

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JET GROUT KOLONLARI İÇİNDE TEŞKİL EDİLEN
FORE KAZIKLARIN ÇALIŞMA PRENSİBİNİN İRDELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ufuk KARAASLANER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

TEMMUZ 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JET GROUT KOLONLARI İÇİNDE TEŞKİL EDİLEN
FORE KAZIKLARIN ÇALIŞMA PRENSİBİNİN İRDELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ufuk KARAASLANER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sedat SERT

TEMMUZ 2025

Ufuk KARAASLANER tarafından hazırlanan “Jet Grout Kolonları İçinde Teşkil Edilen Fore Kazıkların Çalışma Prensibinin İrdelenmesi” adlı tez çalışması 07.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Sedat SERT (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Dr. Öğr. Üyesi Kurban ÖNTÜRK Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “JET GROUT KOLONLARI İÇİNDE TEŞKİL EDİLEN FORE KAZIKLARIN ÇALIŞMA PRENSİBİNİN İRDELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(07/07/2025)

Ufuk KARAASLANER





Eşime ve çocuklarıma ...



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi, birikim ve rehberliğiyle yolumu aydınlatan, akademik gelişimime büyük katkı sağlayan değerli danışmanım Prof. Dr. Sedat SERT'e en derin teşekkürlerimi sunarım. Hocam yalnızca akademik anlamda değil, aynı zamanda insani yönüyle de örnek aldığım bir isim olmuştur. Her zaman ulaşılabilir, sıcak kanlı ve anlayışlı bir yaklaşım sergileyen, sorularımın cevabını daima sabırla ve içtenlikle paylaşan Hocam; yeri geldiğinde bir “abi” şefkatiyle destek olmuş, bu sürecin en önemli rehberi olmuştur. Eğitim hayatımın ötesinde, hayatımda da değerli bir insan olarak yerini daima koruyacaktır.

Yüksek lisans sürecine başlamamda en büyük paya sahip olan, içimdeki heyecanı görüp beni cesaretlendirerek bu yola yönlendiren Dr. İnş. Yük. Müh. Elif YILMAZ'a gönülden teşekkür ederim. Kendisi, sürecin her aşamasında desteğini hissettirmiş, yeri geldiğinde motive etmiş, yeri geldiğinde azımlendirmiş, sahip olduğu tecrübeleri hiçbir zaman saklamadan, doğru ve samimi bir şekilde benimle paylaşarak meslek hayatımda başarıya ulaşmamda etkin bir rol oynamıştır.

Bu süreç boyunca her türlü fedakarlığı gösteren, anlayışı, sevgisi ve desteğiyle bana güç veren eşim Damla KARAASLANER'e en derin teşekkürlerimi sunarım. Aileme vakit ayırmam gereken anlarda dahi tezime ve derslerime zaman ayırmama anlayışla yaklaşmış, yorulduğum noktalarda ise beni destekleyerek yeniden ayağa kalkmamı sağlamıştır. Onun sabrı ve sevgisi bu sürecin en büyük dayanağı olmuştur. Ayrıca sabırları, sevgileri ve varlıklarıyla hayatıma neşe ve anlam katan sevgili çocuklarım Ertuğrul ve Cihangir KARAASLANER'e de sonsuz teşekkür ederim.

Akademik ve mesleki yolculuğumda her zaman yanımda olan, çalışma ortamı ve desteğiyle bu süreci mümkün kılan, 11 yıldır mensubu olmaktan onur duyduğum Hayat Holding ailesine içten şükranlarımı sunarım.

En önemlisi, beni yetiştirip her zaman yanımda olan, sevgileriyle bana yol gösteren canım anne ve babama teşekkür ederim.

Ufuk KARAASLANER

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	v
TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER.....	xi
KISALTMALAR.....	xiii
SİMGELER.....	xv
TABLO LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Hipotez.....	5
2. ZEMİN İYİLEŞTİRME	7
2.1. Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	8
2.2. Zemin İyileştirilmesinde Uygun Metodun Seçimi	9
2.3. Jet Grout Kolonları ile Zemin İyileştirme Metodu.....	9
2.3.1. Yöntemin tarihsel gelişimi	10
2.3.2. Jet grout imalatı	11
2.3.2.1. İmalat ekipmanları	11
2.3.2.2. İmalat aşamaları.....	11
2.3.3. Yöntemin avantaj ve dezavantajları	12
2.3.3.1. Jet grout yönteminin avantajları	13
2.3.3.2. Jet grout yönteminin dezavantajları.....	13
2.3.4. Jet grout yöntemi tasarım kriterleri	14
2.3.4.1. Taşıma kapasitesi.....	14
2.3.4.2. Oturma analizi	14
2.4. Kompozit Zemin.....	15
2.4.1. Kompozit zeminin özellikleri.....	15
2.4.2. Kompozit zeminin hesap parametrelerinin hesaplanması	16
3. DELME KAZIKLAR	19
3.1. Tasarıma Göre Kazık Çeşitleri.....	19
3.1.1. Uç kazıklar	19
3.1.2. Sürtünme kazığı.....	19
3.2. Kazık Yöntemi Seçim Kriteri	19
3.3. Fore Kazık İmalat Aşamaları	19
3.3.1. Taşıma kapasitesi	20
3.3.1.1. Reese ve O'Neill (1988) yöntemi.....	20
3.3.1.2. Kulhawy ve Phoon (1993) yöntemi.....	21
3.3.2. Kazık grup taşıma kapasitesi.....	23
3.3.3. Kazık grubunun konsolidasyon oturması	23
3.4. Kazık Yükleme Deneyleri.....	23

3.4.1. Statik kazık yükleme deneyi.....	23
3.4.2. Kazık göçme yükü hesap kriteri	24
4. DELME (FORE) KAZIK İMALATINDA YAŞANAN ZORLUKLAR.....	27
4.1. Kuyu Stabilitesinin Sağlanması	29
4.1.1. Bentonit kullanımı.....	29
4.1.2. Polimer kullanımı.....	31
4.1.3. Muhafaza borusu kullanımı	33
5. JET GROUT İÇERİSİNDE TEŞKİL EDİLEN FORE KAZIKLARIN PERFORMANSLARININ İRDELENMESİ.....	39
5.1. Proje ve Proje Sahası Hakkında Bilgiler	39
5.2. Zemin Araştırmaları ve Zemin Özellikleri	41
5.2.1. Arazi çalışmaları	41
5.2.2. Kazık kapasitesinin hesabı.....	46
5.2.3. Kazık yükleme deneylerinin yorumlanması	49
5.2.4. Jeofizik ölçümler ile iyileştirmenin değerlendirilmesi	56
6. SONUÇ.....	59
KAYNAKÇA	61
ÖZGEÇMİŞ.....	67

KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
BKS	: Bina Önem Sınıfı
CPT	: Cone Penetration Test (Koni Penetrasyon Testi)
c_u	: Drenajsız Kayma Mukavemeti
$c_{u,doğal}$	: Doğal Zeminin c_u Değeri
$c_{u,jet}$	: Jet Grout Kolon İçindeki c_u Değeri
$c_{u,kompozit}$	: Kompozit Zemin c_u Değeri
D	: Kazık Çapı
DTS	: Deprem Tasarım Sınıfı
E	: Elastisite Modülü
JG	: Jet Grout (Jet Enjeksiyon)
L	: Kazık Boyu
OCR	: Overconsolidation Ratio (Aşırı Konsolidasyon Oranı)
PLT	: Pile Load Test (Kazık Yükleme Deneyi)
Q	: Taşıma Gücü
R	: Jet Grout Kolonlarının Zemin İçindeki Alan Oranı
SPT	: Standard Penetration Test (Standart Penetrasyon Testi)
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)
V_s	: Shear Wave Velocity (Kayma Dalgası Hızı)
ZF	: Yerel Zemin Sınıfı ZF (TBDY'ye Göre)



SİMGELER

ρ	: Yoğunluk [g/cm ³]
D	: Çap [m]
m	: Kütle
t	: Zaman [Birim]
γ	: Zemin Birim Hacim Ağırlığı [kN/m ³]
ϕ	: İçsel Sürtünme Açısı
σ	: Efektif Gerilme [kPa]



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1. Fore Kazık Uygulamalarında Zemin Tipine Bağlı Bentonit Kullanım Değerlendirmesi (Kraszewski, 2020; Abraham, 2021).	31
Tablo 4.2. Fore Kazık Uygulamalarında Polimer Destek Sıvısının Kullanımı	32
Tablo 4.3. Fore Kazıkta Muhafaza Borusu Kullanım Uygunluğu.....	34
Tablo 5.1. Site-1 ve Site-2'deki siloların özellikleri	41
Tablo 5.2. İnceleme alanında yapılan zemin çalışmaları.	41
Tablo 5.3. MASW ölçüm değerleri.....	44
Tablo 5.4. Sitelerde seçilmiş silo ve saha araştırmaları.	44
Tablo 5.5. Site-1 idealize zemin profili ve zemin özellikleri.	44
Tablo 5.6. Site-2 idealize zemin profili ve zemin özellikleri.	45
Tablo 5.7. Jet grout kolonları için tipik drenajsız kayma direnci aralıkları.	48
Tablo 5.8. Kazık Yükleme Deneyi Veri Tablosu (PLT-TK-54).....	50
Tablo 5.9. Kazık yükleme deneyi veri tablosu (PLT-TK-85).	52
Tablo 5.10. İyileştirme öncesi ve sonrası kayma dalgası hızları	56
Tablo 5.11. İyileştirmenin kontrolü.	58



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 4.1. Fore kazık imalatının şematik gösterimi.	28
Şekil 4.2. Fore kazık imalatı ile ilgili örnek şantiye fotoğrafları.	28
Şekil 4.3. Kuyu stabilitesi sağlanmış ve sağlanamamış foraj çukuru kesiti.	29
Şekil 4.4. Muhafaza borusu ile birlikte kuyu dışına çıkan kazık.	35
Şekil 4.5. Muhafaza borusuna takılıp sıyrılan fret donatısı.	35
Şekil 4.6. Vibrasyon yöntemi ile muhafaza borusu çakılması / çekilmesi.	36
Şekil 5.1. AFAD Türkiye diri fay haritası (Bursa NK35-12).	39
Şekil 5.2. Silo temelleri altında kazık ve jet grout kolonlarının plan görüntüsü.	40
Şekil 5.3. Arazi deneyleri vaziyet planı.	42
Şekil 5.4. SPT deneylerine ait derinliğe bağlı SPT N_{30} grafiği.	43
Şekil 5.5. Kazık yükleme deneyi sonuçları (PLT-TK-54).	51
Şekil 5.6. Kazık yükleme deneyi sonuçları (PLT-TK-85).	53
Şekil 5.7. Mazurkiewicz yöntemiyle kazık yükleme deneyi göçme yükü tahmini (PLT-TK-85).	55
Şekil 5.8. Kazık yükleme deneyi sonuçları (PLT-TK-54 ve 85).	56



JET GROUT KOLONLARI İÇİNDE TEŞKİL EDİLEN FORE KAZIKLARIN ÇALIŞMA PRENSİBİNİN İRDELENMESİ

ÖZET

Yumuşak, gevşek ve yer altı su seviyesinin yüksek olduğu zemin koşullarında yapıların zemine güvenle taşınması ve uygulanan projenin ekonomik boyutunu da düşünerek imalatın yapılması İnşaat Mühendisliğinin başlıca görevidir. Bu tür zeminlerde ağır ve nitelikli yapıların yapılması ciddi geoteknik problemlerin çözülmesi gerekebilmektedir. Maliyet açısından ilk olarak zemin ıslah yöntemleri ile yumuşak/gevşek zemin katı/sıkı forma getirilmek istenir. Zemin ıslah yöntemi ile iyileştirilen zeminde iki hedef gözetilir. Bunlardan birincisi oturma kriterini, ikincisi ise taşıma gücü kriterini sağlamaktır. Ağır ve nitelikli yapıların zemininde kullanılan ıslahı yöntemleri taşıma gücü kriterin sağlamakta ancak çoğu durumda oturma kriterini tek başına sağlayamamaktadır. Çözüm olarak maliyet açısından daha yüksek olan derin temel sistemlerinin yapı altında kullanılması önerilebilmektedir.

Tez çalışmasına konu olan iki site olarak inşa edilen bir silo inşaat sahasının zeminleri çok yumuşak alüvyonal zeminlerden oluşmaktadır. Üst yapı yükleri yüzeysel temel taşıma gücünü çok fazla aştığından yapı fore kazıklı derin temel üzerine üzerine inşa edilmiştir. Çok yumuşak zeminden dolayı Site-1’ de fore kazık imalatı sırasında birtakım zorluklarla karşılaşmıştır. Karşılaşılan zorluklar neticesinde Site-2’ de her fore kazığın çevresine 80 cm çapında ve 16 metre boyunda 4’ er adet jet grout kolonları imal edilmiş ve çimento hamurunun prizini alması sonrasında fore kazıkların imalatı gerçekleştirilmiştir. Her iki sitede imal edilen fore kazıklara yükleme deneyi yapılmış ve taşıma gücü performansları değerlendirilmiştir. Tez çalışmasında çok yumuşak zeminlerde zemin iyileştirilmesi yapılmadan önceki ve sonraki fore kazık imalatları, imalat aşamasındaki yaşanan zorluklar, zorluklara yönelik çözümler anlatılmakta ve kazıkların taşıma gücü performanslarını karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir. Aynı zamanda jet grout kolonları ile iyileştirilmiş kısmi kompozit zemine imal edilen fore kazıkların daha hızlı ve daha ekonomik olduğu saha gözlemleriyle detaylıca anlatılmaktadır. Büyük ölçekli bütçeler ile inşa edilen bu tür sanayi yapılarının, akademik bakış açısıyla jeolojik, jeofizik ve geoteknik olarak değerlendirilmesi sonrasında literatüre büyük ölçüde katkı sağlanması hedeflenmektedir.

Ayrıca, bu çalışmada iyileştirilmiş zemin-kazık etkileşimini daha derinlemesine değerlendirebilmek adına, jet grout uygulaması sonrası oluşan kompozit zemin davranışı da dikkate alınmıştır. Kompozit zemin yaklaşımı ile jet grout kolonları ve doğal zeminin birlikte çalıştığı sistemde, drenajsız kayma mukavemeti (c_u) tahmini için ağırlıklı ortalama formülasyon kullanılmıştır. Buna ek olarak, jet grout sonrası kayma dalgası hızı (V_s) artışı üzerinden c_u - V_s ilişkisine dayalı ampirik değerlendirmeler yapılmış, bu sayede zemin iyileştirmesinin etkinliği jeofizik parametrelerle de desteklenmiştir. Her iki yaklaşımın sonuçları, hem teorik hem de deneysel olarak karşılaştırılmış ve literatürde yer bulan modellerle sahadaki veriler uyumlu şekilde yorumlanmıştır. Bu mühendislik yaklaşımı, tez kapsamında ayrıntılı olarak ele alınmıştır.



INVESTIGATION OF THE WORKING PRINCIPLE OF BORED PILES CONSTRUCTED WITHIN JET GROUT COLUMNS

SUMMARY

In soft, loose soils with a high groundwater table, safely transferring structural loads to the ground while maintaining economic feasibility in construction represents a fundamental challenge in geotechnical engineering. The construction of heavy and high-quality structures on such soils requires addressing complex geotechnical problems, which become even more critical in seismically active regions. In engineering practice, soil improvement techniques are primarily employed to enhance inadequate ground conditions while considering cost-effectiveness. The main objective of these methods is to control settlement behavior and ensure bearing capacity by densifying and stiffening the soil mass. However, in practice, soil improvement techniques-though generally sufficient in terms of bearing capacity-may not always satisfy settlement criteria alone. Consequently, for heavy and critical structures, deep foundation systems, particularly bored piles, are often preferred as safer but more costly alternatives.

Population growth, technological advances, and industrial land demands have led to a reduction in building footprint areas and an increase in structure heights. This trend increases both the load per unit area and the stresses beneath foundations.

This study was conducted at a silo construction site in the Körfez district of Kocaeli Province, Turkey, characterized by very soft alluvial soils with a high groundwater table. Since shallow foundation systems could not meet the design loads, bored piles were implemented as the deep foundation solution. The site was divided into two sections, Site-1 and Site-2, both exhibiting similar soil conditions and construction challenges.

At Site-1, located in the Yeniköy plain, bored piles with a diameter of 80 cm and a length of 24 m were directly constructed. Pile capacity and length were designed considering both static and seismic loads in accordance with the Turkish Earthquake Code of 2007. During pile construction, maintaining borehole stability was challenging due to weak soil profiles and the high groundwater table, which directly affected project cost and schedule.

At Site-2, silo diameters were reduced and heights increased to achieve greater storage volume with a smaller foundation system, improving area efficiency. Due to increased sub-foundation stresses, seismic moments and uplift forces necessitated longer piles than normal. Since Site-2 was designed in 2021, the 2018 Turkish Building Earthquake Code was applied. Pile design calculations indicated diameters of 100 cm and lengths exceeding 50 m. One key reason for such long piles was the very soft clay layer within the upper 16 m of soil, where the undrained shear strength (c_u) was approximately 15 kPa, providing insufficient shaft friction.

To improve the mechanical properties of this upper 16 m of soil, jet grouting was implemented. The design included four jet grout columns, each 80 cm in diameter and

16 m in depth, around every bored pile. The jet grout columns were constructed by injecting cement slurry into the soil under 300-400 bar pressure with a water-cement ratio of 1:2. After setting, bored piles were installed within the improved soil mass. This enhancement reduced the previously predicted pile lengths of over 50 m to a maximum of 42 m, achieving significant time and cost savings.

Both sites contained bored piles of varying diameters and lengths. In this study, one representative pile from each site was analyzed: at Site-1, an 80 cm diameter, 24 m long pile with a vertical load capacity of 95 tons, and at Site-2, a 100 cm diameter, 31 m long pile with a vertical load capacity of 182 tons.

Static pile load tests, conducted in accordance with ASTM D1143 (2020), revealed that at Site-1, the pile designed for 95 tons could carry up to 142.5 tons, resulting in a total settlement of 8.83 mm, comprising 5.17 mm residual and 3.66 mm elastic settlement. At Site-2, the pile was loaded to 350 tons (1.92 times the service load), exhibiting only 2.35 mm total settlement, including 1.50 mm residual and 0.85 mm elastic settlement.

These findings confirm, in line with previous studies, that borehole stability significantly influences bored pile performance. Lam et al. (2015) compared bentonite and polymer drilling fluids, concluding that polymer-based piles performed nearly twice as well due to improved borehole stability. Zhou et al. (2021) highlighted the impact of excavation and injection methods on pile capacity, while Hongbo et al. (2007) demonstrated the influence of construction methods on shaft friction and overall pile performance.

In this study, the behavior of jet grout-improved soils was evaluated through experimental observations as well as theoretical and empirical approaches. The composite soil concept was adopted, assuming that the ground comprises both natural soil and jet grout columns. Predicting the degree of improvement and corresponding changes in soil parameters before jet grouting remains challenging.

Each composite soil system may exhibit different characteristics depending on soil type, improvement method, cement/water ratio, groundwater table, and saturation level. Considering these variables, predicting pile capacity a priori is complex. To address this, a method from the literature was applied: the area ratio (R) of jet grout columns within the soil volume was determined, and the undrained shear strengths of the components ($c_{u,jet}$ and $c_{u,natural}$) were weighted accordingly to compute the composite undrained shear strength ($c_{u,composite}$) of the improved soil. This approach allowed realistic modeling of pile-soil interaction and quantified the effect of soil improvement.

For example, in-situ tests indicated $c_{u,natural} = 15$ kPa for the first 16 m. Using the composite soil approach, $c_{u,composite}$ was calculated as 134.46 kPa. Applying this value in pile capacity calculations allowed achieving 182 tons with a pile length of 31 m instead of 40 m—a 9 m reduction per pile. Considering 55 bored piles per raft foundation, the total pile length reduction amounted to 495 m for a single silo, corresponding to approximately 22.5% savings in time and cost.

Furthermore, geophysical measurements before and after jet grouting revealed substantial increases in shear wave velocity (V_{s30}), from 213 m/s to 343 m/s. Using the empirical V_s – c_u correlation (Mayne & Rix, 1995), these increases were numerically linked to improvements in undrained shear strength (c_u), providing an alternative method for estimating post-treatment soil strength. The coefficient R in this correlation

must be calibrated, and while c_u can be estimated from geophysical data, it should not be directly used for pile design. Instead, this relationship is useful for assessing soil improvement quality by comparing estimated c_u values with field and laboratory test results.

Results obtained from both the composite soil formulation and the V_s – c_u empirical relationship were consistent, reinforcing the reliability of the methodologies. This approach provides a valuable engineering tool, particularly when direct c_u measurements (such as CPT or PLT) are unavailable, enabling prediction of soil improvement effects.

In conclusion, this thesis provides a comparative evaluation of bored pile performance in both unimproved and jet grout-improved weak soils, quantitatively demonstrating the effects of improvement on borehole stability, pile performance, settlement, and pile length. Bored piles constructed within jet grout-improved composite soils offer a safe, economical, and practical alternative for heavy structures on geotechnically unfavorable soils.





1. GİRİŞ

İnsan nüfusunun çoğalması, teknolojinin ilerlemesi, sanayi alanları inşaatı için arazi ihtiyacının artması gibi sebepler, yatırımcıları yapıların taban alanlarını küçültüp yüksekliklerini arttırmaya yöneltmiştir (Shrivastava ve ark., 2016; Jahandari ve ark., 2019; Arslan ve ark., 2023). Bu yönelimle birlikte yük/alan oranı büyümekte, bir başka deyişle temel altı gerilmeler artmaktadır. Aynı zamanda yapı yüksekliğinin artması ile özellikle deprem anında yapıya etkiyen momentler ve buna bağlı diğer kuvvetler de büyümektedir. Bu sebeplerin ortaya çıkarttığı sonuçlar özellikle deprem kuşağında bulunan ülkemiz için ciddi risk oluşturmaktadır. Riskin ortadan kaldırılması için de ciddi geoteknik çözümlerin bulunması ve uygulanması gerekmektedir. Aynı zamanda bulunan bu çözümlerin de sahada uygulanabiliyor olması hatta zaman/maliyet çerçevesinde değerlendirilmesi gerekmektedir.

Geoteknik mühendisliğinin önemli problemlerinden biri zayıf ve gevşek zeminlerdeki fore kazıkların imalatı sırasında kuyu stabilitesini sağlamaktır (Wang ve ark., 2011; Marlow ve ark., 2013; Yin ve ark., 2015; Wu ve ark., 2020; Yang ve ark., 2022; Long ve ark., 2023). Kuyu stabilitesi basitçe foraj cidarının şekil formunun bozulmadan imalat süresi boyunca aynı kalması olarak tanımlanabilir. Kuyu stabilitesinin sağlanması daha çok şantiye sürecinde ve yerinde çözülmesi gereken bir problemdir. Yapılan saha çalışmalarında bu konuda mühendislerin tecrübe ve yetkinliklerini kullanmaları gereken durumlarla sıkça karşılaşılmaktadır. Sahada yaşanabilecek sorunlar zemin türlerine göre değişse de genel olarak iki ana zemin başlığı altında toplanabilir. Birinci başlık ince daneli yumuşak zeminler ve ikinci başlık iri daneli gevşek zeminler olarak ele alınabilir. Birincil soruna ithafen, kil ve silt gibi ince daneli yumuşak bir zeminde fore kazık imal edilirken genelde kuyu cidarında daralma ya da çökmeler meydana gelmesi örnek olarak verilebilir (Wang ve ark., 2011; Hashemi ve ark., 2014; Long ve ark., 2023). İkincil sorun ise temiz kum ve ince boyutlu çakılların gevşek dizilimde olmaları durumunda delgi (foraj) sırasında meydana gelen çökmelerdir (Haimson ve Kovacich, 2003; Zhang ve ark., 2009; Hashemi ve ark., 2014). Her iki durumun da bir sonucu olarak kuyu açılması sırasında auger'in her dalış-çıkış çevriminde istenen silindirik form elde edilemeyebilir. Bir diğer sonuç ise

kuyu daralması ya da göçmesi nedeni ile istenilen kuyu derinliklerine ulaşmak için gereğinden fazla foraj ve hafriyat yapılması ve beton maliyetinin artması olabilmektedir. Kuyu cidarının daralması sonucunda da eğer foraj kılıflı (muhafaza borulu) yapılıyorsa, imalat sonrasında kılıfın iş makinası tarafından geri çekilmesi oldukça güç, kimi zaman imkânsız hale gelebilmektedir. Bahsi geçen sorunlar genelde şantiye ortamında imalat aşamasında karşılaşılan, bu nedenle de literatürde yeterince araştırılmayan problemlerdir.

Geçmişten günümüze birçok araştırmacı kuyu stabilitesinin sağlanmasına yönelik çalışmalar yapmıştır (Liu ve ark., 2003; Toğrol ve Tan, 2009; Wang, 2011, Wang ve ark., 2011; Duan ve ark., 2012; Yin, 2015). Bilinen yöntemler; kuyuya su basmak, bentonit uygulamak, polimer uygulamak veya muhafaza borusu kullanmaktır. Su, bentonit ve polimer uygulamasının amacı kuyu cidarında zeminlerin uyguladığı basınca karşı basınç oluşturarak kuyunun cidar stabilitesini sağlamaya çalışmaktır (Ball ve ark., 2006; Lam ve ark., 2018; Ibrahim ve ark., 2020; Larisch, 2022; Haider ve ark., 2024). Özellikle yukarıda bahsedilen yumuşak veya gevşek zeminlerde kuyu içerisine sıvı basılması ile cidar stabilitesi sağlanamadıysa muhafaza borusunun sürülmesi kaçınılmazdır. Muhafaza borusu vibrasyonla ya da hidrolik ekipmanlarda zemine sürülebilir veya çekilebilir (Yin, 2015; Dong ve ark., 2018). Eğer imalat noktasına yakın diğer önemli yapılar var ise vibrasyon ile muhafaza borusunu çakmak veya çekmek riskli olabilir. Muhafaza borusu genellikle 10 m ile 20 m arasında bir uzunlukta kullanılır. Daha uzun metrajlardaki boruyu zemin özelliklerine bağlı olarak sürmek veya çekmek için güçlü fore kazık makinaları kullanılması gerekmektedir. Kohezyonlu zeminlerde boruyu zemine sürmek mümkün olsa da geri çekme işlemi daha zordur, kimi zaman imkânsızdır.

Stabilitenin sağlanamadığı durumlarda önerilen her bir çözüm proje öncesi tasarlanan bütçe/maliyet eğrisinin dışına çıkılmasına sebebiyet verebilmektedir. Bunun da ötesinde, stabilite sağlanamamış ise imal edilen fore kazıkların performansları ciddi ölçüde düşebilmektedir (Duan ve Kulhawy, 2009; Abdrabbo ve ark., 2012; Wan ve ark., 2019).

Hongbo ve ark. (2007) tarafından yürütülmüş bir çalışmada ise kazık yapım yöntemlerinin kazıkların cidar sürtünmesine etkisi ile kazıkların performanslarının değişimi incelenmiştir.

Lam ve ark. (2015) çalışmasında kuyu stabilitesinin bentonit kili ve polimer solüsyonu ile sağlanabilme durumu incelenmiştir. Çalışma sonucunda fore kazık imalatında kuyu stabilitesinin polimer sıvısı ve bentonit kili ile sağlandığı kazıklar üzerinde yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarında polimer sıvısı kullanılarak imal edilen fore kazıkların, bentonit sıvısı kullanılarak imal edilen fore kazıklara göre neredeyse iki kat daha iyi performans gösterdiği ispatlanmıştır. Fore kazık imalatında kuyu stabilitesinin sağlanması ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında, kuyu stabilitesinin akışkan sıvılar ile sağlanabilme durumlarında kazık performansının ciddi ölçüde arttığı görülmektedir. Bu nedenle fore kazıkların imalat aşamasında kuyu stabilitesinin sağlanması için farklı yöntemlerin geliştirilmesi gerektiği açıkça ortadadır. Bu konuda yeni sıvılar geliştirilebilir ya da zemin iyileştirme yöntemleriyle fore kazık imalatı için farklı hibrit yöntemler kullanılabilir.

Wan ve ark. (2019) çalışmalarında ince kum tabakası içerisinde imal edilen büyük çaplı yerinde dökme fore kazıkların performansını saha testleri ile ölçmüşlerdir. Kazıkların yük-oturma davranışı ile gövde (sürtünme) ve uç taşıma dirençleri incelenmiştir. Çalışma, kazıkların sondajla açılması sırasında azalan performansın, kazık sonrasında yapılan enjeksiyon (post-grouting) işlemiyle artırılabilceğini ortaya koymuştur.

Zhou ve ark. (2021) tarafından yürütülmüş bir çalışmada kazık kuyusu farklı delme metotlarıyla ve grouting yapılarak veya yapılmadan açılmış ve bu kuyularda imal edilen kazıkların performansı statik yükleme deneyleri ile araştırılmıştır. Sonuç olarak farklı kuyu oluşturma metotlarının kazık kapasitesini büyük ölçüde etkilediği belirtilmiştir.

Jet grout yöntemi sıklıkla zemin iyileştirme yöntemi olarak kullanılmaktadır (Manne ve ark., 2020; Mısır, 2020; Yılmaz ve Ercan, 2020; Wong ve ark., 2020; Ghodrati ve ark., 2023). Yöntemin amacı zeminin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmektir. Buna bağlı olarak da zeminin stabilitesi sağlanabilmektedir. Son zamanlarda jet grout kolonları yardımıyla zemin ortamında kazıklar için açılan kuyuların stabilitesinin de sağlanabildiğine yönelik çalışmalar yürütülmüştür (Nikbakhtan ve ark., 2007; So, 2021). Genel olarak yapılan çalışmalarda tünel yapılarında ve eğimli veya düz kazılarda zemin stabilitesinin jet grout yöntemi ile sağlanabilmesi konu edilmiştir. Fore kazık imalatında her ne kadar açık alan kazısı yapılsa da, imalat tekniğine bakılırsa bir kazı yöntemi uygulanmaktadır. Zemin katmanlarına bağlı olarak açılan

her fore kazık kuyusunun etrafındaki zeminlerin stabilitesinin sağlanması gerekmektedir. Bu hem stabil kuyudaki saha imalatının kolaylaşmasında hem de daha önce bahsedildiği gibi kazık performansının iyileştirilmesinde temel etken olmaktadır.

Ho ve ark. (2002) Singapur’da yürüttükleri çalışmalarında fore kazıkları zeminin farklı katmanlarına önceden imal edilen jet grout kolonlarının içinde teşkil etmişlerdir. Sahaya özgü geoteknik çalışmalar yapıldıktan sonra jeolojik profil çıkartılmıştır. Zemin profili yer yer tabakalar halinde gevşek kum, killi dolgu, normal konsolide olmuş üst ve alt deniz kili içermektedir. Çalışmada zeminin farklı derinliklerine ve farklı kalınlığa sahip birbirini kesen jet grout kolonları imal edilmiş, içerisinde de fore kazık imalatı yapılmıştır. Çalışmada fore kazıkların kapasitelerinin önemli ölçüde arttığı yapılan kazık basınç ve çekme testleriyle kanıtlanmıştır.

Bir diğer çalışmada, San Juan nehri boyunca devam eden Metro Manila inşasında, jet grout kolonları ile çevrili bir alana imal edilen fore kazıkların taşıma kapasitelerinin arttığı, zeminin de stabilitesinin sağlandığı gözlemlenmiştir (Ono ve Morales, 2004).

Rollins ve ark. (2008), yumuşak kil ortamında jet grout kolonları ile fore kazık grubunun yanal yer değiştirme direncinin %184 oranında arttığını belirlemişlerdir.

Kaymakçı (2014), alüviyal kökenli bir zemin kesitinde -17 m ile -40 m derinlik arasına 80 cm çapında jet grout kolonlarının imalinden sonra 0 m ile -20 m arasına 100 cm çapında fore kazıkların imal edildiği Zonguldak Çatalağzı Termik Santrali projesini incelemiştir. Projede, fore kazıkların jet grout kolonlarına 3 m soketlenmesi sağlanmıştır. İmalatı tamamlanan fore kazıklara yükleme deneyi yapılmıştır. Sonuç olarak jet groutlara 3 metre soketlenen fore kazıkların taşıma kapasitelerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Bir başka çalışmada, Nalçakan (2018) bir viyadük inşaatında alüviyal zemin özelliklerinin çok yumuşak olduğu bir ortamda her bir fore kazığı çevreleyen 5 adet jet grout kolonlarının olduğu bir hibrit çalışmayı aktarmıştır. Çalışmada 3 adet kombinasyon ile kazık yükleme deneyi yapılmıştır. Normal zemin koşullarında yapılan fore kazıkların yükleme deneyi Test-1, fore kazıklar yapıldıktan sonra çevresine jet grout kolonları imal edilen kazıkların yükleme deneyi Test-2, jet grout imalatlarının kazık imalatlarından önce yapıldığı ve kazıkların jet grout kolonlarını keserek imal edildiği fore kazıkların yükleme deneyi Test-3 olarak adlandırılmıştır. Yükleme deneyleri tüm kombinasyonlar için kazık göçertilene kadar devam ettirilmiş

ve nihai kazık taşıma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Yapılan uygulama ve testlere göre jet grout kolonlarının önceden imal edilip sonrasında jet kolonlarını kesen bir fore kazığın göçme yükü ile normal zemin koşullarında imal edilen fore kazığın göçme yükü arasında %164'lük bir fark görülmüştür. Çalışmada jet grout kolonları içerisine teşkil edilen fore kazıkların taşıma gücünün ciddi oranda arttığı tespit edilmiştir.

1.1. Hipotez

Literatürden örnek verilen tüm çalışmalarda fore kazık ile jet grout uygulamalarının hibrit olarak kullanılmasında, jet grout uygulamasının zeminin stabilitesini sağladığı, fore kazıkların yatay ve düşey direncini arttırdığı görülebilmektedir. Çalışmalarda jet grout ile fore kazıklar farklı kombinasyonlarda kullanılmıştır. Bazı çalışmalarda fore kazıklar uç direncini artırma amacıyla derinlerde belli kalınlıklarda imal edilmiş jet grout kolonlarına soketlenmiş, bazı çalışmalarda jet grout ile iyileştirilen ortamda aralarda fore kazık imalatı yapılmış, kimilerinde fore kazığın imalatı öncesinde farklı derinliklerde farklı kalınlıkta jet grout uygulaması yapılmış, bir kısmında ise jet groutlar ile güçlendirilmiş zeminde ve normal zemin koşullarında imal edilmiş fore kazıkların taşıma kapasiteleri değerlendirilmiştir. Ancak yumuşak veya gevşek zeminlerde fore kazık imalatında karşılaşılan en büyük zorlukların başında gelen kuyu stabilitesinin jet groutlar ile sağlanıp sağlanmadığı hakkında bir çalışma yoktur. Jet grout yönteminin farklı amaçlar ile kullanılması literatürde var olsa da fore kazık kuyusunun stabilitesini sağlamaya yönelik ve stabil kuyudan dolayı kazık performansının artırılmasına yönelik çalışmalar oldukça yetersizdir.

Tüm bu çalışmalar detaylıca incelendiğinde jet grout uygulaması ile fore kazık imalatı sırasında kuyu stabilitesinin sağlanabilirliğinin ve bunun fore kazığa olan pozitif etkisinin derinlemesine irdelenmeye değer bir problem olduğu düşüncesi ortaya çıkmıştır. Bu tez çalışmasının amacı kuyu stabilitesinin sağlanmasında jet groutların etkisinin araştırılması ve kazık kapasitesinin stabil ve stabil olmayan kuyudan nasıl etkilendiğinin ortaya konulmasıdır. Kuyunun stabilitesinin sağlanması adına sahada kuyunun açılacağı yerde jet groutlarla çevrili bir ortam oluşturulmuş, jet grout kolonlu ortam oluşturulmadan önceki zemin parametreleri ile jet grout kolonlarıyla çevrili zemin ortamındaki parametrelerin değişkenliğinin ortaya konması adına jeofizik araştırmalar yapılmıştır. Bu kapsamda her iki ortamda da Mikrotremor ve Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) deneyleri yürütülmüştür. Ek

olarak, stabil olmayan ve stabil kuyu içerisinde imal edilen kazıklara kazık yükleme deneyleri yapılmış ve bunun sonucunda kazık performansları kıyaslanmıştır. Tüm bunlara ek olarak, sahada kuyu stabilitesinin sağlanması ve fore kazık imalatına yönelik elde edilen deneyimler, yaşanabilecek problemlerin özeti şeklinde aktarılarak uygulamadaki problemlerin çözümüne yönelik öneriler sunulmaktadır.



2. ZEMİN İYİLEŞTİRME

Yüksek yer altı su seviyesi ve zayıf zemin koşullarında ağır yapıları güvenli bir şekilde inşa etmek, aynı zamanda ekonomik yönden kabul edilebilir yöntemler uygulamak inşaat mühendisliğinin bir uğraşısıdır. Yapıdan gelen statik ve dinamik yükler temel sistemi vasıtası ile zemine aktarılır. Temel sistemleri yeterli taşıma gücüne sahipse ve oturmaları tolere edebiliyorsa yükler güvenle taşınmaktadır. Ancak düşük kayma dirençli zeminlerin bulunduğu ortamlarda taşıma gücü aşılması veya oturma kriterlerinin sağlanamaması problemleri olası olmakta, bu gibi durumlarda ıslah çalışması yapılarak yapıdan gelen yüklerin güvenle taşınması sağlanabilmektedir.

Bir geoteknik mühendisi yapıdan gelen yüklere göre zemini incelediğinde aşağıdaki alternatiflerden birini uygulamak durumundadır.

- Zayıf zemini kabul etmek,
- Zayıf zemini kaldırıp yerine uygun zemin koymak,
- Zayıf zemini güçlendirmek.

Birinci alternatifte zayıf zemini göz önüne alarak yapı tekrardan tasarlanır ve zemine uygun bir yapı haline getirilir. Ancak bu durumda yapının amacı dışına çıkması, uzun vadede zeminden kaynaklı yapı hasarının olabilmesi ve ilave bakım-onarım işlemlerinin oluşması ile projeye ek ekonomik yük gelebilmektedir. İkinci alternatifte ise zayıf zeminin kaldırılması, yeni zemin malzemesinin ocaktan bulunup gerekli laboratuvar testlerinin yapılarak seçilmesi, şantiye sahasına getirilmesi ve sıkıştırılması hem son derece maliyetli hem de meşakkatli olabilmektedir. Ayrıca yer altı su seviyesinin yüzeye yakınlığı ve zayıf zemin derinliğinin fazla olması durumlarında bu seçenek uygulanabilir olmaktan çıkmaktadır. Son alternatifte ise zemin çeşitli yöntemler kullanılıp ıslah edilerek çözüme ulaşılmaktadır.

Zemin ıslahı (iyileştirmesi) genel olarak zemini daha stabil hale getirmek için yapılan işlemlerdir. Zeminin zayıf parametrelerinin uygun bir yöntem ile iyileştirilmesi mümkündür. Zemin iyileştirmesindeki temel ilke, zemin içerisindeki boşlukların mekanik araçlarla azaltılması, zemin boşluklarının çeşitli bileşimdeki karışımlarla

doldurulması, yeraltı su seviyesinin düşürülmesi veya zeminin su içeriğinin azaltılması ya da çeşitli elemanların kullanılması suretiyle mevcut zeminin güçlendirilmesidir.

2.1. Zemin İyileştirme Yöntemleri

Zemin iyileştirme, M.Ö. 3000 yılına dayanan en eski inşaat mühendisliği uygulamalarından biridir. Artan nüfus, buna bağlı olarak yapılaşma isteği ve yapılaşma alanlarının elverişsiz zemin ortamlarına kayması sebebi ile zemin iyileştirme yöntemleri günümüzde büyük önem kazanmıştır. Öncelikle yapının isteği ve zemine uygunluğu öncelik tutularak, zamana ve maliyete bağlı birçok zemin iyileştirme yöntemi geliştirilmiştir.

İyileştirme metotları için birçok bilim adamı yoruma dayalı fikir ayrılığına düşse de Geoteknik mühendisliğinin en ilgi gören Mitchel (1981) raporu birçok konuya referans olmaktadır. Bu rapor zemin iyileştirme yönetimlerini 6 ana başlık altında toplamıştır.

- Kohezyonsuz zeminin yerinde derin kompaksiyonu,
- Ön ve aşırı yükleme,
- Enjeksiyon ve harç (derz) dolgu,
- Katkı maddeleri,
- Termal iyileştirme,
- Geotekstil ve geosentetik ile güçlendirme.

Uluslararası Zemin Mekanik ve Temel Mühendisliği Topluluğu, Zemin İyileştirme Teknik Komitesi (TC211) tüm bu sınıflandırmaları değerlendirip Geoteknik camiasının hemfikir olduğu bir sınıflandırma geliştirmiştir. Bu sınıflandırma aşağıdaki şekildedir:

1. Kohezyonsuz zeminin katkı maddeleri kullanılmadan iyileştirilmesi.
 - a. Dinamik kompaksiyon
 - b. Vibro kompaksiyon (flotasyon)
 - c. Patlatma ile kompaksiyon
 - d. Yüzey kompaksiyonu
2. Kohezif zeminin katkı maddeleri kullanılmadan iyileştirilmesi.
 - a. Mevcut zeminin hafif madde ile değiştirilmesi
 - b. Yapay drenler ile ön yükleme
 - c. Vakum ile ön yükleme

3. Katkı maddeleri ile zemin iyileştirme.
 - a. Vibro değiştirme ve taş kolonlar
 - b. Kum kompaksiyon kazıkları
 - c. Geotekstil ile glendirilmiş kolonlar
4. Harç türü katkı maddeleri ile zemin iyileştirme.
 - a. Mineral katkılı harçlar
 - b. Katkı malzemeleri ile karıştırma yöntemi (derin karıştırma)
 - c. Jet harç enjeksiyonu
5. Zemin takviyesi.
 - a. Geosentetikler ile mekaniksel iyileştirme

2.2. Zemin İyileştirilmesinde Uygun Metodun Seçimi

Zemin iyileştirme yöntemi seçimine başlamadan önce plan yapılan zemini tanımak önceliklidir. Zemine yapılacak olan arazi ve laboratuvar deneyleri ile tanıma işlemi gerçekleştirilir. Arazide standart penetrasyon ve koni penetrasyon deneyleri ve bunun akabinde laboratuvar deneyleri ile zeminin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenir. Ortam, saptanacak granülometri eğrisi, ince dane oranı, rölatif sıklık, kıvam, yoğunluk, su muhtevası, yer altı su seviyesi, içsel sürtünme açısı, ayrıca maksimum yer ivmesi ve hesaplanacak düzeltme katsayıları gibi sismik ve statik ölçütlere göre birçok açıdan değerlendirilir. Sismik etkiler sonucu oluşan periyodik kayma gerilmeleri, zeminin çevrimsel gerilme mukavemeti ile karşılaştırılır.

Zemin zerine yapılacak olan yapıdan gelen yükler ile zemin parametreleri karşılaştırılarak projeye uygun ve ekonomik bir zemin iyileştirme yönteminin seçimine gidilir.

2.3. Jet Grout Kolonları ile Zemin İyileştirme Metodu

Jet grout yöntemi, özellikle yumuşak ve geveşek zeminlerde yapı yüklerinin zeminin daha alt tabakalarına aktarılması için kullanılmaktadır. Diğer enjeksiyon yöntemleri düşünüldüğünde jet grout yönteminin en büyük avantajlarından biri de farklı zeminlerde geniş yelpazeli kullanım alanıdır. Bu yöntem ile hem kil hem de kum-çakıl gibi farklı karakter ve türdeki zeminlerin ıslahı yapılabilmektedir.

2.3.1. Yöntemin tarihsel gelişimi

Zemin ıslah yöntemlerinden biri olan jet grout yöntemi ilk olarak 1970'li yılların başında Japonya'da denenmiş ve başarılı olmuştur. 1970'li yılların sonunda ise İtalya'da ve diğer Avrupa ülkelerinde uygulanmaya başlanmıştır. Ülkemizdeki ilk uygulaması 1986 yılında Haliç Kollektörleri Projesi kapsamında Ayvansaray tünel aynasının zemin ıslahında yapılmıştır. Bu metotta, grout olarak adlandırılan çimento-su şerbetinin yüksek basınçlarla zemin içerisine püskürtülmesi ile sürekli ve homojen bir kolon oluşturulması hedeflenmektedir. Basınç ile püskürtülen grout enjeksiyon memesinden (nozzle) veya memelerinden geçerken yüksek bir kinetik enerji kazanarak, zemini "yırtar" ve zeminle şerbet arasında bir karışım sağlanır. Oluşan kolon "soilcrete" olarak adlandırılmakta ve bu zeminde temel olarak boşluk oranı azalırken daha düşük sıkışabilirlik elde edilebilmektedir.

Durgunoğlu (2004) jet grout yönteminin kullanım amaçlarını şu şekilde belirtmiştir;

- Temeller altında, düşey yükler için basınç elemanı olarak taşıma gücü ve deplasman kontrolü,
- Döşemeler altında düşey ve özellikle yüksek yayılı yükler altında basınç elemanı olarak taşıma gücü ve deplasman kontrolü,
- Dolgular altında basınç elemanı olarak taşıma gücü ve deplasman kontrolü,
- Köprülerde yaklaşım dolguları altında düşey dolgu yüklerinin taşınması, dolgu altında oturma kontrolü ve kenar ayak kazıklarına negatif çeper sürtünmesi intikalinin önlenmesi,
- Havuzlarda, yer altı su depolarında ve su yapılarında, donatı ile teçhiz edilerek çekme elemanı olarak,
- Kazılarda, ağırlık tipi istinat yapısı teşkili ile yanal zemin itkilerinin alınması,
- Kazılarda donatı ile teçhiz edilerek düşey eğilmeye maruz iksa elemanı olarak,
- Kazılarda ve ankrajlı istinat yapılarında özel donatı ile ankraj elemanı olarak,
- Geçirimli zeminlerde ve yüksek YASS bulunan ortamlarda yapılan kazılarda taşıyıcı elemanlar arasında batardo kapama elemanı olarak,
- Yumuşak killerdeki kazılarda kazı öncesi kazı taban seviyesi altında teşkil edilen payanda elemanı olarak,

- Kazı tabanından kazıya gelecek yeraltı suyunun kontrolü için tıkaç elemanı olarak,
- Şevlerde stabilitenin sağlanması için zemin takviye elemanı olarak veya ağırlık batardosu teşkili ile,
- Yumuşak zeminde açılan yüzeye yakın tünellerde tünel üstündeki zeminin iyileştirilmesi amacı ile,
- Yumuşak zeminde açılan tünellerde tünel içinde ve ayna önünden yapılarak, kazı öncesi tünel kesiti üzerinde taşıyıcı bir şemsiye oluşturulması amacı ile,
- Önemli ve ağır yapılarda sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının düşük olduğu durumlarda kazıklı temellere gelecek yatay yüklerin ve oluşacak deplasmanların kontrolü için, kazıklarla birlikte,
- Sıvılaşma sonucu oluşacak zemin yanal ve düşey deplasmanlarının sınırlandırılması için yapı etrafında veya altında kapama elemanları olarak,
- Sıvılaşma riskine karşı güvenlik sayısının arttırılması, zeminde oluşan kayma gerilmelerinin bir kısmının taşınarak deprem sonucu oluşabilecek düşey ve yanal deplasmanların sınırlandırılması amacı ile.

2.3.2. Jet grout imalatı

Zemin ıslah yöntemlerinden biri olan jet grout imalatı, dünyada ve ülkemizde sıklıkla kullanılmaktadır. Jet grout uygulaması, genellikle zayıf zemin koşullarında zemin mukavemetini artırmak için kullanılır. Jet grout işlemi, yüksek basınçlı bir çimento karışımının zemine enjekte edilerek zeminin iyileştirilmesini sağlar. Çimento hamuru yüksek basınç ile yumuşak zemini yırtarak zeminin belirli oranda sıkışmasını sağlar.

2.3.2.1. İmalat ekipmanları

Jet grout imalatında kullanılan ana ekipmanlar;

- Uygulayıcı delici makine
- Pompa
- Karıştırıcı ünite
- Dinlendirme kazanı

2.3.2.2. İmalat aşamaları

Jet grout uygulamasının genel imalat aşamaları şöyledir:

- **Planlama ve Tasarım:** Uygulama öncesi, zemin etüdü yapılarak zemin özellikleri belirlenir ve uygun tasarım parametreleri oluşturulur. Bu aşamada, kullanılacak çimento karışımının özellikleri ve enjeksiyon basıncı belirlenir.
- **Delgi:** Jet grout uygulaması için öncelikle zemin üzerinde belirlenen noktalarda delikler açılır. Bu delikler, çimento karışımının zemine enjekte edileceği noktaları belirler. Delme işlemi, tasarımda belirlenen derinlik ve çapta gerçekleştirilir.
- **Karışım Hazırlığı:** Çimento, su ve gerekli katkı maddelerinden oluşan enjeksiyon karışımı hazırlanır. Bu karışım, belirli bir viskozite ve mukavemete sahip olmalıdır.
- **Enjeksiyon:** Hazırlanan çimento karışımı, yüksek basınçlı pompalar aracılığıyla sondaj deliklerine enjekte edilir. Bu işlem sırasında enjeksiyon harcı, özel bir enjeksiyon memesi yardımıyla zeminle karıştırılarak bir çeşit çimento-zemin karışımı oluşturulur. Yüksek basınçlı enjeksiyon, zeminin parçalanarak karışımın zemine nüfuz etmesini sağlar.
- **Kolon Oluşumu:** Enjeksiyon işlemi sırasında, karışım zemine yayılır ve prensip olarak silindirik bir kolon oluşturur. Bu kolonlar, ortamda taşıma kapasitesini artırır ve oturma problemlerini azaltır. Kolonların çapı ve uzunluğu, uygulama parametrelerine bağlı olarak değişir.
- **Sertleşme ve Kür:** Enjeksiyon tamamlandıktan sonra, çimento karışımının priz alması ve sertleşmesi için belirli bir süre beklenir. Bu süre zarfında, karışımın tam mukavemetine ulaşması sağlanır.
- **Kalite Kontrolü ve Testler:** Uygulama sonrası, oluşturulan jet grout kolonlarının kalitesi ve performansı test edilir. Bu testler, kolonların tasarım kriterlerini karşılayıp karşılamadığını belirlemek için yapılır.

Jet grout uygulaması, zemin koşullarına ve yapı gereksinimlerine göre özelleştirilebilir ve genellikle geoteknik uzmanlığı olan inşaat mühendisleri tarafından denetlenmesi gereken bir süreçtir. Her proje için tasarım ve uygulama detayları farklılık gösterebilir.

2.3.3. Yöntemin avantaj ve dezavantajları

Jet grout yöntemi, zemin iyileştirme projelerinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir ve çeşitli avantajları ile dezavantajları bulunmaktadır. Yöntem, zemin koşullarına ve

proje gereksinimlerine bağı olarak dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir. Her projenin kendine özgü koşulları, yöntemin avantaj ve dezavantajlarının dikkatlice analiz edilmesini gerektirir.

2.3.3.1. Jet grout yönteminin avantajları

- **Zemin iyileştirme yeteneği:** Jet grout, düşük dayanımlı veya yüksek sıkışabilirlikteki zeminleri önemli ölçüde iyileştirir ve bu zeminlerin taşıma kapasitesini artırır.
- **Esneklik:** Farklı zemin türlerinde kullanılabilir ve değişen zemin koşullarına göre uyarlanabilir. Hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz zeminlerde etkili olabilir.
- **Geometrik kontrol:** Kolonların çapı ve uzunluğu, proje gereksinimlerine göre ayarlanabilir, böylece istenilen zemin iyileştirmesi sağlanabilir.
- **Azaltılmış yer değiştirme:** Diğer zemin iyileştirme yöntemlerine kıyasla daha az yer değiştirme ve oturma yaratır, bu da bitişik yapılar üzerindeki olumsuz etkileri minimize eder.
- **Yüksek basınçlı uygulama:** Yüksek basınçlı enjeksiyon, zeminin homojen olmayan yapısını kırarak daha homojen bir iyileştirme sağlar.
- **Hızlı uygulama:** Özellikle sınırlı alanlarda ve kısıtlı sürelerde hızlı bir şekilde uygulanabilir.

2.3.3.2. Jet grout yönteminin dezavantajları

- **Maliyet:** Jet grout uygulamaları, diğer zemin iyileştirme yöntemlerine göre daha maliyetli olabilir. Özellikle büyük ölçekli projelerde maliyetler artabilir.
- **Çevresel etkiler:** Yüksek basınçlı enjeksiyon sırasında çevredeki zemin ve su kaynakları kirlenebilir. Bu nedenle çevresel etkilerin iyi yönetilmesi gerekir.
- **Kontrol zorlukları:** Yüksek basınçlı enjeksiyon süreci sırasında karışımın tam olarak nereye gittiğini kontrol etmek zor olabilir, bu da istenmeyen boşluklar veya düzensiz kolonlar oluşturabilir.
- **Sınırlı derinlik:** Çok derin zemin iyileştirmeleri için uygun olmayabilir. Derinlik sınırlamaları, uygulamanın etkinliğini azaltabilir.

- **Uzmanlık gereksinimi:** Jet grout uygulamaları, özel ekipman ve uzmanlık gerektirir. Bu da proje planlaması ve uygulama aşamasında ek zorluklar yaratabilir.

2.3.4. Jet grout yöntemi tasarım kriterleri

Jet grout yöntemi, zemin iyileştirme projelerinde çeşitli tasarım kriterlerine dayanarak uygulanır. Bu kriterler, taşıma kapasitesi ve oturma analizi gibi temel mühendislik parametrelerini içerir.

2.3.4.1. Taşıma kapasitesi

- **Zemin karakterizasyonu:** İlk adım, mevcut zemin koşullarının detaylı bir şekilde incelenmesidir. Bu, zemin tabakalarının türünü, yoğunluğunu, su içeriğini ve diğer fiziksel özelliklerini içerir.
- **Kolon yerleşimi ve boyutlandırma:** Jet grout kolonlarının çapı ve aralıkları, tasarımda önemli bir rol oynar. Kolon çapı, genellikle 0.6 ile 1.5 metre arasında değişebilir. Kolonların yerleşimi, yük dağılımını ve taşıma kapasitesini optimize edecek şekilde tasarlanır.
- **Malzeme özellikleri:** Kullanılacak çimento karışımının basınç dayanımı, karışım oranları ve diğer kimyasal özellikleri belirlenir. Bu özellikler, kolonların nihai mukavemetini etkiler.
- **Yük dağılımı:** Yapının yükleri, jet grout kolonları ve doğal zemin arasındaki etkileşim dikkate alınarak dağıtılır. Kolonlar, yükün zemine uniform bir şekilde aktarılmasını sağlar.
- **Güvenlik katsayıları:** Taşıma kapasitesi hesaplamalarında güvenlik katsayıları uygulanır. Bu, olası belirsizliklere karşı yapının güvenliğini artırır.

2.3.4.2. Oturma analizi

- **Başlangıç oturması:** Jet grout uygulamaları, zemin sıkışmasını azaltarak oturma miktarını kontrol altına almayı amaçlar. Başlangıç oturması, kolonların doğru yerleştirilmesiyle minimize edilir.
- **Uzun vadeli oturma:** Zamanla meydana gelen konsolidasyon oturması da dikkate alınmalıdır. Jet grout kolonları, uzun vadeli oturma miktarını azaltabilir, ancak bu oturma tamamen önlenemeyebilir.

- **Farklı oturma:** Farklı zemin veya yük koşulları, yapının farklı bölgelerinde farklı oturma miktarlarına neden olabilir. Tasarım, bu tür oturma farklılıklarını minimize edecek şekilde yapılmalıdır.
- **Nümerik modelleme:** Oturma analizleri genellikle sayısal modelleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilir. Bu modellemeler, zemin ve yapı etkileşimini daha iyi anlamak için önemlidir.
- **Alan testleri ve izleme:** Uygulama sonrası, yerinde testler ve izleme ile oturma davranışı gözlemlenir. Bu, tasarım varsayımlarının doğruluğunu değerlendirmek için kritik bir adımdır.

2.4. Kompozit Zemin

Kompozit zemin, doğal zemin ile onun içine yerleştirilen/geçirilen/geçici olarak oluşturulan bir başka malzemenin (örneğin jet grout kolonları, taş kolonlar, geogrid, donatılar, kazıklar vs.) birlikte çalıştığı karma bir zemin sistemidir.

Bu sistem, dış yüklemelere karşı homojen olmayan ama birleşik bir zemin davranışı gösterir. Örneklenirse jet grout kolonları, zayıf zemin içine çimento enjekte edilerek oluşturulan rijit kolonlardır. Taş kolonlar (Kum kolonlar), düşey granüler kolonlar olup, çevresindeki yumuşak zemine drenaj ve rijitlik desteği sağlar. Geosentetik donatılı zeminler, donatıların, taşıma gücünü ve çekme direncini artırdığı sistemlerdir. Kazıklı zemin iyileştirmesinde (piled embankment), kazık ve zemin dolgusu birlikte çalışır.

2.4.1. Kompozit zeminin özellikleri

Bileşenler arası işbirliği: Kompozit zemin, iki malzemenin birbirini tamamlayıcı mekanik özelliklerinden yararlanır. Rijit elemanlar (örn. jet grout) taşıma gücünü ve rijitliği artırırken zayıf zemin sürekli ortam sağlar.

Gerilme paylaşımı: Yük, rijit kolonlara ve doğal zemine oranlı olarak dağılır. Kompozit sistemin taşıma gücü, sadece jet grout kolonlarının değil, kolon + doğal zemin + etkileşim koşullarının toplamıdır.

Yer değiştirme uyumu (Deformasyon uyumu): Kompozit zeminde rijit ve zayıf malzeme, ortak deformasyon altında çalışmak zorundadır. Bu nedenle genellikle eşdeğer modül ve eşdeğer mukavemet kullanılır.

2.4.2. Kompozit zeminin hesap parametrelerinin hesaplanması

Kompozit zemin, doğal zemin ile içine uygulanan iyileştirme sistemlerinin (örneğin jet grout kolonlarının) birlikte çalıştığı karma bir sistemdir. Bu sistemde, hem dayanım hem deformasyon açısından etkin (eşdeğer) değerler hesaplanarak mühendislik tasarımı yapılır. Ortamın kompozit zemin kabul edilmesi gerçekçi tasarım yapılmasını sağlar. Sadece jet grout özelliklerine ya da sadece doğal zemin özelliklerine göre tasarım yetersiz kalabilir. Taşıma gücünü ve oturmayı tahmin etmek daha isabetli olur. Zemin iyileştirmesi yatırımının mühendislik performansı tahmin edilir.

Kompozit sistemlerin özelliklerinin belirlenmesinde karışım kuralı (rule of mixtures) kullanılır. Bu formül, kompozit malzeme mekaniği ve geoteknik iyileştirme literatüründe kullanılan karışım kurallarına dayalıdır. Jet grout gibi yüksek modüllü kolon sistemlerinde, alanın belirli bir yüzdesi jet grout'tur; geri kalanı doğal zemindir. Bu durumda sistemin etkin mukavemeti, iki bileşenin alan oranına göre ortalaması olarak ifade edilir.

Karışım kuralının genel ifadesi;

$$\text{Özellik}_{\text{kompozit}} = f_1 \cdot X_1 + f_2 \cdot X_2 + \dots \quad (2.1)$$

şeklinde belirlenir. Burada; f_i : her malzemenin toplam sistem içindeki oranı (alan, hacim veya ağırlık), X_i : o bileşenin mühendislik özelliği (c_u , E , ϕ , k , vs.) olmaktadır. Kompozit ortam özelliklerinin her biri

$$\text{Özellik}_{\text{kompozit}} = R \times \text{Özellik}_{\text{kolon}} + (1-R) \times \text{Özellik}_{\text{zemin}} \quad (2.2)$$

formülü ile belirlenebilir. Bu özellik; drenajsız kayma direnci (c_u), elastisite modülü (E) veya geçirimsizlik katsayısı (k) olabilir. Örneğin jet grout kolonları ile kompozit zemin oluşturulduğunda ortamın drenajsız kayma direnci $c_{u \text{ kompozit}} = R \times c_{u \text{ jet}} + (1-R) \times c_{u \text{ doğal}}$ şeklinde hesaplanır. Burada $c_{u \text{ kompozit}}$: Jet grout + doğal zeminden oluşan kompozit zeminin tahmini drenajsız kayma mukavemeti (c_u) değeridir. R katsayısı, jet grout kolonlarının zemindeki alan oranı, yani iyileştirme oranıdır (0 ile 1 arasında bir değerdir). $c_{u \text{ jet}}$: Jet grout kolon içindeki tahmini drenajsız kayma direnci (c_u) değeridir. Kompozit sistem için ortalama değerler alan, hacim veya ağırlık cinsinden belirlenebilirse de çoğu zaman “alan ağırlıklı ortalama (area-weighted average)” yöntemi kullanılır ve ifade şu şekilde yazılabilir:

$$c_{u \text{ kompozit}} = \frac{A_{\text{jet}} \times c_{u \text{ jet}} + A_{\text{zemin}} \times c_{u \text{ doğal}}}{A_{\text{toplam}}} = R \times c_{u \text{ jet}} + (1-R) \times c_{u \text{ doğal}} \quad (2.3)$$

Burada R, planda toplam jet grout alanının toplam alana bölünmesiyle elde edilir.

Benzer yaklaşımla çalışan Massarsch ve Topolnicki (2005) yönteminde iyileştirilmiş ortamın “eşdeğer mukavemet” ve “eşdeğer deformasyon modülü” kolonların ve zeminlerin direnç ve deformasyon modülleri kullanılarak değerlendirilir. Kirsch ve Bell (2013) yönteminde de, kolonların ve çevredeki zeminin görelî alan oranları ve rijitlikleri dikkate alınarak kompozit ortamın rijitliği veya dayanımı tahmin edilebilmektedir. Mitchell ve Katti (1981), farklı zemin iyileştirme yöntemleri için eşdeğer dayanım hesaplarını, “karışım kuralı” esasına göre yapmaktadır. Bunun yanında FHWA (2003, 2022) jet grout tasarım kılavuzunda formül açıkça verilmemekte, ancak yük paylaşımı ve rijitlik oranı yaklaşımıyla zemin ve jet grout katkısı birlikte modellenmektedir.



3. DELME KAZIKLAR

Kazıklar, zayıf zemin koşullarında yapı yüklerini daha derinlerde bulunan sağlam zemin tabakalarına aktarmak için sıklıkla kullanılan bir temel çözümdür. Delme kazıklardan oluşan derin temeller, özellikle yüksek yapıların ve ağır yüklerin söz konusu olduğu projelerde tercih edilir. Delme (fore) kazıklı derin temeller, inşaat projelerinde esneklik ve güvenlik sağlamak için önemli bir temel çözümü olup, her projenin spesifik gereksinimleri göz önünde bulundurularak tasarlanmalı ve uygulanmalıdır.

3.1. Tasarıma Göre Kazık Çeşitleri

3.1.1. Uç kazıklar

Uç kazıklar, yüklerini kazık ucunun oturduğu sağlam zemin veya kaya tabakasına doğrudan aktarır. Bu tür kazıklar, genellikle kazık ucunun oturduğu zemin tabakasının taşıma kapasitesine dayalı olarak tasarlanır.

3.1.2. Sürtünme kazığı

Sürtünme kazıkları, yüklerini kazık boyunca yanal yüzeyinin çevresindeki zeminle olan sürtünmesi/yapışması ile taşır. Yani, kazığın çevresel alanı boyunca oluşan sürtünme kuvvetleriyle yük aktarımı gerçekleştirilir. Bu tip kazıklar, genellikle yumuşak zeminlerde veya kazık ucunun sağlam bir tabakaya ulaşamadığı durumlarda kullanılır.

3.2. Kazık Yöntemi Seçim Kriteri

Kazık yöntemi seçimi; zemin özellikleri, yapı yükleri, çevresel koşullar, ekonomik faktörler ve proje gereksinimlerine bağlıdır. Zemin araştırmaları ve mühendislik analizleri, hangi kazık tipinin daha uygun olduğunu belirlemede kritik öneme sahiptir.

3.3. Fore Kazık İmalat Aşamaları

- **Delme işlemi:** Döner delgi makineleri ile kazık delikleri açılır. Delme işlemi sırasında zeminin kaymasını önlemek için geçici muhafaza boruları veya

çamur karışımları (bentonit veya polimer çamuru gibi) kullanılarak kuyu stabilitesi sağlanır.

- **Donatı yerleştirilmesi:** Çelik donatı kafesi açılan deliğe yerleştirilir.
- **Beton dökümü:** Donatının yerleştirilmesinin ardından, delik sürekli bir şekilde beton ile doldurulur.
- **Muhafaza borusunun çekilmesi:** Eğer kullanıldıysa, geçici muhafaza borusu beton dökümünden sonra çekilir.

3.3.1. Taşıma kapasitesi

Kazıkların tasarımında taşıma kapasitesinin doğru bir şekilde hesaplanması önemlidir. Bunun için çeşitli yaklaşımlar kullanılır:

3.3.1.1. Reese ve O'Neill (1988) yöntemi

Bu yaklaşım, kazık taşıma kapasitesini hesaplamak için zemin parametreleri ve kazık boyutları gibi faktörleri dikkate alır.

a. Nihai Uç Direnci (Q_p)

$$Q_p = A_p \cdot q_p \quad (3.1)$$

A_p = Kazık taban alanı (m^2)

q_p = Kazık tabanında birim uç direnci (kPa veya kN/m^2)

- Kohezyonlu zeminlerde (killer):

$$q_p = N_c \cdot c_u \quad (3.2)$$

- Kohezyonsuz zeminlerde (kum, silt):

$$q_p = q' \cdot N_q \quad (3.3)$$

N_c, N_q = Taşıma gücü katsayıları

c_u = Drenajsız kohezyon (kPa)

q' = Kazık ucu seviyesindeki efektif örtü basıncı (kPa)

b. Nihai Sürtünme Direnci (Q_s)

$$Q_s = \sum (f_s \cdot A_s) \quad (3.4)$$

f_s = Birim çevre sürtünme direnci (kPa)

A_s = İlgili zemin tabakasında kazığın çevre alanı (m^2)

- Kohezyonlu zeminlerde:

$$f_s = \alpha \cdot c_u \quad (3.5)$$

- Kohezyonsuz zeminlerde:

$$f_s = K \cdot \sigma'_v \cdot \tan(\delta) \quad (3.6)$$

α = Adezyon faktörü (0.3-1.0 arası, zemine göre)

K = Yanal zemin basıncı katsayısı (genelde 0.5-1.0)

σ'_v = Düşey efektif gerilme (kPa)

δ = Zemin–kazık arası sürtünme açısı ($\approx 0.75 \cdot \phi$)

c. Toplam Nihai Taşıma Gücü (Q_u)

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (3.7)$$

d. İzin Verilebilir Taşıma Gücü (Q_a)

$$Q_a = Q_u / F_s \quad (3.8)$$

F_s = Güvenlik katsayısı (genelde 2.0-3.0 arası)

Reese ve O'Neill (1988) yöntemi, kazığın uç direncini klasik taşıma gücü katsayılarıyla; çevre sürtünmesini ise kohezyon veya efektif gerilme ile ilişkilendirerek hesaplar. Bu nedenle hem kum hem de kil zeminlerde uygulanabilmektedir.

3.3.1.2. Kulhawy ve Phoon (1993) yöntemi

Bu ampirik yaklaşım, zemin özelliklerini ve yükleme koşullarını kullanarak kazık taşıma kapasitesini tahmin etmek için kullanılır.

a. Nihai Uç Direnci (Q_p)

$$Q_p = A_p \cdot q_p \quad (3.9)$$

A_p = Kazık taban alanı (m^2)

q_p = Birim uç direnci (kPa)

- CPT tabanlı tanım:

$$q_p = q_c / F_q \quad (3.10)$$

q_c = CPT uç direnci (kPa)

F_q = Güvenlik veya korelasyon katsayısı (tipik 1.5-3 arası)

b. Nihai Sürtünme Direnci (Q_s)

$$Q_s = \Sigma (f_s \cdot A_s) \quad (3.11)$$

f_s = Birim çevre sürtünme direnci (kPa)

A_s = Kazık çevre alanı (m^2)

- CPT tabanlı tanım:

$$f_s = \beta \cdot \sigma'_v \quad (3.12)$$

β = Deneysel sürtünme katsayısı (0.2-0.5)

σ'_v = Düşey efektif gerilme (kPa)

- Alternatif olarak, CPT sürtünme oranı (R_f) kullanılır:

$$f_s = R_f \cdot q_c \quad (3.13)$$

$$R_f = f_c / q_c \quad (3.14)$$

f_c = CPT çevre sürtünmesi (kPa)

c. Toplam Nihai Taşıma Gücü (Q_u)

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (3.15)$$

d. İzin Verilebilir Taşıma Gücü (Q_a)

$$Q_a = Q_u / F_s \quad (3.16)$$

F_s = Güvenlik katsayısı (genelde 2.0-3.0 arası)

Kulhawy ve Phoon (1993) yöntemi, kazık taşıma gücünü CPT uç direnci (q_c) ve çevre sürtünmesi (f_c) verileri üzerinden hesaplar. Bu yaklaşım, özellikle SPT verilerinin belirsiz olduğu veya CPT'nin kullanıldığı zeminlerde daha güvenilir sonuçlar vermektedir.

Bu yöntemler dışında çeşitli ampirik formüller ve deneysel veriler, kazık taşıma kapasitesinin tahmininde kullanılabilir.

3.3.2. Kazık grup taşıma kapasitesi

Fore kazıklar birden fazla kazıktan oluşan gruplar halinde kullanıldığında, kazık grubu sisteminin taşıma kapasitesi, tekil kazıkların toplam kapasitesinden farklı olabilir. Bu durum, **grup etkisi** olarak adlandırılır. Grup taşıma kapasitesi, aşağıdaki iki temel kriterle değerlendirilir:

a) Taşıma Gücü (Q_{grup}):

- Kazıklar arası mesafe yeterince büyükse (genellikle $3D$ ve üzeri, D = kazık çapı), her kazık zemine bağımsız çalışır ve toplam kapasite $\approx n \times Q_{\text{tekil}}$ kabul edilebilir.
- Eğer kazıklar çok yakınsa, kazıklar arasındaki zemin etkileşimi nedeniyle taşıma kapasitesi $n \times Q_{\text{tekil}}$ 'den daha düşük olabilir (grup verimliliği $\eta < 1$).

b) Grup Verimi (η):

$$\eta = Q_{\text{grup}} / (n \times Q_{\text{tekil}}) \quad (3.17)$$

- Grup verimi zemin tipi, kazık aralıkları, kazık düzeni ve kazık boylarına bağlı olarak değişir.

Ayrıca kazık gruplarında **blok davranışı** gözlenebilir. Bu durumda grup, sanki tek bir büyük kazık gibi davranır ve çevresel sürtünme ile uç taşıma kapasitesi bu bloğa göre hesaplanır. Terzaghi blok yaklaşımı, kazık grubunun bir blok gibi davranarak nasıl yük taşıdığını analiz eder. Yük dağılımı ve etkileşimler dikkate alınarak grup taşıma kapasitesi belirlenir.

3.3.3. Kazık grubunun konsolidasyon oturması

Kazık grupları, zamanla meydana gelen konsolidasyon nedeniyle oturabilir. Bu durum, tasarımda dikkate alınmalı ve grup oturması analiz edilmelidir.

3.4. Kazık Yükleme Deneyleri

3.4.1. Statik kazık yükleme deneyi

Statik kazık yükleme deneyi, inşaat mühendisliğinde kazıkların zeminle olan etkileşimini ve taşıma kapasitesini belirlemek için kullanılan kritik bir test yöntemidir. Statik kazık yükleme deneyi, kazıkların taşıma kapasitesini ve zeminle olan etkileşim davranışını doğrudan ölçen bir saha testidir. Bu test, kazık temel sistemlerinin

güvenilirliğini değerlendirmede ve tasarım varsayımlarını doğrulamada hayati öneme sahiptir. Test sonuçları, mühendislerin daha doğru ve güvenli temel tasarımları yapmasına olanak tanır.

3.4.2. Kazık göçme yükü hesap kriteri

Kazık göçme yükü, kazığın taşıma kapasitesine ulaştığı ve daha fazla yük taşıyamadığı noktadır. Bu kriter, kazık yükleme deneyleri ve analitik hesaplamalarla belirlenir.

Her bir başlık, fore kazıklı temelin tasarımında ve uygulama aşamalarında dikkatlice ele alınmalıdır. Bu süreç, mühendislik analizleri ve saha uygulamaları ile desteklenerek yapı güvenliğini ve performansını en üst düzeye çıkarmayı amaçlar.

- **Deneyin yapılışı;**

Hazırlık Aşaması: Testin gerçekleştirileceği alan dikkatlice seçilir ve kazıklar yerleştirilir. Kazığın üzerine yükü uygulayacak olan donanım kurulur. Genellikle yükleme için hidrolik krikolar ve reaksiyon çerçeveleri kullanılır.

Yükleme Prosedürü:

- Sabit Yükleme (Hızlı) Testi: Bu yöntemde, yük kazık üzerine hızla uygulanır ve kazığın tepkisi izlenir. Bu yöntem, kısa sürede sonuç elde etmek için kullanılır.
- Kademeli Yükleme Testi: Bu daha yaygın kullanılan yöntemdir. Yük, belirli aralıklarla kademeli olarak artırılır. Her bir yük kademesinde kazığın yer değiştirmesi ölçülür ve stabilize olması için beklenir. Bu süreç, kazığın nihai taşıma kapasitesinin belirlenmesine yardımcı olur.

Veri Toplama: Yükleme sırasında kazığın yer değiştirmesi, genellikle lazer veya mekanik ölçüm cihazları ile hassas bir şekilde kaydedilir. Bu yer değiştirmeler, kazığın taşıma kapasitesini ve zemin-tepki davranışını anlamak için analiz edilir.

Veri Analizi: Toplanan veriler kullanılarak kazığın yük-yer değiştirme eğrisi oluşturulur. Bu eğri, kazığın taşıma kapasitesini belirlemede kullanılır. Eğrinin eğimi ve yük altında kazığın göçme durumu gibi özellikler dikkatle incelenir.

- **Testin Faydaları;**

Tasarım Doğrulama: Gerçek saha koşullarında yapılan bu test, tasarım aşamasında yapılan tahminlerin doğrulanmasına olanak tanır.

Güvenlik ve Dayanıklılık: Test sonuçları, yapıların güvenliğini artırmak için gerekli tasarım değişikliklerini belirlemede kullanılır. Yanlış tasarım varsayımlarından kaynaklanabilecek riskleri minimize eder.

Ekonomik Tasarım: Gereğinden fazla muhafazakâr tasarımlar yerine, optimize edilmiş ve ekonomik tasarımlar yapılmasına olanak sağlar.

- **Mazurkiewicz yöntemi ile göçme yükü hesabı;**

Kazık yükleme deneylerinin değerlendirilmesinde kullanılan en yaygın grafiksel yaklaşımlardan biri Mazurkiewicz yöntemidir (Mazurkiewicz, 1972). Bu yöntem, yük-oturma eğrisinin geometrik davranışını esas alarak, kazığın göçme yükünü (nihai taşıma kapasitesini) belirlemeyi amaçlar. Yöntem, deney verilerinden doğrudan elde edilen eğri üzerinde yapılan basit geometrik inşa adımlarına dayanır ve herhangi bir matematiksel formülasyona gerek duymaz.

Mazurkiewicz yaklaşımında öncelikle yük-oturma (Q-s) eğrisi çizilir. Bu eğri, kazığın yükleme aşamasında uygulanan kademeli yükler ile her kademe sonunda ölçülen oturmalar arasındaki ilişkiyi gösterir. Analiz yalnızca yükleme kolu üzerinden yürütülür; boşaltma kolu değerlendirmeye dâhil edilmez (Tomlinson ve Woodward, 2008).

Eğri üzerinde belirli eşit oturma aralıkları seçilir ve bu oturma değerlerine karşılık gelen noktalardan dikey doğrular çizilir. Her dikey doğrunun eğriyi kestiği noktadan itibaren yük eksenine paralel yatay doğrular çizilerek bir önceki yük düzeyine projeksiyon oluşturulur. Bu yatay doğruların yük eksenini kestiği noktalardan itibaren 45° eğimli doğrular çizilir ve bu doğrular bir sonraki dikey çizgiyi kesene kadar uzatılır. Böylelikle ardışık oturma adımları arasında bir dizi kesişim noktası elde edilir (Fellenius, 1980; Poulos ve Davis, 1980).

Elde edilen bu kesişim noktaları, yük-oturma eğrisinin doğrusal olmayan davranışının geometrik izdüşümünü temsil eder. Bu noktalar bir doğru ile birleştirildiğinde, çizginin yük eksenini kestiği noktanın ordinatı, kazığın göçme yükü (Q_{ult}) olarak kabul edilir. Bu noktadan sonraki yük artışlarında oturma değerinin hızla artması, kazığın plastik bölgeye geçtiğini ve nihai kapasiteye ulaşıldığını gösterir (De Beer, 1967; Mazurkiewicz, 1972).

Mazurkiewicz yöntemi, özellikle yük-oturma eğrisinin açık bir kırılma noktasının bulunmadığı durumlarda, nihai taşıma kapasitesini grafiksel olarak belirleyebilme özelliğiyle tercih edilir. Bu yönüyle De Beer (1967), Chin (1970) ve Davisson (1972) gibi diğer değerlendirme yöntemlerine tamamlayıcı niteliktedir. Yöntem basit, tekrarlanabilir ve mühendislik yorumu açısından sezgisel bir değerlendirme sağlar.

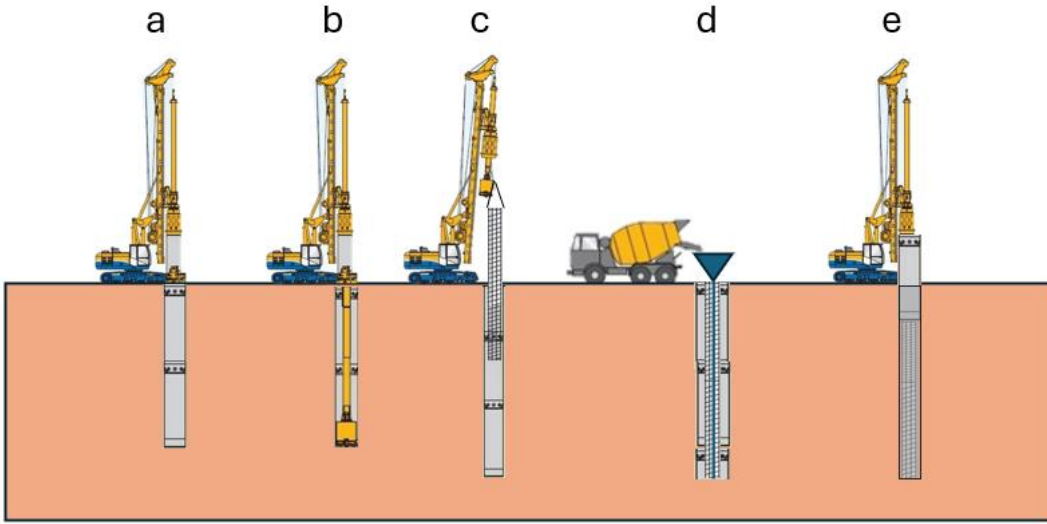


4. DELME (FORE) KAZIK İMALATINDA YAŞANAN ZORLUKLAR

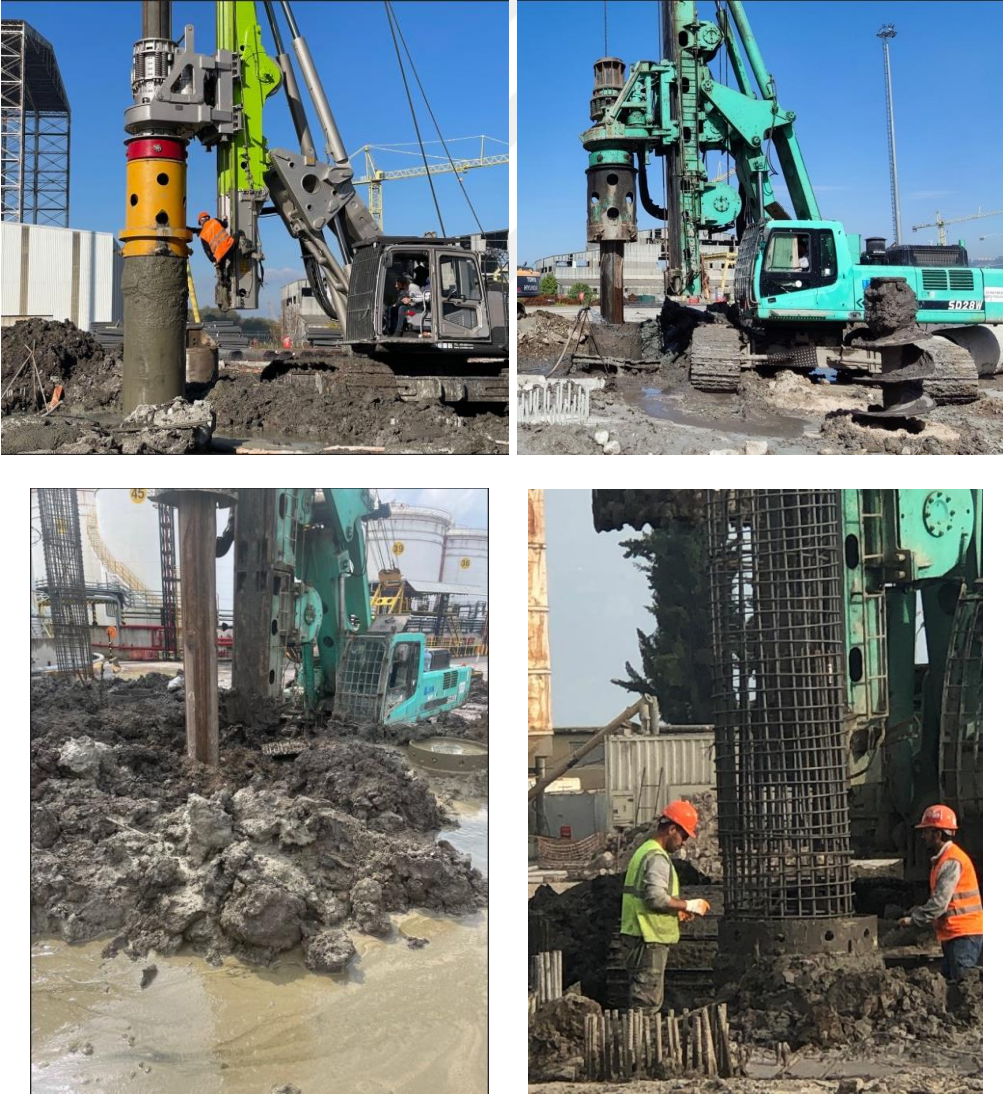
Delme kazıklar, zeminlerin kayma dirençlerinin yetersiz olduğu veya yapının aşırı oturma riski taşıdığı durumlarda tercih edilen, derin temel çözümlerinden biridir. Bu yöntemde yapıdan gelen yükler, kazıklar yardımıyla daha güvenli tabakalara aktarılırlar (Tomlinson ve Woodward, 2014). Fore kazıkların imalat süreci, kullanılan ekipman ve yöntemlerin yanı sıra, zemin profili, yeraltı suyu koşulları ve beton kalitesi gibi geoteknik ve malzeme özelliklerine bağlı olarak çeşitli zorluklar barındırabilir (Çelebi ve ark., 2017). Ayrıca, uygulama sırasında kuyu çökmesi, beton segregasyonu ve donatı yerleşiminde zorluklar ile karşılaşılabilir (Özcan ve Özdemir, 2023). Fore kazık imalatı Şekil 4.1.' de gösterilen 5 temel aşamadan oluşur: Muhafaza borusunun yerleştirilmesi, kuyunun foraj yöntemi ile açılması, kuyu içerisine hazırlanan demir donatının yerleştirilmesi, tremi borusu ile beton dökülmesi, muhafaza borusunun çıkartılması. Şekil 4.2.' de fore kazık imalatı ile ilgili örnek şantiye fotoğrafları gösterilmektedir.

İmalat sürecinde karşılaşılabilen bazı zorluklar şunlardır:

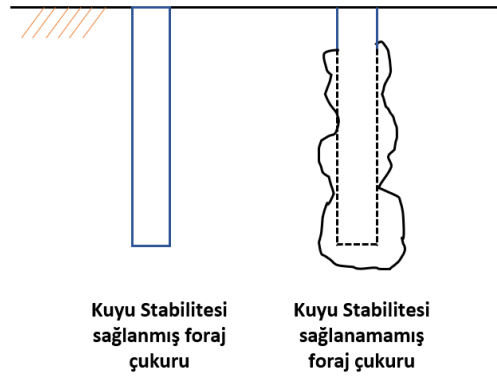
- Kuyu Stabilitésinin Sağlanması: Özellikle gevşek veya suya doymuş zeminlerde, kuyu duvarlarının şekil formu sağlanamazsa, kazık imalatı sırasında kuyu cidarında yıkıntılar, çöküntüler ortaya çıkabilir (Şekil 4.3.).
- Kuyu Çapaklanması veya Çatlamaı: Kuyu duvarlarının yeterli destekle stabilize edilmemesi nedeniyle çatlamlar veya zemin kopmaları.
- İyi Sızdırmazlık Sağlanamaması: Özellikle bentonit ve polimer kullanılırken, yeterince sızdırmazlık sağlanamazsa sıvı kaçakları nedeniyle kuyu sıvı dolgusu yetersiz kalır.
- Çalışma Alanındaki Kısıtlamalar: Çevredeki yapılar veya trafik nedeniyle imalat alanında hareket kısıtlamaları, zorluklar yaşanabilir.
- Ekipman ve Teçhizat Eksikliği: Güncel ve uygun ekipmanların olmaması işlem verimini ve kalitesini azaltabilir.



Şekil 4.1. Fore kazık imalatının şematik gösterimi.



Şekil 4.2. Fore kazık imalatı ile ilgili örnek şantiye fotoğrafları.



Şekil 4.3. Kuyu stabilitesi sağlanmış ve sağlanamamış foraj çukuru kesiti.

4.1. Kuyu Stabilitesinin Sağlanması

Fore kazık imalatında kuyu stabilitesinin sağlanması, yapı güvenliği ve inşaat sürecinin sağlıklı ilerlemesi açısından kritik öneme sahiptir. Özcan ve Özdemir (2023) çalışmalarında, fore kazık ve jet grout kolonlarında bütünlük deneyi uygulamalarıyla kuyu bütünlüğünün ve stabilitesinin değerlendirilmesine yönelik yöntemler ortaya koymuşlardır. Kuyu stabilitesinin sağlanması için öncelikle zemin özelliklerinin doğru tespiti, uygun sondaj ve destekleme yöntemlerinin kullanılması ve inşaat sırasında düzenli denetimler yapılması gerekmektedir. Mühendislerin saha tecrübesi ve teknik bilgisi, oluşabilecek stabilite sorunlarının erken tespiti ve önleyici tedbirlerin alınması açısından hayati öneme sahiptir. Bu süreçte, zeminin tepkisi ve hareketlerini dikkate alarak uygun stabilite önlemlerinin belirlenmesi, projede başarı ve güvenliğin sağlanması açısından temel unsurlardandır. Kuyu stabilitesinin sağlanması için zemin özelliklerine bağlı birkaç yöntem kullanılmaktadır.

4.1.1. Bentonit kullanımı

- Amacı: Yanal toprak basıncını dengelemek, kuyu duvarlarını stabil tutmak. Toprağın ve kuyu duvarlarının çevresinde yüksek sızdırmazlık sağlayarak, kuyu içindeki sıvı kaybını ve toprak sarkmasını önler.
- Avantajları:
 - Yüksek sızdırmazlık özelliği.
 - Uygulaması kolay ve maliyet açısından ekonomik.
- Dezavantajları:
 - Suyun yüksek miktarda kullanılmasını gerektirir.
 - Uzun sürede stabilite sorunlarına neden olabilir.
 - Çökeltme işlemi için belirli büyüklükte alana ihtiyaç duyar.

Fore kazık ve diyafram duvarlarda bentonit, Veder (1953) tarafından yapılan öncü çalışmadan bu yana kullanılmaktadır. Bentonit hazırlığında, toz halinde bulunan bentonit suyla karıştırılarak, genellikle %4-6 oranında bentonit ve %96-94 su içeren bir süspansiyon (çamur) elde edilir ve bu karışım, tanklarda 12-24 saat bekletilerek bentonitin tam şişmesi sağlanır. Kazı başlamadan önce veya kazı sırasında (fore kazık makinesiyle kazıya başlanmadan önce veya esnasında), hazırlanan bentonit çukuru doldurulur; bu, kazı ilerledikçe çamurun kazı çeperine baskı uygulayarak çökmesini önlemeyi amaçlar. Kazı sırasında ise bentonit sürekli pompa yardımıyla kazık çukuruna verilir ve üstten taşan sıvı tekrar tanklara alınarak dinlendirilir, böylece sistem sürekli döngü halinde işler. Bu döngü sırasında, bentonit çamurunun yoğunluğu ($1.03-1.10 \text{ g/cm}^3$), viskozitesi (Marsh hunisi ile yaklaşık 30-45 saniye), filtrasyon kaybı ve pH değeri (7-9 arasında) gibi özellikleri düzenli olarak kontrol edilir. Kazı tamamlandıktan sonra, donatı kafesi yerleştirilir ve beton döküm işlemi, tremi boruları kullanılarak yapılır; bu işlem sırasında bentonit çamuru üstten taşar ve alttan yukarı doğru çukuru doldurur. Çünkü beton, bentonitten daha yoğun olduğu için, aşağı doğru inerek çukuru doldururken, bentonit yukarı itilir ve dışarı alınır. Son olarak, dışarı alınan bentonit süspansiyonu kum, çimento ve zemin partiküllerinden arındırılır ve yeniden kullanıma hazır hale getirilir. (Bauer Maschinen GmbH, 2014; Burland ve ark., 2015).

Bentonit kullanımı için gereken havuz sayısı; uygulama hacmine, sistemin tasarımına ve kullanım amacına göre değişir. Temel olarak, genellikle iki veya üç havuz kullanılır. Birinci havuz; bentonit malzemesinin hazırlanması ve karıştırılması için kullanılır. İkinci havuz: bentonitin kullanıma hazır hale getirildiği, sirküle edildiği ve filtre edildiği çamurun toplandığı yer olarak görev yapar. Üçüncü havuz (opsiyonel): arıtılmış ve tekrar kullanım için hazır hale getirilen bentonitin toplandığı, arıtma ve depolama havuzudur. Bu havuzların kapladığı alan, imalat hızı ve çokluğuna göre değişiklik gösterilir. Ayrıca bu havuzlarla foraj kuyusu arasında, kuyudan çıkan kullanılmış bentoniti çökelme havuzuna ulaştırmak için tahliye kanallarının olması gerekmektedir.

Bentonit kullanımı her ne kadar kuyu stabilitesini sağlasa da proje tasarım aşamasında zemin türü ve sahanın fiziki durumu göz önünde bulundurularak kullanımı planlanmalıdır. Bentonit kullanımının farklı zemin türleri üzerindeki kullanım alanları Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Fore Kazık Uygulamalarında Zemin Tipine Bağlı Bentonit Kullanım Değerlendirmesi (Kraszewski, 2020; Abraham, 2021).

Zemin Türü	Bentonit Kullanımı Uygunluğu	Açıklama
Kum (İnce-Orta-İri)	Uygun	Kumlu zeminlerde stabilite sağlamak için bentonit etkili bir çözümdür.
Çakıl	Şartlı Uygun	Yüksek geçirgenlik nedeniyle bentonit kaçağı olabilir, destekleyici önlem gerekir.
Silt	Uygun	Stabilite için bentonit etkili, ancak sıvılaşma potansiyeline dikkat edilmeli.
Kil (Yumuşak-Orta Sert)	Şartlı Uygun	Zaten kohezyonlu olduğundan her durumda gerekli olmayabilir.
Sert Kil / Sert Zemin	Genellikle Gerekli Değil	Stabilite doğal olarak sağlanabilir, bentonit çoğu durumda kullanılmaz.
Kaya (Parçalanmış veya Sert)	Uygun Değil / Gerekli Değil	Kazı stabilitesi yüksek; bentonit gerekli değildir.
Organik Zeminler / Turba	Uygun Değil	Bentonit kararlılığı sağlayamaz; farklı yöntemler gerekir.
Yeraltı Su Seviyesi Yüksek Zeminler	Uygun	Bentonit, sıvı basıncına karşı çökme engellemede etkilidir.

4.1.2. Polimer kullanımı

- Amacı: Kuyu sıvısının akışkanlığını artırmak ve daha uzun süre stabil tutmak. Çabuk stabilizasyon sağlar, sıvı akışkanlığını ve yapışkanlığı artırır, toprak parçacıklarını tutar.
- Avantajları:
 - Çabuk ve etkili stabilite sağlar.
 - Çevre dostu alternatifler mevcuttur.
- Dezavantajları:
 - Maliyetleri daha yüksek olabilir.
 - Uygulama ve karışımında dikkat gerektirir.

Fore kazık imalatında kuyu stabilitesini sağlamak amacıyla kullanılan polimer bazlı sondaj sıvıları, özellikle düşük kohezyonlu veya geçirimsiz zeminlerde etkili sonuçlar verir. Polimer kullanımının farklı zemin türleri üzerindeki kullanım alanları Tablo 4.2.' de verilmiştir (Lam ve ark., 2015; Bustamante ve ark., 2020).

Uygulama süreci, polimer sıvısının hazırlanmasıyla başlar. Bu sıvı, genellikle şantiye sahasında bulunan özel karıştırma tanklarında veya çelik karıştırma havuzlarında hazırlanır. Temiz su, bu tanklara alınarak üretici firmanın önerdiği oranlarda polimer (çoğunlukla PHPA bazlı) yavaşça eklenir ve mekanik karıştırıcılarla homojen bir

karişım elde edilir. Sıvının yeterli viskozite ve akışkanlık özelliklerine ulaşabilmesi için belirli bir süre dinlendirilmesi gerekebilir. Hazırlanan polimer sıvısı, kazı esnasında açılan fore kazık kuyusuna pompalanarak kuyu cidarını desteklemek amacıyla kullanılır. Polimer sıvısı, cidarda ince bir jel tabakası oluşturarak zeminin kazı sırasında çökmesini veya dağılmasını önler, ayrıca süspansiyon kabiliyeti sayesinde kesif (yoğun ve ince daneli) malzemelerin dibe çökmesini engeller. Kazı tamamlandıktan sonra beton dökümüne geçilirken, tremi borusu kuyu tabanına yerleştirilir ve beton aşağıdan yukarıya doğru dökülürken, daha hafif olan polimer sıvısı betonun etkisiyle yukarı itilir ve kuyu ağzından taşarak dışarıya alınır. Kuyu ağzından çıkan bu sıvı, genellikle zemin kotuna yerleştirilmiş açık toplama kanalları veya geçici tahliye boruları aracılığıyla bir ara toplama çukuruna veya sıvı atık toplama tankına yönlendirilir. Buradan ise pompa sistemleri ile geri kazanım ünitesine (dekantör, elek sistemleri veya santrifüj cihazları) aktarılır. Bu  nitelerde polimer sıvısı içindeki kesif malzemelerden arındırılarak filtrelenir ve viskozite, yoğunluk gibi özellikleri kontrol edilerek yeniden kullanıma hazır hale getirilir. Bu süreç, hem sıvının ekonomik ve verimli kullanımını sağlar hem de çevresel atıkları azaltarak sürdürülebilir bir uygulama imk nı sunar (Smith ve Johnson, 2018; Lee ve ark., 2020).

Tablo 4.2. Fore Kazık Uygulamalarında Polimer Destek Sıvısının Kullanımı

Zemin Türü	Polimer Kullanımı Uygunluğu	Açıklama
Kum (�nce-Orta-Kaba)	Uygun	Polimer, düşük viskozite ile verimli kazı sağlar ve stabiliteyi destekler.
�akıl	şartlı Uygun	Yüksek geçirgenlik nedeniyle sıvı kaçağı riski vardır; özel polimer gerekebilir.
Silt	Uygun	Polimerler ��kme kontrolü sağlar, stabiliteyi artırır.
Kil (Yumuşak-Orta Sert)	şartlı Uygun	Kille reaksiyona girip jel oluşabilir; dikkatli seçim gerekir.
Sert Kil / Sert Zemin	Genellikle Gerekli Değil	Doğal stabilite yüksek; destek sıvısı gerekmez veya sınırlı kullanılır.
Kaya (Parçalanmış veya Sert)	Uygun Değil / Gerekli Değil	Stabilite yüksek; polimer kullanılmaz.
Organik Zeminler / Turba	Uygun Değil	Düşük taşıma kapasitesi ve yüksek bozulma riski; polimer etkisiz kalır.
Yeraltı Su Seviyesi Yüksek Zeminler	Uygun	Polimer, su geçirmez bir tabaka oluşturarak sıvı kontrolünü sağlar.

Polimer kullanımı her ne kadar kuyu stabilitesini sağlasa da proje tasarımı aşamasında zemin türü ve sahanın fiziki durumu göz önünde bulundurularak kullanımı planlanmalıdır.

4.1.3. Muhafaza borusu kullanımı

- Amacı: Kuyu duvarlarını desteklemek ve şekil bozukluğunu engellemek.
- Avantajları:
 - Kuyu stabilitesini artırır.
 - Özellikle derin kuyularda etkilidir.
- Dezavantajları:
 - Sürme ve çekme işlemlerinde ek zaman ve maliyet gerektirir.
 - Spesifik güçlü iş makinaları gerektirir.
 - Kuyuya desteklenen zeminin özelliğine göre belirli derinlikte yerleştirilir.
- Yerleştirme:
 - Kuyu açılırken, kuyu başı seviyesine getirilerek içeri yerleştirilir ve kuyu tamamlandıktan sonra sökülebilir veya kalıcı olabilir.

Fore kazık imalatında muhafaza borusu, kazık iç yüzeylerinin stabilizasyonu, zemin sıvılaşmasının önlenmesi ve kazık işlemlerinin kontrollü bir şekilde yürütülmesi amacıyla kullanılır. Bu boru, kazık delme işlemi sırasında genellikle dik bir şekilde yerleştirilir ve uzunluğu boyunca uzanır. İşlem sırasında, muhafaza borusu delme ve kazık gövdesinin oluşturulmasında zeminin hareketini engeller; böylece, kazık çapını ve şeklini koruyan bir iç boşluk sağlar. Beton döküm işlemi tamamlandıktan sonra, bazı durumlarda muhafaza borusu kesilir veya çıkarılır; bazen ise boru, kazık taşıyıcı veya koruyucu olarak kalmaya devam eder. Muhafaza borusunun kullanımı, özellikle yumuşak veya sıvılaşmaya yatkın zeminlerde, kazık iç yüzeyinin stabil kalmasını sağlamak, zemin sıvılaşmasını engellemek ve beton dökümünü kolaylaştırmak açısından oldukça önemlidir. Kısacası, bu boru, delme ve beton döküm işlemlerinin güvenli ve kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmesine imkân tanır (Kumar ve Singh, 2019; Li ve ark., 2020).

Muhafaza borusu genellikle kazının başlangıcında kısa bir derinliğe kadar yerleştirilir. Bentonit veya polimer çözeltileri kullanılan durumlarda bile, zemin çok gevşekse veya su seviyesi yüksekse boru kullanımı önerilir. Borunun kullanılacağı derinlik, alan için hazırlanmış geoteknik raporu esas alınarak belirlenmelidir. Şantiye koşullarına ve makine ekipmanına göre uygulamada farklılıklar olabilir. Muhafaza borusunun farklı zemin türleri için kullanım alanları Tablo 4.3.' de verilmiştir.

Tablo 4.3. Fore Kazıkta Muhafaza Borusu Kullanım Uygunluğu

Zemin Türü	Muhafaza Borusu Kullanımı	Açıklama
Gevşek Kum (Doygun)	Gerekli	Kazı sırasında çökmeyi ve su girişini önlemek için kullanılır.
Siltli Zeminler (Doygun)	Gerekli	Siltin akma eğilimi nedeniyle muhafaza borusu ile stabilite sağlanır.
Killi Zemin (Orta-Sert, Yumuşak)	Gerekli / Opsiyonel	Yumuşak killerde stabilite sorunları yaşanabileceği için önerilir. Sert killerde gerekmez.
Katı Kil (Sert, Tutarlı)	Gerekmez	Kazı stabilitesini doğal olarak sağlar.
Çakıl / Çakıllı Zemin (Doygun)	Gerekli	Suya doymuş çakıllı zeminlerde boşluklardan su ve zemin akışı nedeniyle önerilir.
Kaya Ortam	Gerekmez	Stabil yapıdadır, boruya ihtiyaç duyulmaz.
Karışık Zemin (Tabakalı Yapı)	Gerekli	Stabil olmayan tabakalar arasında geçişlerde güvenlik için kullanılır.
Yeraltı Su Seviyesi Yüksek Alanlar	Gerekli	Suyun etkisiyle zemin gevşeyebileceğinden boru kullanımı önerilir.

Muhafaza borusu zemin içerisine sürülebilse de zeminde kalma süresi ya da zemin özelliklerinden dolayı bazen çekilmesi zor ya da imkansız olabilmektedir. Eğer şantiyede çekme tork gücü yüksek bir iş makinesi bulunmuyorsa boruyu çekmek güç olabilir. Boru, beton dökümünden sonra çekildiği için eğer çekilmesi uzun sürerse betonun boru içinde priz almasından dolayı çekme işlemi daha da zor olabilir. Hatta prizi alan betonarme kazık muhafaza borusu ile kuyu dışına çıkabilir ve kazık iptal edilmek zorunda kalınıp yakın bir lokasyona yeniden imal edilmesi gerekir. Şekil 4.4.'de muhafaza borusu çekilirken kuyu dışına çıkan fore kazık gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Muhafaza borusu ile birlikte kuyu dışına çıkan kazık.

Fore kazıkların içerisine yerleştirilen donatıların projeye uygun imal edilmesi şarttır. Özellikle fret etriyenin uç kısımları boy donatısının içerisine kıvrılarak sıkıca bağlanmalıdır. Aksi takdirde muhafaza borusu çekilirken etriye ucu boruya takılarak bağ tellerinin kopmasına neden olur ve bağ telleri boy donatısından sıyrılarak kuyu dışına çıkabilir (Şekil 4.5.). Bu durumda da kazık iptal edilip yakın ve uygun lokasyona yeni kazık imal edilir.



Şekil 4.5. Muhafaza borusuna takılıp sıyrılan fret donatısı.

Muhafaza borusunun vibrasyon yardımıyla sürülmesi: Muhafaza borusunu sürmek ya da çekmek için yaşanan güçlüklerle karşı vibrasyon yöntemi de kullanılabilir. Vibrasyon kullanımı, muhafaza borusunun doğru konumda ve stabil şekilde yerleştirilebilmesi, çıkarılabilmesi için önemli bir teknolojidir. Vibrasyon başlığı muhafaza borusuna kenetlenerek titreşim boru boyunca aktarılarak sürme gerçekleşir (Şekil 4.6.).

Yöntemin Avantajları:

- Yapışma ve sürtünmeyi azaltır, borunun kolaylıkla yerleştirilip çıkarılmasını sağlar.
- Kuyu duvarlarının çatlamasını engeller ve kuyu stabilitesini artırır.
- Hızlı ve etkili uygulama sağlar, zaman kazandırır.

Dezavantajları:

- Vibrasyonun çevresel etkileri: Yakın çevredeki yapılar veya yer altı tesislerine zarar verebilir.
- Yüksek maliyet: Vibrasyon makineleri ve ekipmanlarının kullanımı maliyetlidir.
- Uygulama teknik gerektirir: Doğru frekans ve şiddet ayarları gerekir.



Şekil 4.6. Vibrasyon yöntemi ile muhafaza borusu çakılması / çekilmesi.

Fore kazık imalatında muhafaza borusunun zemine yerleştirilmesi ve kazık imalatı sonrası geri çekilmesi işlemlerinde vibrasyon kullanımı, özellikle zeminle temas yüzeylerinde sürtünmeyi azaltarak prosesi kolaylaştırmak amacıyla tercih edilmektedir. Bu yöntemde, uygun çap ve et kalınlığına sahip çelik muhafaza borusu, vibratör yardımıyla zemine düşey olarak sürülür. Vibrasyon uygulaması sırasında kullanılan ekipmanın frekans ve genlik değerleri, zeminin tipine göre optimize edilmeli; aşırı titreşimden kaynaklanabilecek zemin gevşemesi veya çevresel yapı hasarları göz önünde bulundurularak kontrol altında tutulmalıdır. Özellikle kohezyonsuz ve yüksek yeraltı su seviyesine sahip ortamlarda, muhafaza borusunun stabil şekilde sürülmesi ve etrafındaki zemin basıncının dengelenmesi için gerekirse bentonit veya polimer bazlı stabilite sıvıları kullanılmalıdır.

Kazık imalatı sürecinde, muhafaza borusu içindeki kazı işlemi uygun kazı ekipmanları ile kontrollü şekilde gerçekleştirilir. Kazı sonunda taban temizliği yapılarak temel

yüzeyinin betonlamaya hazır hale getirilmesi sağlanır. Donatı kafesi, muhafaza borusuna zarar vermeyecek şekilde şaft içine indirilir ve kafesin şaft ekseninden sapması engellenir. Betonlama işlemi tremi yöntemiyle gerçekleştirilerek, betonun segregasyona uğramadan şaftı doldurması sağlanır. Vibrasyonla borunun geri çekilmesi aşamasında, betonun yeterli kıvama ulaşmış olması ve borunun kontrollü hızda çekilmesi kritik öneme sahiptir. Aksi halde beton içerisinde boşluklar oluşabilir veya kafesin stabilitesi bozulabilir. Vibrasyonun sürekliliği ve şiddeti, donatı kafesi ile temasın önlenmesi ve borunun betonla birlikte yukarı sürüklenmemesi açısından titizlikle ayarlanmalıdır.

Geoteknik açıdan değerlendirildiğinde, vibrasyon uygulamasının zemin davranışı üzerindeki etkileri dikkatle analiz edilmelidir. Özellikle gevşek kumlu veya suya doygun zeminlerde vibrasyon, geçici taşıma gücü kayıplarına ve sıvılaşma riskine yol açabilir. Ayrıca kohezyonlu zeminlerde muhafaza borusunun çekilmesi sırasında boru yüzeyine yapışma (adezyon) etkisi nedeniyle kilitlenme yaşanabileceğinden, vibrasyonun bu etkiyi azaltacak seviyede olması gereklidir. Uygulama süresince, borunun çekilme hızı, vibrasyon parametreleri ve betonun yükselme durumu sürekli izlenmeli; kalite kontrol ekipleri tarafından deformasyon, boşluk oluşumu veya segregasyon gibi kusurların önüne geçilmelidir. Bu bağlamda, vibrasyonla muhafaza borusu uygulaması, zemin koşulları ve proje özelliklerine uygun şekilde tasarlanıp yürütüldüğünde, kazık imalatında hem verimliliği artıran hem de iş güvenliği ve kaliteyi destekleyen etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Fellenius, 2017; Zhou ve Zhang, 2018).



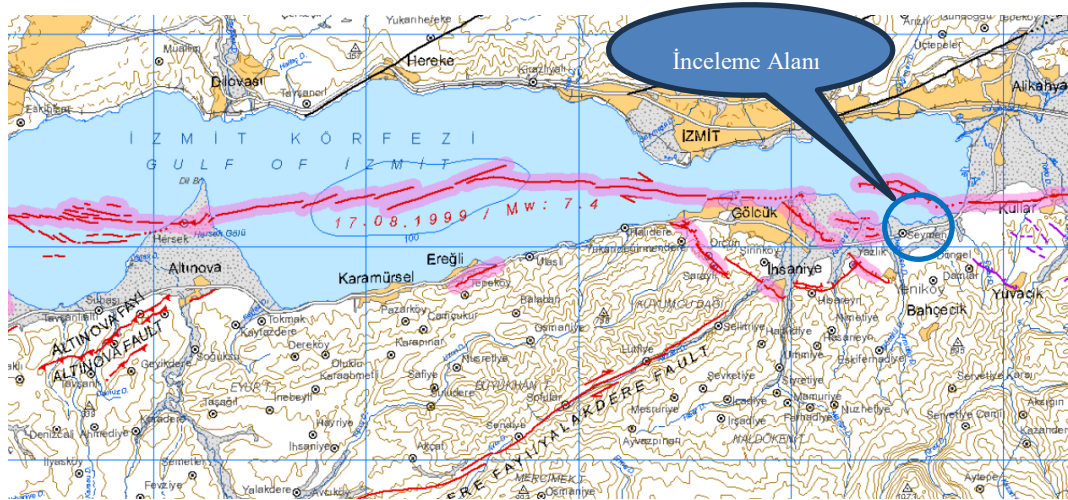
5. JET GROUT İÇERİSİNDE TEŞKİL EDİLEN FORE KAZIKLARIN PERFORMANSLARININ İRDELENMESİ

Bu bölümde fore kazık imalatları sırasında kuyu stabilitesinin jet grout kolonları ile sağlanması ve önceden imal edilmiş jet grout kolonları içerisine imal edilen fore kazıkların performansları bir vaka analizi özelinde incelenmektedir.

5.1. Proje ve Proje Sahası Hakkında Bilgiler

İkameti Kocaeli ilinde olan bir limanda, sıvı kimyasal depolama ve elleçleme faaliyetleri yürütülmektedir. Limanda 300-10000 m³ arasında değişkenlik gösteren toplam 85 adet sıvı kimyasal depolama silosu bulunmaktadır.

Silo yapıları genel olarak gereken durumlarda zemin iyileştirme, betonarme temel sistemi, silindirik çelik yapı ve MEP (Mechanical, Electrical, Plumbing) kısımlarından oluşmaktadır. Yapının temel altı gerilmelerine göre çok daha zayıf olduğu zeminlerde, zemin iyileştirme ya da derin temel sistemlerinin kullanılması kaçınılmaz olmaktadır. Özellikle deprem bölgesinde hem deprem sırasında hem de sonrasında silo içerisindeki sıvıların çalkalanması sonucu ciddi momentler ve buna bağlı kuvvetler ortaya çıkmaktadır. İnceleme sahası Marmara bölgesi, Kocaeli ili, Körfez bölgesindedir. Marmara Denizi içinde yer alan ve basitleştirilmiş aktif fay sistemine göre inceleme sahasının konumu doğrultu atım fay etkisinde yer almaktadır (Şekil 5.1.).

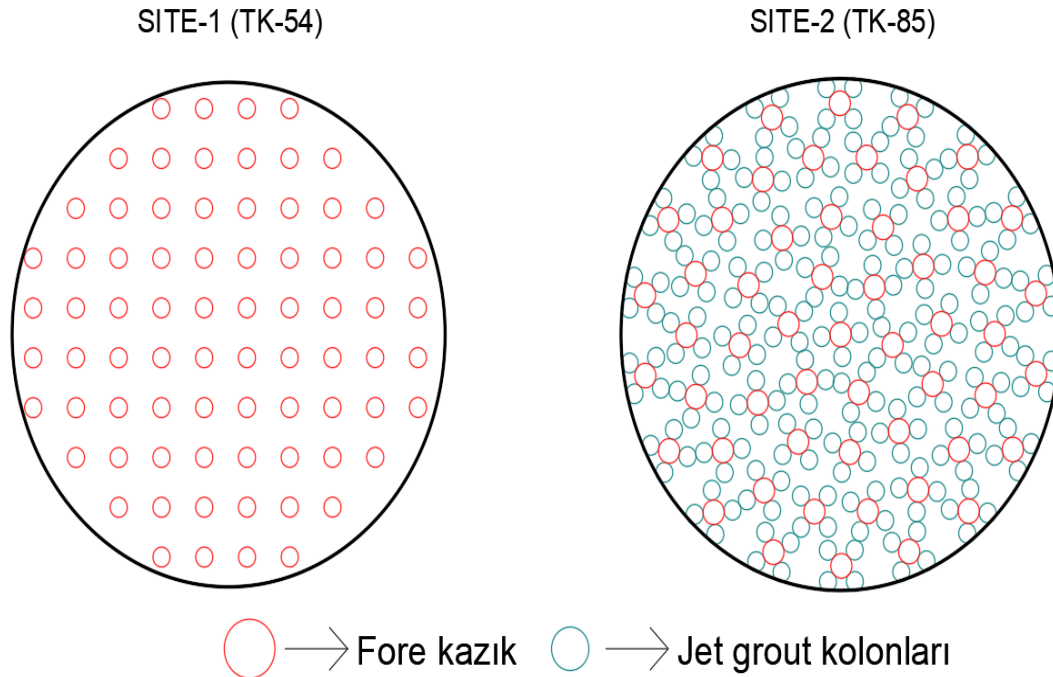


Şekil 5.1. AFAD Türkiye diri fay haritası (Bursa NK35-12).

Araştırma yapılan saha Kocaeli ilinde deniz kıyısında bulunmaktadır. Jeomorfolojik olarak değerlendirildiğinde düz bir topoğrafyaya sahiptir. Bu çalışmadaki araştırma sahası yaklaşık 20.000 m² olup iki komşu siteden oluşmaktadır. Siloların inşa edildiği alanda zemin iyileştirmesi yapılmış ve derin temel sistemi kullanılarak yapı inşası tamamlanmıştır.

Site-1’ de üç farklı hacimden oluşan toplam 18 adet sıvı kimyasal depolama silosu mevcuttur. Silolar derin temel sistemi olan fore kazıkların üzerine inşa edilmiştir. Site-2’ de ise üç farklı hacimde, üç farklı yoğunlukta malzeme taşıyan toplam 22 adet sıvı kimyasal depolama siloları mevcuttur. Bu sitedeki silolar önceden imal edilmiş jet grout kolonları içerisinde imal edilmiş fore kazıklı derin temel üzerinde inşa edilmiştir. Siloların özellikleri Tablo 5.1.’ de verilmiştir. Şekil 5.2.’ de silo temelleri altında inşa edilen kazık ve jet grout kolonlarının plan görüntüsü verilmektedir.

Tablo 5.1.’ de görüldüğü üzere, her iki sitedeki yapıların çapları, hacimleri ve depolanacak sıvıların yoğunlukları farklılık göstermektedir. Silolara sıvı kimyasal olarak asit, baz ve alkol türevleri depolanmaktadır. Siloların dizayn yoğunlukları, depolanacak sıvı ürünlerin cinsine göre 1 ton/m³, 1.5 ton/m³ ve 1.8 ton/m³’ tür. Bu farklılıklar nedeniyle, taban gerilmeleri de değişiklik arz etmektedir. Statik yüklerden kaynaklanan taban gerilmeleri 132 kPa ile 388 kPa arasında değişmektedir.



Şekil 5.2. Silo temelleri altında kazık ve jet grout kolonlarının plan görüntüsü.

Tablo 5.1. Site-1 ve Site-2'deki siloların özellikleri

	Silo Çapı (m)	Silo Yüksekliği (m)	Silo Hacmi (m ³)	Silo Adedi	Depolanacak Sıvı Yoğunluğu (t/m ³)	Statik Yük (kN)	Taban Gerilmesi (kPa)
Site 1	13.40	13.50	1904	7	1	18678	132
	17.20	18.00	4182	6	1	41025	176
	23.00	24.00	9971	5	1	97815	235
Site 2	11.14	16.00	1559	5	1	15303	157
	11.14	16.00	1559	2	1.5	22955	235
	12.41	18.00	2177	4	1	21375	176
	12.41	18.00	2177	2	1.5	32063	265
	12.41	18.00	2177	2	1.8	38476	318
	15.28	22.00	4034	4	1	9573	215
	15.28	22.00	4034	1	1.5	59360	323
	15.28	22.00	4034	2	1.8	71232	388

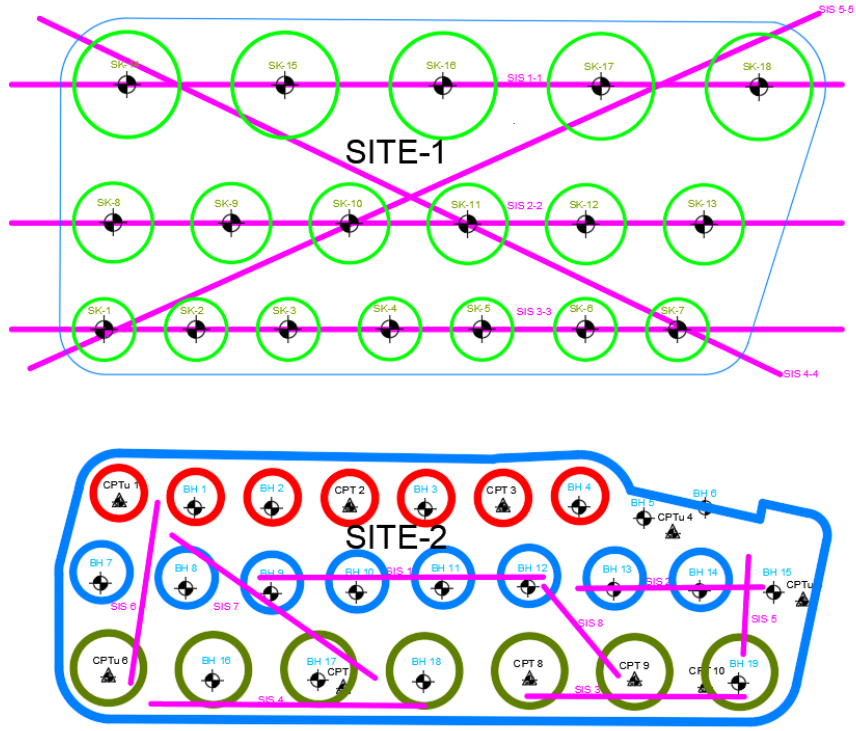
5.2. Zemin Araştırmaları ve Zemin Özellikleri

5.2.1. Arazi çalışmaları

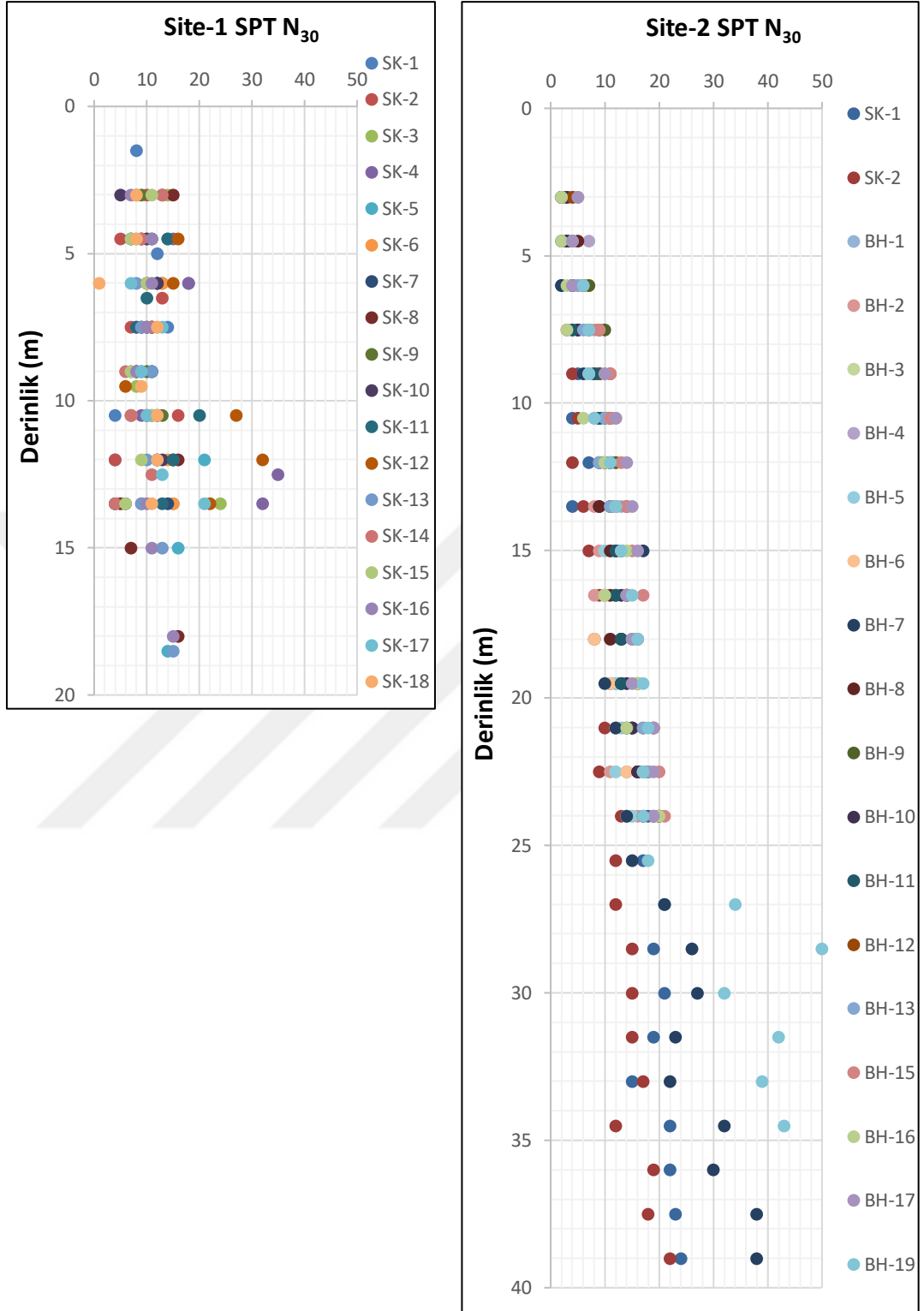
Araştırma sahası olan Site-1' de 18 adet ve Site-2' de 19 adet olmak üzere toplam 37 adet sondaj, Site-2' de 10 adet CPT deneyi, Site-1' de 5 adet ve Site 2' de 8 adet olmak üzere toplamda 13 adet MASW sismik ölçüm yapılmıştır (Tablo 5.2.). Arazi deneylerine ait vaziyet planı Şekil 5.3.'deki gibidir. Tüm alan için sondaj sonuçlarına bakıldığında zeminin 0-20 metre arasında çok yumuşak siltli yüksek plastisiteli kil, 20-30 metre arasında orta katı ve 30-40 metre arasında çok katı kil olduğu gözlemlenmiştir. Tüm alanda SPT N₃₀ değerleri 0-20 metre arasında genelde 4-25, 20-30 metre arasında genelde 10-27 ve 30-40 metre arasında çoğunlukla 10-30 olarak ölçülmüştür. Yeraltı su seviyeleri de 1.5-3 metre arasında değişmektedir. Tez çalışmasına yönelik olarak Site-1 ve Site-2' de ölçülmüş SPT değerleri grafiği Şekil 5.4.'de verilmektedir.

Tablo 5.2. İnceleme alanında yapılan zemin çalışmaları.

	SONDAJ	CPT	MASW
SİTE-1	18 adet	-	5 adet
SİTE-2	19 adet	10 adet	8 adet



Şekil 5.3. Arazi deneyleri vaziyet planı.



Şekil 5.4. SPT deneylerine ait derinliğe bağlı SPT N_{30} grafiği.

Ölçümü yapılan 13 adet MASW jeofizik ölçümünde V_{s30} değerleri 173-227 m/s bulunmuştur. MASW ölçüm değerleri Tablo 5.3.' deki gibidir.

Tablo 5.3. MASW ölçüm değerleri.

Site	Hat	V _{s30} (m/sn)	Site	Hat	V _{s30} (m/sn)
Site-1	SIS 1-1	202	Site-2	SIS 1	196
	SIS 2-2	202		SIS 2	215
	SIS 3-3	189		SIS 3	213
	SIS 4-4	200		SIS 4	173
	SIS 5-5	199		SIS 5	226
				SIS 6	208
				SIS 7	197
				SIS 8	227

Yapılan saha çalışmalarında görüldüğü üzere Site-1 ve Site-2' nin zemin özellikleri benzerdir. Alanda birçok saha deneyi yapılsa da tez çalışması kapsamında Site-1 ve Site-2' deki birer silo örnek olarak seçilmiş ve bu silolarda yapılan tüm çalışmalar detaylandırılmıştır. Sitelerde seçilmiş silolar ve yapılmış saha araştırmaları Tablo 5.4.' te, Site-1 ve Site-2 için idealize zemin profili ve zemin özellikleri Tablo 5.5. ve Tablo 5.6.' da verilmiştir.

Tablo 5.4. Sitelerde seçilmiş silo ve saha araştırmaları.

Site	Silo No	SPT No	MASW No	PLT No
Site-1	TK-54	SK-11	Sis 2-2, Sis 4-4	PLT-TK-54
Site-2	TK-85	BH-19	Sis 3, Sis 5	PLT-TK-85

Tablo 5.5. Site-1 idealize zemin profili ve zemin özellikleri.

Zemin Katmanı	Zemin Cinsi	Birim Hacim Ağırlık	Kayma Direnci Açısı	Elastisite Modülü	Drenajsız Kayma Mukavemeti	Kayma Dalgası Hızı	SPT _{N30}
m		γ_n (kN/m ³)	ϕ' (°)	E (kg/cm ²)	c_u (kPa)	V_s (m/sn)	
0-8	Killi Kum / Kumlu Killi Silt	17	28	30	-	150-180	5-17
8-10	Az Çakıllı Kumlu Kil/Silt	18	0	20	25	190-210	9-12
10-20	Yüksek Plastisiteli Siltli Kil	18	0	50	50	240	13-15

Tablo 5.6. Site-2 idealize zemin profili ve zemin özellikleri.

Zemin Katmanı	Zemin Cinsi	Birim Hacim Ağırlık γ_n (kN/m ³)	Kayma Direnci Açısı ϕ' (°)	Elastisite Modülü E (kg/cm ²)	Drenajsız Kayma Mukavemeti c_u (kPa)	Kayma Dalgası Hızı V_s (m/sn)	SPT _{N30}
0-3	Dolgu	19	28-30	75	-	160-180	3-5
3-7.5	Çok Yumuşak Siltli Kil/Çok Gevşek Killi Silt	18	28	60	-	160-180	4-8
7.5-15	Çok Yumuşak-Yumuşak Kil	17	0	20	15	150-160	6-17
15-21	Orta Katı Kil	18	0	50	50	180	6-15
21-24	Gevşek-Orta Sıkı Siltli Killi Kum	18	30	650	-	200	13-20
24-33	Orta Katı Kil	18	0	60	60	180-200	13-30
33-36	Orta Sıkı Siltli Killi Kum	18	30-32	750	-	210-220	12-30
36-40	Katı Kil	19	0	80	80	225	17-39

Tez çalışması için seçilen Site-1 ve Site-2 sahalarında yapılan zemin araştırmaları kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, zemin koşullarının mühendislik tasarımına etkilerini anlamak açısından önemli bulgular sunmaktadır. Site-1’ de sondaj derinliği maksimum 20 m iken Site-2’ de bu değer 40 m’ ye kadar ulaşmıştır. Site-1’de 0-8 m aralığında SPT N₃₀ değerleri genellikle 5-16 seviyelerinde seyretmiş, 8-10 m derinliklerde 6-11 arasında ve sonrasında 20 m derinliğe kadar genellikle 9-22 aralığında elde edilmiştir. Bu durum, Site-1 zeminlerinin özellikle üst seviyelerde oldukça yumuşak ve düşük kayma direncine sahip olduğunu göstermektedir. Site-2’de ise SPT N₃₀ değerleri yüzeyden 25 m derinliğe kadar düzenli bir artış göstermekte ve bu aralıkta değerler 3’ ten 21’ e doğru değişmektedir. Bundan sonraki derinliklerde 12 ile 27 arasında değerler elde edilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, Site-2’nin taban basınçlarının yüksek değerleri göz önüne alındığında ilk 16 metrelik kısmında zemin özelliklerinin yetersiz olduğu tespit edilmiş ve bu nedenle fore kazıkların imalatı öncesinde 80 cm çapında jet grout kolonları ile zemin iyileştirmesi yapılmıştır.

Ayrıca Site-2’de 10 adet CPT (Cone Penetration Test) yapılmış olması, zeminin taşıma gücü ve tabakalanma yapısının daha hassas şekilde belirlenmesini sağlamıştır. MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) verileri ise Site-1 için 189-208 m/s, Site-2 için ise 173-226 m/s aralığında V_{s30} değerleri sunmuş, bu da zemin rijitliği açısından benzer düzeyde olduklarını ancak iyileştirme yapılan bölgelerde daha dengeli bir davranış sağlandığını ortaya koymuştur. Her iki sahada da USCS sınıflamasına göre yüksek plastisiteli kil (CH) zemin türü hakimdir ve bu zemin tipi düşük drenaj

kapasitesi, yüksek oturma potansiyeli ve uzun konsolidasyon süresi gibi mühendislik açısından zayıf özellikler göstermektedir. Tüm bu veriler doğrultusunda, Site-2' de jet grout destekli hibrit temel sisteminin uygulanması, yalnızca kazık taşıma kapasitesini artırmakla kalmamış, aynı zamanda zemin koşullarının iyileştirilmesini sağlayarak kazık imalatı sürecinde kuyu stabilitesini de desteklemiştir.

Özetle Site-1 ve Site-2 için yapılan arazi ve laboratuvar çalışmaları sonucunda, yüzeysel temellerin güvenli taşıma kapasitesinin, gelen yüklerin oldukça altında olduğu tespit edilmiştir.

5.2.2. Kazık kapasitesinin hesabı

Yumuşak veya gevşek zeminlerde uç direnci alamayan fore kazık zeminde tutunmakta zorluk çeker. Tez çalışmasının yürütüldüğü çalışma alanında da kendini tutamayan ortamda fore kazık imalatının yapılmasında ve taşıma kapasitesini sağlamakta zorluk yaşanmıştır.

Site-1' de klasik yöntemle hesaplanan taşıma kapasitesi 95 tondur. Bu yöntemle hesaplanarak imal edilen fore kazık, saha yükleme deneyi ile doğrulanmış ve proje sonlanmıştır. Ancak aynı zemin sahasında bulunan Site-2' de fore kazığın taşıma kapasite ihtiyacı yaklaşık 180 tondur. Kısa vade için yapılan kazık kapasite hesaplarında 0-7.5 m arasındaki zeminin drenajsız kayma direnci altındaki zemine eşit kabul edilmiştir. Diğer benzer zeminlerde de aynı kabul yapılmıştır. Buna göre herhangi bir iyileştirme yapılmadan ilerlenilen projede hesap yapılırken 180 tonluk taşıma kapasitesi gereken fore kazık çapı 100 cm ve boyu 40 metre çıkmaktadır (FS=2). İlk 16 m' si çok yumuşak olan ortamda bu kısmın jet groutlar ile iyileştirilmesi sonrasında kompozit ortam yaklaşımıyla fore kazık kapasitesi hesaplanmıştır. Buna göre 180 tonluk kapasitenin, 100 cm çap ve 31 metre boya sahip fore kazık ile sağlanması öngörülmüştür. Kompozit ortam formülü uygulanırken güvenlik sayısı 2 alınmıştır.

Fore kazık kapasitesi Terzaghi'nin kohezyonlu zeminlerde uyguladığı hesap yöntemine göre Site-2 için;

İyileştirme yapılmamış zeminde

- Uç Direnci (Q_p)

Kazık çapı=100 cm, boyu=40 m, $N_c = 9$, $c_u = 80$ kPa

$$Q_p = 9 \times 80 \times 0.785 = 565.49 \text{ kN}$$

- **Sürtünme Direnci (Q_s):**

0-7.5 m arası ($\alpha = 0.25$, $c_u=15$ kPa) (karma zemin yaklaşımı):

$$Q_{s1} = 15 \times 0.25 \times 3.1415 \times 7.5 = 88.36 \text{ kN}$$

7.5-15 m arası ($\alpha = 1$, $c_u=15$ kPa)

$$Q_{s2} = 15 \times 1 \times 3.1415 \times 7.5 = 353.42 \text{ kN}$$

15-21 m arası ($\alpha = 0.8$, $c_u=50$ kPa)

$$Q_{s3} = 50 \times 0.8 \times 3.1415 \times 6 = 753.98 \text{ kN}$$

21-24 m arası ($\alpha = 0.25$, $c_u=50$ kPa) (karma zemin yaklaşımı):

$$Q_{s4} = 50 \times 0.25 \times 3.1415 \times 3 = 117.81 \text{ kN}$$

24-33 m arası ($\alpha = 0.6$, $c_u=60$ kPa)

$$Q_{s5} = 60 \times 0.6 \times 3.1415 \times 9 = 1017.88 \text{ kN}$$

33-36 m arası ($\alpha = 0.25$, $c_u=60$ kPa) (karma zemin yaklaşımı):

$$Q_{s6} = 60 \times 0.25 \times 3.1415 \times 3 = 141.37 \text{ kN}$$

36-40 m arası ($\alpha = 0.55$, $c_u=80$ kPa)

$$Q_{s7} = 80 \times 0.55 \times 3.1415 \times 4 = 552.9 \text{ kN}$$

$$Q_s = 3025.66 \text{ kN}$$

$$Q_p = 565.49 \text{ kN}$$

$$Q_u = 3591.14 \text{ kN}$$

$$FS = 2$$

$$Q_a = 1795.57 \text{ kN} = 183.03 \text{ ton}$$

İyileştirme yapılan zeminde

- Kompozit ortam yaklaşımı

$$c_{u \text{ kompozit}} = R \times c_{u \text{ jet}} + (1-R) \times c_{u \text{ doğal}} \quad (5.1)$$

$c_{u \text{ kompozit}}$: Jet grout + doğal zeminden oluşan kompozit zeminin tahmini drenajsız kayma mukavemeti (c_u) değeridir.

R: Jet grout kolonlarının zemindeki alan oranı, yani iyileştirme oranıdır (0 ile 1 arasında bir değerdir).

$c_{u \text{ jet}}$: Jet grout kolon içindeki tahmini drenajsız kayma mukavemeti (c_u) değeridir.

$c_{u \text{ doğal}}$: Jet grout öncesi doğal zeminin drenajsız kayma mukavemeti (c_u) değeridir.

Farklı zemin cinslerinde yapılan imalat sonucu farklı dayanımlar elde edilebileceğinden jet groutun drenajsız kayma direnci de değişiklik gösterecektir. Tablo 5.7.' de farklı zeminlerde yapılan imalatlar sonrası elde edilen dayanımlara örnekler verilmiştir. Bu tez çalışmasında incelenen alanda jet grout imalatı yapılan zeminler kil zeminler olduğundan Tablo 5.7.' deki değerler göz önünde tutularak 400 kPa' lık bir ortalama değer ile kompozit ortam için hesap yapılmıştır.

Tablo 5.7. Jet grout kolonları için tipik drenajsız kayma direnci aralıkları.

Zemin Türü (Orişinal Zemin)	Jet Grout Tipi / Kalitesi	UCS (MPa)	Yaklaşık c_u (kPa)	Kaynak
Yumuşak kil / organik zemin	Düşük basınç, düşük çimento (zayıf kolon)	0.5-1.0	250-500	EuroSoilStab (2002), FHWA (2005)
Yumuşak - orta plastisiteli kil	Orta kalite jet grout	1.0-2.0	500-1000	Bruce ve Bruce (2003)
Siltli zemin / kumlu silt	Orta-iyi kalite	1.5-3.0	750-1500	FHWA-NHI-05-041 (2005)
Kumlu - çakıllı zemin	Yüksek basınç, iyi karışım	2.0-5.0	1000-2500	Xanthakos (1994), Bruce (2012)
Çok iyi çimentolanmış (ör. tek enjeksiyonla bile güçlü karışım)	Yüksek dayanımlı grout	3.0-6.0	1500-3000	FHWA (2005), Hayward Baker Reports
Kötü karışmış veya heterojen kolon	Düşük kalite	0.3-0.8	150-400	Bruce ve Bruce (2003)

- R değeri hesaplama;

Jet grout çapı 80 cm, jet grout adedi 4, karelaj s: 1.27 m

$$R = (0.8^2 \times 3.1415 / 4) / (1.27 \times 1.27) = 0.31$$

- c_u kompozit hesaplama;

$$0-15 \text{ m; } c_u \text{ kompozit} = 0.31 \times 400 + (1 - 0.31) \times 15 = 134.46 \text{ kPa}$$

$$15-16 \text{ m; } c_u \text{ kompozit} = 0.31 \times 400 + (1 - 0.31) \times 50 = 158.60 \text{ kPa}$$

- Uç Direnci (Q_p)

Kazık Çapı=100 cm, boyu=31 m, $N_c = 9$, $c_u = 60$ kPa

$$Q_p = 9 \times 60 \times 0.785 = 424.12 \text{ kN}$$

- **Sürtünme Direnci (Q_s):**

0-7.5 m arası ($\alpha = 0.25$, $c_u=134.46$ kPa) (karma zemin yaklaşımı):

$$Q_{s1} = 134.46 \times 0.25 \times 3.1415 \times 7.5 = 792.01 \text{ kN}$$

7.5-15 m arası ($\alpha = 0.30$, $c_u=134.46$ kPa)

$$Q_{s2} = 134.46 \times 0.30 \times 3.1415 \times 7.5 = 950.41 \text{ kN}$$

15-16 m arası ($\alpha = 0.30$, $c_u=158.60$ kPa)

$$Q_{s3} = 158.60 \times 0.3 \times 3.1415 \times 1 = 149.47 \text{ kN}$$

16-21 m arası ($\alpha = 0.80$, $c_u=50$ kPa):

$$Q_{s4} = 50 \times 0.8 \times 3.1415 \times 5 = 628.3 \text{ kN}$$

21-24 m arası ($\alpha = 0.3$, $c_u=50$ kPa) (karma zemin yaklaşımı):

$$Q_{s5} = 50 \times 0.3 \times 3.1415 \times 3 = 141.37 \text{ kN}$$

24-31 m arası ($\alpha = 0.64$, $c_u=60$ kPa)

$$Q_{s6} = 60 \times 0.64 \times 3.1415 \times 7 = 844.44 \text{ kN}$$

$$Q_s = 3506.00 \text{ kN}$$

- **Kazık kapasitesi (Q_u):**

$$Q_u = 3930.12 \text{ kN}$$

$$FS=2$$

$$Q_a = 1965.06 \text{ kN} = 200.31 \text{ ton}$$

5.2.3. Kazık yükleme deneylerinin yorumlanması

Arazi çalışmalarında, Site-1 (PLT-TK-54) ve Site-2 (PLT-TK-85) bölgelerinin her birinde birer adet eksenel statik basınç yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Yükleme deneyleri, ASTM D1143 (2020) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş ve deney yükleri, reaksiyon kazıkları ile sağlanmıştır.

Her bir test kazığı üzerine, yük aktarımını sağlamak amacıyla donatılı betonarme başlık imal edilmiş, yük aktarımı ise çelik taşıyıcı kirişler ve hidrolik kriko sistemleri aracılığıyla yapılmıştır. Deneyler süresince, 0.01 mm hassasiyetinde ölçüm yapabilen dört adet komparatör kullanılmış ve kazık başındaki yer değiştirmeler bu cihazlarla

ölçülerek ortalaması alınmak suretiyle değerlendirilmiştir. Doğru ve güvenilir ölçüm verileri elde edilebilmesi için, komparatörlerin yerleştirildiği bağımsız referans kirişleri, test kazığının deformasyonundan etkilenmeyecek şekilde mesafeli olarak kurulmuş; bu kirişlerin bir ucu sabitlenmiş, diğer ucu ise mafsallı destekle sabitlenmiştir.

Deney süresince, reaksiyon kazıklarının ve test sisteminin davranışı, her yük kademesi değişiminde ya da belirli zaman aralıklarında optik gözlemlerle takip edilmiştir. Böylece sistem stabilitesi detaylı biçimde izlenmiş ve olası sapmalar kontrol altına alınmıştır.

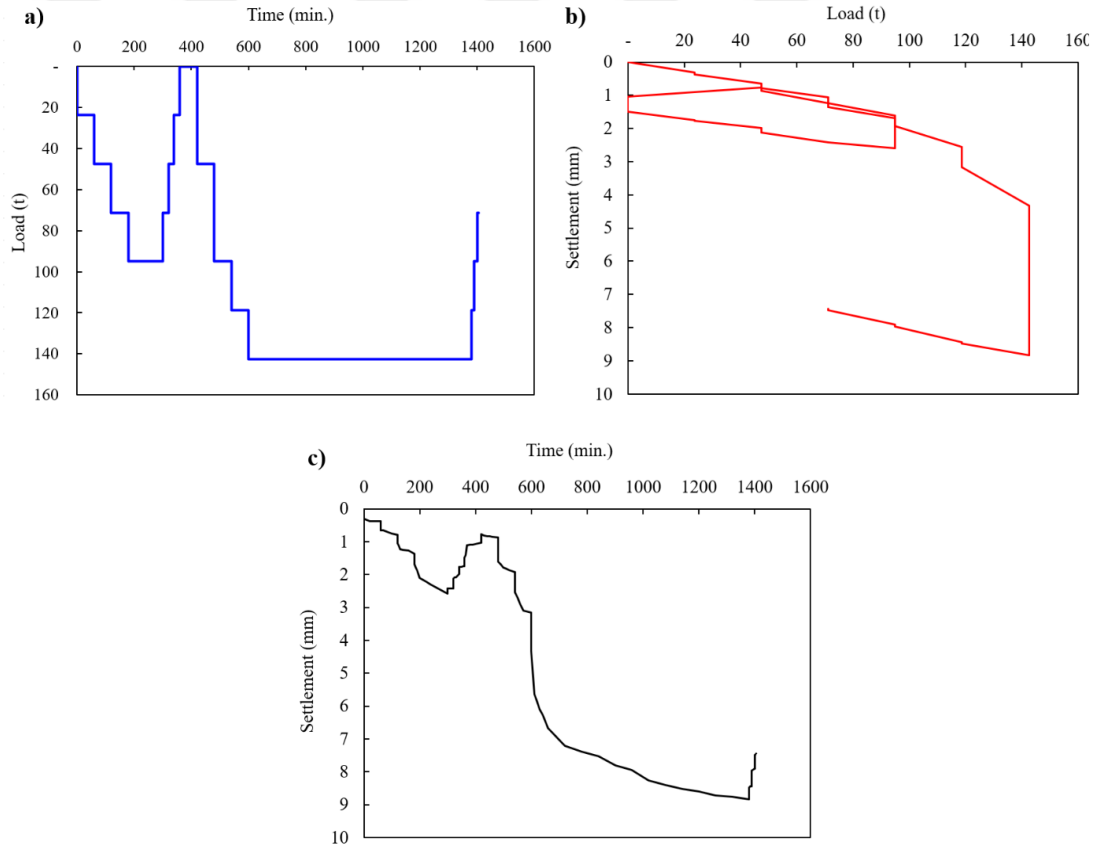
Site-1’ de, iyileştirme yapılmamış alanda inşa edilen fore kazık, 80 cm çapında ve 24 m uzunluğundadır. Sahada yapılan SPT (Standart Penetrasyon Testi) verilerine göre bu kazığın taşıma kapasitesi yaklaşık 95 ton olarak belirlenmiştir. Ancak yapılan yükleme denemesinde, kazık 1.5 kat güvenlik katsayısı ile 142.5 ton yükleme seviyesine kadar test edilmiştir. Deneye ait yük-oturma tablosu Tablo 5.8.’ de, eğrileri ve diğer grafiksel veriler Şekil 5.5.’ te sunulmaktadır.

Tablo 5.8. Kazık Yükleme Deneyi Veri Tablosu (PLT-TK-54)

Yük (t)	Oturma (mm)	Zaman (dk)	Yük (t)	Oturma (mm)	Zaman (dk)	Yük (t)	Oturma (mm)	Zaman (dk)
0	0	0	47.5	2.05	335	142.5	5.85	620
23.75	0.31	0	47.5	1.98	340	142.5	6.1	630
23.75	0.32	5	23.75	1.77	340	142.5	6.28	640
23.75	0.34	10	23.75	1.77	345	142.5	6.67	660
23.75	0.37	20	23.75	1.76	350	142.5	7.21	720
23.75	0.37	40	23.75	1.75	355	142.5	7.38	780
23.75	0.37	60	23.75	1.75	360	142.5	7.53	840
47.5	0.65	60	0	1.49	360	142.5	7.80	900
47.5	0.65	65	0	1.41	365	142.5	7.95	960
47.5	0.66	70	0	1.11	370	142.5	8.26	1020
47.5	0.69	80	0	1.09	380	142.5	8.41	1080
47.5	0.76	100	0	1.09	390	142.5	8.52	1140
47.5	0.79	120	0	1.07	400	142.5	8.59	1200
71.25	1.06	120	0	1.04	420	142.5	8.71	1260
71.25	1.14	125	47.5	0.77	420	142.5	8.76	1320
71.25	1.22	130	47.5	0.81	430	142.5	8.83	1380
71.25	1.25	140	47.5	0.83	440	118.75	8.48	1380
71.25	1.27	160	47.5	0.84	450	118.75	8.45	1385
71.25	1.36	180	47.5	0.86	460	118.75	8.44	1390

Tablo 5.8. (Devamı). Kazık Yükleme Deneyi Veri Tablosu (PLT-TK-54)

95	1.69	180	47.5	0.87	470	95	7.97	1390
95	1.79	185	95	1.61	480	95	7.93	1395
95	1.86	190	95	1.69	490	95	7.90	1400
95	2.10	200	95	1.78	500	71.25	7.48	1400
95	2.20	220	95	1.83	510	71.25	7.44	1405
95	2.30	240	95	1.87	520	71.25	7.40	1410
95	2.59	300	95	1.93	540	47.25	7.07	1410
71.25	2.42	300	118.75	2.55	540	47.25	7.02	1415
71.25	2.42	305	118.75	2.69	550	47.25	7.01	1420
71.25	2.42	310	118.75	2.89	560	23.75	6.49	1420
71.25	2.42	315	118.75	3.10	570	23.75	6.39	1425
71.25	2.42	320	118.75	3.12	580	23.75	6.34	1430
47.5	2.12	320	118.75	3.16	600	0	5.61	1430
47.5	2.09	325	142.5	4.33	600	0	5.42	1435
47.5	2.09	330	142.5	5.63	610	0	5.17	1440

**Şekil 5.5. Kazık yükleme deneyi sonuçları (PLT-TK-54).**

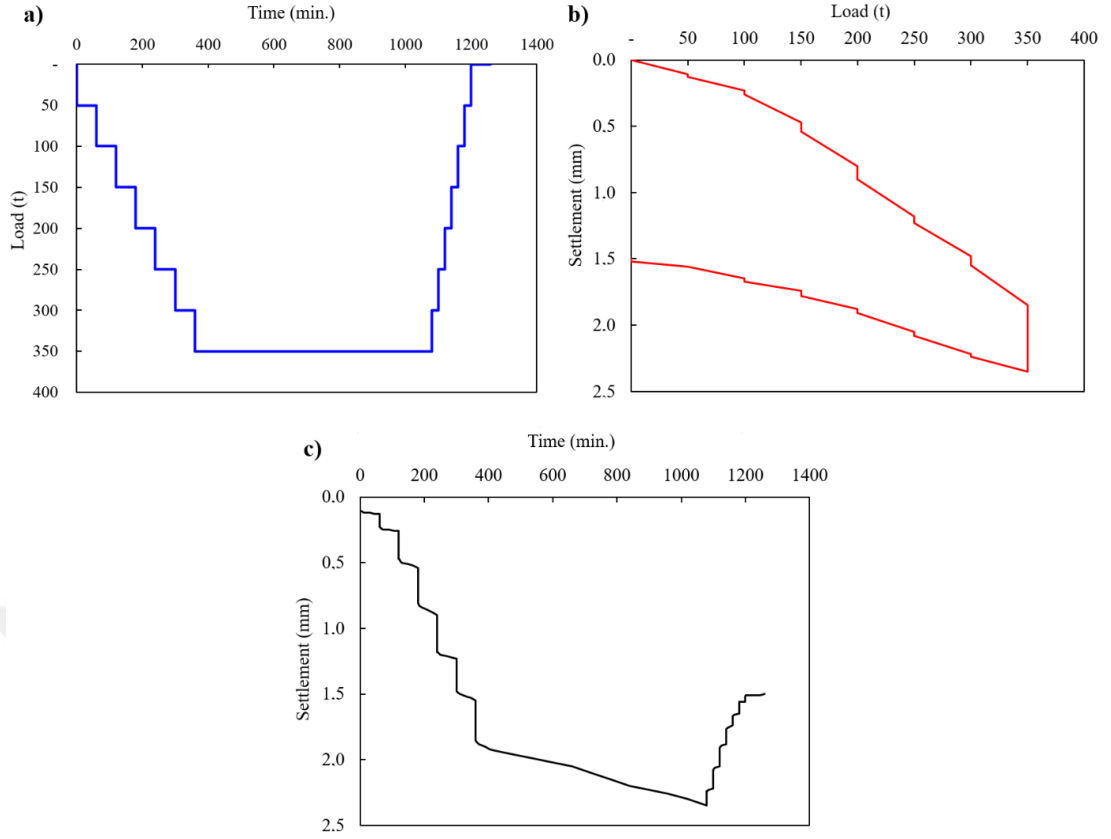
Test kazığına uygulanan maksimum 142.5 tonluk yükleme sonrasında, kazık başında 8.83 mm oturma meydana gelmiştir. Yük boşaltıldıktan sonra nihai (kalıcı) oturma miktarı 5.17 mm olarak ölçülmüş, bu durumda 3.66 mm' lik kısmın elastik oturma olduğu değerlendirilmiştir.

Site-2 alanında, jet grout kolonları ile iyileştirilmiş zemin üzerinde imal edilen fore kazık 100 cm çapında ve 31 metre uzunluğundadır. Saha SPT (Standart Penetrasyon Testi) verilerine göre bu kazığın taşıma kapasitesi 182 ton olarak belirlenmiştir. Ancak deneyde, kazık servis yükünün 1.92 katı (yani %192'si) olan 350 tonluk yükü test edilmiştir.

Bu yükleme deneyine ait yük-oturma tablosu Tablo 5.9.' da, oturma-zaman, oturma-yük ve yük-zaman ilişkilerini gösteren grafikler Şekil 5.6.' da sunulmaktadır.

Tablo 5.9. Kazık yükleme deneyi veri tablosu (PLT-TK-85).

Yük (t)	Oturma (mm)	Zaman (dk)	Yük (t)	Oturma (mm)	Zaman (dk)	Yük (t)	Oturma (mm)	Zaman (dk)
-	0	0	250	1.19	245	300	2.24	1080
50	0.11	0	250	1.2	250	300	2.24	1081
50	0.11	1	250	1.21	270	300	2.23	1085
50	0.11	5	250	1.22	285	300	2.22	1100
50	0.12	10	250	1.23	300	250	2.08	1100
50	0.12	30	300	1.48	300	250	2.07	1101
50	0.13	45	300	1.48	301	250	2.06	1105
50	0.13	60	300	1.49	305	250	2.05	1120
100	0.23	60	300	1.50	310	200	1.91	1120
100	0.23	61	300	1.52	330	200	1.90	1121
100	0.24	65	300	1.53	345	200	1.89	1125
100	0.25	70	300	1.55	360	200	1.88	1140
100	0.25	90	350	1.85	360	150	1.78	1140
100	0.26	105	350	1.86	361	150	1.77	1141
100	0.26	120	350	1.87	365	150	1.76	1145
150	0.47	120	350	1.88	370	150	1.74	1160
150	0.47	121	350	1.90	390	100	1.67	1160
150	0.49	125	350	1.92	405	100	1.67	1161
150	0.50	130	350	1.93	420	100	1.66	1165
150	0.51	150	350	1.96	480	100	1.65	1180
150	0.52	165	350	1.99	540	50	1.56	1180
150	0.54	180	350	2.02	600	50	1.56	1181
200	0.80	180	350	2.05	660	50	1.56	1185
200	0.81	181	350	2.10	720	50	1.56	1200
200	0.83	185	350	2.15	780	0	1.52	1200
200	0.84	190	350	2.20	840	0	1.51	1201
200	0.86	210	350	2.23	900	0	1.51	1205
200	0.88	225	350	2.26	960	0	1.51	1215
200	0.90	240	350	2.30	1020	0	1.51	1230
250	1.18	240	350	2.35	1080	0	1.51	1245
250	1.18	241				0	1.50	1260



Şekil 5.6. Kazık yükleme deneyi sonuçları (PLT-TK-85).

Site-2' de, iyileştirilmiş zemin üzerinde yer alan test kazığına 350 tonluk yük uygulandığında, toplam oturma miktarı 2.35 mm olarak ölçülmüştür. Yük boşaltıldıktan sonra nihai (kalıcı) oturma değeri 1.5 mm' ye düşmüş ve bu durumda 0.85 mm' lik kısmın elastik oturma olduğu değerlendirilmiştir.

İki testin karşılaştırılması yapıldığında, iyileştirme yapılmamış zemin üzerindeki Site-1 kazığında nihai oturma miktarı 5.17 mm, jet grout ile iyileştirilmiş zemin üzerindeki Site-2 kazığında ise bu değer 1.5 mm olarak belirlenmiştir. Bu durum, nihai oturma miktarında %71 oranında bir azalma olduğunu göstermekte olup, bu fark mühendislik açısından oldukça anlamlıdır.

Bunun yanında bu kazık yükleme deneyinde göçme yükü Mazurkiewicz yöntemi ile değerlendirilmiştir. Mazurkiewicz yöntemine göre kazık kapasitesi hesabında düşey yük-yer değiştirme grafiğinin parabolik olduğu kabul edilir ve grafiksel yöntemle göçme yükü hesaplanır. Bu yöntem genelde göçmeye ulaşmamış kazık yükleme deneylerinde göçme yükünü tahmin amaçlı kullanılır.

Kazık taşıma kapasitesinin belirlenmesinde kullanılan Mazurkiewicz yöntemi, yük-oturma eğrisinin geometrik özelliklerinden yararlanarak göçme yükünü tanımlayan grafiksel bir yaklaşımdır. Yöntemin temel varsayımı, kazığın oturma davranışının belirli bir noktadan sonra lineerlikten saparak plastik bölgeye geçmesidir. Bu geçiş, yük-oturma (Q-s) eğrisi üzerinde görsel bir çizim ile ortaya konur.

İlk olarak, yükleme deneyinden elde edilen veriler kullanılarak kazığın yük-oturma eğrisi çizilmiştir. Bu eğri, düşey ekseninde oturma miktarlarını (s), yatay ekseninde ise uygulanan yükleri (Q) göstermektedir. Elde edilen eğrinin yalnızca yükleme kolu (artış yönü) dikkate alınmıştır; boşaltma verileri analiz dışında tutulmuştur.

İkinci adımda, oturma ekseninde eşit aralıklarla yatay doğrular çizilmiştir. Bu yatay doğrular genellikle 0.50 mm veya 1 mm gibi sabit oturma aralıklarında seçilmiştir. Her yatay doğrunun yük-oturma eğrisini kestiği noktalar belirlenmiştir.

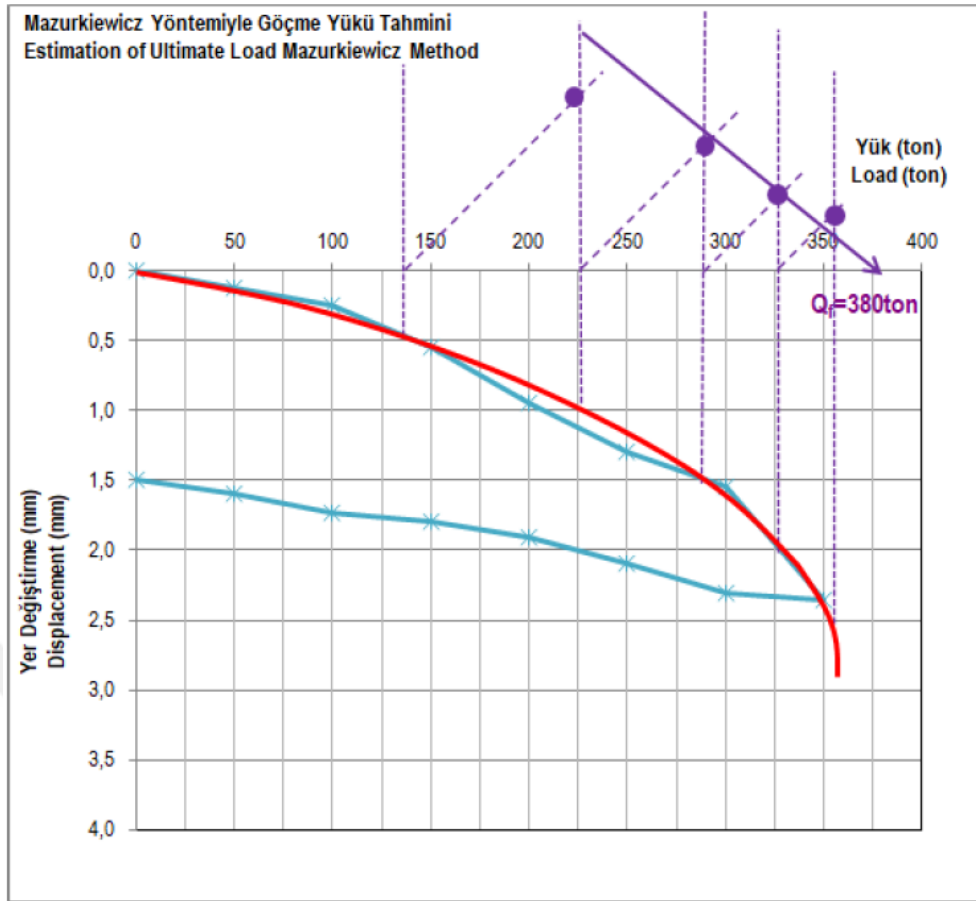
Üçüncü adımda, bu kesişim noktalarından oturma eksenine paralel dikey doğrular çizilmiştir. Böylece her oturma adımına karşılık gelen düşey çizgi, bir önceki yük düzeyinin düşey izdüşümünü göstermektedir.

Dördüncü adımda, dikey doğruların yük eksenini kestiği noktalardan itibaren 45° eğimli doğrular çizilmiştir. Her 45° doğrusu bir sonraki dikey çizgiyle kesişecek şekilde uzatılmıştır. Bu şekilde her ardışık oturma adımı için birer kesişim noktası elde edilmiştir.

Beşinci adımda, elde edilen bu kesişim noktaları bir doğru şeklinde birleştirilmiştir. Bu doğru, yük-oturma eğrisinin geometrik eğilim hattını temsil eder. Söz konusu doğrunun yük eksenini kestiği nokta, kazığın göçme yükü (Q_{ult}) olarak kabul edilmiştir.

Son olarak, yapılan grafiksel çizim sonucunda doğrusal çizginin yük eksenini yaklaşık $Q_{ult} = 380$ ton değerinde kestiği belirlenmiştir. Bu değer, kazığın kapasitesi olarak yorumlanmaktadır. Mazurkiewicz yönteminin en önemli avantajı, deneyin tamamlanmasından sonra ilave matematiksel işlem gerektirmeden, yük-oturma eğrisinin geometrisinden doğrudan göçme yükünü tanımlayabilmesidir.

Şekil 5.7.' den görülebileceği gibi Mazurkiewicz yöntemiyle ilk kazık yükleme deneyi değerlendirildiğinde göçme yükü olarak $Q_f = Q_u = 380$ ton hesaplanmıştır.

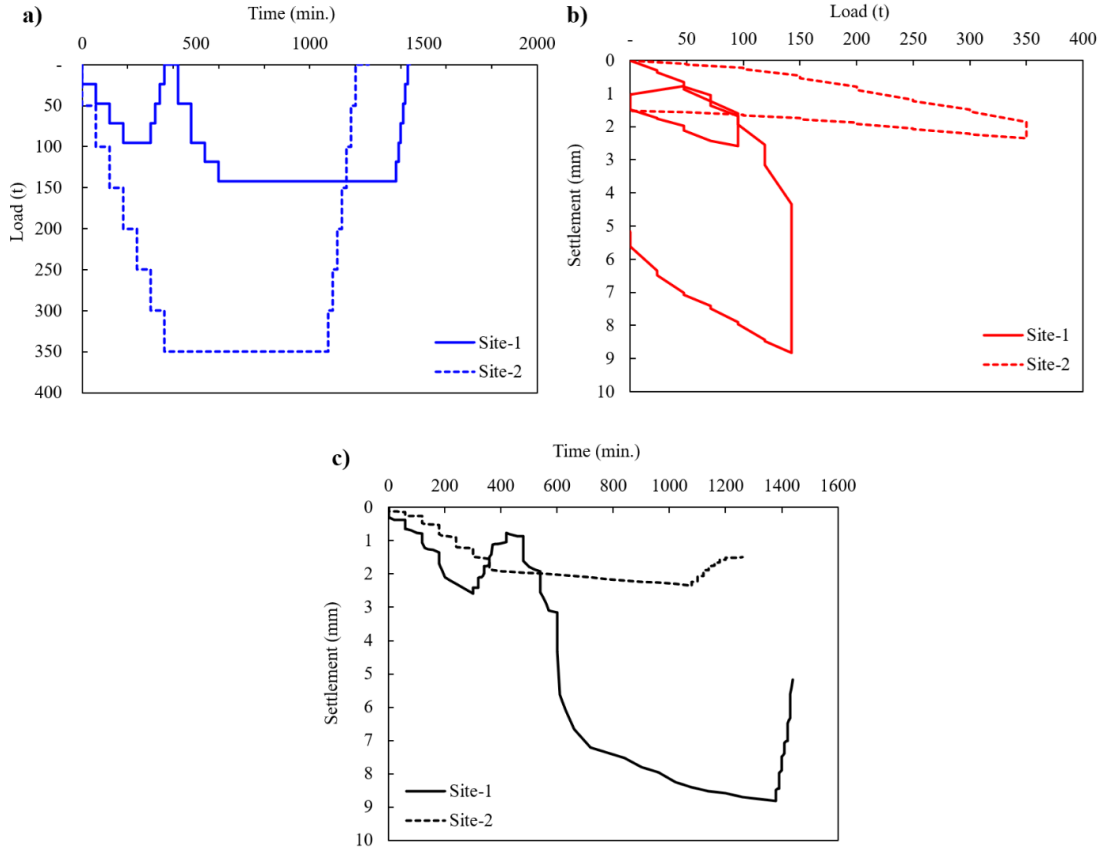


Şekil 5.7. Mazurkiewicz yöntemiyle kazık yükleme deneyi göçme yükü tahmini (PLT-TK-85).

PLT-TK-54 ve PLT-TK-85 numaralı fore kazık yükleme deneylerine ait karşılaştırmalı grafikler Şekil 5.8.' de sunulmaktadır.

İki farklı kazık yükleme deneyinin karşılaştırılması yapıldığında; iyileştirme yapılmamış zeminde (Site-1) bulunan fore kazık, servis yükünün %150 fazlası ile yüklendiğinde 5.17 mm kalıcı oturma meydana gelmiştir. Buna karşılık, jet grout kolonları ile çevrelenmiş zemin üzerinde inşa edilen fore kazık (Site-2), servis yükünün %192 fazlası ile test edilmesine rağmen kalıcı oturma değeri yalnızca 1.5 mm olarak ölçülmüştür.

Bu sonuçlar, jet grout ile iyileştirilmiş zeminde inşa edilen fore kazıkların taşıma gücünün, zemin iyileştirmesi yapılmamış alanlara göre belirgin şekilde arttığını ortaya koymakta ve bu iyileştirmenin kazık performansı üzerindeki olumlu etkisini net biçimde göstermektedir.



Şekil 5.8. Kazık yükleme deneyi sonuçları (PLT-TK-54 ve 85).

5.2.4. Jeofizik ölçümler ile iyileştirmenin değerlendirilmesi

Jeofizik ölçümlere göre, fore kazık ve jet grout imalatı öncesinde 213 m/s olan V_{s30} değeri, imalat sonrasında 343 m/s' ye yükselmiştir. Bu şekilde, zemin jeofizik ölçümleriyle değerlendirildiğinde V_{s30} değerinde %61 oranında bir artış sağlandığı görülmektedir (Tablo 5.10.).

Tablo 5.10. İyileştirme öncesi ve sonrası kayma dalgası hızları

Doğal Zemin			Jet Grout + Fore Kazık Sonrası		
Nokta	V_{s30} (m/sn)	T_o (sn)	Nokta	V_{s30} (m/sn)	T_o (sn)
S-3	213	1.04	MASW 3	343	0.53

Mayne ve Rix (1995) bağlantısı kullanılarak V_{s30} değerlerinden, kompozit zemin yaklaşımı ile bulunan c_u değerinin sağlanması yapılabilir:

$$c_u \approx V_s^2 / K \quad (5.2)$$

Bağlantıdaki K değeri; $c_{u \text{ doğal}} = 34.5$ kPa (üst 30 m ortalama) değerinin kullanılması ile

$$34.5 \approx 213^2 / K$$

$$K = 1315$$

bulunmaktadır. K değerinin 1315 olması kabulü ile iyileştirilmiş kompozit zemin için V_{s30} değeri kullanıldığında;

$$c_u \approx 343^2 / 1315 = 89.5 \text{ kPa}$$

Kompozit zemin yaklaşımıyla iyileştirilmiş ortamda üst 30 m için ortalama c_u değeri 97.9 kPa olarak bulunduğundan hesabı yapılan iki farklı yaklaşımdan elde edilen c_u değerinin mertebe olarak birbirine yakın olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır.

$$90 \text{ kPa} \approx 98 \text{ kPa}$$

Kompozit zeminde V_s - c_u arasındaki ilişkinin bağlantısını kurmak çok kritiktir. Çünkü kompozit zemin kabulüyle fore kazık kapasitesi hesaplanırken, iyileştirilmek istenen zeminin iyileştirme kriterlerine bağlı olarak önceden c_u değeri tahmin edilebilmektedir. Ancak V_s - c_u ilişkisindeki K değerini kalibre ederken, çok fazla etken bulunmaktadır. Ayrıca iyileşmemiş zeminde V_s değerleri ölçülebilen, kompozit zeminde iyileştirme yapılmadan V_s değeri tahmin edilemez.

Bundan dolayı eğer iyileştirilmiş bir zeminde fore kazık kapasitesi hesaplanacaksa ilk olarak kompozit yaklaşım ile hesap yapılması uygun olacaktır. Sonrasında hem iyileştirme yapılacak hem de fore kazık imal edilecektir. İyileştirme sonrasında zeminin V_s hızı tekrar ölçülüp, V_s - c_u bağlantısı kurularak kompozit zemin yaklaşımındaki c_u değerleri teyit edilebilir. Bunun yanında kazık imalatı sonrası yükleme deneyi yapılarak, hesaplanan kazık kapasitesinin kesinlikle kontrol edilmesi gereklidir.

Sonuç olarak; jet grout imalatı öncesinde $V_{s(\text{iyileştirme sonrası})}$ değeri bilinmediği için V_s - c_u bağıntısı, ön tasarım aşamasında kullanılamaz. Bu nedenle, kompozit zemin yaklaşımı tasarım hesaplarında tercih edilmelidir. Öte yandan, uygulama sonrası elde edilen V_s verileri, yapılan iyileştirmenin etkinliğini değerlendirmek amacıyla V_s - c_u ilişkisi ile analiz edilebilir. Bu iki yaklaşım birbirini tamamlayıcı niteliktedir, ancak aynı amaca hizmet etmezler. Tablo 5.11' de iki yöntemin karşılaştırması verilmektedir.

Tablo 5.11. İyileştirmenin kontrolü.

Kriter	Kompozit Zemin Yaklaşımı	V_s-c_u Ampirik İlişkisi
Kullanım amacı	Tasarım öncesi c_u tahmini	Uygulama sonrası kontrol / karşılaştırma
Zamanlama	Jet grout öncesi	Jet grout sonrası
Girdiler	$c_{u \text{ jet}}$, c_u doğal, R	V_s , K
Çıktı	$c_{u \text{ kompozit}}$	c_u
Avantajı	Önceden tahmin yapılabilir	Yerinde ölçümle değerlendirme
Dezavantajı	$c_{u \text{ jet}}$ tahmini gerekir	K kalibrasyonu gerekir

6. SONUÇ

Bu çalışmada, öncelikle fore kazık imalatı sırasında karşılaşılan kuyu stabilitesinin sağlanmasına yönelik zorluklar ele alınmış ve bu bağlamda iki farklı saha üzerinde yapılan uygulamalar karşılaştırılmıştır. Site-1 sahasında fore kazıklar, herhangi bir zemin iyileştirmesi yapılmadan, dengesiz (stabil olmayan) kuyu koşullarında imal edilmiştir. Buna karşılık, Site-2 sahasında kazık imalatı öncesinde ilgili alanlar jet grout kolonları ile çevrelenmiş ve kuyu stabilitesinin sağlanması ile kazık kapasitesinin artırılması hedeflenmiştir.

Her iki sahada gerçekleştirilen uygulamalardan elde edilen veriler doğrultusunda, kuyu stabilitesinin sağlanıp sağlanamadığı saha gözlemleri ve deneysel verilerle test edilmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, her iki sahada üretilen fore kazıkların taşıma kapasiteleri ile birlikte, zemin iyileştirmesinin zemin parametrelerine etkisi de sahada yapılan deneylerle incelenmiştir.

Çalışma sonucunda elde edilen temel bulgular şu şekildedir:

- Jet grout kolonları ile iyileştirilmiş zemin üzerinde inşa edilen fore kazıklarda, beton sarfiyatı hesapları ve saha gözlemleri, kuyu stabilitesinin sağlandığını açıkça ortaya koymuştur.
- MASW (Yüzey Dalgası Yöntemi) deneyleri sonucunda, doğal zemin ve jet grout ile iyileştirilmiş zemin arasında kayma dalgası hızı (V_s) karşılaştırması yapılmış ve jet grout uygulamasıyla bu değer yaklaşık %61 oranında arttığı belirlenmiştir.
- Her iki sahada gerçekleştirilen kazık yükleme deneyleri, jet grout ile çevrelenmiş zemine imal edilen fore kazıkların taşıma kapasitesinin önemli ölçüde arttığını, oturmaların ise azaldığını göstermiştir. Bu performans artışı, doğrudan kuyu stabilitesinin sağlanmış olmasıyla ilişkilendirilmiştir.
- Jet grout sonrası zemin, doğal zemin ile kolonların birlikte çalıştığı bir “kompozit zemin” halini almaktadır. Bu nedenle, tasarımda yalnızca doğal

zeminin c_u değeri yeterli bir gösterge değildir; jet grout kolonlarının etkisi de dikkate alınmalıdır.

- Tasarım aşamasında, jet grout uygulaması henüz yapılmadan önce kullanılabilecek en uygun yöntem, “kompozit zemin yaklaşımıdır.” Bu yöntemde drenajsız kayma mukavemeti (c_u), aşağıdaki ağırlıklı ortalama formülü ile tahmin edilebilir:

$$c_{u,kompozit} = R \times c_{u,jet} + (1-R) \times c_{u,doğal}$$

- Kompozit ortam yaklaşımı ile hesaplanmış fore kazık kapasitesi kazık yükleme deneyi ile doğrulanmıştır. Bunun ötesinde iyileştirme öncesi ve sonrasında yapılan kayma dalgası hızı ölçümleri iyileştirmenin gerçekleştiğini teyit etmiştir.
- V_s — c_u ampirik ilişkisi ($c_u = V_s^2 / K$), tasarım öncesi değil, uygulama sonrası kalite kontrol ve iyileştirme etkinliği değerlendirmesi için kullanılmalıdır. Çünkü jet grout sonrası oluşacak V_s değerinin tasarım aşamasında bilinmesi mümkün değildir.
- Kompozit ortam yaklaşımı ile 0-16 metre için elde edilen $c_{u,kompozit}$ değeri kullanılarak fore kazık kapasitesi hesaplanmış ve üstyapıdan gelen yüklere göre 40 metre olan fore kazık boyu 31 metreye düşerek kazık başına 9 metrelik bir tasarruf elde edilmiştir. Kazıkların bağlı bulunduğu radye temelde toplam 55 adet fore kazık bulunmaktadır. Toplamda sadece bir adet siloda 495 metre fore kazık tasarrufu sağlanmıştır. Böylece projedeki bir siloda %22.5’ luk zaman+maliyet tasarrufu gerçekleşmiştir.

Zemin iyileştirme yöntemi olan jet grout uygulaması sonrasında zeminin değişecek parametrelerinin önceden tahmin edilmesi ile fore kazık kapasitesi hesaplanabilmekte ve bu yöntemle projelerde zaman tasarrufu sağlanmaktadır.

Bu çalışmada, geoteknik özellikler açısından uygun olmayan ortamda yüksek yapısal yükleri taşıyabilecek fore kazıkların imalatında kuyu stabilitesinin sağlanmasına ilişkin bulgular sunularak literatüre uygulamaya yönelik çözüm sunulmaktadır. Jet grout yöntemiyle zemin iyileştirilmesi, hem kazık taşıma kapasitesini artırmakta hem de sahada sıkça karşılaşılan kuyu stabilitesi problemini minimize ederek uygulama sürecini daha güvenli ve verimli hale getirmektedir.

KAYNAKÇA

- Abdrabbo, F.M., Gaaver, H.E.: Installation Effects Of Auger Cast-In-Place Piles (2012). <https://doi.org/10.1016/J.Aej.2012.08.001>
- Arslan, E., Develioglu I, Pulat HF, The Effect Of Curing Time And Freeze-Thaw Cycles On The Undrained Shear Strength Of Lime-Stabilized Alluvial Soils. *Revista De La Construcción*. 2023; [Http://Dx.Doi.Org/10.7764/Rdlc.22.2.348](http://Dx.Doi.Org/10.7764/Rdlc.22.2.348)
- ASTM D1140-17: Standard Test Methods For Determining The Amount Of Material Finer Than 75-Mm No.200 Sieve In Soils By Washing. West Conshohocken PA, ASTM International (2017)
- ASTM D2487-17: Standard Practice For Classification Of Soils For Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken PA, ASTM International (2017)
- ASTM D4318-10: Standard Test Methods For Liquid Limit Plastic Limit And Plasticity Index Of Soils. West Conshohocken PA, ASTM International (2010)
- ASTM D7928-1: Standard Test Method For Particle-Size Distribution Gradation Of Fine-Grained Soils Using The Sedimentation Hydrometer Analysis. West Conshohocken PA, ASTM International (2017)
- Ball, D. J., Hutchinson, M. T., Jefferis, S. A., Shotten, P. G., Stamsfoeld, L., & Wills, A. J. (2006). *Bentonite Support Fluids In Civil Engineering*. Federation Of Piling Specialists. 2nd Edition. Federation Of Piling Specialists, Kent, United Kingdom.
- Borcherdt, R.D., Wentworth, C.M., Janssen, A., Fumal, T., Gibbs, J., 1991, "Methodology For Predictive GIS Mapping Of Special Study Zones For Strong Ground Shaking In The San Francisco Bay Region", *Proc. 4th Inter. Conf. On Seismic Zonation*, (3):545-552.
- Bruce, D. A. (2000). The practice of jet grouting. *Ground Improvement*, 4(3), 91–110. <https://doi.org/10.1680/grim.2000.4.3.91>
- Bruce, D. A. (2012). "*Jet Grouting – The State of Practice.*" In *Proceedings of the Grouting and Deep Mixing 2012 Conference*, New Orleans, Louisiana, USA, ASCE Geotechnical Special Publication No. 228, pp. 155–171.
- Bruce, D. A., & Bruce, M. E. C. (2003). The properties of jet-grouted materials. In *Proceedings of the Third International Conference on Grouting and Ground Treatment* (pp. 862–876). New Orleans, Louisiana, USA: American Society of Civil Engineers (ASCE).
- De Beer, E. E. (1967). The evaluation of the bearing capacity of piles by the results of static and dynamic load tests. *Géotechnique*, 17(2), 87–112.

- Dong, Y., Chen, F. & Chen, Y. (2018). Investigation Of The Extraction Of The Casing For Large Diameter Cast-In-Place Piles By Vibratory Hammers In Clays. *Indian Geotech J* 48, 430–441. <https://doi.org/10.1007/S40098-017-0256-4>
- Duan, X., Kulhawy, F.H.: Tip Post-Grouting Of Slurry-Drilled Shafts In Soil: Chinese Experiences (2009). [https://doi.org/10.1061/41021\(335\)6](https://doi.org/10.1061/41021(335)6)
- Duan, Z. D., Duan, Y.P., Yan P.V., Influencing Factors Analysis Of Stability Of Hole Wall Of Bored Pile In Seasonal Frozen Ground In The West Of China, *Applied Mechanics And Materials*, (2012), 256-259, 441-444
- Durgunoğlu, H. T. (2004). Yüksek modüllü kolonların temel mühendisliğinde kullanımı. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, (431), 25–36.
- EuroSoilStab. (2002). “Design Guide for Soft Soil Stabilisation.” European Commission 5th Framework Research Project: EuroSoilStab – Development of Design and Construction Methods to Stabilise Soft Organic Soils. CT97-0351, Swedish Geotechnical Institute (SGI) Report No. 17, Linköping, Sweden.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2005). “*Jet Grouting Technology*.” U.S. Department of Transportation, National Highway Institute. Publication No. FHWA-NHI-05-041, Washington, D.C., USA. 306 s.
- Federal Highway Administration. (2003). Manual on Jet Grouting – Geotechnical Engineering Circular No. 26 (FHWA-NHI-06-026). U.S. Department of Transportation. (Updated version: 2022).
- Fellenius, B. H. (1980). The analysis of results from routine pile load tests. *Ground Engineering*, 13(6), 19–31.
- Ghodrati, A., Sabermahani, M., Korayem, A.H.: Experimental study to enhance prediction of jet-grout column diameter and efficiency in sand. *International Journal Of Physical Modelling In Geotechnics*. (2023) <https://doi.org/10.1680/Jphmg.21.00075>
- Güler, E., & Gümüş Seçil, G. (2021). Jet grouting technique and strength properties of jet grout columns. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 5(1), 19–24. <https://doi.org/10.46460/ijiea.932980>
- Haimson, B., Kovacich J.: Borehole Instability In High-Porosity Berea Sandstone And Factors Affecting Dimensions And Shape Of Fracture-Like Breakouts (2003). [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00283-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00283-1)
- Hayward Baker Inc. (2004–2010). *Internal Technical Reports and Case Histories on Jet Grouting Performance*. Hayward Baker (Keller North America), Hanover, Maryland, USA.
- Ho, C.E., Asce, M., Lim, CH., Tan, CG.: Characteristics Of Bored Piles Installed Through Jet Grout Layer, *Journal Of Performance Of Constructed Facilities* archive, 16(4). (2002)
- Horvath. J. S. (2002). Soil-structure interaction research project: Basic SSI concepts and applications overview. Report No. CGT-2002-2. Manhattan College. New York.

- Ibrahim, A. S., & Al-Bidry, M. A. (2020). Study The Effect Of Particle Sizes And Concentration On The Rheological Properties Of Iraqi Bentonite For Using As Drilling Fluids. *Journal Of Engineering/College Of Eng./University Of Baghdad*, 26(3), 65–76.
- Jahandari, S., Saberian, M., Tao, Z., Mojtahedi F.F., Li, J., Ghasemi, M., Rezvani, S., Li, W.: Effects Of Saturation Degrees, Freezing-Thawing and Curing On Geotechnical Properties Of Lime And Lime-Cement Concretes. *Cold Regions Science And Technology*. (2019). <https://doi.org/10.1016/J.coldregions.2019.02.011>
- Kaymakcı, S.: The Investigation Of Performance Of Bored Pile That Is Socketed Jet Grout Column(2014).
- Kirsch, K., & Bell, A. (2013). *Ground improvement* (2nd ed.). CRC Press.
- Lam C, Jefferis SA, & Suckling, TP. (2018). Treatment Of Bentonite Fluid For Excavation Into Chalk. *Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 171(6), 518–529. <https://doi.org/10.1680/Jgeen.18.00043>
- Lam, C., Jefferis, S.A., Suckling, T.P., Troughton, V.M.: Effects Of Polymer And Bentonite Support Fluids On The Performance Of Bored Piles. *Soils And Foundations*. Volume 55, Issue 6. Pages 1487-1500.(2015). <https://doi.org/10.1016/J.sandf.2015.10.013>
- Larisch, M. D. (2022). Construction And Stability Risks For Fluid Supported Deep Excavations And Their Effects On Design Parameters. In *DFI-PFSF Piling & Ground Improvement Conference* (P. 20).
- Liu Z., Liang J., Huang Y., Stability Of Hole-Wall In Artificial Drill Hole Piles[J].*Mineral Resources And Geology*,(2003),17(5):648–650.(In Chinese)
- Long, Z., Zhang, L., He, L., Guo, Z., & Wang, Z. (2023). Stability Analysis Of Hole Wall For Bored Piles. <https://doi.org/10.21203/Rs.3.Rs-3456212/V1>
- Manne A, Prasad PVSR, Annam MK. Application Of Jet Grouting For Geotechnical Challenges. In: Latha Gali, M., Raghuveer Rao, P. (Eds) *Construction In Geotechnical Engineering. Lecture Notes In Civil Engineering*, Vol 84. Springer, Singapore. (2020). https://doi.org/10.1007/978-981-15-6090-3_41
- Marlow, P.; Webber, S.; Mikula, P.A.; Lee, M. Bored Reinforced Piles For Raisebore Support: Four Case Studies, And Guidelines Developed From Lessons Learnt. *Min. Technol.* 2013, 122, 159–165.
- Massarsch, K. R., & Topolnicki, M. (2005). Jet grouting – Technology and applications. In *Proceedings of the Conference on Grouting and Ground Treatment* (pp. 1–21). American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Mayne, P. W., & Rix, G. J. (1995). Correlations between shear wave velocity and cone tip resistance in natural clays. *Soils and Foundations*, 35(2), 107–110. https://doi.org/10.3208/sandf.35.2_107
- Mazurkiewicz, B. (1972). The estimation of pile bearing capacity based on static loading test results. *Proceedings of the 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Madrid.

- Mısır, G.: Ground Improvement and Displacement Estimation with Jet Grouting Method: A case study. *Journal of European Science and Technology (in Turkish)* , (18), 290-299. (2020)
- Midorikawa, S, 1987. Prediction Of Isoseismal Map In The Kanto Plain Due To Hypothetical Earthquake, *Journal Of Structural Engineering*, Vol.33B, Pp. 43-38
- Mitchell, J. K., & Katti, R. K. (1981). Soil improvement: State-of-the-art report. In *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol. 4, pp. 509–565.
- Nalcakan, M.S., (2018) Çevresi Jet Kolonlar İle İyileştirilmiş Fore Kazıkların Taşıma Kapasitesi, *Zemin Mekaniği Ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı*, İstanbul.
- Nikbakhtan, B., Pourrahimian, Y., Aghababaei, H.: The Effects of Jet Grouting On Slope Stability At Shahriar Dam, Iran, Paper Presented At The 1st Canada - U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Paper Number: ARMA-07-133, Canada. (2007).
- Ono, T., Morales, E.M.: Settlement of a light rail pier supported on large diameter bored piles remediated by jet groutin., *Missouri University of Science and Technology*. (2004)
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Pile Foundation Analysis and Design*. John Wiley & Sons.
- Rollins, K.M., Adsero, M.E., Brown3, D.A.: Use of jet grouting to increase latearal pile group resistance in soft clay, *The 14th World Conference On Earthquake Engineering* October 12-17, 2008, Beijing, China
- Skempton AW. “Cast-In Situ Bored Piles In London Clay,” *Geotechnique*, Vol. 9, Pp. 153–173. 1959
- So, A.K.O.: Performance of The Jet Grouted Sloping Berm As A Support To The Diaphragm Wall In An Excavation. In: Neves, J Zhu, B Rahardjo P. (Eds) *Advanced Geotechnical and Structural Engineering In The Design And Performance Of Sustainable Civil Infrastructures. Geochina 2021. Sustainable Civil Infrastructures*. Springer, Cham.. (2021). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-80155-7>
- Toğrol E, Tan O. *Pile Foundations*. Birsen Publishing House, 1st Ed. İstanbul; 2003.
- Tomlinson, M. J., & Woodward, J. (2008). *Pile Design and Construction Practice* (5th ed.). Taylor & Francis.
- Wan, Z. Hui, Wang, H. Tao, Hu, T., Zhou, F., & Dai, G. Liang. (2025). Experimental Study On Lateral Bearing Behavior Of Distributed Postside-Grouted Piles In Sandy Soil. *European Journal Of Environmental And Civil Engineering*, 29(5), 1031–1052. <https://doi.org/10.1080/19648189.2024.2423880>
- Wang Y., Zhang G., Hu Q., Analysis Of Stability Of Bored Pile Hole-Wall [J] *Chinese Journal Of Rock Mechanics And Engineering*, 30(1):3281-3287. (2011). (In Chinese)

- Wang Z., Research Of Factors Affecting Stabilization Of Hole Wall Of Bored Pile[J], Journal Of Highway And Transportation Research And Development, 2011, 28(1): 86-90, (In Chinese).
- Wong, R.K.N., Weng, Y.F., Leong, G.K., Cheng, S.H.: A Case Study of Effectiveness of Large Diameter Jet Grout For Soil Improvement Works In Soft Marine Clay. In Duc Long, P., Dung, N. (Eds) *Geotechnics For Sustainable Infrastructure Development. Lecture Notes In Civil Engineering.* (2020); https://doi.org/10.1007/978-981-15-2184-3_84
- Wu, S., Wei, Y., Zhang, Y., Cai, H., Du, J., Wang, D., Yan, J., & Xiao, J. (2020). Dynamic Compaction Of A Thick Soil-Stone Fill: Dynamic Response And Strengthening Mechanisms. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 129, 105-944. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105944>.
- Xanthakos, P. P. (1994). *Ground Control and Improvement*. John Wiley & Sons, Inc., New York. ISBN 0-471-55200-3.
- Yang, R., Huang, J., Griffiths D.V.: Optimal Geotechnical Site Investigations For Slope Reliability Assessment Considering Measurement Errors (2022). <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106497>
- Yılmaz, E., Ercan, M.: Soil improvement by using jet grout method: A Case Study. *Current Researches In Engineering And Architecture Sciences*. 11-29. (2020)
- Yin, M.Z. A Pile Foundation Problem: Collapse Of Soil In Pile Bore Holes. In *Applied Mechanics And Materials*; Trans Tech Publications Ltd.: Uetikon-Zuerich, Switzerland, 2015; Volume 744, Pp. 413–416.
- Zhang Yan, Liu Jin Bo. *Manual Of Pile Foundations*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- Zhou, H., Chen, Z. Analysis Of Effect Of Different Construction Methods Of Piles On The End Effect On Skin Friction Of Piles. *Front. Archit. Civ. Eng. China* **1**, 458–463 (2007). <https://doi.org/10.1007/S11709-007-0062-7>
- Zhou, Z., Xu, F., Lei, J., Bai, Y., Chen, C., Xu, T., Zhang, Z., Zhu, L., & Liu, T. (2021). Different Hole-Forming Methods On The Bearing Characteristics Of Post-Grouting Pile In Loess Areas. *Transportation Geotechnics*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100423>



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ufuk KARAASLANER

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2025, Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği (Tezsiz)

MESLEKİ DENEYİM:

- 2015 - 2016 Hayat Holding - Limaş Liman İşletmeciliği A.Ş. - Teknik Ressam ve SAP Operatörü
- 2017 - 2020 Hayat Holding - Limaş Liman İşletmeciliği A.Ş. - İnşaat Teknikeri
- 2021 - 2024 Hayat Holding - Limaş Liman İşletmeciliği A.Ş. - İnşaat Mühendisi
- 2024 - Hayat Holding - Hayat Kimya Sanayi A.Ş. - Global Yatırım Direktörlüğü İnşaat Yöneticisi

TEZDEN ÜRETİLEN ESERLER:

Karaaslaner, U., Sert, S., Arslan, E. (2025, 23-25, May). Yumuşak - gevşek zeminlerde delme kazık imalatında yaşanan zorluklar (Challenges Encountered in Bored Pile Construction in Soft and Loose Soils), 21th International Istanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering, Architecture and Mathematical Sciences, pp. 269-285, İstanbul, Türkiye.