denince birçok faktör sayılabilir. Bu çalışmada özellikle deprem tehlikesine karşı binalarda güvende kalma konusu ele alınacaktır. Çünkü binalar hem gündüz hem de gece kullanılan önemli yapılardır. Kentlerde binalar güvenli yapılmamış ise insanlar da içerisinde güvende olmayacaklardır.

Depremler aslında doğal sürecin bir gerekliliği olarak meydana gelmektedir. Fakat depremlerin doğal süreçten çıkarılarak birer afet haline dönüşmesi ise insan kaynaklı nedenlere bağlı olabilmektedir. Levhaların hareketi sonucu oluşan tektonik depremler kırıldıkları yerlerde faylar oluşturmaktadır. Bu kırılma ile açığa çıkan enerji yer kabuğunda ve yüzeyde hissedilmektedir. Eğer yerleşim yerlerinin seçiminde ve binaların yapımında deprem faktörü az ya da hiç dikkate alınmamış ise işte o zaman deprem bir tehlike, sonuçları ise doğa kaynaklı (insan kaynaklı!) afet olmaktadır.

Türkiye'nin aktif deprem kuşağı olan ve dünyadaki depremlerin yaklaşık yüzde yirmisinin olduğu Akdeniz Alp Himalaya deprem kuşağında yer alması nedeniyle insanlar farklı bölgelerde farklı büyüklüklerde depremlere maruz kalabilmektedir. Depremler hem can kaybı hem de ekonomik kayıp anlamında diğer afet türlerinden daha çok olumsuz etki yapabilmektedir. (AFAD, Türkiye'de Afet Yönetimi ve Doğa Kaynaklı Afet İstatistikleri, 2018). Aktif deprem kuşağı ülkemizde Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAFH), Doğu Anadolu Fay Hattı (DAFH) ve Batı Anadolu Fay Hattı (BAFH) gibi büyük depremleri üretebilen fay hatlarına neden olmuştur. Bu fay hatları üzerinde ve çevresinde nüfus ve ekonominin yoğun olması olası kayıpların da fazla olmasına neden olmaktadır.

Yerleşim yerlerinin seçiminde deprem riski göz önünde bulundurularak fay hatlarından uzak ve zemini sağlam olan bölgeler dikkate alınmalıdır. Aynı zamanda inşa edilecek yapıların da deprem ve zemin faktörü dikkate alınarak yapılması önemlidir. Ne yazık ki ülkemizde meydana gelen depremler bunun böyle olmadığını birçok kez göstermiştir. Yanlış yer seçimi, inşa edilen yapılarda yapılan yanlışlar sonucu birçok bina hasar almış ve azımsanmayacak sayıda can kayıpları yaşanmıştır. Deprem sonrası farklı kurum ve kuruluşlarca hazırlanan raporlarda ortak paydada uygun olmayan zemin ve uygun yapılmayan yapılar karşımıza çıkmaktadır.

Yerleşim yerlerinde binalar önemli bir kent donatısı olarak yer almaktadır. Binaların sağlam olması yani depreme dayanıklı bina aşamalarının doğru yürütülmesi can ve mal kayıplarının da az olmasına ve güvenli bir yaşam sağlamanın anahtarını oluşturacaktır. Bu aşamalar, binanın tasarım (proje) aşaması, tasarım (proje) denetimi aşaması, yapım (inşaat) aşaması ve yapım (inşaat) denetimi aşamasıdır. Bu aşamaların gerçekleştirilmesinde uzman kişi ve kurumların yer alması depreme dayanıklı bina elde etmenin en önemli konularındandır (Aydınoglu, N. M. 2021). Sağlam bina yapmanın temel dayanaklarından biri de yönetmeliklerdir. Ülkemizde 1940, 1942, 1949, 1953, 1961, 1968, 1975, 1998, 2007 ve son olarak 2018 TBDY (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) çıkarılmıştır. 2018 TBDY toplam 17 madde ile diğer yönetmeliklerin en kapsamlısı olarak hala yürürlükte olan bir yönetmeliktir. Fakat birçok yerleşim yerinde eski yönetmeliklere göre yapılmış ya da yapılmaya çalışılmış mevcut binalarda vardır. Bunların bir bölümü gerçekten bulunduğu zamanki yönetmelik hükümlerine göre yapılmış, mimarlık ve mühendislik hizmeti alan kaliteli malzeme ve işçilik ile inşa edilen yapılardır. Fakat bir bölümü de var ki bu durumun tam tersi bir uygulama ile yapılmış ve günümüzde kullanımına devam edilen riskli binalardır. Ülke genelinde neredeyse 6 milyon bağımsız bölüm risk altında iken bunlardan 2 milyonunun acil olarak dönüştürülmesi gerekliliği Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından açıklanmıştır (<https://www.csb.gov.tr>). Az sayıda olmayan riskli olarak tabir edebileceğimiz binaları tespit etmek ve risk düzeylerini belirlemek hayati öneme sahiptir.

Ülkemiz ortalama 100 yılda bir büyük depremler üretebilen faylara sahip olduğundan vakit kaybetmeden özellikle 1999 deprem öncesi binaların deprem riski bakımından tespiti ve incelenmesi gereği ortadadır. Bunun için bina risk taramasında sıklıkla kullanılan hızlı tarama yöntemleri bu vaktin kazanılmasında kolaylık sağlayacaktır. Dünyanın farklı ülkelerinde uygulanan hızlı tarama yöntemleri ülkemizde de yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Farklı hızlı tarama yöntemleri olsa da hepsinin ortak paydası hızlı bir şekilde inceleme ve risk durumlarına göre sınıflandırmaların yapılmasıdır. Ülkemizde uygulanan bazı hızlı tarama yöntemleri P25 puanlama yöntemi, RBTEİE 2019 yöntemi (Riskli Binaların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar), sokak taraması yöntemi, DURTES yöntemi, PERA yöntemi ve AURAP yöntemi gibi yöntemler farklı yerleşim yerlerinde uygulanmaktadır (Bal, İ.E. 2005; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2019; Sucuoğlu vd., 2004; Temur, 2006; İlki vd., 2014; Kaplan vd., 2017). Bu çalışmada Eskişehir Teknik Üniversitesi (Kaplan vd., 2017) tarafından geliştirilen AURAP yöntemi kullanılmıştır.

2. Düzce İli Depremselliği

Kuzeybatı Anadolu'nun tümünde hissedilen 17 Ağustos 1999 Doğu Marmara Depremi saat 03.02'de, 7.4 Mw büyüklüğünde meydana gelmiş ve ardından neredeyse 3 ay sonra saat 18.58'de 7.2 Mw büyüklüğünde 12 Kasım 1999 Düzce Depremi meydana gelmiştir. İki depremde de Düzce İl merkez ve çevresi ağır hasarlar ve kayıplar vermiştir. Sonrasında bir iyileşme ve yeniden yapılanma sürecine girilerek toparlanma birkaç yıl içerisinde başlamıştır. Yeni yerleşim yerlerinin seçimi ve kat yüksekliklerinin tekrar düzenlenmesi, mikro bölgeleme çalışmaları gibi birçok alanda gelişmeler yaşanmıştır. Fakat deprem sonrası kentte yenilenme için gelişme gerçekleştirilmiş olsa da hala istenen seviyelere gelindiği söylenemez. Riskli binaların ve alanların dönüştürülmesi, yolların ve altyapının daha da geliştirilmesi önerilmektedir. Düzce ilinde en son 23.11.2022 tarihinde saat 04.08'de kentin 11 km batısında, Gölyaka ilçe merkezli sığ odaklı, 6.0 Mw büyüklüğünde orta büyüklükte bir deprem meydana gelmiştir. Deprem Düzce'nin çevre illerinde de hissedilmiştir. 1999 Depremlerinde kırılmayan neredeyse 7 km uzunluğunda kesimin üzerinde gerçekleşen son deprem ile 23.11.2022 tarihinde bu kesimin yırtılmasıyla depremin meydana geldiği belirtilmektedir. Neyse ki depremde herhangi bir yapı yıkılmasa da Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından kent merkezi, ilçeleri ve köylerinde ağır hasarlı olarak belirlenen acil yıkılacak 181 bina tespit edilmiştir <https://www.mta.gov.tr/>. 23 Kasım 2022 tarihinde meydana gelen Düzce-Gölyaka Depreminin yaklaşık 17 saniye sürmesi ve 1999 depremleri sonrası kentte bazı tedbirlerin alınmış olması sayesinde ağır can ve ekonomik kayıplar yaşanmamıştır. Örneğin Düzce Merkezde bina kat sınırlaması 4 katla sınırlıdır. Yeni yapılacak binaların parsellerinden sismik etüt raporu istenmektedir. Belediye ve yapı denetimler tarafından hem proje aşamasında hem de yapım aşamasında gerekli denetimler yapılmaktadır. Bu sayede ileriye dönük deprem tehlikesine karşı tedbirler alınırken olası depremlere karşı da kent direnç kazanmaktadır. Şekil 1'de Bolu ve Düzce civarı diri fay haritası görülmektedir.



Şekil 1. Bolu ve Düzce illerinin diri fay haritası (Özmen, 2000)

3. Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak Düzce il Merkezine bağlı Burhaniye Mahallesi seçilmiştir. Burhaniye Mahallesi 1999 deprem öncesi binaların yoğunlukta olduğu bir mahalledir (Şekil 2). Burhaniye Mahallesi Düzce yerleşim yerinin en merkezi konumunda yer alan mahallelerinden biridir. Mahallemde 6 kata kadar binaların olması ve merkezi bir konumda olmasından dolayı nüfus yoğunluğu fazladır.



Şekil 2. Burhaniye Mahallesi yerleşim yeri sınırları

Çalışma 2024 yılı içerisinde yapılmış ve AURAP yöntemi ile Burhaniye Mahallesinde farklı lokasyonlarda bulunan 33 binada risk taraması yapılmıştır. İncelenen binaların tamamı 1999 depremi öncesi inşa edilen betonarme binalardır. Burhaniye Mahallesinde 6 kattan daha fazla yapılan bina bulunmamaktadır. İncelenen binaların kat adetleri 3 ile 6 kat arasında değişmektedir. Özellikle 5 ve 6 katlı binalarda bodrum kata daha fazla rastlanılmıştır. Bodrum kat olması binanın deprem anında bodrumsuz binalara göre daha rijit kalmasını sağlayacaktır.

4. AURAP Yöntemi

AURAP yöntemi Eskişehir Teknik Üniversitesinde (Kaplan vd, 2017) geliştirilen hızlı tarama yöntemidir. Yöntem betonarme çerçeve sistemli binalarda tahribatsız yöntem yoluyla kritik katta (zemin kat) inceleme yapılarak binanın deprem risk durumu tahmini olarak belirlenebilmektedir. Bunun için kritik katın planı, X ve Y yönü ölçüleri alınmış kolon ve perde sayıları, Schmidt çekici ile beton basınç dayanımı, röntgen tarama

cihazı ile kolonda etriye sıklaştırılması olup olmadığı, kat yükseklikleri, zemin bilgisi, düzensizlikler gibi parametreler hakkında bilgiler alınarak binanın deprem riski bakımından düşük, orta ya da yüksek risk sonucuna ulaşılmaktadır.

Bir binanın tahmini bilgileri AURAP hızlı tarama yöntemi ile binanın projesi varsa yaklaşık 1 saat, projesi yoksa kritik katın rölevesi ve anket formlarında bulunan gerekli bilgiler alınarak yaklaşık 2 saat gibi kısa zamanda alınabilmektedir. Bunların sonucunda binanın risk durumu belirlenerek ilgili makamlarca deprem öncesi gerekli adımların atılması sağlanabilmektedir.

AURAP yönteminde risk düzeyleri düşük, orta ve yüksek risk olarak belirlenmektedir. Bina sonuç puanı (BSP) 50 puana eşit ya da altında ise yüksek risk, 50 ile 150 puan arası ise orta risk ve 150 puana eşit ya da üzeri ise düşük risk olarak değerlendirilmektedir (Şekil 3).

Yüksek Risk $P \leq 50$	Orta Risk $P=50-150$	Düşük Risk $P \geq 150$
----------------------------	-------------------------	----------------------------

Şekil 3. AURAP yöntemi bina sonuç puanlarına göre risk düzeyleri

Hesaplamalar sonucunda binalarda risk düzeyleri “Yüksek Risk”, “Orta Risk” veya “Düşük Risk” olarak çıkabilmektedir. AURAP yönteminde risk düzeyleri ile ilgili şu açıklamalar yer almaktadır:

Bina “Yüksek Risk” düzeyine sahip bina olarak belirlenmiş ise, mutlaka daha ayrıntılı bir değerlendirme yöntemi (6306 sayılı Kanunun Uygulama Yönetmeliği'nin Ek-2'sinde yer alan Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar veya Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'de tarif edilen yöntem) ile ivedilikle irdelenmesi önerilmektedir.

Bina “Orta Risk” düzeyinde bina ise yüksek riskli binalar kadar ivedi olmamakla birlikte yine de daha ayrıntılı bir sismik performans değerlendirme yöntemi ile irdelenmesi tavsiye edilmektedir.

Bina “Düşük Risk”li olarak değerlendirilmiş olması, binanın depremde hasar görmeyeceği ya da toptan göçmeyeceği anlamına gelmemekle birlikte riskin görece olarak düşük olduğunu göstermektedir. Düşük riskli binaların da ilgililerinin ekonomik öncelikleri ve risk algıları doğrultusunda, ayrıntılı inceleme yöntemlerinden biri ile incelenmesinde yarar vardır, şeklinde açıklanmaktadır.

Bina Sonuç Puanı (BSP); Göreceli bina puanı (GBP), Yapısal Emniyet Faktörü (YEF) ve Sürekli çerçeve puanı (SÇP) çarpımları sonucunda bulunmaktadır (Denk. 1).

$$BSP=GBP \times YEF \times SÇP \quad (1)$$

Göreceli bina puanı (GBP), deprem yönetmeliğinde verilen binadaki olası düzensizlikler ve binada bulunan kısa kolon, köşe kolon sorunu, asma kat, güçlü kiriş-zayıf kolon gibi kusurlara göre belirlenmektedir (Denk. 2). Denklemde CKi (Ceza Katsayıları): Binada varsa düzensizlikler ve yapısal kusurları (burulma düzensizliği, zayıf kat, kısa kolon, güçlü kiriş-zayıf kolon, vb) ifade eden ceza katsayıları kümülatif puanı 100 puandan aşağıya çekebilmektedir.

$$GBP = 100x \prod_{i=1}^N CKi \quad (2)$$

Yapısal Emniyet Faktörü (YEF), kritik katın kesme kuvveti taşıma kapasitesinin eşdeğer deprem yükü yöntemine (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007) göre bulunan taban kesme kuvvetine oranı ile bulunmaktadır (Denk. 3)

$$YEF=Vc/Vb \quad (3)$$

Sürekli çerçeve puanı (SÇP), incelenen binanın kritik katında mevcut sürekli çerçeve sayısının katın planına göre olması gereken (uygun-ideal) sürekli çerçeve sayısına bölünmesi ile sürekli çerçeve oranı (SÇO) hesaplanmaktadır. Elde edilen (SÇO)'ya göre (SÇP)'i için katsayı bulunmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. Sürekli Çerçeve Oranı (SÇO) 'na göre Sürekli Çerçeve Puanı (SÇP) 'nin katsayı değerleri

SÇP = 0,25	(SÇO ≤ 0,25)
SÇP = SÇO	(0,25 < SÇO < 0,50)
SÇP = 1	(SÇO ≥ 0,50)

Sonuç olarak Bina Sonuç Puanı (BSP), binanın içeriden ve dışarıdan yerinde incelenmesi sonucunda formlara geçirilen bilgiler ışığında yukarıda bahsi geçen denklemlerde veriler yerine konularak hesaplanabilmektedir. AURAP yöntemi ile ilgili daha detaylı bilgiler (Kaplan, vd. 2017) çalışmasında bulunmaktadır.

5. AURAP Yönteminin Uygulanması

AURAP yönteminde binalara ait puanların hesaplanmasında zemin bilgisi, temel bilgisi, kolon bilgileri, beton basınç dayanımı, donatı sıklığı, bina ağırlığı, bina periyodu, düzensizlikler ve yapısal kusurlar, bina yapım yılı gibi birçok parametre etkindir. Örneğin yerel zemin sınıfı (Z1, Z2, Z3, Z4) göre (Deprem Yönetmeliği 2007) Spektrum Karakteristik Periyotları (T_A , T_B) alınmaktadır. Daha sonra deprem bölgesi bilgisine göre Spektrum Katsayısı (ST) bulunarak spektrum eğri grafiği oluşturulmaktadır. Temel bilgisi de parametreler arasındadır. Tekil temel, kademeli temel var ya da yok durumuna göre puan katsayısı oluşmaktadır. Düzensizlikler ve yapısal kusurlar dediğimizde, Deprem Yönetmeliği 2007'de belirtilen düzensizliklerin var ya da yok olma durumuna göre bir katsayı puana etki etmektedir. Kolonlar arasında en büyük açıklığın 6.00 m'den ya da 7.00 m'den büyük olması, güçlü kiriş zayıf kolon var ya da yok olması durumu, etriye sıklaştırılmasının olmaması, zemin seviyesinin altında bodrum kat bulunmaması, Bina Yapım Yılı (BYY) ≤ 1975 , $1975 \leq \text{BYY} \leq 1990$, $1991 \leq \text{BYY} \leq 2000$ yılları aralığında olması gibi birçok parametre bilgisi girilerek Bina Sonuç Puanı (BSP) hesaplanmakta ve binanın risk durumu az, orta ya da yüksek riskli olarak belirlenebilmektedir.

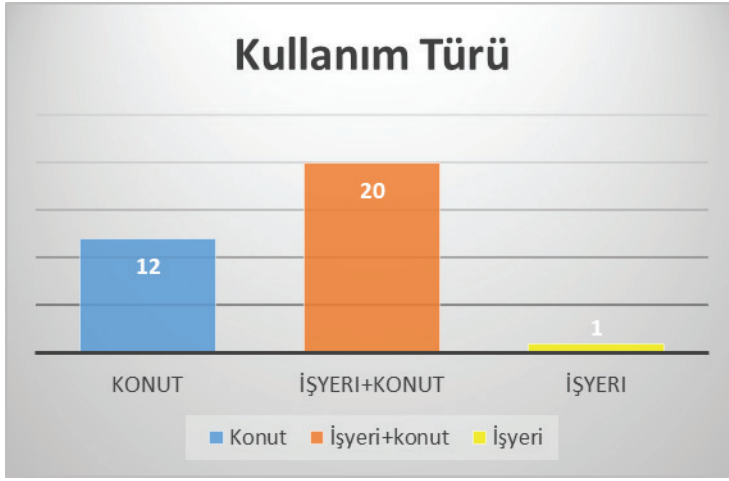
Düzce ili Burhaniye Mahallesi'nde AURAP yöntemi 33 binada uygulanarak Bina Risk durumları belirlenmiştir. Bina risk durumlarının belirlenmesinde kullanılan parametreler her bir bina için detaylı olarak girilmektedir. Her bir binaya ait doldurulan anket verilerinde yer alan parametreler ile yapılan hesaplamalar sonucunda binaların Risk puanı oluşmuş ve 33 yapı bu risk puanına göre Yüksek Riskli, Orta Riskli ve Düşük Riskli olarak tespit edilmiştir. İncelenen yapılar ile ilgili hesaplanan Risk Durumları aşağıda gösterilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. İncelenen 33 binaya ait bazı genel bilgiler ve binaların Risk Durumları

Sıra no	Yapım yılı	Kullanım türü	Bodrum kat adedi	Toplam Kat adedi	Güçlendirme	Risk durumu
1	1994	Konut	1	6	var	orta riskli
2	1987	Konut	0	5	var	orta riskli
3	1993	Konut	1	5	yok	az riskli
4	1983	Konut	1	6	yok	az riskli
5	1987	İşyeri+Konut	1	6	var	az riskli
6	1993	Konut	1	6	yok	orta riskli
7	1994	Konut	0	5	yok	orta riskli
8	1996	İşyeri+Konut	1	6	var	az riskli
9	1995	İşyeri+Konut	0	5	yok	az riskli
10	1982	Konut	1	5	yok	az riskli
11	1986	İşyeri+Konut	0	5	yok	orta riskli
12	1984	İşyeri+Konut	1	6	yok	orta riskli
13	1982	Konut	1	5	var	orta riskli
14	1979	Konut	1	5	yok	az riskli
15	1985	İşyeri+Konut	1	5	yok	az riskli
16	1981	İşyeri+Konut	1	4	yok	az riskli
17	1982	İşyeri+Konut	1	6	var	az riskli
18	1980	Konut	1	6	var	az riskli
19	1984	Konut	1	4	var	az riskli
20	1992	İşyeri+Konut	1	6	yok	orta riskli
21	1988	İşyeri+Konut	1	6	var	az riskli
22	1996	İşyeri+Konut	1	6	yok	az riskli
23	1998	işyeri	1	5	yok	az riskli
24	1984	İşyeri+Konut	1	6	var	az riskli
25	1986	Konut	0	5	var	az riskli
26	1981	İşyeri+Konut	0	3	var	az riskli
27	1991	İşyeri+Konut	0	4	var	az riskli
28	1985	İşyeri+Konut	0	3	yok	az riskli
29	1991	İşyeri+Konut	0	4	var	az riskli
30	1991	İşyeri+Konut	0	5	yok	az riskli
31	1993	İşyeri+Konut	0	5	var	az riskli
32	1977	İşyeri+Konut	0	4	yok	az riskli
33	1996	İşyeri+Konut	0	4	var	az riskli

6. Tartışma ve Sonuç

Düzce ili, Burhaniye mahallesinde İncelenen 33 binanın tamamı 1999 depremlerinden önce yapılan binalardır. İncelenen binalar arasında en eski bina 1977 yılında yapılmış iken, en son inşa edilen bina ise 1998 yılında yapılmıştır. 33 binanın 12'si konut, 20'si işyeri + konut ve 1'i de sadece işyeri olarak kullanılmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Kullanım türüne göre binalar

1999 depremleri sonrası binalarda yıkım ya da farklı hasar durumları oluşmuştur. Mülga Bayındırlık ve İskân Bakanlığı (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı) tarafından orta hasarlı olarak tespit edilen binalarda güçlendirme yapıldıktan sonra oturma izni verilmiştir. Fakat güçlendirme projelerinin binaların tamamında doğru olarak yapıp yapılmadığı tartışma konusudur. Bu konunun daha detaylı araştırılması önerilmektedir. İncelenen binalardan 16 tanesinde güçlendirme yapılmıştır!

İncelenen binaların %40'ı bodrumlu, %60'ı ise bodrumsuz olarak inşa edilmiştir. Bodrumlu binalarda sadece -1 kat bodrum bulunmaktadır. Düzce merkez yerleşkesinin alüvyon zemin üzerinde bulunması,

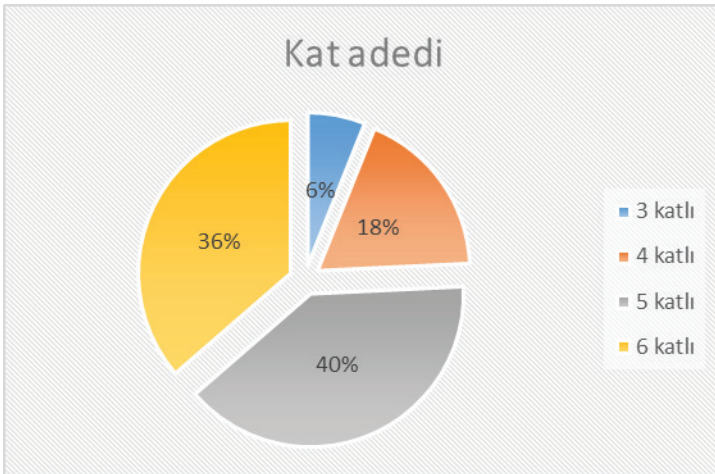
Yeraltı su seviyesinin 4-5 metrelerde çıkması yani yer altı su seviyesinin sığ olması nedenlerinden dolayı (zemin etüdü raporlarında zemin sınıfı 2007 Deprem Yönetmeliğine göre genelde Z4, 4-5 metre seviyelerde yer altı su seviyesi görülebilmektedir) ne yazık ki bodrumlu binaların

bodrumlarında nem-koku ve kolon-kiriş donatılarında sıklıkla korozyona rastlanılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. İncelenen binaların bodrum katlarında su ve neme bağlı bozulmalar

Burhaniye Mahallesinde genel olarak binalar 3 kat ile 6 kat arasında değişmektedir. İncelenen 33 binanın 12'si 6 katlı (tamamı bodrumlu), 13'ü 5 katlı (4'ü bodrumlu, 9'u bodrumsuz), 6'sı 4 katlı (2'si bodrumlu, 4'ü bodrumsuz), 2'si 3 katlı (tamamı bodrumsuz) olarak inşa edilmiştir (Şekil 6). Bunlardan 4, 5 ve 6 katlı bodrumlu binaların bodrumsuz olanlara göre statik, salınım ve deplasman bakımından daha avantajlı olacağı söylenebilir.



Şekil 6. İncelenen binaların kat adedi dağılımı

Burhaniye Mahallesi binalar genellikle bitişik yapı düzeninde yapılmıştır. Betonarme çerçeve sisteminde planlanan binalar 1999 deprem sonrası güçlendirme yapılarak genelde bodrum katta olmak üzere ilave perdeler eklenmiştir. Bazı adalarda binaların kat seviyeleri benzer iken bazı adalarda farklı kat seviyeli binalar göze çarpmaktadır. Aynı zamanda eski binaların yanına yeni binaların yapılması sonucu da kat seviyelerinde farklılıklar oluşmuştur. Düzce Belediyesi İmar Yönetmeliği'nde 12 Kasım 1999 depreminden sonra merkezde kat adedi zemin + 3 kat olarak belirlenmiştir. Farklı kat seviyeleri deprem anında binalarda çekiçleme etkisi oluşturabilmektedir. Şekil 7 ve Şekil 8' de Burhaniye Mahallesi incelenen bazı binalara ait görseller sunulmuştur.



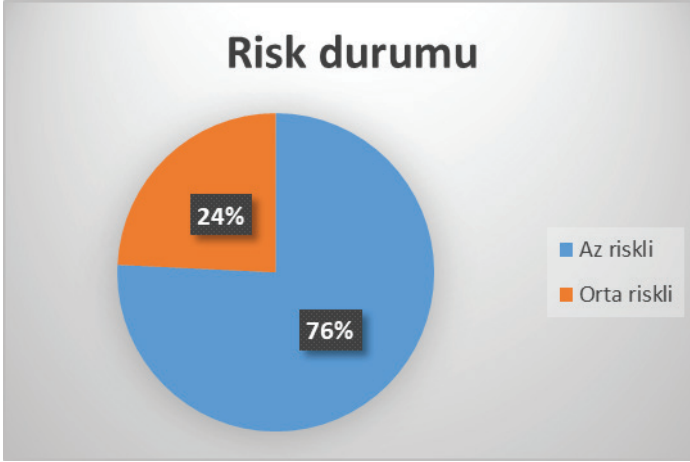
Şekil 7. Burhaniye Mahallesi incelenen deprem öncesi binalara ait görseller



Şekil 8. Burhaniye Mahallesi incelenen deprem öncesi binalara ait görseller

İncelenen binalarda beton basınç dayanımlarının tespiti için Schmidt test çekici, kolonlarda donatı sıklaştırma tespiti için ise el röntgen tarama cihazı kullanılmıştır. Uzunluk ölçülerinin alımında lazer metre ve 5 m.'lik şerit metre kullanılmıştır. Binalarda beton basınç dayanımının ortalama 15 MPa civarında olduğu tespit edilmiştir. Güçlendirme yapılan binalara ilave edilen perde vb taşıyıcı yapı elemanlarında (güçlendirme projelerinden elde edilen bilgilere göre) beton basınç dayanımının 20 MPa civarında olduğu görülmüştür. Beton basınç dayanımlarının tespitinde yerinde beton karot örneklerinin alınması önerilmektedir.

AURAP yönteminde kullanılan anket formlarına binalardan alınan veriler işlenerek verilen formüllere göre bina risk puanları elde edilmiştir. Kullanılan yöntemle göre incelenen 33 binadan 25'i az riskli, 8'i ise orta risk düzeyinde belirlenmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. İncelenen binaların AURAP yöntemine göre hesap sonucu risk durumları

İncelenen binalarda orta riskli olarak belirlenen binalar 5 ve 6 katlı binalardır. Orta riskli çıkan binaların 4'ü 5 katlı, diğer 4'ü de 6 katlı olan binalardır. Düzce Belediyesi İmar yönetmeliği 12 Kasım 1999 depremi sonrası tarihinden itibaren Burhaniye Mahallesi'nde yapılacak yeni binalarda en fazla 4 kat sınırlaması (zemin + 3) getirmiştir. Yer altı su seviyesinin yüksek ve zeminin zayıf olduğu Burhaniye Mahallesi'nde özellikle 4 kat üzeri binalarda deprem bakımından risk daha fazla olacaktır. Ayrıca yeni yapılan binalar ile eski binalar arasında kat farkları çıkarak düzensiz yapı dağılımı oluşabilmektedir. Bununla birlikte, yeni binalar ile eski binaların kat seviyelerinin farklı olması, dilatasyonu (ayırma derzi) yetersiz

binalarda deplasman-salınım farkının oluşmasına neden olarak çekiçleme etkisini artırabilecektir. Bu durum yeni ya da eski olsun iki bina için de depremde hasar alma riskini artıracaktır.

Eski binaların yoğun olduğu bölgelerde parsel bazında dönüşüm yerine ada bazlı dönüşüm daha uygun olacaktır. Çünkü parsel bazında dönüşüm yaptığınızda Burhaniye Mahallesi gibi bitişik nizamlı binaların yoğunlukta olduğu bir bölgede yıkım ve yeniden yapım zor olacaktır.

Mahallede bazı boş parsellere yeni bina yapımı devam etmektedir. Fakat bu durum eski bina ile yeni bina arasında hem statik hem mimari anlamda farkları ortaya çıkarmakta ve bu durumun her iki yapıyı da olumsuz etkileme ihtimali bulunmaktadır.

Mahallede bulunan yolların da birçok sokakta yetersiz kalması ayrı bir problemdir. Olası bir afet anında bu yolların kullanımı mümkün olmayabilecektir. Burhaniye Mahallesinde riskli binaların yanı sıra eski ve yeni binalar arasında yükseklik farkı, yolların dar olması ve yoğun nüfusun bulunması olası bir afet anında hem bina hem de insanlar için risk düzeyinin artmasına sebep olabilecektir.

Riskli, eski ve düzensiz binaların yoğun olduğu bölgelerde dönüşümün kentsel dönüşüm olarak yapılması uygun olacaktır. Bu sayede kanunun verdiği yetki ve imkanlar doğrultusunda daha düzenli ve güvenli bölgelerin oluşturulması sağlanabilecektir. Düzce Belediyesi'nin kentsel dönüşüm konusunda gayret içinde olduğu söylenebilir. Fakat daha hızlı ve etkin bir sürecin işletilmesi gerektiği de ortadadır. Düzce Belediyesi kentsel dönüşüm için 8 bölge belirlemiştir. Bu bölgelerin bazılarında kentsel dönüşüm çalışmaları devam etmektedir. (<https://www.trthaber.com/haber/turkiye/duzcede-kentsel-donusum-icin-8-bolge-belirlendi-789116.html>).

16/5/2012 tarihli ve 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun (Halk arasında "Kentsel Dönüşüm Kanunu") afet riski altındaki alanlar ile bu alanlar dışındaki riskli yapıların bulunduğu arsa ve arazilerde, fen ve sanat norm ve standartlarına uygun, sağlıklı ve güvenli yaşama çevrelerini teşkil etmek üzere iyileştirme, tasfiye ve yenilemelere dair usul ve esasları belirlemektir.

Bu Kanunun uygulanmasında;

a) Bakanlık: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığını,

b) İdare: Belediye ve mücavir alan sınırları içinde belediyeleri, bu sınırlar dışında il özel idarelerini, büyükşehirlerde büyükşehir belediyele-

rini ve Bakanlık tarafından yetkilendirilmesi hâlinde büyükşehir belediyesi sınırları içindeki ilçe belediyelerini,

c) Rezerv yapı alanı: Bu Kanun uyarınca gerçekleştirilecek uygulamalarda kullanılmak üzere, TOKİ'nin veya İdarenin talebine bağlı olarak veya resen Bakanlıkça belirlenen alanları,

ç) Riskli alan: Zemin yapısı veya üzerindeki yapılaşma sebebiyle can ve mal kaybına yol açma riski taşıyan, Cumhurbaşkanınca kararlaştırılan alanı,

d) Riskli yapı: Riskli alan içinde veya dışında olup ekonomik ömrünü tamamlamış olan ya da yıkılma veya ağır hasar görme riski taşıdığı ilmi ve teknik verilere dayanılarak tespit edilen yapıyı,

e) TOKİ: Toplu Konut İdaresi Başkanlığını,

f) (Ek:7/11/2023-7471/6 md.) Başkanlık: Kentsel Dönüşüm Başkanlığını, tanımları yer almaktadır (<https://altyapi.csb.gov.tr/kanunlar-i-463>).

Kentsel dönüşüm yerleşim yerleri için fırsat niteliğindedir. Bunun için riskli yapıların tespiti ve bu doğrultuda adımlar atılması stratejik öneme sahiptir. Hızlı tarama yöntemleri riskli yapıların tespitinde ve bunların sınıflandırılmasında rol alarak işlemlerin çabuk ilerlemesini sağlayabilmektedir. Düzce ilinin daha farklı bölge ve mahallerinde 1999 deprem öncesi hatırı sayılır sayıda binaları bulunmaktadır. Düzce il genelinde riskli binaların tespiti ve bir an önce gerekli adımların atılması kentin ve insanların güvenliği için önemli bir aşama olacaktır.

Kaynaklar

- AFAD, Türkiye’de Afet Yönetimi ve Doğa Kaynaklı Afet İstatistikleri, 2018.
- A.İlki, M. Comert, C. Demir, K. Orakcal, D. Ulugtekin, M. Tapan and N. Kumbasar 2014 “Advances in Structural Engineering Volume 17 No.3.
- Aydinoğlu, N. M. (2021). Deprem Tehlikesi Altında Binalarımızın Hasar Riski Tasarım ve Yapım Sorunları, İstanbul Bülten, sayı 167.
- Bal, İ.E., (2005), Deprem Etkisindeki Betonarme Binaların Göçme Riskinin Hızlı Değerlendirme Yöntemleri ile Belirlenmesi, Yüksek Lisans, İTÜ, İstanbul.
- Kaplan, O., Guney, Y., Topcu, A. and Ozcelikors, Y. (2017). A rapid seismic safety assessment method for mid-rise reinforced concrete buildings. Bulletin of Earthquake Engineering, 1-27.
- Özmen, B., 2000, Düzce-Bolu Bölgesi’nin Jeolojisi, Diri Fayları ve Hasar Yapan Depremleri s:1-14, 12 Kasım 1999 Düzce Depremi Raporu (Editör: Bülent ÖZMEN ve Günruh BAĞCI), Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, Ankara.
- RYTEİE-2019, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanunun Uygulama Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik. T. C. Resmi Gazete, Sayı: 30808, 21 Haziran 2019.
- Sucuoğlu H, Yazgan U, Yakut A. A screening procedure for seismic risk assessment in urban building stocks”. Earthquake Spectra,2007; 23(2): 441–458.
- Temür, R. (2006). Hızlı Durum Tespit (DURTES) Yöntemi ve Bilgisayar Programının Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- TBDY-2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, T.C. Resmi Gazete, Sayı: 30364, 18 Mart 2018.
- T.C. Maden Teknik ve Arama Genel Müdürlüğü, <https://www.mta.gov.tr/> Erişim tarihi: 15.03.2025.
- T.C. Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü, <https://www.csb.gov.tr/bakan-murat-kurum-turkiyede-6-milyon-bagimsiz-birim-risk-altinda-2-milyonu-acil-donusmeli-bakanlik-faaliyetleri-40206> Erişim tarihi: 13.03.2025.
- <https://www.trthaber.com/haber/turkiye/duzcede-kentsel-donusum-icin-8-bolge-belirlendi-789116.html> Erişim tarihi: 21.03.2025.
- <https://altyapi.csb.gov.tr/kanunlar-i-463> Erişim tarihi: 21.03.2025.

Bölüm 5

DEPREM BÖLGELERİNDE KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON KULLANIMININ KALIP BASINCINA ETKİSİ¹

Tuncay KAP², Metin ARSLAN³

1 Dr. Tuncay KAP “Kendiliğinden yerleşen betonlarda döküm hızı ve donatı yoğunluğunun kalıp yanıl basıncı üzerine etkileri” konulu doktora tezinden üretilmiştir. Tez Danışmanı Prof. Dr. Metin ARSLAN, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.

2 Dr. Öğr. Üyesi, İnşaat Bölümü, Düzce Meslek Yüksekokulu, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye (ORCID: 0000-0003-1832-0662)

3 Prof. Dr. Öğretim Üyesi, Ankara Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Türkiye (ORCID: 0000-0001-9432-6877)

GİRİŞ

Ülkemizde son yıllarda meydana gelen depremler nedeniyle pek çok bina yıkılmış ve/veya hasar almıştır. Bu yıkımların temel sebeplerinden bir tanesi de beton basınç dayanımının çok düşük olması veya betonun yerinde yeterli miktarda sıkıştırılıp kalıba yerleştirilmesinde vibrasyon kullanılmamasıdır. Bu nedenlerden dolayı Kendiliğinde yerleşen beton kullanımı son yıllarda önem kazanmıştır. İnşaat uygulamalarında 1980 yılların başında kullanılmaya başlanmıştır Kendiliğinden yerleşen beton terleme, ayrışma gibi kusurları olmaksızın, iyi sıkışma özelliği göstermekte olup çok akıcı kıvamlı ve kimyasal katkı yardımıyla yaklaşık olarak 90 dakika süreyle akıcı kıvamını koruyan özelliklere sahiptir. Araştırmanın amacı, Deprem bölgelerinde kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) kalıpların yanal yüzlerine yaptığı hidrostatik basınçların farklı beton döküm hızlarına bağlı değişimler incelenmiştir. Bu amaçla 2018 deprem yönetmeliğine uygun yapılan betonarme yapılarda donatı sıklığından dolayı betonun kalıba yerleştirilmesi ve sıkıştırılmasında KYB büyük kolaylıklar sağlamaktadır. KYB kullanılan yapılarda kalıpların sökülmesinden sonra beton yüzeyinde normal betonlarda karşılaşılan kusurlu imalatlar en az seviyeye düşmektedir. Ayrıca KYB kullanılmasıyla birlikte işçilik, zaman ve maliyet açısından normal betona göre avantajlar sağlamaktadır. KYB kullanımı ile betonarme elemanlarda donatılarda oluşan korozyon sorunu da en az düzeye inmekte ve yapı ömründe de bazı avantajlar sağlamaktadır. Kendiliğinden yerleşen betonlarda (KYB) kullanılan katkılar genellikle yüksek oranda su azaltıcı hiper akışkanlaştırıcı (Polikarboksilik eter esaslı hiper akışkanlaştırıcı) malzemelerdir (Şimşek, 2009:1)].

Beton içerisine taş unu, uçucu kül gibi malzemeler katılmaktadır.

1. ARAŞTIRMANIN AMACI VE ÖNEMİ

Betonarme yapılarda 2018 deprem yönetmeliğine göre yapılan taşıyıcı sistem (kolon, kiriş, döşeme ve temel kalıplarına KYB dökülmesi önem arz etmektedir. Şantiye ortamında kalıba dökülen KYB betonunun döküm hızının kontrollü bir şekilde yapılması beton ve kalıbın sağlıklı çalışması kontrol altında yapılmalıdır. Bu amaçla inşaat sürecinin hızlı yapılması açısından tünel kalıp sistemi gibi sistemler kullanılmaktadır.

Bu araştırmada, kalıp yanal basıncının bilinmesi ve beton döküm hızının da kontrol altında yapılması önemlidir. Özellikle kat yüksekliklerinin standart olduğu konut vb. yapılarda kalıba hangi noktada ne kadar bir yanal basınç geleceğinin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla seçilen kalıp türü, kalıp elemanı ve boyutlarının bilinmesi son derece önemlidir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

KYB literatürde yüksek işlenebilir özellikleri nedeniyle herhangi bir vibrasyona ihtiyaç duyulmadan kendi ağırlığı ile kalıba boşluksuz bir şekilde yerleşen, bu aşamada sıkışma ve ayrışma gibi kusurları oluşmayan betondur. (Okamura, 1997:2).

KYB, vibrasyona gerek olmaması nedeniyle gürültülü çalışmaların ortadan kaldırılması, işçilik maliyetinin düşürülmesi, daha hızlı üretim imkânı tanınması ile birlikte iri malzeme hacminin azaltılması, boyutu en fazla olan agrega tane optimum düzeye çekilmesi, uygun bir süperakışkanlaştırıcı ilave edilmesiyle akıcılık özelliği kazanarak sık donatılar içinden geçerek dar kesitlerde harcın yerleştirilmesi ve boşluksuz beton üretimine olanak sunmaktadır (Gaimster, 2003:3).

Betonarme taşıyıcı sistem tasarımında esas malzeme; yapı çeliği ve betondur. Yapı çeliği standart özelliklerde beton santrallerinde hazırlanmaktadır. Ancak beton, fiziksel ve mühendislik özellikleri bakımından; kendisini meydana getiren (agrega, çimento, su ve katkı maddeleri gibi) gereçlerin özellikleri yanında, beton tasarımı, betonun hazırlanması, betonun taşınması, yerleştirilmesi, sıkıştırılması gibi aşamalardan sonra, kalıpların mekanik nitelikleri ile çevre koşullarından etkilenmektedir (Hurd, 1989:4)

Son yıllarda yapı malzemesi olarak çoğunlukla tercih edilen malzeme betondur. Dünyada betonun son yüzyılda kullanıldığı gibi gelecek dönemlerde de kullanılacağı düşünülmektedir. Geleneksel olarak kullanılan betona ilave olarak akademik çalışmaların gelişmesi ve teknolojideki çalışmaların artmasıyla birlikte beton türleri de artmıştır. Bunlar arasında da beton türü olarak (KYB) bulunmaktadır (Brouwers, 2005:5)

KYB, literatürde farklı isimlerle tanımlanmaktadır. Genelde kendiliğinden sıkışan beton (Self-Compacting Concrete-SCC) ile adlandırılmaktadır. Farklı bir isim olarak kendiliğinden düzeyeleşen beton (Self-Levelling Concrete-SCC) ve kendiliğinden çöken beton (Self-Consolidating Concrete-SCC) dur. Ülkemizde genel olarak kendiliğinden yerleşen beton (KYB) ifadesi ile anılmaktadır (Rols, 1999:6), (Yahia, 2005:7).

KYB'ler kolay işlenebilirlik özellikleri nedeniyle vibrasyona ihtiyaç duyulmadan doğal ağırlığı ile dökülecek yere boşluk kalmadan yerleşebilen, bu aşamada terleme ve ayrışma gibi kusurlara imkân vermeyen betonlardır (Okamura:1997:8).

KYB, vibrasyona ihtiyaç duyulmadığı için gürültü kirliliğine izin verilmemesi, daha hızlı üretimin oluşturulmasıyla birlikte iri agrega

miktarının azaltılması, iri agrega dane çapının düşürülmesi ve süperakışkanlaştırıcı ilavesiyle birlikte akıcılık özelliğinin sağlanması, sık yapı çelikleri arasından geçerek dar kısımlarda çalışma özelliği ve belirlenen kalıp içerisinde boşluk olmadan beton üretimine imkân sağlamaktadır (Gaimster, 2003:9)

KYB tasarım yöntemi için, betonda kullanılacak agregada hesaplanan miktarlar belirlenmiş ve agreganın boşluk kısımlarını dolduran çimentoların bağlayıcı nitelikleri ile betonun akıcılık niteliklerini araştırmışlardır (Nansu, 2001:10).

Yüksek miktarda uçucu kül ikame ederek KYB üretimi yapmışlardır. Hazırlanan bu beton yayılma testinde, taze harcın yayılma çapı 730 ile 800 mm, 50 cm mesafeye geliş zamanı ise 2 ile 4 sn arasında değişmektedir. Yayılma testinde bütün karışımların KYB özelliği gösterdiği gözlenmiştir. V-Hunisi testi sonunda elde edilen akma sürelerinde, KYB standartlarına göre karışım viskozitelerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Sertleşmiş KYB'lerle ilgili çalışmalarında beton basınç deney verilerine göre, 28 günlük basınç mukavemetleri 30 Mpa ile 46 MPa aralığında belirlenmiştir (Felekoğlu. 2003:12).

Felekoğlu ve arkadaşları 2004 yılında yaptıkları çalışma kapsamında; KYB'lerin mühendislik özelliklerine ait yapılan deneylerde, KYB beton karışım hesabında belirli bağlayıcı dozajında akışkanlaştırıcı katkı miktarı arttırılarak harcın karışım suyu azaltılınca, yayılma çapı limitler içinde kalırken viskozitenin arttığını tespit edilmiştir. Belirli bir bağlayıcı dozajı ile agrega gradasyonunda, su/toz miktarının değişmesiyle aynı zamanda akışkanlaştırıcı miktarının düşürülmesi, taze harcın geçiş yeteneğinde artış göstermiştir Felekoğlu, 2004:13).

KYB'nin yayılma özelliğini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında yayılma niteliği, geçiş yeteneği, su emme, yayılma hızı vb. ile beton mukavemet niteliklerinin genel olarak belirlenmesidir (Wennenzhong, 2002:14).

KYB ve katkı-çimento uyumu konulu deneysel araştırmalarında, yayılma hızlarını belirlemek için farklı çimento çeşitleriyle deneyler üzerinde çalışmışlardır. Deneye tabi tutulan numunelerin bir günlük mukavemetlerinin çimentonun katkı türünden etkilendiği bazı çimento ve akışkanlaştırıcıların birlikte kullanılması halinde büyük oranda hava sürüklendiği, mukavemetleri etkilediğini tespit etmişlerdir (Sağlam: 2005:14).

Betonarme yapıların yapım aşamasında önemli bir yere özellik arz eden kalıp, kendisini taşıyabilecek duruma ulaşıncaya kadar betona des-

tek vermek, betona şekillendirmek, betonda arzu edilen yüzey şeklini almak gibi temel özellikler içermektedir (ACI-397, 2002:15) .

Kalıp, temel özelliklerinin yanında beton yüzeyinin performansını belirlenmesi oldukça önemlidir. Betonarme kalıpların yüzey malzemesi çeşidi, tasarım kusurları ve kalıp yağlarının hatalı uygulanmasından ötürü, kalıp uygulanan beton yüzeylerinde fiziksel, mühendislik özellikleri üzerinde etki yapan ve yüzey kusurlarının oluştuğu bilinmektedir (ACI-303, 2004:16).

Su/Çimento miktarının düşürülmesiyle betonun basınç dayanımında artış olacağı daha önce yapılan çalışmalarda bulunmuştur. Son zamanlarda belirli akışkanlaştırıcılar yardımıyla su/çimento oranının 0,20 kadar azaltılmıştır. Güncel araştırmalarda, çeşitli akışkanlaştırıcılar kullanılarak çimento hamuru içindeki boşluk miktarının %5'lere kadar azaltılması durumunda dayanımının 200 MPa kadar çıktığı belirlenmiştir ((Brouwers, 2005:5).

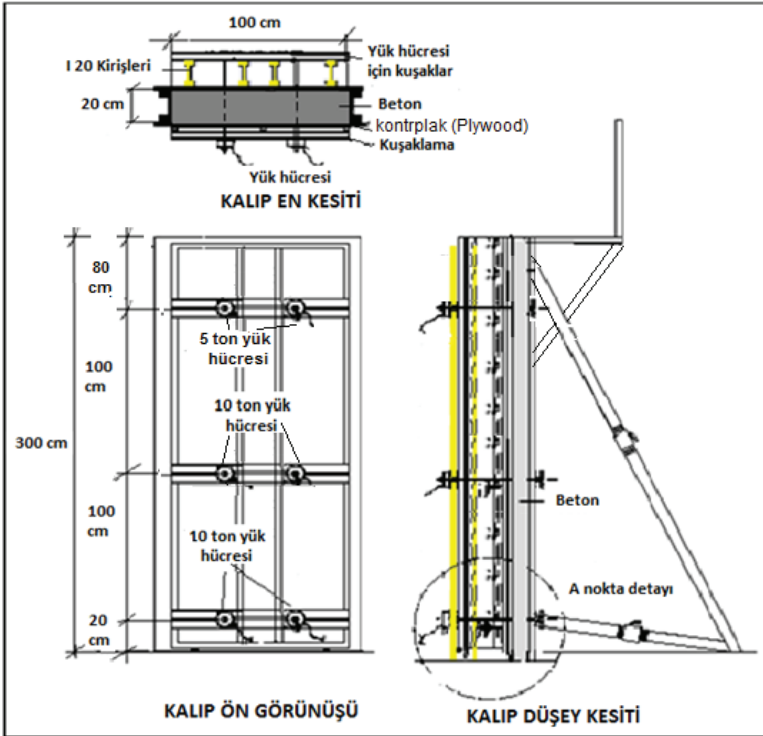
KYB'un normal betonlara göre avantajlarının belirlenebilmesi için bazı özelliklere ihtiyaç vardır: beton tasarımının doğru yapılması, agregaların özellikleri ve kg cinsinden ağırlıkları, kullanılan kimyasal katkı türleri önem arz etmektedir. Belirlenen üstünlükleri sayesinde son zamanlarda normal betonun yerini almaya başlamıştır.

Tablo 1. KYB için uygun test metotları tabloda verilmiştir [6]

Özellikler	Deney Adı	Birim	Gruplandırma	Referans değerler
Akıcılık/ Doldurma Yeteneği	Çökme Yayıma	mm	SF1	550-650
			SF2	660-750
			SF3	760-850
Viskozite/ Akıcılık	T ₅₀₀ süresi	sn	VS1	≤2
			VS2	>2
	V hunisi	sn	VF1	≤8
			VF2	9-25
Geçiş Özelliği	L kutusu	mm/mm	PA1	≥0.80
			PA2	≥0,80
	U kutusu	mm	-	-

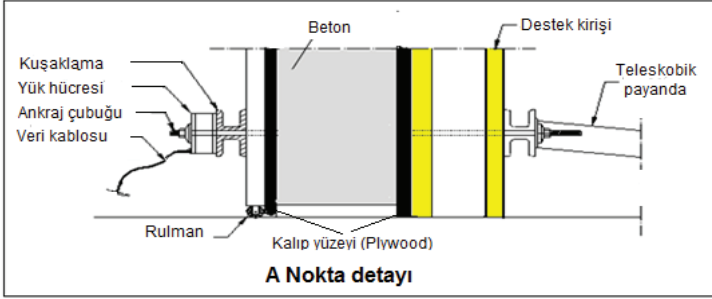
3. YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında laboratuvar şartlarında betonarme kalıbına etkiyen yanıl basıncın belirlenmesi için 1,00 m eninde, 3,00 m yükseklik ve 0,20 m ebadında beton dökümü için üç tane ahşap betonarme kalıp yapılmıştır. Kalıp yüzeylerinden bir tarafı kalıp aparatları ile sabitlenerek, diğer tarafın alt bölümüne rulmanlar konulmuştur. Kalıp üzerinde meydana gelen yanıl basınçların ölçmek için, 5 ve 10 ton kapasiteli yeni kalibrasyonları yapılmış yük ölçerler konulmuştur. Yük ölçerler bağlantı elemanlarına bağlanarak kalıp üzerinde yerden 0,20 m yukarıda 2 tane 10 ton kapasiteli yük ölçerler, 1,20 m yukarıda 2 adet 10 ton kapasiteli yük ölçerler ve yerden 2,20 yukarıda 2 adet 5 ton kapasiteli yük ölçerler konulmuştur. Beton döküm hızına bağlı olarak kalıpta farklı yüksekliklerde oluşan yanıl basınçlar ölçülmüştür. Beton döküm hızı 1.5 m/h, 2 m/h ve 4 m/h olarak üç farklı döküm hızı üzerinde çalışma yapılmıştır. Bu deneysel çalışmada kalıplar üzerinde üç farklı yüksekliklerde yanıl basınç değerleri yük ölçerler yardımıyla tespit edilmiştir. Kalıp deney düzeneği Şekil.1'de verilmiştir.



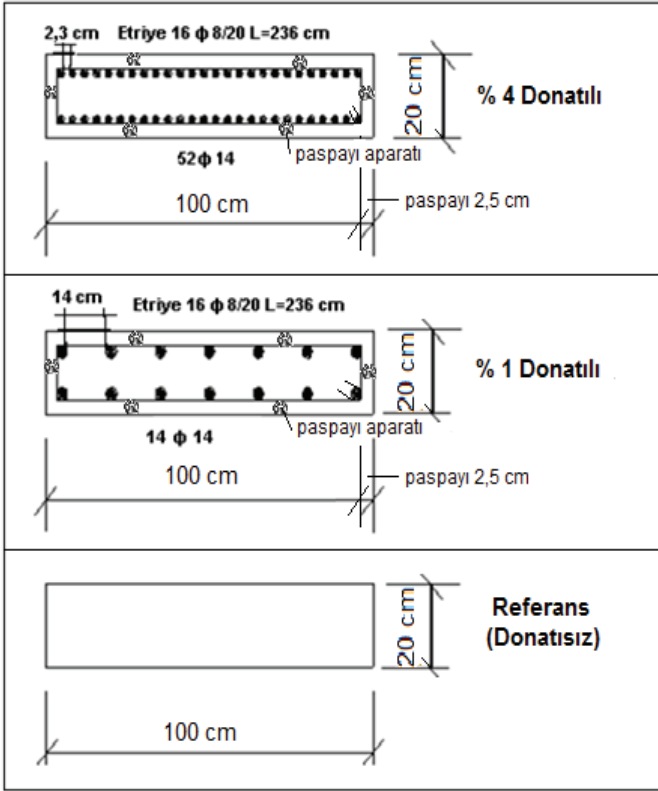
Şekil 1. Kendiliğinden Yerleşen beton dökümleri için deney düzeneği

Kalıp üzerinde oluşan basınçların ölçümünde yük hücreleri kullanılmıştır. Kalıbın yük hücresinin olduğu kısım hareketli olarak hazırlanmıştır. Bu kısımlara 2 adet rulman konulmuştur. Belirtilen bölümün hareketli yapılmasındaki hedef; kalıp yüzeyinde oluşan yanıl basıncın ankraj elemanı vasıtasıyla yük ölçerlere aktarılmasıdır. Kalıpta oluşan yanıl basınçlarının belirlenmesi için hazırlanan deney düzenekleri Şekil 2.'de verilmiştir.



Şekil 2. Kendiliğinden Yerleşen betonun dökümü için yük hücresi bağlantı detayı

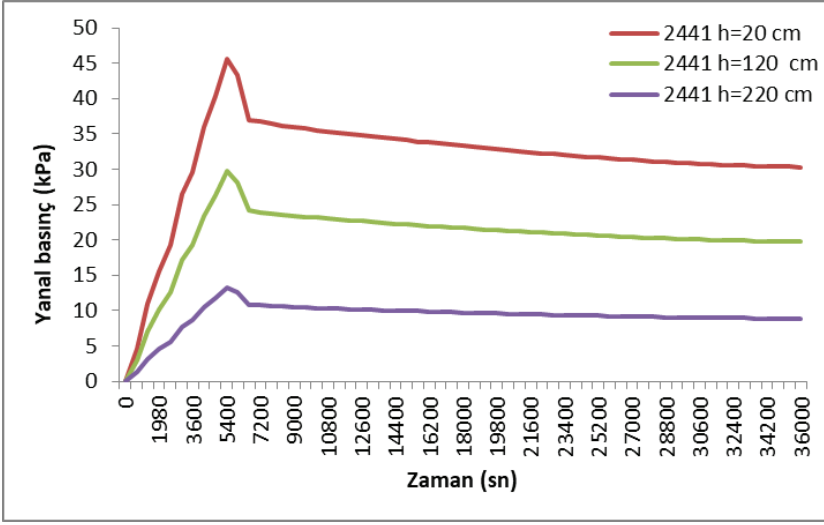
Yapılan deneysel çalışmada, beton içerisine yapı çeliği olarak beton kesit alanının minimum %1'i ve maksimum %4'ü oranında olacak şekilde TSE 708'e uygun nervürlü inşaat çeliği kullanılmıştır. Hazırlanan donatıların oranları ve donatı planları Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Kendiliğinden Yerleşen beton dökümlerinde konulan donatı detayı

Kendiliğinden yerleşen betonun, beton döküm hızı 4 m/h kalıpta yerden 0,20 m yukarıda, 1,20 m yukarıda, 2,20 m yukarıya montajı yapılan yük ölçerler vasıtasıyla yanal basınçlar ölçülmüştür.

Kendiliğinden yerleşen betonun, kalıp içine döküm hızı 4 m/h kalıpta yerden 0,20 m, 1,20 m, 2,20 m yüksekliklere monte edilen yük ölçerler vasıtasıyla yanal basınçlar belirlenmiş, 0,1 sn aralıklarla yanal basınç değerleri bilgisayar programı yardımıyla ölçülerek kayıt altına alınmış olup sonuçlar Şekil 2.'de gösterilmiştir.



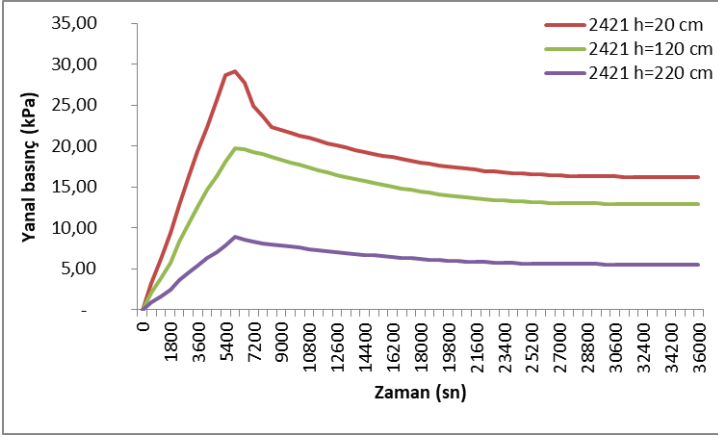
Şekil 4. Beton döküm hızı 4 m/h olan ve farklı yüksekliklerde oluşan kalıp yanıl basınç-zaman grafiği

Kendiliğinden yerleşen betonların, beton döküm hızı 4 m/h

Kalıpta yerden itibaren $h=0,20$ m yükseklikte ölçülen yanıl basınç 45,60 kPa.

Kalıpta yerden itibaren $h=1,20$ m yükseklikte ölçülen yanıl basınç 29,69 kPa.

Kalıpta yerden itibaren $h=2,20$ m yükseklikte ölçülen yanıl basınç 13,31 kPa değerleri bulunmuştur.



Şekil 5. Beton döküm hızı 2 m/h olan ve farklı yüksekliklerde oluşan kalıp yanıl basınç-zaman grafiği

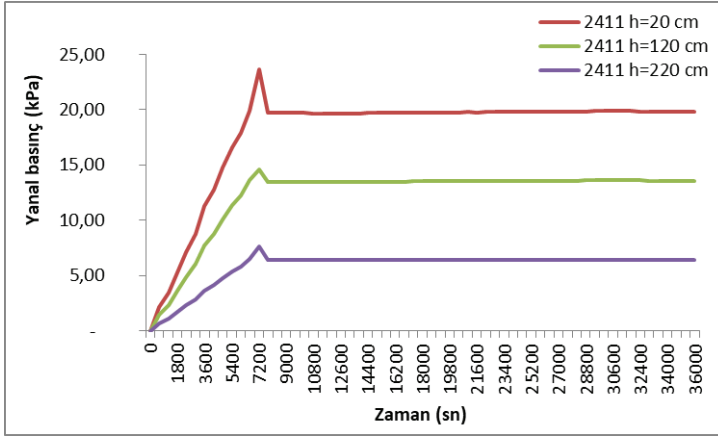
Kendiliğinde yerleşen betonların, beton döküm hızı 2 m/h ve beton içinde boyuna donatı oranı %1 olarak hazırlanmış kalıpta;

Kalıpta yerden itibaren h=0,20 m yükseklikte ölçülen yanıl basınç 29,19 kPa.

Kalıpta yerden itibaren h=1,20 m yükseklikte ölçülen yanıl basınç 19,76 kPa.

Kalıpta yerden itibaren h=2,20 m yükseklikte ki yanıl basınç 8,92 kPa olarak bulunmuştur.

Kendiliğinden yerleşen betonların, beton döküm hızı 1,5 m/h ve beton içinde boyuna donatı oranı %1 olan kalıpta yerden 0,20 m, 1,20 m, 2,20 m yüksekliklere montajı yapılan yük ölçerler vasıtasıyla yanıl basınçlar ölçülmüş ve süreli olarak yanıl basınç verileri Şekil 4.'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Beton döküm hızı 1,5 m/h olan ve farklı yüksekliklerde oluşan kalıp yanal basınç-zaman grafiği

Kendiliğinden yerleşen betonların, beton döküm hızı 1,5 m/h ve beton içindeki boyuna donatı oranı %1 olarak hazırlanmış kalıpta;

Kalıpta yerden itibaren $h=0,20$ m yükseklikte yanal basınç 23,61 kPa.

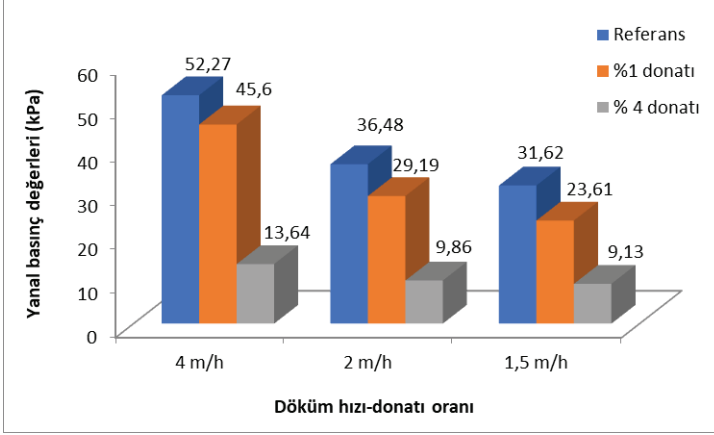
Kalıpta yerden itibaren $h=1,20$ m yükseklikte yanal basınç 14,63 kPa

Kalıpta yerden itibaren $h=2,20$ m yükseklikte bulunan yanal basınç 7,65 kPa ölçülmüştür.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kendiliğinden yerleşen betonun 0,20 m yükseklikte beton yanal basıncı:

Kendiliğinden yerleşen betonların kalıpta yerden 0,20 m yükseklikte bulunan yanal basınç verileri Şekil.5'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Kendiliğinden yerleşen betonların kalıpta $h=0,20$ m yükseklikte yanal basınç-döküm hızı grafiği

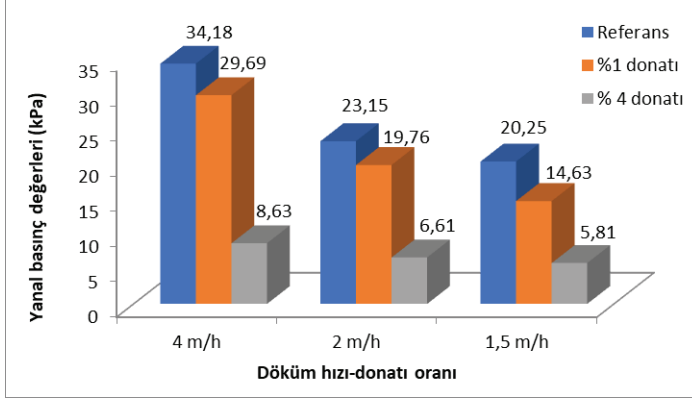
Kendiliğinden yerleşen betonda, 1,5 m/h döküm hızı ve kalıpta $h=0,20$ m yükseklikteki referans numunede yanal basınç 31,62 kPa, %1 donatıda yanal basınç 23,61 kPa ve %4 donatıda ise yanal basınç 9,13 kPa belirlenmiştir.

- Kendiliğinden yerleşen betonda, 2 m/h döküm hızı ve kalıpta yerden $h=0,2$ m referans numunede yanal basınç 36,48 kPa, %1 donatılı kalıpta yanal basınç 29,19 kPa ve %4 donatılı kalıpta ise yanal basınç 9,86 kPa belirlenmiştir.

-Kendiliğinden yerleşen betonların, 4 m/h döküm hızı ve kalıpta yerden $h=0,2$ m yükseklikteki referans numunede yanal basınç 52,27 kPa, %1 donatılı kalıpta yanal basınç 45,60 kPa ve %4 donatılı kalıpta ise yanal basınç 13,64 kPa belirlenmiştir.

Kendiliğinden yerleşen betonun 1,20 m yükseklikte beton yanıl basıncı

Kendiliğinden yerleşen betonların kalıpta 1,20 m yükseklikte ölçülen yanıl basınç verileri Şekil 6.'de gösterilmiştir.



Şekil.8 Kendiliğinden yerleşen betonların kalıpta $h=1,20$ m yükseklikte yanıl basınç- döküm hızı grafiği

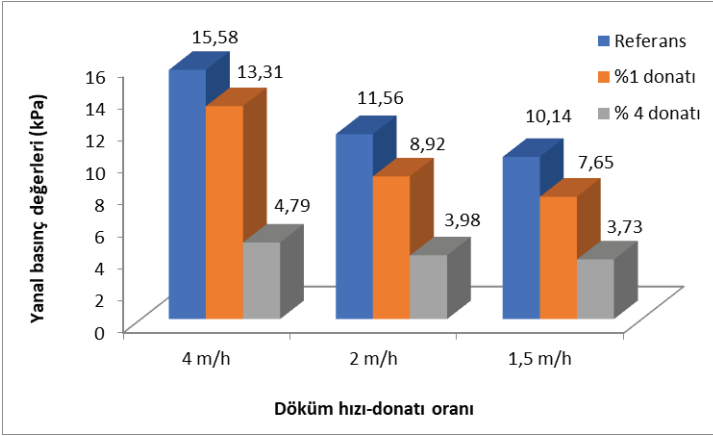
Kendiliğinden yerleşen betonda, 1,5 m/h döküm hızı ve kalıpta yerden $h=1,20$ m yükseklikteki referans numunede yanıl basınç 20,25 kPa, %1 donatıda yanıl basınç 14,63 kPa %4 donatıda ise yanıl basınç 5,81 kPa belirlenmiştir.

Kendiliğinden yerleşen betonda, 2 m/h döküm hızı ve kalıpta yerden $h=1,20$ m yükseklikteki referans numunede yanıl basınç 23,15 kPa, %1 donatıda yanıl basınç 19,76 kPa ve %4 donatıda ise yanıl basınç 6,61 kPa belirlenmiştir.

Kendiliğinden yerleşen betonların, 4 m/h döküm hızı ve kalıpta yerden $h=1,20$ m yükseklikteki referans numunede yanıl basınç 34,18 kPa, %1 donatıda yanıl basınç 29,69 kPa ve %4 donatıda ise yanıl basınç 8,63 kPa belirlenmiştir.

Kendiliğinden yerleşen beton kalıbında 2,20 m yükseklikte ölçülen yanıl basıncı

Kendiliğinden yerleşen beton kalıbında 2,20 m yükseklikte ölçülen yanıl basınç verileri Şekil 7.'de gösterilmiştir.



Şekil.9 Kendiliğinden yerleşen betonun kalıpta $h=2,20$ m yükseklikte yanıl basınç- döküm hızı grafiği

Kendiliğinden yerleşen betonda, 1,5 m/h döküm hızı ve kalıpta $h=2,20$ m yükseklikteki referans numunede yanıl basınç 10,14 kPa, %1 donatılı kalıpta yanıl basınç 7,65 kPa ve %4 donatılı kalıpta ise yanıl basınç 3,73 kPa belirlenmiştir.

Kendiliğinden yerleşen betonların, 2 m/h döküm hızı ve kalıpta $h=2,20$ m yükseklikteki referans numunede yanıl basınç 11,56 kPa, %1 donatılı kalıpta yanıl basınç 8,92 kPa ve %4 donatılı kalıpta ise yanıl basınç 3,98 kPa belirlenmiştir.

Kendiliğinden yerleşen betonların, 4 m/h döküm hızı ve kalıpta $h=2,20$ m yükseklikteki referans numunede yanıl basınç 15,58 kPa, %1 donatılı kalıpta yanıl basınç 13,31 kPa ve %4 donatılı kalıpta ise yanıl basınç 4,79 kPa belirlenmiştir.

Betonarme yapılarda 6 m/h daha yüksek hızlarda beton dökümü yapılarak kalıp yanıl basıncı üzerinde etkileri araştırılabilir. Ayrıca beton içinde boyuna donatı oranları %2 ve %3 alınarak kalıp yanıl basıncı üzerine etkileri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- ŞİMŞEK, O. (2009). *Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayınevi, Ankara.*
- OKAMURA, H. (2009). *Self-Compacting Concrete, Concrete Technology..*
- Gaimster, R., and Dixon, N.,(2003). *Self- Compacting Concrete, in Advanced Concrete Technology.*
- HURD, M.K. (1989). *Formwork For Concrete, Fifth Edition, Spn;4, p 11-17, ACI, November heoretical Soil Mechanics. Wiley.*
- BROUWERS, ,H.J.H.İ. RADIX, H.J. (2005). *Self Compacting Concrete, Teorical and experimental of selflevelling concrete,Cement and Conrete Research,35.2116.*
- AMBROISE, J. ROLS, S., PERA, J. (1999). Effects of different viscosity agents on the propoities of self-levelling concrete, *Cement and Concrete Research, 29, 2, 261-266..*
- SHIMOYAMA, Y., TANIMURA, M., YAHIA, A. (2005). Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio, *Cement and Concrete Research, 35, 2, 532-539.*
- OKAMURA., H. (1997). *Self-Compacting Concrete, Concrete Technology..*
- DIXON, N., GAIMSTER, R. (2003). *Self- Compacting Concrete, in Advanced Concrete Technology.*
- CHAI, H.W.,KUNG, C.H., (2001). A simple mix design method for selfcompacting concrete, *www.sciencedirect.com, Cement and Concrete Research, 31, 1799-1807..*
- ŞAHMARAN. M., Tokyay, M., YAMAN. İ.Ö.,(2004). Yeni Nesil Yüksek Akışkanlaştırıcı Katkı Maddeleri ile Yüksek Hacimde Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Yerleşen Beton , *Beton 2004 Kongre Bildiri, İstanbul..*
- BARADAN. B., FELEKOĞLU, B. (2003). Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Malzemesi ABD, 267s, İzmir.*
- BARTOS, J.M., PETER, Z. (2003). Permeation properties of Self-Compacting Concrete, *www.scincdirect.com, Cement and Concrete Research pp 33, 921-926.*
- DOĞAN. A.Ü., PARLAK. N., SAĞLAM. R,A. (2005). Kendiliğinden Yerleşen Betonda Çimento Katkı Uyumu, *6.Ulusal Beton Kongresi, İTÜ, İstanbul, 213-214.*
- ACI Committee 397 2R-02. (2002). Identification and control of consolidation related surface defects in formed concrete”, *American Concrete Institute, Detroit, 5-8.*
- ACI Committee 303 R-04, (2004). Guide to cast-in-place arcitctural concrete practice, *American Concrete Institute, Detroit, 1-21.*