

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TİE-BACK DERİN KAZI DESTEKLEME
SİSTEMİNİN PERFORMANSININ
İNCELENMESİ

İbrahim ÖÇAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenokon SELÇUK

TEMMUZ, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TİE-BACK DERİN KAZI DESTEKLEME SİSTEMİNİN
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

İbrahim ÖÇAL tarafından hazırlanan tez çalışması 22.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenokon SELÇUK
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üye Murat Ergenokon SELÇUK, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Özgür YILDIZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cihan ÖSER, Üye
İstanbul Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenokon SELÇUK sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “TİE BACK DERİN KAZI DESTEKLEME SİSTEMİNİN PERFORMANSININ İNCELENMESİ” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

İbrahim ÖÇAL





Anneme,

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam boyunca bilgi, birikim ve tecrübeleriyle her daim bana yol gösterip rehberliği ile yolumu aydınlatan değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenokon SELÇUK' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince ilgi ve alakalarını hiç eksik etmeyen, mesleki bilgi ve tecrübelerini aktarmaktan bir an olsun çekinmeyen sabır ve anlayış ile her anımda yanımda olan Geobos Zemin Güçlendirme Sistemleri İnşaat Mühendislik Taahhüt ve TİC. LTD. ŞTİ. firması ortakları İnş. Yük. Müh. Dr. Arif ÇINAR, İnş. Yük. Müh. Bora BERK, İnş. Yük. Müh. Osman PEKARUN ve İnş. Yük. Müh. Kaan DOĞANIŞIK ve tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmam kapsamında incelemiş olduğum projenin geoteknik tasarımlarını gerçekleştiren, bu süre zarfında yararlanmış olduğu bilgiler ve elde etmiş olduğu sayısal analiz sonuçlarını tüm detaylarıyla paylaşan geoteknik proje müellifi Sayın Güliz ÜNLÜ' ye teşekkür ederim.

Eğitim hayatımın ilk gününden beri maddi manevi desteklerini esirgemeyen, hayatlarından fedakârlık edip benim gelişimim için çaba gösteren ve bu amaç uğrunda tüm zorluklara katlanan, başta annem Dilek ÖÇAL, babam Kadir ÖÇAL, ablam Sema ÖÇAL YUMURTACI ve kardeşim Melek ÖÇAL olmak üzere tüm aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İbrahim ÖÇAL

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	10
1.3 Hipotez	12
2 İSTİNAT YAPISINA ETKİYEN YÜKLER	14
2.1 Yanal Toprak Basıncı	14
2.1.1. Aktif Toprak Basıncı	17
2.1.2. Pasif Toprak Basıncı	20
2.1.3 Sükunetteki Toprak Basıncı	22
3 DERİN KAZI YÖNTEMLERİ VE DESTEKLEME ELEMANLARI	29
3.1 Derin Kazı, Avantajları ve Dezavantajları	29
3.2 Derin Kazı Yöntemleri	31
3.2.1 Açık Kazı Yöntemi	32
3.2.2 İçten İksalı Kazı Yöntemi	33
3.2.3 Ada Kazı Yöntemi	35
3.2.4 Yukarıdan Aşağıya Kazı Yöntemi	36
3.2.5 Anolu Kazı Yöntemi	38
3.2.6 Ankrajlı Kazı Yöntemi	39
3.3 Düşey Destekleme Elemanları	46
3.3.1 Palplanş Perde	47
3.3.2 Kuyu Perde Duvar	49

3.3.3 Diyafram Duvar	50
3.3.4 Fore Kazık	53
3.3.5 Mini Kazık	57
3.4 Yatay Destekleme Elemanları.....	58
3.4.1 Püskürtme Betonlu (Shotcrete) Kaplama	59
3.4.2 Boru (Strut) Destekleme	61
3.4.3 Zemin Çivisi	63
3.4.4 Öngermeli Ankraj	67
3.4.5 Tie-back	78
4 TİE BACK KULLANILAN ÖRNEK BİR ÇALIŞMA SAHASININ İNCELENMESİ	97
4.1 Çalışma Sahasında Tie-back Kullanım Alanları.....	97
4.2 İnceleme Alanı Jeolojisi, Zemin Profili ve Geoteknik Parametreler	103
4.2.1 İnceleme Alanı Jeolojisi ve Zemin Profili	103
4.2.2 İnceleme Alanındaki Zeminlerin Geoteknik Parametreleri	106
4.3 Performans Analizleri	107
4.3.1 Boru Köprüsü Bölgesi İksa Sistemi Performans Analizi	111
4.3.2 Elektrik Direği Bölgesi İksa Sistemi Performans Analizi	139
5 SONUÇLAR	164
5.1 Sonuçlar ve Tespitler	164
KAYNAKÇA	174
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	178

SİMGE LİSTESİ

A	Elemanın Kesit Alanı
α	Duvar arka yüzünün düşey düzlem ile yapmış olduğu açı
c	Zeminin Kohezyon Değeri
c_{ref}	Referans Kohezyon Değeri
δ	Aktif toprak basıncı ile istinat yapısı arasındaki zemin-yapı sürtünme açısı
$\delta h/H$	Maksimum yatay deplasman/kazı derinliği oranı
E	Elemanı oluşturan malzemenin elastisite modülü
E^*A	Eksenel rijitlik
E_{init}	İlk boşluk oranı
F_s	Güvenlik katsayısı
γ	Zeminin birim hacim ağırlığı
γ_{sat}	Doygun birim hacim ağırlığı
γ_{unsat}	Doygun olmayan birim hacim ağırlığı
H	Düşey destekleme elemanı yüksekliği
K_0	Sükunetteki toprak basıncı katsayısı
K_{as}	Aktif toprak basıncı katsayısı
K_h	Yatay sismik katsayı
K_{ps}	Pasif toprak basıncı katsayısı
L	Eleman boyu (m)
M	Eğilme momenti değeri
N	Normal kuvvet değeri
N_{init}	İlk boşluk oranına bağlı doygunluk
$\emptyset$	Zeminin kayma mukavemeti açısı
P_{as}	Aktif toprak basıncı
P	Uygulanan kuvvet (kN)
P_0	Pasif toprak basıncı
P_{ps}	Statik pasif toprak basıncı

ψ	Genleşme açısı
R	Göçme yüzeyinde doğan sürtünme ve normal kuvvetlerin bileşke kuvveti
S	Eleman Aralığı
S_h	Yatay aralık
S_v	Düşey aralık
$T_{\text{öngerme}}$	Öngerme kuvveti
V	Kesme kuvveti değeri
ν	Poisson oranı
V_{s30}	İlk 30 metredeki kayma dalgası hızı
w	Ağırlık
W	Zemin kamasının ağırlığı
ΔL	Yanal deplasman değişimi

KISALTMA LİSTESİ

GPa	Gigapaskal
KDYY	Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği
kN	Kilonewton
MASW	Aktif Kaynaklı Yüzey Dalgası
MPa	Megapaskal
OCR	Aşırı konsolide oranı
SPT	Standart Penetrasyon Deneyi
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TS500	Betonarme yapıların tasarım ve kuralları
TS 22475	Sondaj kuyusundaki zeminden numune alma standardı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. (a) Sükûnet halindeki (b) Aktif (c) Pasif toprak basınçları altında istinat yapısı-zemin etkileşimi. (Das, 1999)	15
Şekil 2.2. Rankine aktif toprak basıncı dağılımı (Das,1999),.....	17
Şekil 2.3. Coulomb Aktif Toprak Basıncı Kama Teorisi	18
Şekil 2.4. Coulomb pasif toprak basıncı kama teorisi	21
Şekil 2.5. Terzaghi ve Peck tarafından önerilen (1967) yanal toprak yükü dağılı ve hesabı (Köse, 2010)	24
Şekil 2.6. Tschebotarioff tarafından önerilen (1973) yanal toprak yükü dağılım ve hesabı (Köse, 2010)	24
Şekil 2.7. Lehmann tarafından kohezyonsuz zeminler için önerilen yanal toprak basıncı dağılımı (Çınar, 2010)	25
Şekil 2.8. İsveç yapı standardı (1974) tarafından önerilen yanal toprak basıncı dağılımı (Yılmaz, 2001).....	25
Şekil 2.9. Yoo tarafından seçilen ve gerçekleşen yük dağılımları (Çınar,2010) ...	26
Şekil 2.10. Ankrajlı kazılarda yanal toprak yüklerinin karşılaştırılması. (Çınar,2010)	27
Şekil 2.11. Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği kohezyonlu zeminler için yanal toprak basıncı dağılımı diyagramları (KDYY, 2022)	28
Şekil 3.1. Eğimli açık kazı yöntemi (C. Ou, 2006)	32
Şekil 3.2. Konsol istinat yapıli kazı (Çınar,2010)	33
Şekil 3.3. İçten iksalı kazı yöntemi ve destekleme elemanları (Ekici,2010).....	34
Şekil 3.4. Ada kazı yöntemi (C. Ou, 2006)	36
Şekil 3.5. Yukarıdan aşağıya kazı yöntemi (C. Ou, 2006)	37
Şekil 3.6. Anolu kazı yöntemi	38
Şekil 3.7. Öngermeli ankraj kullanılarak tasarlanmış bir iksa sistemi	43
Şekil 3.8. Öngermeli ankrajların kullanıldığı örnek bir iksa sistemi.....	44
Şekil 3.9. Zemin çivisi kullanılarak tasarlanmış bir iksa sistemi	45
Şekil 3.10. Örnek bir palplanş birleşim detayı-1 (Jiang, 2023).....	48
Şekil 3.11. Örnek bir palplanş birleşim detayı-2 (Deckner 2016).....	48
Şekil 3.12. Örnek bir palplanş imalatı (Baca, 2017)	49
Şekil 3.13. Tamamlanmış bir kuyu perde imalatı (Köse, 2010).....	50
Şekil 3.14. Diyafram duvar yapım aşamaları (Köse, 2011)	52

Şekil 3.15. Fore kazıkların kullanıldığı örnek bir iksa çalışması	54
Şekil 3.16. Örnek bir kesişen fore kazık vaziyet planı	55
Şekil 3.17. Mini kazıklı örnek bir iksa sistemi (Öçal Kişisel Arşiv, 2022).....	57
Şekil 3.18. Örnek bir püskürtme beton imalatı (Öçal Kişisel Arşiv, 2022)	60
Şekil 3.19. Örnek bir içten iksalı destekleme sistemi (Öçal Kişisel Arşiv, 2022).62	
Şekil 3.20. Zemin çivisi ekipmanları (Porterfield vd., 1994).....	64
Şekil 3.21. Zemin çivisi uygulama adımları (KDYY, 2022).....	65
Şekil 3.22. Örnek bir zemin çivisi imalatı (Öçal Kişisel Arşiv, 2022).....	66
Şekil 3.23. Öngermeli ankraj ekipmanları (Çınar, 2010)	69
Şekil 3.24. Örnek bir öngermeli ankraj imalatı (Öçal Kişisel Arşiv, 2022)	70
Şekil 3.25. Öngermeli ankrajlı iksa sistemi göçme mekanizmaları (KDYY, 2022)	73
Şekil 3.26. Tipik bir ankraj öngerme işlemi (Öçal kişisel arşiv, 2022).....	77
Şekil 3.27. Tie-back elemanının kullanılabileceği örnek durumlar (Öçal kişisel arşiv, 2022)	79
Şekil 3.28. Tie-back Ekipmanları (Öçal kişisel arşiv, 2022).....	79
Şekil 3.29. Tie-back kullanılmış örnek bir iksa çalışması (Öçal kişisel arşiv, 2022)	81
Şekil 3.30. Yüksek gerilim hattı direği etrafında tie-back kullanılan bir derin kazı (Öçal kişisel arşiv, 2022)	82
Şekil 3.31. Bir yapı etrafında tie-back elemanlar ile teşkil edilen örnek bir iksa sistemi çalışması (Öçal Kişisel Arşiv, 2022)	83
Şekil 3.32. Tie-back Göçme Mekanizmaları (Öçal kişisel arşiv, 2022).....	88
Şekil 3.33. Tie-back çalışması yapılmış bir çalışma platformu (Öçal kişisel arşiv, 2022)	91
Şekil 3.34. Tie-back imalatı için hazırlanmış bir çalışma platformu (Öçal kişisel arşiv, 2022)	92
Şekil 3.35. Tie-back aplikasyon noktasına yanaşmış delgi makinesi (Öçal kişisel arşiv, 2022)	92
Şekil 3.36. Koruma boruları içinde öngerme işlemine hazır tie-back elemanlar (Öçal kişisel arşiv, 2022)	93
Şekil 3.37. Tie-back imalatı sırasında kuşak kirişi betonu dökme işlemi (Öçal kişisel arşiv, 2022)	94
Şekil 3.38. Tie-back öngerme işlemi (Öçal kişisel arşiv, 2022).....	95
Şekil 3.39. Tie-back hattının arkasına yerleştirilmiş inklinometre – 1 (Öçal kişisel arşiv, 2022)	95
Şekil 3.40. Tie-back hattının arkasına yerleştirilmiş inklinometre – 2 (Öçal kişisel arşiv, 2022)	96

Şekil 4.1. Çalışma sahasında yer alan boru köprüsü iksa sistemi (Öçal kişisel arşiv, 2022)	98
Şekil 4.2. İksa hattı ile çakışan elektrik direği için alınan iksa önlemi (Öçal kişisel arşiv, 2022)	99
Şekil 4.3. İnklinometre düzeneği şeması	101
Şekil 4.4. RST İnklinometre Veri Toplama Cihazı (rstinstruments.com)	102
Şekil 4.5. Inclinalanalysis programında oluşturulan örnek bir kümülatif inklinometre grafiği	103
Şekil 4.6. Boru köprüsü bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde deformasyon modeli.....	114
Şekil 4.7. Boru köprüsü bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde oluşan maksimum yatay deplasman	115
Şekil 4.8. Boru köprüsü bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde mini kazıklarda beklenen maksimum yatay deplasman	116
Şekil 4.9. Boru köprüsü bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum normal kuvvet	117
Şekil 4.10. Boru köprüsü bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum kesme kuvveti	117
Şekil 4.11. Boru köprüsü bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum eğilme momenti	118
Şekil 4.12. Boru köprüsü bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde deformasyon modeli.....	120
Şekil 4.13. Boru köprüsü bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde oluşan maksimum yatay deplasman	121
Şekil 4.14. Boru köprüsü bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde mini kazıklarda beklenen maksimum yatay deplasman	122
Şekil 4.15. Boru köprüsü bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum normal kuvvet	123
Şekil 4.16. Boru köprüsü bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum kesme kuvveti	123
Şekil 4.17. Boru köprüsü bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum eğilme momenti	124
Şekil 4.18. Tie-back elemanlar üzerine etkiyen maksimum normal kuvvet	124
Şekil 4.19. Boru köprüsü bölgesi inklinometre ölçüm verileri.....	128
Şekil 4.20. Boru köprüsü bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde deformasyon modeli	133
Şekil 4.21. Boru köprüsü bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde oluşan maksimum yatay deplasman	134
Şekil 4.22. Boru köprüsü bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde mini kazıklarda beklenen maksimum yatay deplasman	135

Şekil 4.23. Boru köprüsü bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum normal kuvvet	136
Şekil 4.24. Boru köprüsü bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum kesme kuvveti	136
Şekil 4.25. Boru köprüsü bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum eğilme moment	137
Şekil 4.26. Tie-rod elemanlar üzerine etkiyen maksimum normal kuvvet.....	137
Şekil 4.27. Elektrik direği bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde deformasyon modeli.....	141
Şekil 4.28. Elektrik direği bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde oluşan maksimum yatay deplasman	142
Şekil 4.29. Elektrik direği bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde mini kazıklarda beklenen maksimum yatay deplasman	143
Şekil 4.30. Elektrik direği bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum normal kuvvet	144
Şekil 4.31. Elektrik direği bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum kesme kuvveti	144
Şekil 4.32. Elektrik direği bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum eğilme momenti değeri	145
Şekil 4.33. Elektrik direği bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde deformasyon modeli.....	146
Şekil 4.34. Elektrik direği bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde oluşan maksimum yatay deplasman	147
Şekil 4.35. Elektrik direği bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde mini kazıklarda beklenen maksimum yatay deplasman	148
Şekil 4.36. Elektrik direği bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum normal kuvvet	149
Şekil 4.37. Elektrik direği bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum kesme kuvveti	149
Şekil 4.38. Elektrik direği bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum eğilme moment	150
Şekil 4.39. Tie-back elemanlar üzerine etkiyen maksimum normal kuvvet	150
Şekil 4.40. Elektrik direği bölgesi 2 numaralı inklinometre ölçüm verileri	154
Şekil 4.41. Elektrik direği bölgesi 3 numaralı inklinometre ölçüm verileri	155
Şekil 4.42. Elektrik direği bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde deformasyon modeli	158
Şekil 4.43. Elektrik direği bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde oluşan maksimum yatay deplasman	159
Şekil 4.44. Elektrik direği bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde mini kazıklarda beklenen maksimum yatay deplasman	160

Şekil 4.45. Elektrik direği bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum normal kuvvet	161
Şekil 4.46. Elektrik direği bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum kesme kuvveti	161
Şekil 4.47. Elektrik direği bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum eğilme momenti	162
Şekil 4.48. Tie-rod elemanlar üzerine etkiyen maksimum normal kuvvet.....	162



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Pasif toprak basıncı oluşabilmesi için gerekli yer değiştirme (Das,2013)	20
Tablo 2.2. Zemin cinsine göre kabul edilen k_0 değerleri (Uzuner, 2005).....	23
Tablo 4.1. Yerel Zemin Sınıfı Tablosu (TBDY 2018).....	106
Tablo 4.2. İnceleme Alanındaki Zeminlerin Geoteknik Parametreleri	107
Tablo 4.3. Geoteknik Modellerde Kullanılan Zemin Tabakaları Program Girdileri	110
Tablo 4.4. Geoteknik Modellerde Kullanılan Yapısal Elemanların Program Girdileri.....	111
Tablo 4.5. Boru köprüsü bölgesi tie-back yatay aralığı değişiminin analiz sonuçlarına etkisi	125
Tablo 4.6. Boru köprüsü bölgesi için farklı tie-back düşey aralığı ve adedi ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçları	126
Tablo 4.7. Boru köprüsü bölgesi tie-back öngerme yükü - uzama	130
Tablo 4.8. Boru köprüsü bölgesi farklı donatı çaplarında tie-rod elemanlı sistem analiz sonuçları ve tie-back elemanlı sistem analiz sonuçları	138
Tablo 4.9. Elektrik direği bölgesi tie-back yatay aralığı değişiminin analiz sonuçlarına etkisi	151
Tablo 4.10. Elektrik direği bölgesi için farklı tie-back düşey aralığı ve adedi ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçları	152
Tablo 4.11. Elektrik direği bölgesi tie-back uzama miktarları.....	157
Tablo 4.12. Elektrik direği bölgesi farklı donatı çaplarında tie-rod elemanlı sistem analiz sonuçları ve tie-back elemanlı sistem analiz sonuçları	163
Tablo 5.1. Gerçekleşen ve öngörülen maksimum deplasman miktarları	166
Tablo 5.2. Tie-back yatay-düşey aralık değişiminin iksa sistemine etkisi.....	167
Tablo 5.3. Tie-backler için hesaplanan ve gerçekleşen uzama miktarları	168

Tie-Back Derin Kazı Destekleme Sisteminin Performansının İncelenmesi

İbrahim ÖÇAL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenokon SELÇUK

Kentsel alanlarda artan yapılaşma ve sınırlı parsel koşulları, derin kazı yöntemlerinin daha yaygın ve efektif şekilde kullanılmasını gerektirmektedir. Derin kazı uygulamalarının artışı, beraberinde kazı destekleme (iksa) sistemlerinin kullanımını da yaygınlaştırmıştır. Bu sistemler, yapı çukurunun çevresindeki mevcut yapılardan kaynaklanan sürşarj yükleri ile aktif toprak basıncını güvenli şekilde karşılamak ve kazının hedeflenen temel kotuna ulaşmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Derin kazı destekleme sistemleri aynı zamanda çevre yapıların yapısal stabilitelerinin korunması açısından da kritik rol oynamaktadır. Derin kazı destekleme sistemleri düşey ve yatay destekleme elemanlarının bir arada kullanılmasıyla oluşturulmaktadır. Günümüzde tasarlanan iksa sistemlerinde düşey destekleme elemanı olarak betonarme kazıklar sıklıkla tercih edilirken, yatay destekleme elemanı olarak ise öngermeli ankrajlar ve zemin çivileri tercih edilmektedir.

Ancak bazı özel durumlarda, parsel ortasında yer alan ve çevresinde eş zamanlı olarak derin kazı yapılacak olan yapılar (tarihi yapılar, boru köprüleri, elektrik direkleri vb.) bulunabilmektedir. Bu yapıların, derin kazı süresince hasar görmeden servis ömrüne devam edebilmesi, özel derin kazı destekleme sistemlerinin tasarlanmasını gerektirmektedir. Bu bağlamda, karşılıklı teşkil edilen düşey iksa elemanlarını birbirine bağlayarak sabitleyen tie-back elemanlar, yapısal stabilitenin korunmasında etkin bir çözüm sunmaktadır. Çelik halatlardan oluşan bu elemanlar,

klasik öngermeli ankrajlardan farklı olarak, yük aktarımı için çimento şerbetiyle oluşturulmuş sabit bir kök bölgesine ihtiyaç duymamaktadır.

Bu çalışma kapsamında, Yalova’da yer alan bir inceleme alanında tie-back elemanlar ve mini kazıkların birlikte kullanıldığı bir derin kazı destekleme sistemi ele alınmıştır. İlgili destekleme sistemi çalışma sahasında uygulanmış ve performansı hem aletsel gözlem yöntemleriyle hem de sayısal modelleme metodlarıyla değerlendirilmiştir. Farklı zemin profilleri altında, tie-back elemanlarının kazı stabilitesine etkisi ile yatay ve düşey aralıklarının iksa sisteminin performansına olan katkısı irdelenmiştir. Sayısal analizler, sonlu elemanlar yöntemine dayalı PLAXIS 2D yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler çalışma sahasında gerçekleştirilen aletsel gözlemlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İlgili çalışma, özel durumlarda tie-back sistemlerinin etkinliğini ortaya koyarak uygulayıcı mühendislik tasarımlarına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Geoteknik mühendisliği, derin kazı destekleme sistemleri, iksa performans analizi, tie-back, aletsel gözlem, yapı-zemin etkileşimi.

ABSTRACT

Investigation Of Performance Of Tie-Back Deep Excavation Support System

İbrahim ÖÇAL

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Murat Ergenokon SELÇUK

The increase in urban development and limited land conditions in urban areas require the more widespread and effective use of deep excavation methods. The increase in deep excavation applications has led to the more widespread application of excavation support (buttress) systems. These systems are used to maintaining the structural stability of nearby buildings, safely balance the active soil pressures ensure that the excavation reaches the intended foundation level.

However, in some special cases, there may be structures located at the center of a piece of land where deep excavations are carried out simultaneously. Specially designed deep excavation support systems are required to prevent these structures (historical structures, pipe bridges, electricity poles, etc.) from being damaged during the excavation process and to maintain their service life. In this context, tie-back elements that stabilize the excavation by connecting opposing vertical buttress elements to each other provide an effective solution to maintain structural stability. Unlike traditional prestressed anchors, tie-back elements do not require a fixed mortar body to transfer the loads.

In this study, a deep excavation support system consisting of tie-back elements and mini piles was investigated in a case study in Yalova, Türkiye. The support system

was implemented in situ and its performance was evaluated by both instrumental observation and numerical modeling. The effect of tie-back elements on excavation stability and the contribution of horizontal and vertical spacing to the overall performance of the support system were investigated under different soil profiles. Numerical analyses were performed using PLAXIS 2D software based on the finite element method and the results were compared with field monitoring data. This study aims to highlight the effectiveness of tie-back systems in specific scenarios and provide valuable information for practical engineering designs.

Keywords: Geotechnical engineering, deep excavation supporting system, performance analysis of deep excavation supporting system, tie-back, instrumental observation, structure – soil interaction.



İnşa edilecek yeni yaşam alanlarında (konut, alışveriş merkezi, otopark vs.) kullanım alanlarının arttırılması her zaman mevcut zemin seviyesinden yukarı doğru gerçekleşmemektedir. Günümüzde özellikle büyük şehirlerde kullanım alanlarının daralması sebebiyle sıklıkla başvurulanan yöntemlerden olan derin kazı yöntemleri yeni yapılacak yapıların temellerinin daha derinde konumlandırılmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla daha derinden başlayan temeller üzere yapı katları inşa edilerek yapının otopark, sığınak, depo, spor salonu gibi kullanım alanları zemin seviyesi altında konumlandırılabilir. Derin kazıların hedeflenen temel kotu seviyesine kadar güvenle yapılabilmesi için kritik faktör şüphesiz ki derin kazı destekleme (iksa) sistemleridir. Yatay ve düşey destekleme elemanlarının komplike şekilde çalıştırılması ile teşkil edilen iksa sistemlerinin doğru şekilde çalışıp istenilen performansı sergileyebilmesi için ise ilgili elemanlarının doğru tercih edilmesi gerekmektedir. Günümüzde teşkil edilen iksa sistemlerinde genellikle düşey destekleme elemanı olarak betonarme kazıklar kullanılırken yatay destekleme elemanı olarak ise ihtiyaca göre öngermeli ankraj, zemin çivisi vs. elemanlar tercih edilmektedir. Ancak çalışma sahalarında yaşanması muhtemel özel geoteknik problemler de meydana gelebilmektedir. Yaşanan bu özel geoteknik problemler beraberinde özel çözümleri de getirmektedir. Tie-back elemanlar bu özel durumlarda kullanılan ve derin kazıların, çevre yapılar ve yapı çukuru için herhangi bir stabilite tehlikesi arz etmeden hedeflenen seviyeye kadar güvenle tamamlanabilmesini sağlayan özel bir yatay destekleme elemanı olarak çalışma sahalarında teşkil edilen iksa sistemlerinde aktif olarak kullanılmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde ilgili geoteknik problemler, tie-back elemanların bu problemlerde kullanım alanı ve bu geoteknik problemlerin yaşanıp tie-back elemanların aktif olarak kullanılarak çözüm üretildiği örnek çalışma sahaları için sonlu elemanlar yöntemi prensibine dayalı gerçekleştirilen geoteknik tasarım analizlerinin irdelenmesi ve ilgili sahalarda yapılan saha uygulamaları sonucunda meydana gelen sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

1.1 Literatür Özeti

Geçmişten günümüze değişen ve gelişen teknolojiler doğrultusunda insan ihtiyaçları da değişmiş, gelişmiş ve insanların standartları yükselmiştir. Artan nüfusla birlikte daha fazla yaşam alanına (metro, tünel, alışveriş merkezi, okul, konut, otopark vs.) ihtiyaç duyulmuş, ancak bu yapılaşma için kullanılabilecek alan doğal olarak nüfusa doğru orantılı artmamış, aynı kalmıştır. Bu sebeple bahse konu olan yaşam alanlarının yapımı için var olan arazilerin daha efektif kullanılması amacıyla mühendisler tarafından derin temel yöntemleri uygulanmaya başlanmıştır. Derin temel yöntemleri, düzensiz ve desteksiz açılan derin bir kazıda (kazı derinliği > 6m (Ou, 2006) şev kendi stabilitesini sağlayamayacağı için derin kazı destekleme sistemlerini de (iksa) beraberinde zorunlu kılmıştır.

Derin kazı yönteminin ve bu yöntemle komplike olarak kullanılacak yatay, düşey destekleme elemanlarının belirlenmesi mühendisliğin iki farklı branşı olan jeoloji ve inşaatın birlikte çalışmasını gerektiren bir konudur. Çalışılacak olan arazinin bulunduğu coğrafya, zemin tabakalarının yapısı, yer altı su seviyesi, çevre yapılardan destekleme sistemlerine aktarılabilecek olan yükler vs. seçilecek olan yöntem ve sistem üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Günümüzde gerçekleştirilen derin kazı destekleme sistemi tasarımlarında genellikle belirtilen parametreler göz önünde bulundurularak düşey destekleme elemanı olarak kazıklı sistemler kullanılmaktadır. Yatay destekleme elemanı olarak ise çoğunlukla istinat yapısına etkiyecek yatay itkiler ve bu itkilerin iksa sistemine etkiyeceği süreç göz önünde bulundurularak öngermeli ankraj ya da zemin çivisi kullanılmaktadır. Fakat zemin parametrelerinin müsaade ettiği ancak yapı / parsel geometrisinin müsaade etmediği durumlarda öngermeli ankraj ve zemin çivisi gibi yatay elemanlar efektif olarak kullanılamamaktadır. Örneğin bir parselin ortasında ya da iksa hattı üzerinde kalan ve yapısal stabilitesinde yaşanacak herhangi bir kaybın büyük problemlere sebep olabileceği yapılar bulunduğu ya da çalışma sahası içerisinde konumlandırılması gereken iksa hattının bir dış bükey kenara sahip olduğu durumlarda ilgili yatay destekleme elemanları efektifliğini kaybetmektedir. Başka bir örnek olarak bir liman yapısı için tasarlanan iksa sisteminde kullanılacak yatay destekleme elemanlarının çimento enjeksiyonu ile yapılması yapı stabilitesini yeterli kadar muhafaza edemeyecektir. Günümüzde bahse konu problemlerin çözümünde

tie-back ve tie-rod elemanlar kullanılarak farklı geoteknik çözümler geliştirilmiştir.

Örneğin bir yamaşıma yapışı tasarlanması sırasında yapılacak olan istinat kazıkları hem eksenel hem de yatay yüklere maruz kalmaktadır. Ancak betonarme kazıkların bir tarafında zemin bir tarafında deniz olduğu için yapılan kazıklar üzerlerine etkiyen yanal yükleri güvenli taşıyabilmeleri için herhangi bir yanal destekleme elemanı ile desteklenememektedir. Bahse konu durumun çözümü için P.V. Premalatha, G. Sandeep, P. Jayabalan ve K. Muthukumaran tarafından 2009 yılında yapılan bir çalışmada ilgili problemin çözümü için tie-rod elemanı kullanılmıştır. İmalatı tamamlanan belirli bir uzaklıkta konumlandırılan betonarme bir duvara sabitlenmiştir tie-rod elemanlar vasıtasıyla sabitlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi prensibi ile çalışan bir bilgisayar programı olan Plaxis 2D yazılımında gerçekleştirilen analizler sonucunda tie-rod elemanların istinat kazıklarında meydana gelmesi muhtemel maksimum yatay deplasman miktarını önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir (P.V. Premalatha, G. Sandeep, P. Jayabalan ve K. Muthukumaran, 2009).

Birleşik Arap Emirlikleri'ne bağlı Abu Dabi Musaffah'ta yer alan başka bir liman yapısında yine aynı metot doğrultusunda yatay destekleme elemanı olarak tie-rod elemanı kullanılmıştır. Yapılması planlanan derin kazının deniz ve kara birleşim noktasında palplanş perde ile sızdırmazlık sağlanmıştır. Ancak palplanş perdenin yatay itkileri karşılayamaması sebebiyle yapılan palplanş perdeler belirli bir uzaklıkta imal edilen rijit kazık elemanlara tie-rod elemanlar kullanılarak sabitlenmiştir. A. Elgamal tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada ilgili destekleme sistemi sonlu elemanlar yönetimi prensibi ile çalışan Plaxis 3D programı ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda tasarımı yapılan sistemin güvenlik katsayısı 4,9 olarak tayin edilmiş ve tasarımı yapılan derin kazı destekleme sisteminin belirlenen güvenlik faktörlerini sağlayarak üzerine gelen yanal toprak itkilerini karşıladığı belirlenmiştir. Yapılan analizin başka bir sonucunda ise en kritik bölümde duvarda oluşan maksimum yatay deplasman miktarının 2,1 cm ile 3,3 cm arasında kaldığı tespit edilmiştir. Bahse konu yatay yer değiştirme miktarının kabul edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir. Yapılan dinamik analiz sonucunda ise iksa sistemini oluşturan yatay ve düşey destekleme elemanlarında herhangi bir yapısal hasara rastlanmamıştır. Tüm sonuçlar ışığında yatay

destekleme elemanı olarak tie-rod kullanılan bir liman yapısının gerek statik yükler altında gerek dinamik deprem yükleri altında servis ömrüne devam edebilmesinin mümkün olduğu kanıtlanmıştır (A. Elgamal, 2021).

Dünyanın farklı bölgelerinde bulunan limanlarda yaşanan geoteknik problemlerin bir benzeri İsveç'in Norrköping bölgesindeki eski bir rıhtım yapısında da kendini göstermiştir. 1860 yılında ahşap kazıklar kullanılarak inşa edilen liman yanaşma yapısı 1930 yılında yeniden yapılmıştır. Ancak bulunduğu bölgede ana kayanın 30-42 m derinliklerde yer alması ve üzerinde bulunan yumuşak kil tabakasının taşıyıcılık özelliğinin yeterli olmaması sebebi ile liman yapısı üzerine gelen aktif toprak basınçlarını ve yanal itkileri güvenli şekilde taşıyamaz durumdadır. İlgili problemin çözümünde mevcut yanaşma yapısı önünde 12,5 m uzunluğunda palplanş perdeler yerleştirilerek sızdırmazlık sağlanmış ve yerleştirilen palplanş perdeler 0,6 m kalınlığındaki beton bloğa tie-back ankrajlar kullanılarak sabitlenmiştir. 2019 yılında R.J.N. Azeiteiro, V. Skopal, F. Clifford ve M. Widfeldt tarafından yapılan çalışma kapsamında incelenen bu derin kazı destekleme sistemi Plaxis 2D programı ile analiz edildiğinde güvenlik katsayısının yaklaşık 2,0 mertebelerinde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca tahmin edilen servis ömrü boyunca (120 yıl) yapıda oluşması beklenen maksimum yatay deplasman değeri (10,7 cm) de kabul edilebilir görülmüştür (R.J.N. Azeiteiro, V. Skopal, F. Clifford ve M. Widfeldt, 2019). Yapılan çalışma ışığında derin ana kayanın üzerinde yer alan yumuşak kil zeminde alınacak geoteknik önlemler vasıtasıyla yapılacak olan yanaşma yapılarının 120 yıl gibi servis ömürlerine ulaşabilmesinin mümkün olduğu gösterilmiştir. Yatay destekleme elemanı olarak kullanılan ve palplanş perdeler üzerine etkiyen yatay kuvvetlerin güvenle taşınarak yapının servis ömrüne devam edebilmesini sağlayan tie-back elemanlar da bu geoteknik önlemler doğrultusunda önemli bir role sahiptir.

İran'ın Kiş adasında bulunan Kiş Ticaret Limanında da benzer bir durumla karşı karşıya kalınmıştır. Var olan limanın ticari kapasitesini genişletme amaçlı dört yeni rıhtım yapısı yapılması planlanmıştır. Uzunlukları 80 metre ile 275 metre aralığında değişen bahse konu dört rıhtım yapısının tasarımı bölgenin sahip olduğu sismik şartlar sebebiyle büyük bir öneme sahiptir. Ancak rıhtım yapılarının bulunduğu bölgedeki hâkim zemin tabakaları ilgili sismik yükleri taşıyabilecek potansiyele sahip değildir. Yüzeyde bulunan yaklaşık 7,5 metrelik dolgu tabakasının altında

10,0 metre kalınlığında siltli kum tabakası bulunmaktadır. Siltli kum tabakasının altında ise derinliği tayin edilemeyen, drenajsız kohezyon değeri 100-200 kPa arasında değışkenlik gösteren kil tabakası yer almaktadır. M. Habibi, H. Roodi ve M. Abadimarand tarafından 2009 yılında yapılan çalışmada bahse konu problem doğrultusunda gerek duyulan geoteknik çözümlere ve bu çözümlerin analizlerine yer verilmiştir. Yapılan çalışmada çelik kazıkların tie-rod elemanları ile rıhtım arkasında imal edilen betonarme bir bloğa sabitlemesi üzerine statik ve dinamik analizler yapılmıştır. Analizler kapsamında kullanılan yatay yer ivmesi, 75 yıllık dönüş periyodu için 0.2g, 475 yıllık dönüş periyodu için ise 0.3g olarak kabul edilmiştir. Tie-rod elemanlar için izin verilen çekme dayanımı, tasarımda kullanılan çubuk akma dayanımını %40'ı ile sınırlandırılmıştır. Çelik kazıkların sabitlenmesi amacıyla kullanılacak olan betonarme duvarın yatay deplasmanı ise deprem yükleri altında %1,5 ile sınırlandırılmıştır. Kabul edilen deprem yükleri ve yapılan malzeme dayanımı sınırlamaları doğrultusunda gerçekleştirilen geoteknik analizler sonucunda tasarımı yapılan yapının kaymaya ve devrilmeye karşı güvenlik katsayıları irdelenmiştir. Bunun yanı sıra ilgili yapı temeli için taşıma kapasitesi ve oturma kapasitesi tahkikleri de yapılmıştır. Yapılan tüm tahkik ve analizler sonucunda yapının, üzerine etkiyen yatay yükleri ve deprem yüklerini güvenli şekilde taşıyabildiği tespit edilmiştir. Düşey destekleme elemanı olarak çelik kazık, yatay destekleme elemanı olarak ise tie-rod elemanı kullanılan projede yapı performansı maksimum düzeyde tutulurken maliyet önemli ölçüde azaltılmıştır (M. Habibi, H. Roodi ve M. Abadimarand, 2009). Aynı projenin incelendiği B. Ebrahimian tarafından yapılan çalışmada ise Japonya'da yaşanan Kobe depremi, Türkiye'de yaşanan Kocaeli depremi ve ABD'de yaşanan Los Angeles depremi gibi büyük depremlerde gözlemlenen yer ivmeleri de göz önünde bulundurulmuştur. Yaşanan bu depremler ile birlikte performans dayalı tasarımın temel metodolojisi oluşmuştur. Ebrahimian tarafından 2009 yılında yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar PIANC (2001) yönetmeliği kapsamında yorumlanmıştır. Yapılan çalışmada yapısal eleman olarak 1,5 m² kesit alanlı diyafram duvar, 0,75 m² kesit alanlı ankraj duvarı ve 0.0055 m² kesit alanlı tie-rod elemanlar tanımlanmıştır. Diyafram duvar ve ankraj duvarı arasındaki yatay mesafe ise 54 metre olarak belirtilmiştir. Hem pseudo-statik hem de dinamik analizleri bünyesinde bulunduran bu çalışmada maksimum yatay yer ivmeleri iki seviyede ele alınmıştır. 1. Seviyede 0.25g olarak ele alınan maksimum yatay yer ivmesi için

yatay sismik katsayı (kh) 0.17, 2. Seviyede 0.37g olarak ele alınan yatay yer ivmesi için ise yatay sismik katsayı 0,19 olarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda Mononobe-Okabe yöntemi esas alınmıştır. Dinamik analizde yapılarda gerçekleşmesi muhtemel deformasyonların kıyaslanabilmesi için 3 farklı yük kombinasyonu uygulanmıştır. FLAC programında yapılan dinamik analizler Tahran Üniversitesinde yapılan sarsıntı tablası deneyi ile kanıtlanmıştır. Analizler sonucunda 2. Seviye (0.37g) deprem ivmesi altında diyafram duvarın maksimum yatay deplasman miktarı 32 cm olarak ölçülmüştür. Dinamik analiz ve pseudo-statik analiz kıyaslandığında ise dinamik analizde elde edilen negatif eğilme momenti pseudo-statik analizde elde edilenden %70 daha fazla çıkmıştır. Ayrıca sistemde kullanılan çekme yüklerine maruz bırakılan tie-rod elemanlar için güvenlik katsayıları incelenmiştir. Pseudo-statik analiz sonucunda elde edilen güvenlik katsayıları dinamik analiz sonucunda elde edilen değerlere göre %40 daha fazla çıkmıştır. Yapılan analiz sonuçları PIANC yönergeleri kapsamında doğrulanmış ve yapı performansının tasarım kriterlerini sağladığı sonucuna varılmıştır (B. Ebrahimian, 2009).

R. Düzceer, A. Gökalp ve R. Yörük tarafından 2004 yılında yapılan bir çalışmada ise Hazar denizinin kuzeyinde 100,0 x 150,0 m ebatlarında yapılması planlanan 2 adet petrol sondaj faaliyeti adası için gerçekleştirilen geoteknik çalışmalar incelenmiştir. Kashagan Petrol Sahasının Geliştirilmesi projesinde adaların yapımında 50 metre uzunluğunda dalga ve rüzgar etkilerine maruz kalan ön bölgedekiler ve onları destekleyen arka bölgedeki çelik kazıklar ve bu kazıkların göstereceği yatay deplasmanların sınırlandırılması için tie-rod elemanlar kullanılmıştır. İnşa edilen yapı için önlem alınması gereken en önemli konu kış aylarında yaşanan buz çarpmalarıdır. Yapıda kullanılan tie-rod elemanlar ile buz çarpması sonucu etkiyen yatay yüklerin ön kazıklardan arka kazıklara aktarımı sağlanmıştır. Bu sayede yapı tie-rod elemanlar sayesinde yapısal stabilitesini koruyarak servis ömrüne devam edebilmiştir. Ayrıca geliştirilen bu geoteknik çözüm sayesinde proje beklenen süreden (90 gün) daha kısa sürede (60 gün) tamamlanabilmiştir (R. Düzceer, A. Gökalp ve R. Yörük, 2004).

Çin'in büyük bir limanında ağır tonajlı yük gemilerinin yanaşması için 100.000 ton kapasiteli genel yük iskelesi yapılması planlanmıştır. Planlanan yapının geoteknik analizinde geleneksel sistemin dışına çıkılarak dönemine göre yenilikçi bir çözüm

sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yenilikçi çözüm sisteminde ön sıra kazıklar, bariyer kazıkları ve ankraj duvarları kullanılmıştır. Ayrıca bahse konu düşey destekleme elemanlarını birbirine bağlayarak birlikte çalışmalarını sağlayacak tie-rod elemanlar kullanılmıştır. Z.Y. Cai, J.L. Li, M. Xu ve Y.X. Liu 2009 yılında kullanılan bu geoteknik çözüm üzerine bir dizi analiz ve çalışma yapmışlardır. Yapılan analiz ve çalışmaların sonucunda aktarılan bilgilere göre tie-rod elemanlar sayesinde çelik kazıklar üzerine etkiyen yatay itki kuvvetleri arka bölümde yapılan bariyer kazıklara aktarılmıştır. Bu şekilde sistem üzerine etkiyen toplam yatay kuvvet kazıklar arasında paylaştırılmıştır. Proje kapsamında kullanılan tie-rod elemanlar Q345 veya Q235 kalite çelik kullanılarak üretilmişlerdir. Ayrıca 200 GPa elastisite modülüne sahip olan bu çelik elemanların üzerine etkiyen çekme kuvveti 560 kN/m olarak hesaplanmıştır. Yapılan destekleme sistemi ve geleneksel sistem karşılaştırıldığında geleneksel sistemde kazıklar üzerine etkiyen eğilme momenti 2700,0 kN.m/m iken yeni sistemde bu değer 850,0 kN.m/m mertebelerine düşmüştür. Başka bir parametre olan gerçekleşmesi muhtemel maksimum yatay deplasman üzerinden iki sistemin kıyaslaması yapıldığında ise geleneksel sistemde kazıklarda oluşan maksimum yatay deplasman miktarının 17,5 cm olacağı yapılan analizler sonucunda öngörülmüştür. Yeni sistemde ise bu değer 10,5 cm'ye düşeceği hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda yeni sistem için şu değerler elde edilmiştir; Ön kazıklar eğilme momenti = 850,0 kN.m/m, bariyer kazıklar eğilme momenti = 4930,0 kN.m/m, ankraj duvarı eğilme momenti 1490,0 kN.m/m. Yapılan analiz, çalışma ve kıyaslamalar sonucunda yeni sistemde kullanılan tie-rod elemanın yapı stabilitesini artırırken proje maliyetini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar neticesinde yapılan çalışmada tie-rod elemanının ön duvarın yük altındaki yatay deplasmanını ve eğilmesini sınırlandırdığı, yapı-zemin etkileşiminden kaynaklanan problemlerin giderilmesinde efektif rol oynadığı kanısına varılmıştır.

Benzer bir geoteknik çözümleme Batı Afrika ülkesi olan Togo'da uygulanmıştır. Togo'da bulunan Lome Konteyner Terminalinde 1,05 km uzunluğunda ve 16,7 metre derinliğinde bir rıhtım yapısı ve 55 hektar araziye kapsayacak şekilde bir konteyner depo sahası yapılması planlanmıştır. Sahada hâkim olan zemin koşullarının kumlu ve siltli kil tabakalardan oluşması sebebiyle inşası planlanan yapı beraberinde bir geoteknik çözümleme zorunluluğu da getirmiştir. Bahse konu

geoteknik çözümleme kapsamında yanaşma yapısının olduğu ön kısma diyafram duvarlar yapılmış ve bu diyafram duvarlar tie-rod elemanları kullanılarak daha arka bölümde yapılan ankraj duvarlarına sabitlenmiştir. M. A. Jorgensen ve A. Hansen tarafından 2016'da yapılan çalışmada bu projede uygulanan geoteknik çözüm incelenmiştir. Çalışmada yapılan analiz ve irdelemeler sonucunda elde edilen sonuçlara göre tie-rod elemanlar diyafram duvara etkiyen yanal toprak yüklerinden ve sürşarj yüklerinden kaynaklanan aktif toprak basıncı kaynaklı oluşan yatay deplasmanları azalmıştır. Tie-rod kullanımı sonrası hesaplanan maksimum yer değiştirme 6,1 cm olarak hesaplanmış olup kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu değerlendirilmiştir. Gerçekleşen yatay deplasmanın ise öngörülen değerin %30 altında olduğu kullanılan aletsel gözlem metotları vasıtasıyla ölçülmüştür. Plaxis 2D programında yapılan analizler sonucunda ise kullanılan tie-rod elemanlarının diyafram duvarın stabilitesini arttırarak liman ve depo yapısı sahasının inşasını mümkün kıldığı belirlenmiştir. Bu geoteknik çözüm ile inşası tamamlanan liman, bölgenin önde gelen ticaret merkezlerinden biri olmuştur (M. A. Jorgensen ve A. Hansen, 2016).

Tie-rod elemanların liman yapılarında efektif kullanıldığı örnekler çok fazladır. Ancak geoteknik sorunun doğru tanımlanamadığı durumlarda ya da tasarım ve uygulama aşamalarında gerekli özenin gösterilmediği durumlarda tie-rod elemanlar üzerlerine gelen yüklerinin düşey destekleme elemanlarına aktarımını doğru şekilde gerçekleştiremeyebilmektedir. Bu durumun bir örneği Mısır'da bulunan çelik kazıklı bir liman projesinde yaşanmıştır. Proje kapsamında 20 metre uzunluğunda çelik kazıklı bir rıhtım duvarı tasarlanmıştır ve tasarlanan duvar 6 metre uzunluğundaki diğer duvara çelik tie-rod elemanlar ile yanal stabilitenin sağlanması için sabitlenmiştir. Tie-rod elemanlar 50.8 mm çapında donatılar kullanılarak oluşturulmuş olup, 1,2 metre aralıkla teşkil edilmişlerdir. Ön germe kuvveti olarak ise 50 kN tayin edilmiştir. Rıhtıma yanaşan gemilerden destekleme sistemine 50 kN/m, rıhtım üzerindeki vinç ve diğer hareketli yüklerden ise toplam 50 kN/m² yük aktarımı olacağı öngörülmüştür. Ancak tasarım aşamasında kuşak kirişleri ihmal edilmiş, tie-rod elemanlar her ne kadar malzeme sınıfı olarak yeterli seçilse de aynı hassasiyet tie-rod başlarında kullanılan somunlarda gösterilmemiştir. Yapılan bu tasarım hataları ile birlikte imalat sonrasında tie-rod elemanların bakım ve kontrolü de aksatılmıştır. Tüm bu ihmaller sonucunda süreç içerisinde tie-rod elemanlar

üzerlerine gelen yükleri güvenli şekilde düşey destekleme elemanlarına aktaramamaya başlamıştır. Tasarım aşamasında 2,0 cm olarak öngörülen maksimum yatay deplasman değeri 14,5 cm seviyelerine yükselmiş ve dolayısıyla rıhtım yapısının denize doğru hareketi gözle görülür noktalara ulaşmıştır. Tie-rod elemanların sağlam olduğu durumda kazıklar üzerine etkiyen eğilme momenti +116 kN.m iken tie-rod elemanların bu denli yüklenip kopması sonucunda -272 kN.m olarak tespit edilmiştir. Bu durum rıhtımı kullanan gemilerin ve personellerin güvenliğini tehlikeye atmıştır. Yapılan onarım tasarımlarında ters u kirişler kullanılması planlanmıştır. Analiz sürecinde Plaxis 2D programından faydalanılmıştır. Yapılan tasarımlarda tie-rod kopması sonucu oluşan 14.5 cm'lik yatay deplasman değerinin yeniden 2 cm seviyelerine düşürülebileceği ve kopma sonucu 1.24'e düşen güvenlik katsayısının yeniden yükseltilerek 2.33 mertebelerine getirilebileceği tespit edilmiştir. Bahse konu süreçleri E. M. Galal, D. E. Youssef ve E. R. Tolba 2022 yılında yapmış oldukları çalışmada irdilemişlerdir. Tie-rod elemanların doğru tasarlanıp uygulandığı takdirde üst düzey bir yatay destekleme verimliliği sunduğu ancak bu örnekte olduğu gibi tasarım ve uygulama aşamasında yapılacak hatalar silsilesi akabinde uygulama sonrasında da bakım ve kontrol eksiliği olduğunda yapı stabilitesinin ne denli etkilenebileceği çalışma kapsamında incelenmiştir. Çalışma her ne kadar başarısız bir tie-rod kullanımı örneği olsa da tie-rod elemanların geoteknik çözümler doğrutusunda yapı stabilitesi üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu da ortaya koymaktadır (E. M. Galal, D. E. Youssef ve E. R. Tolba, 2022).

Tie-rod elemanlar yalnızca liman yapılarında meydana gelen geoteknik problemlerin çözümünde kullanılmamaktadır. Benzer bir problemin bir başka gözlemlendiği yer Amerika Birleşik Devletleri'nin Vermont eyaletinde yer alan bir IBM tesisidir. B. F. Townsend ve A. D. Walker 1993 yılında yaptıkları bir çalışmada tesiste yaşanan problemin çözümüne dair bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada belirtildiğine göre ilgili tesis içerisinde yangın yönetmelikleri kapsamında kaçış tünelleri yapılması gerekiyordu ancak tesisin çalışmaya ara vermesi istenmiyordu. Ayrıca tesis içerisinde kullanılan hassas ekipmanların hasar görmesi istenmiyor, temel betonunda 1 inçten fazla oturma oluşmaması, yapılacak imalat boyunca binanın 1. Katına erişimin kesilmemesi, tünel yüksekliğinin bodrumdan birinci kata kadar olması ve tüm bunların en fazla 12 ay içerisinde

yapılması isteniyordu. Bu şartlar altında mühendisler yapılacak tüneller arasında kalkması planlanan zemin tabakalarını desteklemek için tie-back rod adını verdikleri yatay destekleme elemanları kullanmışlardır. İki istinat yapısının birbirine sabitlenmesi esasına dayanan bu yöntemle tüneller yapıda herhangi bir hasara sebebiyet vermeden 7 ay içerisinde tamamlanmıştır. Yapılan bu imalat ile maliyet ve süre minimum seviyede tutulurken yapı içerisinde çalışan hassas ekipmanlarda ve yapının stabilitesinde herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir. İnşaat süresi boyunca tesis faaliyetlerine devam ettiği için de üretim de herhangi bir aksama yaşanmamıştır (B. F. Townsend ve A. D. Walker, 1993).

Tie-rod elemanların efektif mühendislik çözümleri sağladığı başka bir çalışma alanı ise Tayland, Bangkok'ta yapılan yüksek katlı bir konut yapısının derin kazı çalışmalarıdır. Yumuşak killi bir zemine sahip olan çalışma alanında mevcut olan yüksek su içeriği ve düşük drenaj kapasitesi derinliği 25.0 m'yi bulan kazı çalışmaları için özel geoteknik önlemler almayı zorunlu kılmıştır. Anh Dan Nguyen ve arkadaşları 2023 yılında yapmış oldukları çalışmada bahse konu derin kazı için teşkil edilen tie-rod elemanlarla desteklenmiş iksa yapısının performans analizini gerçekleştirmiş ve tie-rod elemanların iksa sisteminin yük taşıma kapasitesine olan etkilerini de çalışma kapsamında irdelemişlerdir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgularda 4 kademeli ve yatay açıklığı 5-6 m olan tie-rod elemanların, düşey destekleme sistemi olan iksa sistemi bünyesinde imalatı tamamlanan diyafram duvarların yanal hareketlerinin kısıtlanmasında kritik rol oynadıkları tespit edilmiştir. Kayma kaması dışında sağlam zeminde bulunan betonarme elemanlara sabitlenen tie-back elemanların yük aktarım mekanizmasına sağlamış oldukları destek ile düşey destekleme elemanlarında gözlemlenen maksimum yanal deplasman değerinin 65 mm mertebelerinde tutulduğu, tie-rod elemanların kullanılmadığı durumda bu değer 100 mm'leri bulabileceği yapılan analizler sonucunda tespit edilmiştir. Sağlamış oldukları bu yanal direnç ile kazı alanı arkasında kalan çevre yapılarında yapısal stabiliteleri korunmuş ve olası oturma problemlerinin önüne geçilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

İksa sistemleri derin kazılarda istinat yapılarının arkasında bulunan topraklar yüklerinin güvenli şekilde taşınmasını sağlayan sistemlerdir. Aynı zamanda çevre

yapılarda herhangi bir yapısal hasara sebep olmadan kazının yapılabilmesini sağlayan iksa sistemleri, düşey ve yatay destekleme elemanlarının birlikte çalışması ile oluşturulmaktadır. Günümüzde yapılan derin kazıların büyük çoğunluğunda çevre yapıların ortasında bulunan parselde kazı işlemi yapılmaktadır. Genellikle yapılan derin kazının arkasında yatay ivmesi taşınması gereken bir toprak yükü ve üzerinde de sürşarj yükü olarak çevre yapılar bulunmaktadır. Ancak yer yer durum farklı olabilmekte ve çevre yapıların ortasında kalan parsel yerine parselin ortasında kalan çevre yapının etrafında derin kazı yapılması gerekebilmektedir. Bu gereklilik kapsamında etrafında derin kazı yapılacak olan yapının yapısal bir hasara maruz bırakılmadan kazının tamamlanması önem arz etmektedir.

Bir yapının iki tarafında ya da etrafında derin kazı yapılması gerektiği ya da çalışma sahasında derin kazı destekleme sistemi teşkil edilecek bölgelerde dış bükey bir kenar bulunduğu durumlarda öngermeli ankrajlar, zemin çivileri gibi yatay destekleme elemanlarının teşkil edilebilmeleri için yeterli alan bulunamamakta ve iksa yapısında stabilite sağlamak mümkün olmayabilmektedir. Çünkü yapılacak olan bahse konu yatay destekleme elemanlarının yapı altından geçerek diğer taraftan dışarı çıkma ihtimali vardır. Böyle bir durumda yatay destekleme elemanlarının en önemli unsuru olan çimento şerbeti ile oluşturulan sabit bir kök bölgesi oluşturulamayacak ve elemanlar sabitlenemeyecektir. Sabitlenemeyen elemanlar ihtiyaç dahilinde çalışmayacak ve istinat yapısı üzerine etkiyen yatay itki kuvvetlerinin güvenle taşınması konusunda fayda sağlamayacaktır.

Bahse konu problemin çözümünde tie-back adı verilen yatay destekleme elemanları kullanılabilir. Tie-back elemanı diğer yatay destekleme elemanlarından ayıran en önemli özellik imalatında çimento enjeksiyonu kullanılmamasıdır. Öngermeli ankraj, zemin çivisi gibi elemanlarda temel prensip çelik halat demetinin ya da çivi donatısının zemin içerisine yapılan çimento enjeksiyona sabitlenmesidir. Tie-back elemanın çalışma prensibi ise yapının iki tarafında yapılan istinat yapılarının çelik halatlar ile birbirine sabitlenmesi esasına dayanmaktadır. Dolayısıyla derin kazı ortasında kalan yapının yapısal stabilitesinin güvenliği sağlanmış olmakla beraber çimento enjeksiyonu kullanılmadığı için maliyet te düşürülmüş ve bir taraftan imalatı gerçekleştirilen yatay destekleme elemanının eş zamanlı olarak diğer taraf için de imalatının tamamlanmış olması ile proje süresinde de önemli bir tasarruf sağlanmış olmaktadır.

Yalova’da bulunan bir çalışma sahasında yapılacak yeni yapıların temellerinin konumlandırılabilmesi için derin kazı imalatlarının yapılması gerekliliği doğmuştur. İlgili derin kazılar sonucunda oluşacak serbest kazı aynalarının desteklenmesi için ise ilgili saha için derin kazı destekleme sistemi tasarımları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler kapsamında iksa hattı üzerinde kalan yüksek gerilim elektrik direği ve saha ortasından geçmekte olan bir boru köprüsü de göz önünde bulundurulmuştur. Bahse konu sahada yapılması planlanan derin kazıların ilgili yapıların yapısal stabilitesinde herhangi bir kayıp yaşanmadan tamamlanması tasarım analizleri kapsamında büyük önem arz etmiştir. Bu gereklilik doğrultusunda düşey destekleme elemanı olarak Ø30 mini kazıkların, yatay destekleme elemanı olarak ise 3 adet 0,6” çelik halattan oluşan tie-back elemanların kullanıldığı derin kazı destekleme sistemi tasarımları gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında tie-back elemanın davranış biçimi sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan Plaxis 2D programı kullanılarak irdelenmiştir. Nihai analiz sonuçlarına göre çalışma sahasında tie-back elemanlar kullanılarak güçlendirilmiş iksa sistemlerinin uygulaması yapılmıştır. Yapılan uygulama neticesinde yapımı planlanan derin kazılar çevre yapılar, boru köprüsü ve yüksek gerilim elektrik direğinin yapısal stabilitesinde herhangi bir kayba sebebiyet verilmeden belirlenen güvenlik faktörleri sağlanarak güvenle tamamlanmıştır. Çalışma sahası için gerçekleştirilen analizlerin sonuçları bahse konu sahadaki zemin parametreleri, tie-back germe deneyleri ve sahada ilgili hatlarda yapılan inklinometre ölçüm verileri ile desteklenmiştir.

1.3 Hipotez

Örnek bir çalışma sahasında yapılması planlanan yeni yapıların temellerinin zemine oturtulabilmesi için derin kazı yapılması gerekebilmektedir. Bu gereklilik inşaat mühendisliğinin geoteknik anabilim dalının inceleme alanında yer almaktadır. Bu doğrultuda yapılacak derin kazıların geoteknik irdelemeler sonucunda seçilecek derin kazı destekleme elemanları ile desteklenmesi zorunluluğu doğmaktadır. Ancak yapılması planlanan derin kazı hattı üzerinde ya da çalışma yapılacak alanın ortasında yapısal stabilitesi önem arz eden bir yapı (yüksek gerilim hattı taşıyan bir elektrik direği, boru köprüsü, tarihi öneme sahip bir yapı vs.) bulunabilmektedir. Dolayısıyla ilgili yapının etrafında eş zamanlı olarak yapılacak derin kazı

alışmaları sırasında ve sonrasında bahse konu yapının servis ömrüne devam edebilmesi ve herhangi bir yapısal hasara maruz kalmaması esas ön plana çıkmaktadır. İlgili durumun yaşanması durumunda problemin geoteknik çözümlenmesi, yapılması planlanan derin kazların desteklenmesi ve mevcut yapının yapısal stabilitesinin korunması tie-back adındaki yatay destekleme elemanları kullanılarak sağlanabilmektedir. Tie-back elemanın davranışı ve verimliliği ise sahada yapılan aletsel gözlem verileri ve sonlu elemanlar yöntemi ile zm yapılan bilgisayar programları ile kanıtlanabilmektedir. Bu kapsamda bahse konu problemle karşılaşılması durumunda tie-back elemanı kullanılarak evre yapılarda herhangi bir yapısal hasara sebebiyet verilmeden derin kaznın tamamlanması mümkündür.



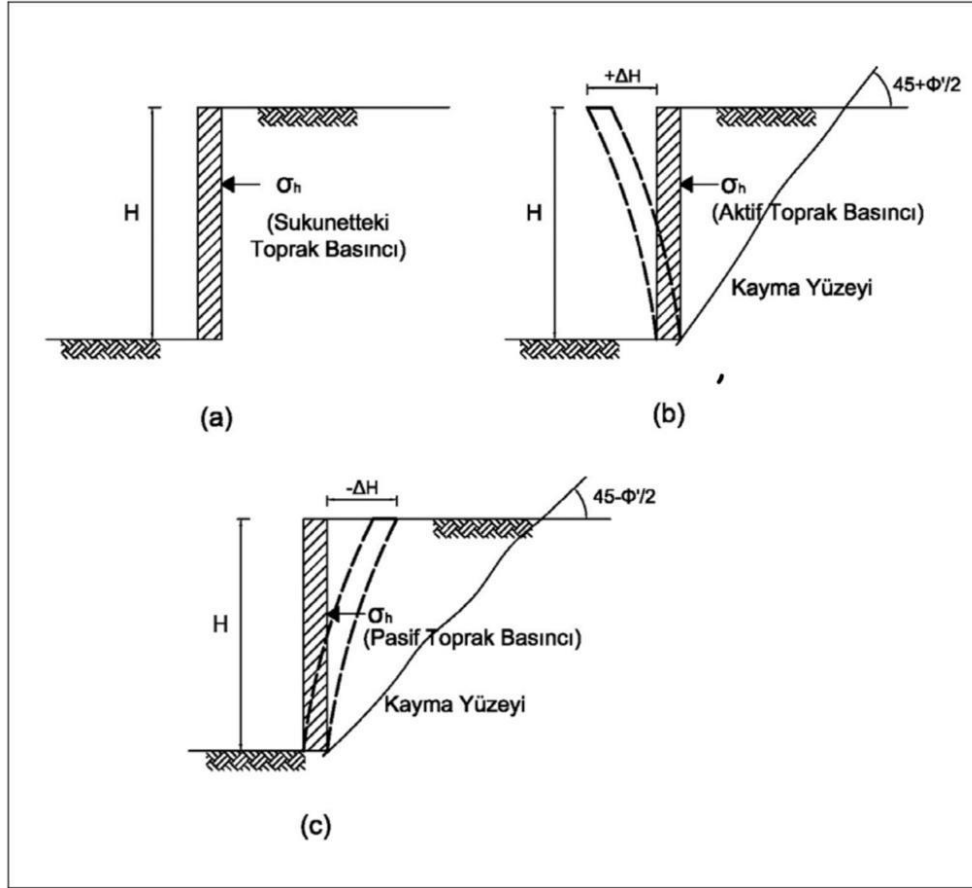
İSTİNAT YAPISINA ETKİYEN YÜKLER

İnşası planlanan herhangi bir yapının (konut alışveriş merkezi vs.) mevcut zemin seviyesinin altında bulunacak katlarında yaşam alanlarının (otopark, spor salonu, üretim alanları vs.) oluşturulması günümüzde önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu ihtiyacın karşılanması için derin kazı yöntemleri geliştirilmiştir. Örnek olarak yapı temellerinin 20 m derine oturtulması ve yapı katlarının bu seviyeden itibaren başlamasının planlandığı örnek bir durumda, herhangi bir destekleme sistemi olmaksızın kazı yapılması sonucunda kazı şevinin belli bir derinlikten sonra göçmesi kaçınılmaz olacaktır. Bahse konu göçme, çevre yapılarda ciddi hasarlara sebep olurken beraberinde can ve mal kayıplarını da beraberinde getirecektir. Bu göçme durumuna sebep olan etken ise şüphesiz ki kazı aynası arkasında oluşan yanal toprak basınçlarıdır. Bu bölümde yanal toprak basınçlarının nasıl oluştuğu, türlerinin neler olduğu, geoteknik tasarımlarda kullanılmak üzere nasıl hesaplandığı detaylı şekilde anlatılacaktır.

2.1 Yanal Toprak Basıncı

Zeminin kayma dayanımı parametreleri, kazı derinliği ve zeminin birim hacim ağırlığı gibi faktörler zemin içerisindeki tabakalanmada düşey gerilmeler oluşturmaktadır. Oluşan bu düşey gerilmeler beraberinde yatay gerilmeleri de getirmektedir. İstinat yapılarına etki eden ve kazı derinliği boyunca değişkenlik gösteren bu kuvvete yanal toprak basıncı denir. Yanal toprak basıncı düşey taşıma elemanlarına yatay düzlemde etkiyen toprak basıncı olarak ta adlandırılır. Genellikle eleman üzerinde kesme kuvveti olarak etkisini gösteren bu yükler normal kuvvetler olarak ta etkisini gösterebilmektedir. Yanal toprak basıncı yük dağılım yönüne göre 3'e ayrılmaktadır. Derin kazı arkasında bulunan zeminin, yapımı devam eden ya da tamamlanmış istinat duvarına (zemin tabakasından yapı çukuruna doğru) yapmış olduğu basınç, aktif toprak basıncı olarak isimlendirilmektedir. İstinat duvarının derin kazı arkasındaki toprak kütlesine doğru (yapı çukurundan zemin tabakasına doğru) uygulmuş olduğu basınç ise pasif toprak basıncı olarak adlandırılır. İstinat yapısının hareketsiz (nötr) olduğu denge

durumundaki zemin-istinat yapısı arasında oluşan basınç durumuna ise sükûnet halindeki toprak basıncı denmektedir. Şekil 2.1’de Aktif, pasif ve sükûnet halindeki toprak basınçları anında istinat yapısı-zemin etkileşimi gösterilmiştir.



Şekil 2.1. (a) Sükûnet halindeki (b) Aktif (c) Pasif toprak basınçları altında istinat yapısı-zemin etkileşimi. (Das, 1999)

Derin kazı yönteminin, bu yöntem kapsamında kullanılacak derin kazı destekleme sisteminin ve sistemi oluşturacak yatay ve düşey destekleme elemanlarının tercihi aşamasında göz önünde bulundurulmuş en önemli faktör toprak basınçlarıdır. Çünkü bir derin kazı tasarımı esnasında esas amaç istinat yapısının arkasındaki zemin tabakasının çalışma sahasına müdahil olmadan istinat yapısı arkasında stabilitesini korumaktır. Bu durum seçilecek olan farklı derin kazı metotları, yatay-düşey destekleme elemanları ve uygulama yöntemleri ile sağlanabilmektedir. Bu sebeple metodoloji belirlenirken önce yatay toprak basınçları doğru tespit edilmelidir. İnşası söz konusu olan istinat yapısının taşıma kapasitesi bu bilgi ışığında belirlenecek güvenlik faktörleri dahilinde seçilecektir.

İstinat yapısının taşıma kapasitesi belirlenirken kullanılacak olan yanal toprak basınçlarının hesaplamaları ilk kez 1776 yılında Charles-Augustin Coulomb tarafından yapılmış olsa da 1857 yılında William Rankine tarafından bu hesaplamalar değişen ve gelişen bilim doğrultusunda nispeten geliştirilerek yeni bir bakış açısına ulaştırılmıştır. İki yöntem de zemin tabakalarının kırılma zarfına kadar olan plastik davranış gösterdiği bölgede yatay yönde meydana gelen hareketler ilkesine dayanmaktadır. Bu sebeple genel kapsama bakıldığında ilgili teoriler için “Plastik denge teorisi” olarak isimlendirme yapmak mümkündür.

Rankine zemin hakkında çeşitli kabuller yaparak minimum aktif ve maksimum pasif toprak basınçları hesapları konusunda önemli gelişmelere imza atmıştır. İstinat yapısına etkileyen yanal toprak basınçlarını hesaplamak adına yapmış olduğu çalışmalarda zemin kütlesinin homojen dağıldığını yani kohezyon, kayma direnci, birim hacim ağırlık gibi karakteristik zemin parametrelerinin zeminin her noktasında aynı olduğunu, istinat yapısı ve zemin tabakası arasında sürtünmenin olmadığını, istinat yapısının oturmuş olduğu tabanla tam 90° açı yaptığını yani yapının tam dik pozisyonda konumlandığını, dolayısıyla yatay ve düşey yönde kayma gerilmelerinin oluşmadığını kabul etmiştir (Yıldız, 2015). Yapmış olduğu bu kabuller her ne kadar gerçekleştirdiği çalışmaları daha hesaplanabilir kılsa da her biri hesaplamalarını gerçeklikten uzaklaştırmıştır. Ancak gerçekten bu denli uzaklaşmasına rağmen yapmış olduğu hesaplamalar kabul edilebilecek doğruluk düzeyinde olup günümüzde aktif olarak kullanılmaktadır.

Charles-Augustin Coulomb ise zeminin izotrop ve homojen olduğunu Rankine gibi kabul etse de Rankine’ den farklı olarak zemin ve istinat yapısı arasında bir sürtünme kuvveti olduğunu öne sürmüştür. Yine Rankine ‘den farklı olarak zeminin kendini tutabilme özelliği olarak adlandırılan kohezyon faktörünü de göz ardı ederek zemini kohezyonsuz olarak ele almıştır. İstinat duvarının yer değiştirmesi ile zeminde bir kayma eğrisi oluşmasını Coulomb keşfetmiştir. Ancak hesapların kolaylığını ve anlaşılabilirliğini sağlamak amacıyla bu kayma yüzeyini düzlemsel olarak kabul etmiştir. Ayrıca Coulomb istinat yapısının üzerinde yer alan sürşarj yükünün de üniform olarak daldığını ve tüm dolgu alanını kapsadığını hesaplarında bir kabul olarak kullanmıştır.

2.1.1. Aktif Toprak Basıncı

Aktif toprak basıncı istinat yapısı arkasından yapı çukuruna doğru etki eden toprak basıncıdır. Rankine yöntemine göre hesaplanış adımları aşağıdaki gibidir;

$$P = \gamma \cdot z \cdot K_{as} - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_{as}} \quad (2.1)$$

Bu denklemde;

γ : Zeminin birim hacim ağırlığı,

K_{as} : Aktif toprak basıncı katsayısı,

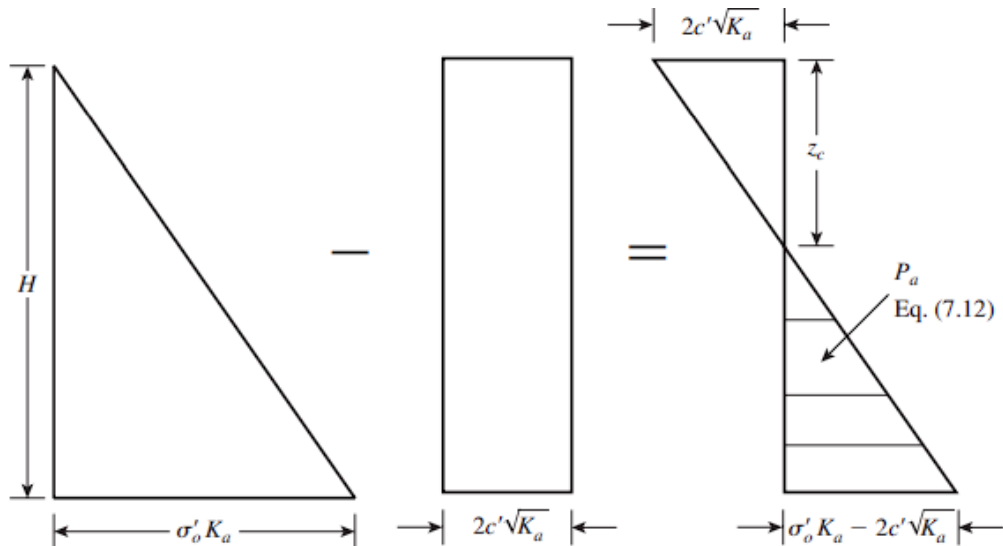
c : Zeminin kohezyon değeridir.

Rankine aktif toprak basıncı hesabında kullanmak üzere aktif toprak basıncı katsayısı (K_{as}) ise aşağıdaki denklem ile belirlenebilmektedir.

$$K_{as} = \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} = \tan^2 \left(45 - \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.2)$$

Ancak kohezyona sahip olmayan (kum vb.) zemin tiplerinde bahse konu olan yöntemle aktif toprak basıncı hesabı yapılırken istinat duvarı yüksekliği (H) boyunca integral alınarak aşağıdaki denklem kullanılır.

$$P_{as} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_{as} \quad (2.3)$$



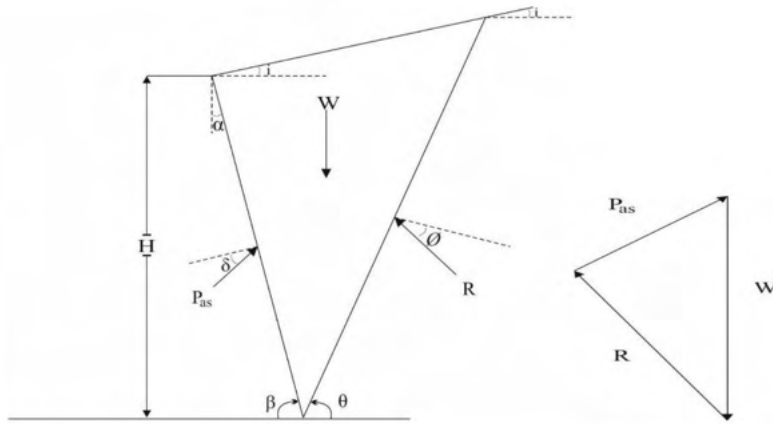
Şekil 2.2. Rankine aktif toprak basıncı dağılımı (Das,1999),

Coulomb ise 1776 yılında yapmış olduğu çalışmalarda kama sistemini kendine prensip olarak kabul etmiş ve Rankine ‘den farklı olarak yükünü hesaplamış olduğunu zemin ile istinat yapısı arasındaki sürtünme kuvvetini göz önünde bulundurmıştır. Ayrıca çalışmalarını tamamlarken çalıştığı zeminin kohezyona sahip olduğunu fark etmesine rağmen hesapların kolay anlaşılabilirliğini sağlamak adına zemini kohezyonsuz kabul etmiştir. Coulomb ’un fark etmiş olduğu ancak hesaplarına dahil etmemiş olduğu kohezyon faktörünü ilk kez Bell (1915) araştırmış ve hesap adımlarına dahil etmiştir. (Bowles, 1966). Bell’in yaptığı çalışmalar ve araştırmalar sonucu elde etmiş olduğu hesaplar ise aşağıdaki denklemlerde belirtildiği gibidir.

$$P_a = \gamma \cdot h \cdot K_a - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_a} \quad (2.4)$$

$$P_p = \gamma \cdot h \cdot K_p + 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_p} \quad (2.5)$$

Bahse konu olan Coulomb ve Rankine çalışmalarının en büyük farkı olan yükü hesaplanan zemin ile istinat yapısı arasındaki sürtünme kuvveti, sürtünme açısı göz önünde bulundurularak tayin edilmekte ve bu sürtünme açısı zeminin cinsine, istinat yapısının yüzeyinin pürüzlülüğüne vs. bağlı olarak değişip zeminin kayma mukavemeti açısının (ϕ) 1/3-2/3 katı aralığında seçilmesine özen gösterilir. Örneğin bir zeminin kayma mukavemeti açısı $\phi = 30^\circ$ ise bağımsız değişkenler göz önünde bulundurularak sürtünme açısı 10 ila 20 arasında bir değer olarak kabul edilip hesap adımlarına devam edilebilmektedir.



Şekil 2.3. Coulomb aktif toprak basıncı kama teorisi

Şekil 2.3' te Coulomb'un kama teorisi ile aktif toprak basıncını hesaplarırken göz önünde bulundurmuş olduğu kuvvet poligonlarına yer verilmiştir. Şekilde ifade edilen poligonlar;

P_{as} : Statik aktif toprak basıncı

W: Zemin kamasının ağırlığı

α : Duvar arka yüzünün düşey düzlem ile yapmış olduğu açı

R: Göçme yüzeyinde doğan sürtünme ve normal kuvvetlerin bileşke kuvveti

$\emptyset$: Zeminin kayma mukavemeti açısı

δ : P_{as} ile istinat yapısı arasındaki zemin-yapı sürtünme açısı $(\frac{\emptyset}{3} - \frac{2\emptyset}{3})$

Coulomb kama teorisi ile hesaplama yapılırken kullanmış olduğumuz P_{as} (statik aktif toprak basıncı) duvar arkasında bulunan kama şeklindeki zemin kütlesinin ağırlığı ile aşağı doğru yönelim hareketi ile bu yönelim sırasında kama zeminin istinat yapısına yapmış olduğu basınç olarak adlandırılır. P_{as} aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

$$P_{as} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_{as} \quad (2.6)$$

Hesap adımında kullanılan statik aktif toprak basıncı katsayısı (K_{as}) ise şu şekilde hesaplanır;

$$K_{as} = \frac{\cos^2(\emptyset - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cdot \cos(\delta + \alpha) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\emptyset + \delta) \cdot \sin(\emptyset - i)}{\cos(\delta + \alpha) \cdot \cos(i - \alpha)}} \right]^2} \quad (2.7)$$

Bu yöntemde zemin kamasına etkiyen birçok farklı kuvvetin denge durumu ön planda olduğu için net bir toprak basıncı dağılımı hesaplanamaz anca lineer olarak 2.5'teki gibi ifade edilirken bu P_{as} kuvvetinin istinat yapısı tabanında H/3 kadar yukarıda olduğu kabul edilir (Kramer, 1996)

$$P_{as} = \gamma \cdot z \cdot K_{as} \quad (2.8)$$

2.1.2. Pasif Toprak Basıncı

Pasif toprak basıncı aktif toprak basıncının tersi yönünde çalışan yani istinat yapısının arkasındaki zeminden yapı çukuruna değil de yapı çukuru tarafında istinat yapısı önünde bulunan zemin tabakasının istinat yapısına yapmış olduğu basınç olarak adlandırılır.

Pasif toprak basıncının oluşabilmesi için istinat yapısının bir miktar hareket etmesi gerekmektedir (Yıldız,2015). Farklı zemin tiplerine göre pasif toprak basıncı oluşması için gereken hareketler de farklıdır. İstinat yapısının yüksekliği H olarak kabul edilirse farklı zemin tipleri için gerekli olan yapı hareketleri Tablo 2.1’ de verilmiştir.

Tablo 2.1. Pasif toprak basıncı oluşabilmesi için gerekli yer değiştirme (Das,2013)

Zemin Tipi	Yer Değiştirme
Gevşek Kum	0.01 H
Sıkı Kum	0.005 H
Yumuşak Kil	0.04 H
Sert Kil	0.02 H

Pasif toprak basıncı için aktifte olduğu gibi birçok farklı hesap çalışması olsa da öne çıkan çalışmalar yine Rankine ve Coulomb’a aittir. Rankine pasif toprak basıncını hesaplamak için kohezyonlu, z derinliğindeki zeminler için (2.9) ‘daki denklemi kullanırken, aynı derinlikte kohezyonsuz zemin tabakası için (2.10) ‘daki denklemi kullanmıştır.

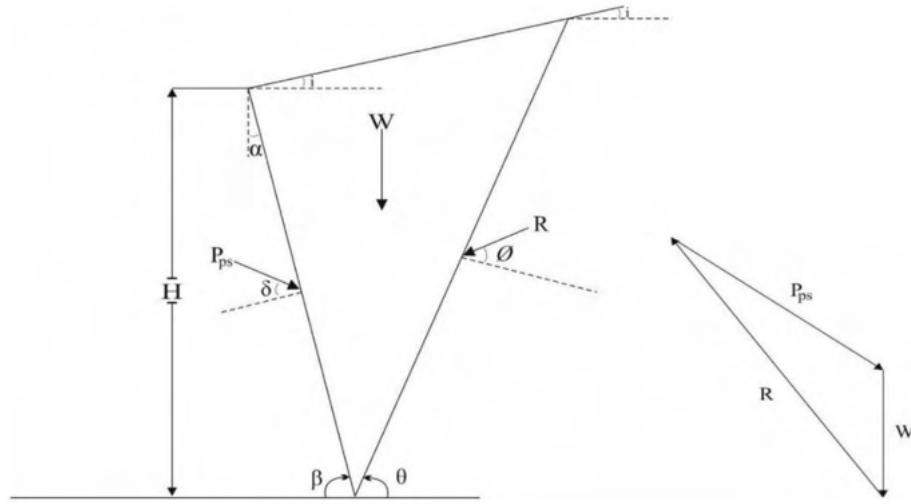
$$P = \gamma \cdot z \cdot K_{ps} - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_{ps}} \quad (2.9)$$

Pasif toprak basıncı hesap adımlarında kullanmış olduğu pasif toprak basıncı katsayısını (K_{ps}) ise aşağıda belirtilen eşitliği kullanarak hesaplamıştır.

$$K_{ps} = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

Ayrıca Coulomb teorisinde olduğu gibi Rankine 'nin de aktif ve pasif toprak basıncı yükleri hesaba konu olan H boyundaki istinat yapısı tabanından H/3 yüksekliğinde etki ettiği kabul edilmiştir.

Coulomb 'un kullanmış olduğu kama teorisi ile pasif toprak basıncı hesaplanırken iste aktif toprak basıncındaki durumun tersi söz konusudur. Aktif toprak basıncında istinat yapısı arkasındaki kama şeklindeki zemin aşağı doğru hareket edip basınç uygularken pasif toprak basıncı durumunda kama şeklindeki zemin yukarı doğru hareket eder ve istinat yapısına minimum basınç uygular. Maksimum basınç uyguladığı andaki durum aktif toprak basıncı olarak adlandırılırken minimum basınç uyguladığı durum pasif toprak basıncı olarak adlandırılır.



Şekil 2.4. Coulomb pasif toprak basıncı kama teorisi

Rankine teorisinde olduğu gibi Coulomb teorisinde de aktif ve pasif toprak basıncı hesapları birbirlerine benzerlik göstermektedir. Şekil 2.4'te Coulomb' un pasif toprak basıncı esnasında yük dağılım kuvvet poligonları gösterilmiş olup şekil üzerinde yer alan parametreler şöyledir;

P_{ps} : Statik pasif toprak basıncı

W: Zemin kamasının ağırlığı

α : Duvar arka yüzünün düşey düzlem ile yapmış olduğu açı

R: Göçme yüzeyinde doğan sürtünme ve normal kuvvetlerin bileşke kuvveti

θ : Zeminin kayma mukavemeti açısı

δ : P_{as} ile istinat yapısı arasındaki zemin-yapı sürtünme açısı $(\frac{\emptyset}{3} - \frac{2\emptyset}{3})$

Şekil 2.4'te belirtilen yüklerin dengede olması halinde lineer olarak pasif toprak basıncı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir;

$$P_{ps} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_{ps} \quad (2.11)$$

Statik pasif toprak basıncı katsayısı (K_{ps}) ise;

$$K_{ps} = \frac{\cos^2(\emptyset + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cdot \cos(\delta - \alpha) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\emptyset + \delta) \cdot \sin(\emptyset + i)}{\cos(\delta - \alpha) \cdot \cos(i - \alpha)}} \right]^2}$$

Şeklinde hesaplanabilmektedir. Coulomb 'un kama teorisinde yüklerin dengesi göz önünde bulundurulduğundan hiçbir zaman mükemmel bir denge söz konusu olamaz. Ancak mükemmele yakın denge durumunda toprak basıncı dağılımı H yüksekliğinde istinat yapısının H/3 kadar yüksekliğinde kabul edilerek aşağıdaki şekilde lineer olarak hesaplanabilir.

$$P_{ps} = \gamma \cdot H^2 \cdot K_{ps} \quad (2.12)$$

2.1.3 Sükunetteki Toprak Basıncı

Sükunetteki toprak basıncı durumunda adından da anlaşılacağı gibi istinat yapısı ve arkasında bulunan zemin tabakası etkileşim halindedir. Ancak bu durumda bir yük dengesi söz konusu olduğu için istinat duvarı bu etkileşim sonucu oluşan toprak basıncından etkilenmemekte ve her ikisi de (zemin tabakası ve istinat yapısı) herhangi bir hareket sergilememektedir. Bahse konu durumdaki toprak basıncı P_0 ile ifade edilmektedir. P_0 değeri (2.13) bağıntısı ile hesaplanabilmektedir.

$$P_0 = \gamma \cdot h \cdot K_0 \quad (2.13)$$

İlgili bağıntıdaki K_0 değeri ise sükunetteki toprak basıncı katsayısı olarak adlandırılıp normal konsolide kil zeminler için (2.14) bağıntısı ile hesaplanabilirken, aşırı konsolide kil (OCR) zeminler için (2.15) bağıntısı kullanılmaktadır (Jaky, 1944). Ayrıca belirtilen bağıntılardan farklı olarak Tablo

2.2’ de verilen zemin tipi K_0 değeri eşleştirmeleri de hesap adımlarında kullanılmak üzere kabul edilerek hesaba devam edilebilmektedir.

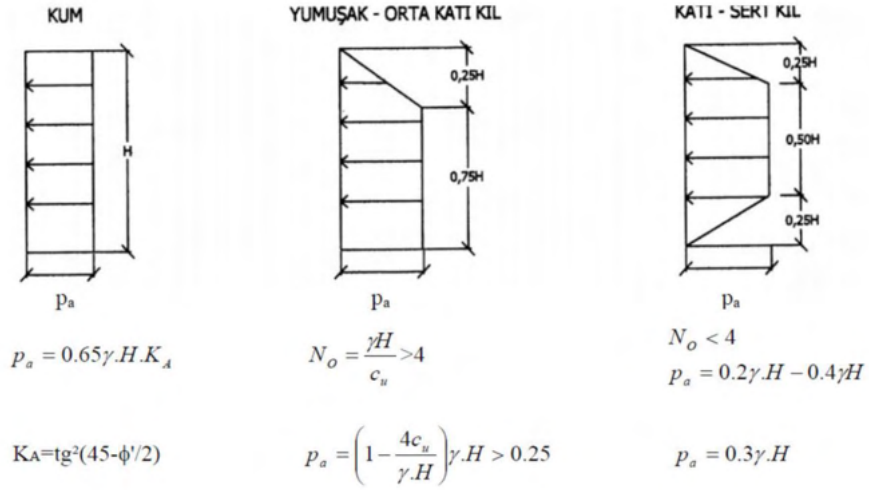
$$K_0 = 1 - \sin\phi' \quad (2.14)$$

$$K_0 = (1 - \sin\phi') \cdot OCR^{\sin\phi'} \quad (2.15)$$

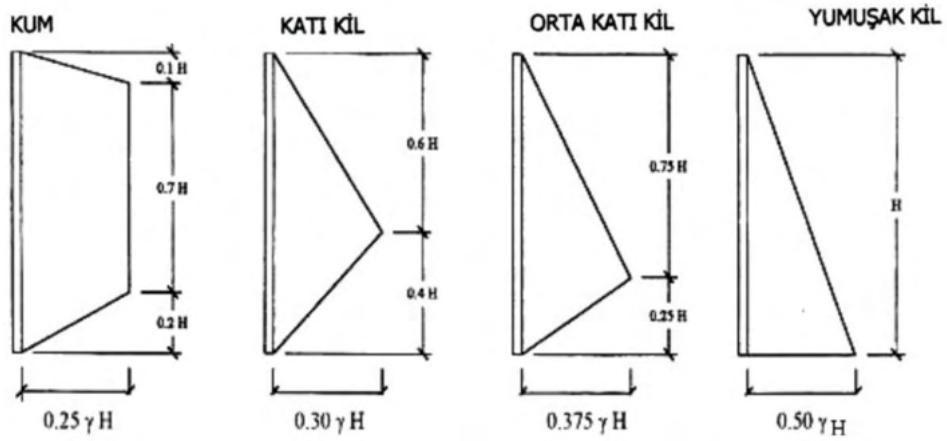
Tablo 2.2. Zemin cinsine göre kabul edilen k_0 değerleri (Uzuner, 2005)

Zemin Cinsi	K_0
Gevşek Kum	0,4
Sıkı Kum	0,6
Yumuşak Kil	0,6
Sert Kil	0,5

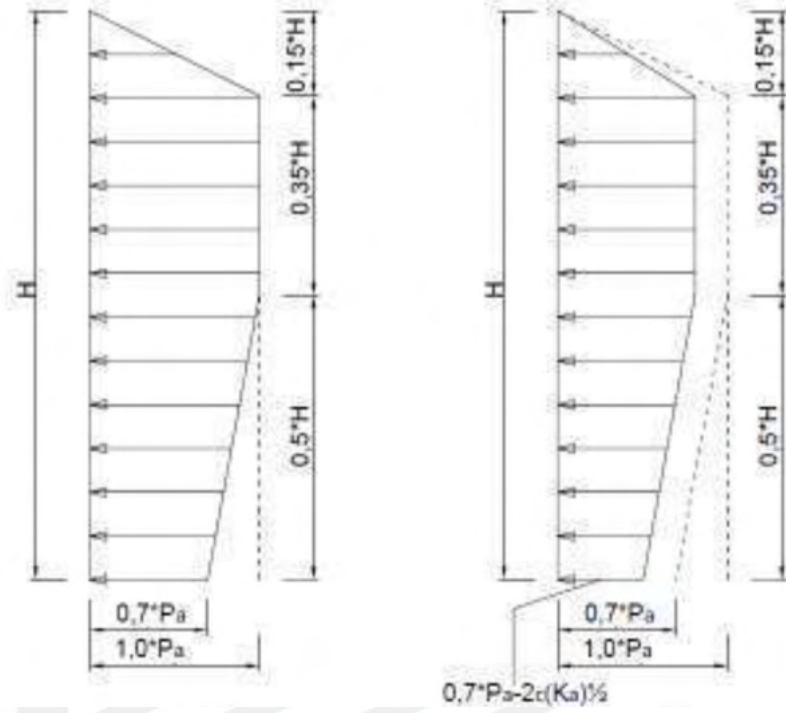
Yanal toprak yükleri hakkında araştırma ve geliştirme faaliyetlerinde bulunan bilim insanları Coulomb ve Rankine ile sınırlı kalmamaktadır. Terzaghi, Peck, Tschebotarioff gibi geoteknik mühendisliğine çeşitli katkılar sağlayan bilim insanları da çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu bilim insanlarının önermiş olduğu toprak basıncı dağılımları Şekil 2.5, Şekil 2.6, Şekil 2.7’ de sunulmuştur. Yapılan bu araştırmalar neticesinde İsveç yapı şartnamesi (1974) tarafından kullanılan yanal toprak basınç dayanımı ise Şekil 2.8’de paylaşılmıştır.



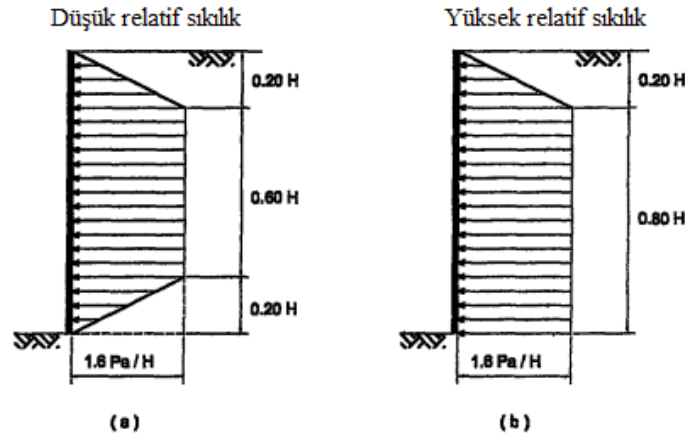
Şekil 2.5. Terzaghi ve Peck tarafından önerilen (1967) yanal toprak yükü dağılı ve hesabı (Köse, 2010)



Şekil 2.6. Tschebotarioff tarafından önerilen (1973) yanal toprak yükü dağılım ve hesabı (Köse, 2010)



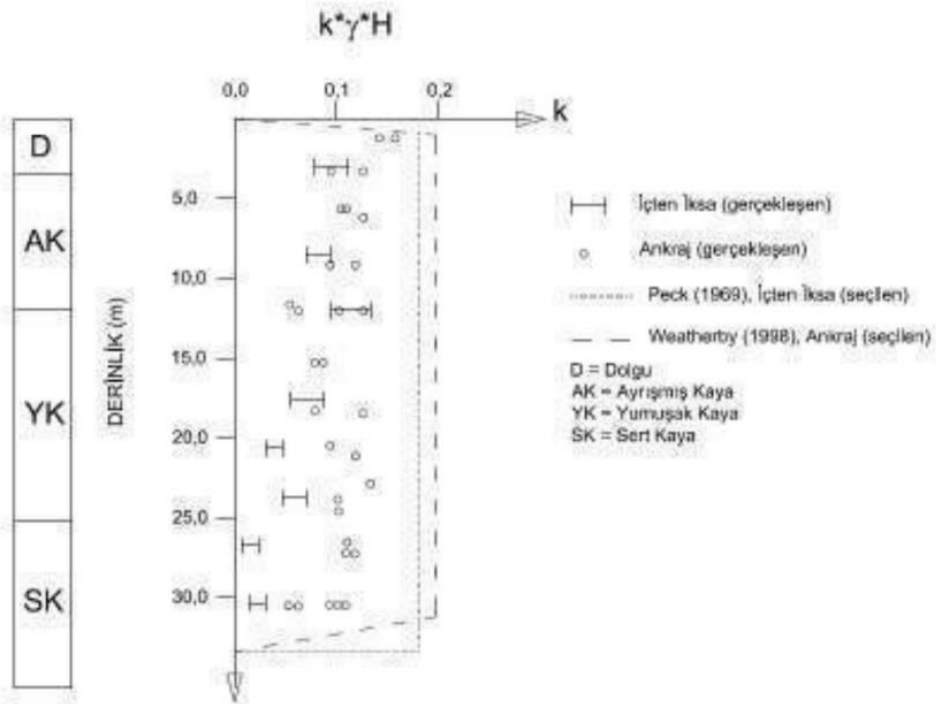
Şekil 2.7. Lehmann tarafından kohezyonsuz zeminler için önerilen yanal toprak basıncı dağılımı (Çınar, 2010)



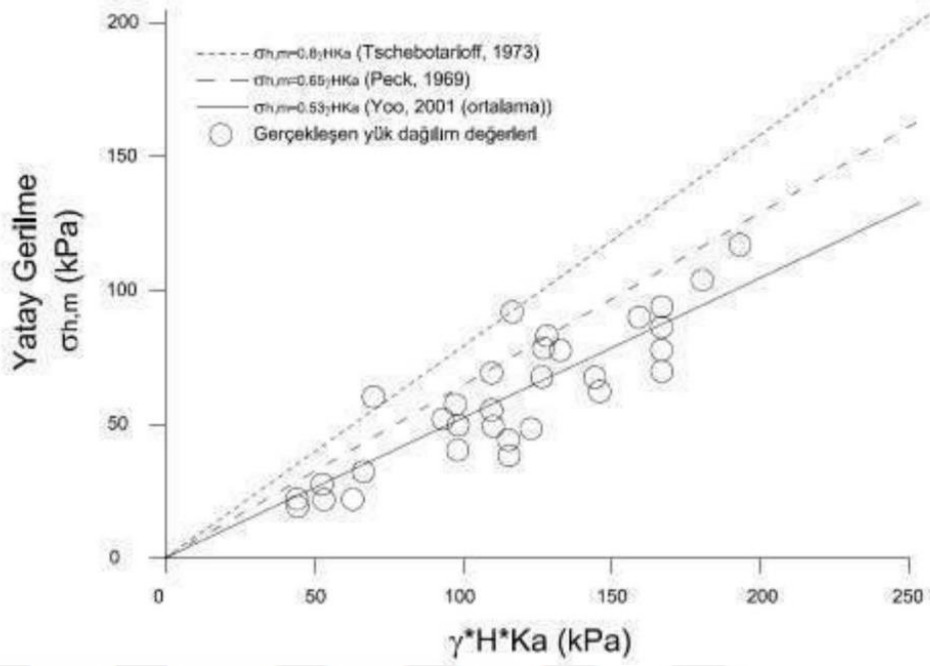
Şekil 2.8. İsveç yapı standardı (1974) tarafından önerilen yanal toprak basıncı dağılımı (Yılmaz, 2001)

Terzaghi, Peck, Lehmann ve Tschebotarioff dışında Navfac, Bjerrum ve Kirkedam (1958), Lambe (1970), Golder (1970), Swatek (1972) ve Klenner gibi araştırmacılar da toprak yükü dağılım konusunda farklı araştırmalar yapmış ve bu araştırmalarının sonucu olarak öneriler sunmuşlardır. Ancak Yoo (2001) tarafından yapılan çalışma

60 farklı derin kazı çalışma sahasından alınan veriler ışığında gerçekleştirilmiş ve gerçek yük dağılımlarına en yakın sonucu vermiştir. Yoo' nun çalışmasının ardından özellikle Terzaghi, Peck ve Tschobotarioff tarafından yapılmış olan önerilerin güvenlik katsayısının çok fazla olduğu dolayısıyla mühendisliğin temel etiklerinden olan ekonomi ile eşleşmediği gözlemlenmiştir. Yoo tarafından yapılan kohezyonlu ve kohezyonsuz zemin tabakaları için öneri Şekil 2.9' da verilmiş olup Yoo'nun gerçekleştirmiş olduğu çalışma sonucunda belirlemiş olduğu değerlerin Tschobotarioff, Terzaghi ve Peck çalışmaları ile karşılaştırması Şekil 2.9' da belirtilmiştir.



Şekil 2.9. Yoo tarafından seçilen ve gerçekleştirilen yük dağılımları (Çınar, 2010)



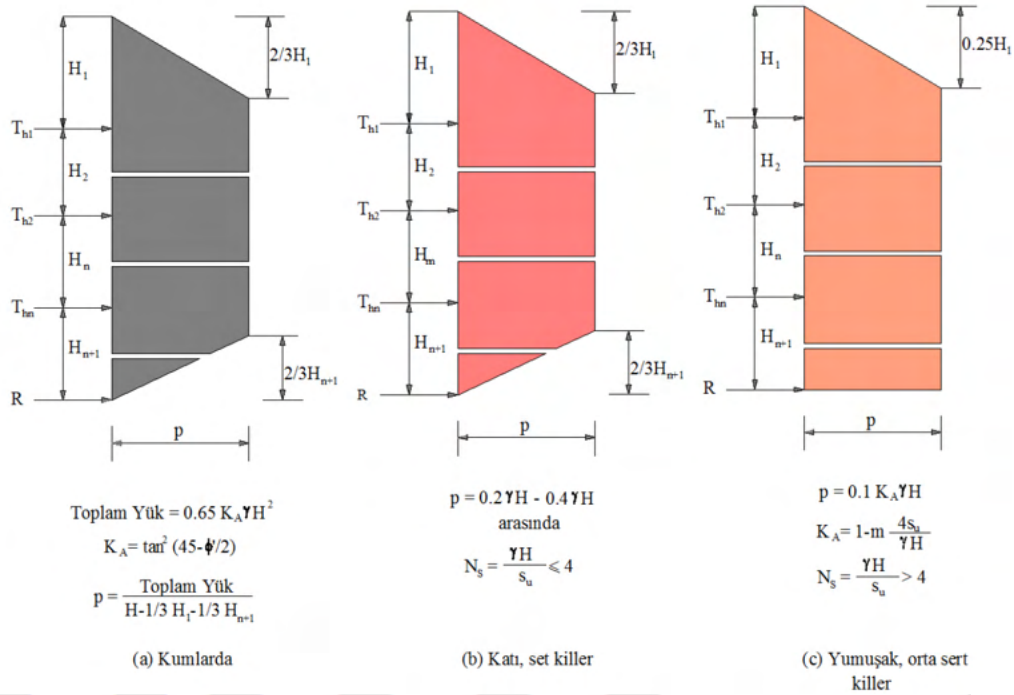
Şekil 2.10. Ankrajlı kazılarda yanal toprak yüklerinin karşılaştırılması.
(Çınar,2010)

Günümüzde imalatı söz konusu derin kazı destekleme sistemlerinin geoteknik tasarım ve analizleri kapsamında bahse konu olan tüm öneriler uygun şartların sağlanması halinde göz önünde bulundurulmaktadır. Süreç boyunca gerek saha araştırmaları sonucu gerekse literatür araştırmaları sonucu elde edilen bilgiler ışığında yapılan hesaplamalar 2022 yılında Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayınlanan Kazı Destek Yapıları Hakkında Yönetmelik kapsamında sistematik bir standart altında değerlendirilmiştir. Günümüzde gerçekleştirilen derin kazı destekleme sistemleri için yanal toprak basınçları ilgili yönetmeliğin 3.2.2.1 maddesinde belirtilen detaylar doğrultusunda hesaplanmaktadır. Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği'nin bahse konu maddesinde kohezyonsuz birimler (kum vs.) için maksimum toprak basıncı (2.16) eşitliği ile hesaplanabilmekte iken ilgili eşitlikte kullanılan K_a katsayısı (2.17) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$P = \gamma \cdot h \cdot K_a \quad (2.16)$$

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.17)$$

Kohezyonlu birimlerde (kil vs.) maksimum toprak basıncı dağılımı için aşağıdaki diyagram ve formüller yönetmeliği ilgili maddesinde sunulmuştur.



Şekil 2.11. Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği kohezyonlu zeminler için yanal toprak basıncı dağılımı diyagramları (KDYY, 2022)

Çok eski yıllarda başlayan yanal toprak yükü hesabı çalışmaları tarihsel süreç boyunca devam etmiş ve derin kazıların yapım sebeplerini oluşturmuştur. Bir derin kazı çalışmasının ilk ve en önemli faktörü yanal toprak yüklerinin doğru saptanması olarak açıklanabilir. Çünkü aslında imalatı muhtemel bir derin kazısının varoluş sebebi kazı arkasında kalacak zeminin dolayısıyla bu zemin üzerinde konumlandırılmış çeşitli yapıların ve yaşam alanlarının göçmeden stabilitelerinin korunmasıdır. Bu sebeple süreç boyunca farklı çalışmalar farklı hesaplamalar ve bunlar ışığında yeni öneriler ön plana çıkmıştır. Yapılması planlanan bir derin kazının tasarım aşamasında ihtiyaç duyulan tasarım parametrelerine göre bu öneriler değerlendirilip çıkarımlar yapılarak tasarımın sürdürülmesidir esastır.

DERİN KAZI YÖNTEMLERİ VE DESTEKLEME ELEMANLARI

Zaman içerisinde nüfus miktarında gözlemlenen artış beraberinde yeni ve çeşitli yaşam alanları oluşturma ihtiyacını da getirmiştir. Bu ihtiyaç karşısında artışına devam eden nüfus farklı sebeplerden dolayı (istihdam, eğitim, sağlık imkanları vb.) büyük şehirlerde yoğunlaşmış ve bu şehirlerde yapılaşma hem yatay hem de düşey olarak hız kazanmıştır. Ancak nüfusun bölgesel olarak yoğunlaşmasının sonucunda, yoğunlaşmanın yaşandığı bölgede bulunan arazilerin yalnızca yer üstünde bulunan kısımları yeterli olmayıp yer altında olan kısımlarının da kullanımı gerekliliği doğmuştur. Tam da bu gereklilik kapsamında derin kazı yöntemleri tasarlanmaya ve kullanılmaya başlanmıştır. Otopark, sığınak, yüksek katlı yapılar ve yer altı ulaşım sistemleri gibi yapılar insanlara hizmet vermeye başlamıştır. Derin kazı yöntemleri birçok avantajı ve dezavantajı da beraberinde getirmiştir. Çalışmanın bu bölümünde derin kazı yöntemleri, avantajları ve dezavantajları ile derin kazı destekleme sistemlerini oluşturan düşey ve yatay destekleme sistemleri detaylı olarak incelenmiştir.

3.1 Derin Kazı, Avantajları ve Dezavantajları

Derin kazı, arazinin tabii zemin kotundan başlanarak ihtiyaca göre belirlenen önce düşey sonra kademe kademe yatay destekleme elemanlarının imalatının yapılıp yatay destekleme elemanları tamamlandıkça kademe kademe kazının yapılarak istenilen yapı çukuru kotuna inilmesine verilen genel addır. Bu süreçte düşey destekleme elemanı olarak farklı ebatlarda fore kazık, mini kazık, diyafram duvar vb. kullanılırken yatay destekleme elemanı olarak zemin çivisi, öngermeli ankraj, strut boruları vb. kullanılabilir. Kullanılması muhtemel bu yatay, düşey destekleme elemanları zemin tabakalarının yapısı, yapı çukurunun derinliği, deri kazı esnasında taşınması planlanan yanal yükler, yapı çukurunun kullanım ömrü ve mimari projenin gereklilikleri gibi farklı parametreler göz önünde bulundurularak birbirleri ile kombinasyonlar yapılarak tayin edilir.

Derin kazılar beraberinde birçok avantajı ve dezavantajı da getirmektedir. Özellikle ülkemizin yeni oluşum bir coğrafya olmasından kaynaklanan depremselliği, imar yönetmeliklerinde yapıların belli yükseklikler ile sınırlandırılmasını zorunlu kılınmıştır. Derin kazılarla birlikte otopark, sığınak, depo, etkinlik salonları vb. yer üstünde olması mecburi olmayan yaşam alanları, yapıların yer altında kalan kısımlarına inşa edilip kat yüksekliğinden büyük tasarruf sağlanmaktadır. Bu tasarruf özellikle nüfusun yoğunlaştığı büyük şehirlerde kendisini net bir şekilde göstermektedir. Ülkemizde gelişen teknoloji ve imkanlarla birlikte kazı derinliği 70-80m yi bulabilen derin kazılar yapılabilmektedir. Belirtilen derinliklerde yapılan derin kazılar yapı-zemin etkileşimini de olumlu yönde etkilemektedir. Yapı temelleri yeryüzüne yakın bulunan jeolojik olarak nispeten daha yeni ve taşıma gücü muhtemelen daha zayıf zemine oturtulacakken derin kazılarla birlikte daha derindeki tahminen taşıma gücü daha yüksek ve eski oluşumlu hatta yer yer coğrafi özelliklere bağlı olarak ana kayaya bile oturtulabilmektedir. Bu durum yapının daha sağlam bir zemine oturtulup hem farklı oturmalarından kaynaklı yapı kullanım ömründeki kısılmaların önüne geçilmesini sağlamakta hem de yapının deprem performansını olumlu yönde etkilemektedir. Derin kazıların bir diğer avantajı ise kazılan malzemenin aynı ya da başka bir yapının inşaatında dolgu malzemesi olarak kullanılabilir olmasıdır. Özellikle nispeten daha derin noktalardan çıkan malzemeler (grovak vb.) dolguda kullanıldığında daha sağlam ve homojen bir dolgu elde edilebilmektedir. Ayrıca derin kazılarla yer altı ulaşım imkanları da gelişmektedir. Metro, tramvay, tüp geçit gibi yapılar sayesinde büyük şehirlerde temel problem haline gelen trafik için yeni ve gözden uzak çözümler üretilebilmektedir. Bu çözümler neticesinde yaşadığımız dünyanın yer altında kalan kısmı da aktif kullanılan ikinci bir şehir haline getirilebilmektedir. Derin kazı avantajlarından bir diğeri ise tersane gibi yapılarda kuru havuzların yapılabilmesidir. Derin kazının olmadığı bir durumda bu havuzlar için çok geniş alanlar gerekecek ve arazi kullanım imkanlarının bu denli kısıtlı olduğu günümüzde yaşam alanı için kullanılacak alanı daha da azaltacaktır. Yüz yıllar önce yaşamış ve her toplum gibi kendilerince yaşam alanları kurmuş medeniyetlerin de tarihi mirasları derin kazılar esnasında gün yüzüne çıkabilmektedir. Gün yüzüne çıkan bu eserler müzelerde sergilenip insanların yaşamış oldukları bölgenin tarihsel medeniyet sürecinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır.

Derin kazıların avantajları saymakla bitmeyeceği gibi sağlamış oldukları avantajların yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajlara başlıca örnek gürültü kirliliği verilebilir. Derin kazı esnasında çalışan makineler (fore kazık, ankraj makinası, kazıcı ekskavatörler vb.) yüksek desibel değerleri ile çalışan aletlerdir ve çevre yapılar da yaşamlarını sürdüren insanları rahatsız edebilecek ses düzeylerine sahiptirler. Gürültü kirliliğinin yanında bahse konu makineler ve inşaat sahasında kullanılan sarf malzemeler çevre kirliliğine de sebebiyet vermektedir. Özellikle makinaların kullanmış oldukları akaryakıt ve her ne kadar filtrasyon işlemi uygulansa da havaya salmış oldukları egsoz dumanı bu konuda önemli bir rol oynamaktadır. Derin kazılar esnasında oluşan bu kirliliklerin yanı sıra maliyet ve zaman faktörü de ön plandadır. Derin temeller için yapılan kazılarda birçok makinenin birbiri ile komplike şekilde çalışması gerekmektedir. Bu işlemler sırasında iş sırası seçiminin doğru yapılamaması, ya da proje başında metodolojinin tam oturtulamaması halinde ciddi zaman kayıpları ve muhtemel maliyet artışları söz konusu olacaktır. Ayrıca derin kazı destekleme sisteminde yer alan elemanların imalatı sırasında yapılacak bir hata anlık olarak gözle görülemeyeceği için fark edildiğinde onarılması ve ortadan kaldırılması da hayli zaman ve maliyet gerektirecektir. Derin kazılar esnasında yaşanabilecek bir diğer olumsuz durum ise şüphesiz çevre yapılarla olan etkileşimidir. Derin kazı esnasında yapılan özellikle ankraj imalatı yatayda yer yer 30-35 metre boylara ulaşabileceğinden çevre yapıların temellerine ya da yer altı tesislerine (elektrik, su, doğalgaz hattı gibi) zarar verebilme potansiyeline sahiptir. Bu nedenle yapılması söz konusu bir derin kazıya başlamadan önce çevre yapılar iyi irdelenmeli ve enerji hatlarının geçtiği bölgeler saha içerisinde uzman ekipler tarafından tespit edilip işaretlenmelidir.

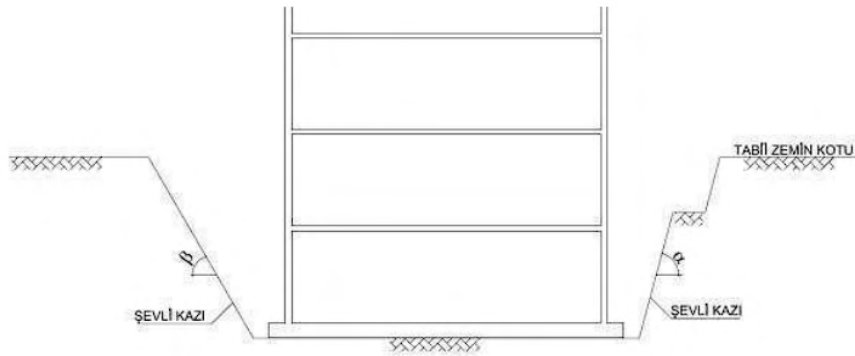
3.2 Derin Kazı Yöntemleri

Derin kazılar, yüksek yapıların temelleri, yer altı ulaşım sistemleri ve yapılarda bulunacak etkinlik alanları gibi birçok farklı ihtiyaca çözüm üretmektedir. Çeşitli ihtiyaçlara çözüm üreten derin kazılar ihtiyacın gereklilikler doğrultusunda farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Bu bağlamda birçok farklı yöntem ve teknik, birbiri ile koordineli bir şekilde çalıştırılarak ihtiyaca uygun derin kazı sistemi tasarlanabilmektedir. Bu yöntemler, birbirlerinden, yapım aşamasında kullanılan elemanlar ve ihtiyaç duyulan kazı çukuru derinliği gibi faktörlerle

ayrılmaktadır. Düşey ve yatay destekleme elemanlarının tercihi, seçilen bu teknik ve yöntemler doğrultusunda yapılırken, çevre yapıların durumu, inşası söz konusu yapının mimari ihtiyaçları, ekipman ve malzeme imkanları ve yapı için öngörülen bütçe planlaması gibi faktörler de göz önünde bulundurulmaktadır.

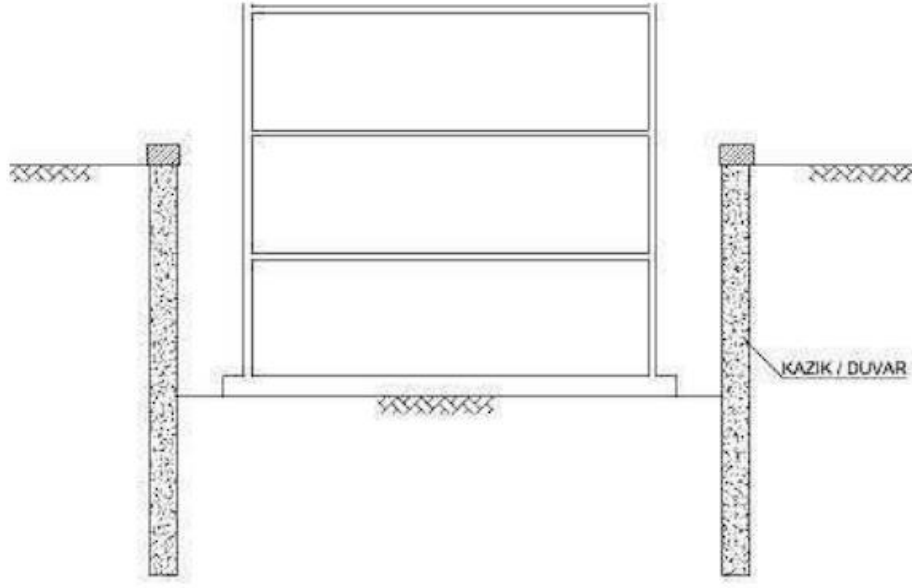
3.2.1 Açık Kazı Yöntemi

Açık kazı yöntemi serbest şevli kazı olarak ta adlandırılmaktadır. Açık kazı yöntemi derin kazı yöntemleri arasında nispeten daha az maliyetli ve hızlı olanıdır. Açık kazı yöntemi eğimli açık kazı ve konsol istinat yapıları açık kazı olmak üzere 2 ana başlık altında incelenebilmektedir (C. Ou, 2006). Eğimli açık kazı Şekil 3.1’ de gösterildiği üzere herhangi bir istinat yapısı gerekmeksizin yapılan şevli kazılardır. Bu yöntem maliyeti minimize edip hızı maksimize etmesinin yanında geniş bir çalışma alanı gerektirmesi ve dolayısıyla ihtiyaç duyulandan daha fazla kazı yapılması handikaplarını da beraberinde getirmektedir.



Şekil 3.1. Eğimli açık kazı yöntemi (C. Ou, 2006)

Konsol istinat yapıları kazı ise düşey destekleme elemanlarının (fore kazık, diyafram duvar, mini kazık vb.) kullanıldığı ancak herhangi bir yatay destekleme elemanının yer almadığı kazı tipidir. Konsol istinat yapısına ait tipik kesit Şekil 3.2’ de gösterildiği gibidir. Bu kazı tipi de eğimli açık kazı yöntemine göre daha maliyetli ve yavaş olsa da kazılacak alanı minimize etmekte, dolayısıyla kazı aşamasında elde edilen hafriyat malzemesinin azalması sonucunu doğurmaktadır. Bu iki yöntem de diğer yöntemlere nazaran daha ilkel yöntemler gibi görünse de gerek maliyetinin az olması gerekse hızlı sonuca varılmasından dolayı sıkça tercih edilen yöntemlerdir. Özellikle çok derin olmayan kazılarda (6-8 m gibi) konsol istinat yapıları açık kazı yönteminin uygulamasına ülkemizde sık rastlanmaktadır.

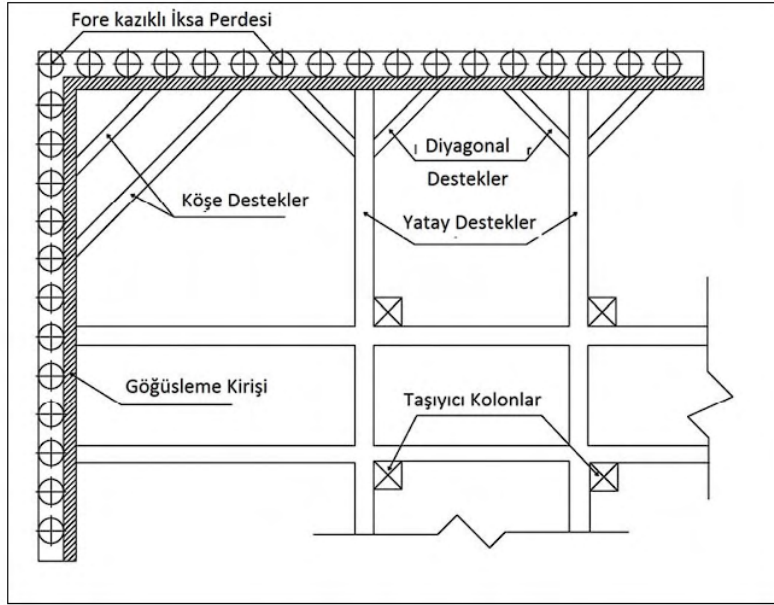


Şekil 3.2. Konsol istinat yapıları kazısı (Çınar,2010)

3.2.2 İçten İksalı Kazı Yöntemi

İçten iksalı kazı yöntemi düşey destek elemanlarının aktif rol oynadığı ancak öngermeli ankraj, zemin çivisi gibi yatay destek elemanlarının bulunmadığı kazı yöntemidir. Bu yöntemde yatay destekleme elemanı olarak taşınması muhtemel yükler ve mimari proje detayları göz önünde bulundurularak farklı tip ve ebatlarda strut boruları kullanılır. Yatayda yük aktarımı sağlamak amaçlı kullanılan bu strut boruları istinat yapısı arkasında kalan zemin tabakasından kaynaklanan aktif toprak basıncını düşey destekleme elemanlarına aktararak derin kazının nihai kazı kotuna kadar belirlenen güvenlik faktörleri dahilinde tamamlanmasına imkan sağlamaktadır. Bu yöntem ülkemizde genellikle dar derin kazılarda kullanılırken çevresel yapılardan (yakın yapılar, taşınamaz enerji hatları, parsel sınırının düzgün dikdörtgen olmaması vb.) kaynaklanan yani öngermeli ankraj veya zemin çivisinin kullanımının mümkün olmadığı durumlarda da kullanılabilir. İçten iksalı kazı yönteminin temel çalışma prensibi, istinat yapısına etkiyen yanal itki kuvvetlerinin strut boruları ile borunun diğer ucunda bulunan düşey destekleme elemanlarına aktarılması esasına dayanır. Bahse konu olan bu aktarım sistemi, ilgili yanal itki kuvvetleri altında istinat yapısında herhangi bir stabilite kaybına sebebiyet verilmeden derin kazının tamamlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Diyagonal destekler ise istinat yapısına gelen toprak basıncını ana yatay desteklere aktararak istinat yapısı cephesinde yükün daha geniş bir alandan transfer edilmesini

sağlamaktadır. Köşe desteklerde bu yük transferi durumu farklı olup istinat yapısına gelen yanal yükün karşı cephede bulunan düşey destekleme elemanları yerine komşu cephede bulunan düşey destekleme elemanlarına aktarımı söz konusudur. Dolayısıyla köşe destekler, bir cephede oluşan aktif toprak basıncını diğer cephede oluşan aktif toprak basıncına geri itki olarak yansıtmaktadır. Tüm bu yatay destek elemanları içten iksalı kazı yönteminin kullanıldığı örnek bir derin kazı sahasında Şekil 3.3'te gösterildiği üzere birbiri ile koordineli bir şekilde çalışmaktadır.



Şekil 3.3. İçten iksalı kazı yöntemi ve destekleme elemanları (Ekici,2010)

İçten iksalı kazı yönteminde imalat adımları aşağıda belirtildiği gibi sıralandığında maliyet ve zaman faktörlerinin minimize edildiği ve dolayısıyla uygulama esnasındaki verimin maksimum noktaya ulaştırılabildiği gözlemlenmiştir. İçten iksalı kazı yönteminin önerilen imalat adımları aşağıdaki gibidir (Ou, 2006);

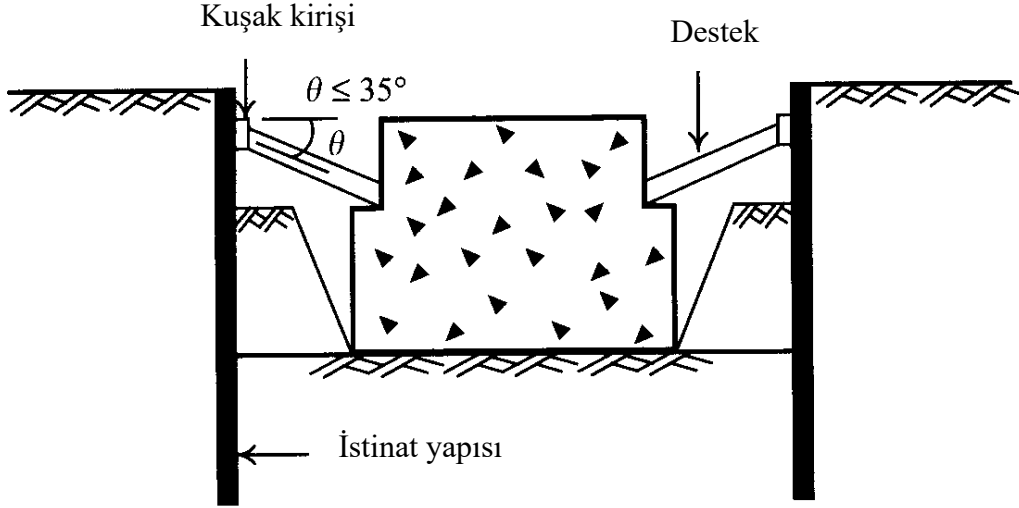
- Düşey destekleme elemanlarının (diyafram duvar, fore kazık vb.) imalatı tamamlanır,
- İlk kazı kademesi yatay destek elemanlarının yerleştirileceği seviyeye kadar tamamlanır,
- İstinat yapısında önceden belirlenen seviyeye göğüsleme (kuşak) kirişlerinin yapılması,
- Göğüsleme kirişlerinin belirlenen noktalarına yatay destekleme elemanlarının (strut borularının) yerleştirilmesi ile ilgili kademe yük aktarımına başlanır,

- Belirtilen adımlar kademe kademe istenilen yapı çukuru derinliğine ulaşılan dek kadar tekrar edilir,
- Nihai yapı çukuru derinliğine ulaşıldığında yapının imalatına başlanıp yapı, yükseldikçe geri dolgu ile strut borularının kademe kademe sökülmesi ile süreç tamamlanır.

3.2.3 Ada Kazı Yöntemi

Ada kazı yöntemi içten iksalı derin kazı yöntemi ve konsol istinat yapıları ile derin kazı yönteminin birlikte kullanılması ile oluşturulan bir derin kazı yöntemidir. Temel prensibi konsol istinat yapılarının yapılmasının ardından bu yapılara komşu olan zeminin şevli şekilde topuk vazifesi görebilmesi için bırakılması ve yapının çekirdek kısmının yapımına başlanması prensibine dayanmaktadır. Çekirdek kısmı belli bir seviyeye kadar tamamlanan yapı ile konsol istinat yapıları arasında içten iksalı kazı yöntemindekine benzer yatay yük aktarım elemanları yerleştirilmektedir. Yapının diğer kısımlarına geçildikçe bu yerleştirilen yatay destek elemanları kademe kademe sökülerek imalat tamamlanmaktadır (Şekil 3.4). Diğer yöntemlere göre daha maliyetli ve yavaş gözükse de bu yöntem çok derin olmayan ve dar arazi parsellerinde aktif olarak kullanılıp fayda sağlamaktadır.

Ada kazı yönteminin beraberinde getirmiş olduğu en büyük dezavantaj şüphesiz ki geniş bir kazı alanı gerektirmesidir. Derin kazı yöntemlerinin inşaat sahalarına sağlamış olduğu en büyük faydalardan biri olan kazılacak alanın minimize edilmesi bu yöntemle aynı çatı altında buluşamamaktadır. Ayrıca düşey destekleme elemanlarının önünde bırakılacak şevli topuk zeminin doğru hesaplanmayıp yanlış miktarda bırakılması halinde istinat yapısında tahmin edilenden çok daha fazla deformasyon gözlenecek olup bu deformasyon yer yer farklı oturumlarla sonuçlanabilecekken toptan göçmelere de sebebiyet vermesi muhtemel olacaktır. Bu yöntemin beraberinde getirmiş olduğu en büyük avantaj ise içten iksalı yöntemle göre çok daha az yatay destekleme elemanı gerektirmesidir. Yatay destekleme elemanının azalması ile beraber işçilik ve dolayısıyla maliyette azalacaktır. Ada kazı yönteminde birçok farklı işin entegre olarak bir arada yürütmesi gerektiğinden doğru planlama ve hassas bir çalışma ile verimli bir yöntem olabilecekken ülkemizde bahse konu olan bu entegrasyonun yaratacağı çeşitli problemler sebebiyle çok sık tercih edilmemektedir.



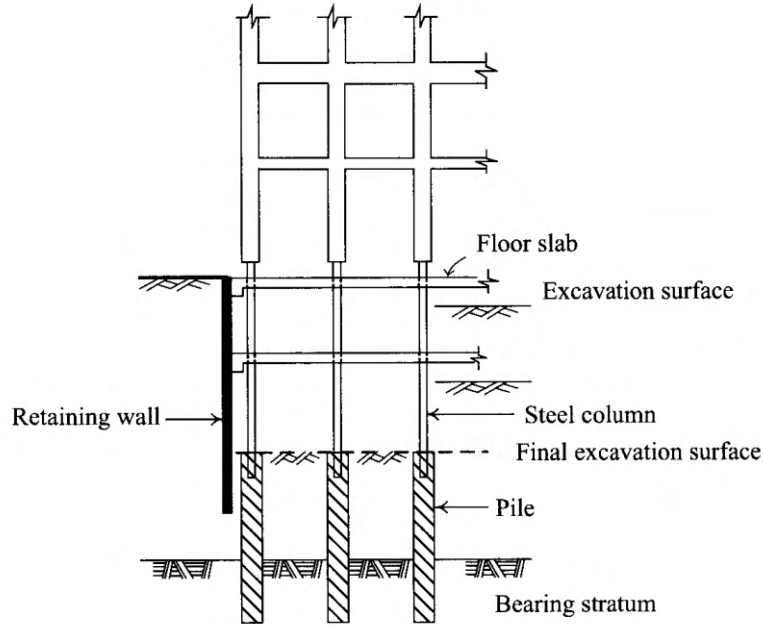
Şekil 3.4. Ada kazı yöntemi (C. Ou, 2006)

3.2.4 Yukarıdan Aşağıya Kazı Yöntemi

Anlatılan kazı yöntemlerinin tamamı önce derin kazının kademe kademe tamamlanması ardından yapının yapı çukurundan başlanarak yapılması esasına dayanırken yukarıdan aşağı kazı yöntemi önce yapının yapılması ardından kazının kademe kademe tamamlanması prensibi ile diğer yöntemlerden ayrılır. Özel bir yöntem olan yukarıdan aşağı kazı yöntemi tamamlandığında yapının zemin kotunun altında kalan yaşam alanlarının inşaa süreci de tamamlanmış olmaktadır. Önce yapının ardından kazının yapılması prensibi ile istinat yapısı olarak görev alan düşey destekleme elemanlarına gelen yanıl itki kuvvetleri kademli olarak yapıya aktarılmaktadır. Dolayısıyla yapı derin kazı tamamlanana dek yatay destek elemanı gibi hizmet vermektedir. Derin kazı tekniklerine diğer yöntemlere göre farklı bir bakış açısı kazandıran bu yöntem işlek meydanlarda yapılması planlanan metro istasyonları gibi yapıların derin kazı çalışmalarında efektif çözümler sunmaktadır. Yukarıdan aşağıya kazı yönteminin de diğer yöntemlerde olduğu gibi kendine has avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Yukarıdan aşağıya kazı yönteminin avantaj ve dezavantajlar aşağıdaki gibidir;

- Yapının ve kazının eş zamanlı ilerlemesi toplam proje süresinde ciddi bir zaman tasarrufu sağlamaktadır,
- Kat döşemelerinin normal şartlardan daha rijit olması sebebi ile otopark, depo gibi geniş açıklık gerektiren alanların elde edilmesini kolaylaştırmaktadır,

- İçten iksalı yöntemde kullanılan çelik yatay destekleme elemanlarına nispeten daha rijit döşemelere yatay yükler aktarıldığı için daha güvenli bir kazı imkanı sunmaktadır,
- Kazı, destekleme, yapı işlerinin aynı anda yürütülebilmesi zaman tasarrufu oluştururken eş zamanlı olarak maliyeti de aynı oranda arttırmaktadır,
- Diğer derin kazı yöntemlerine göre daha hassas işçilik gerektirmektedir.



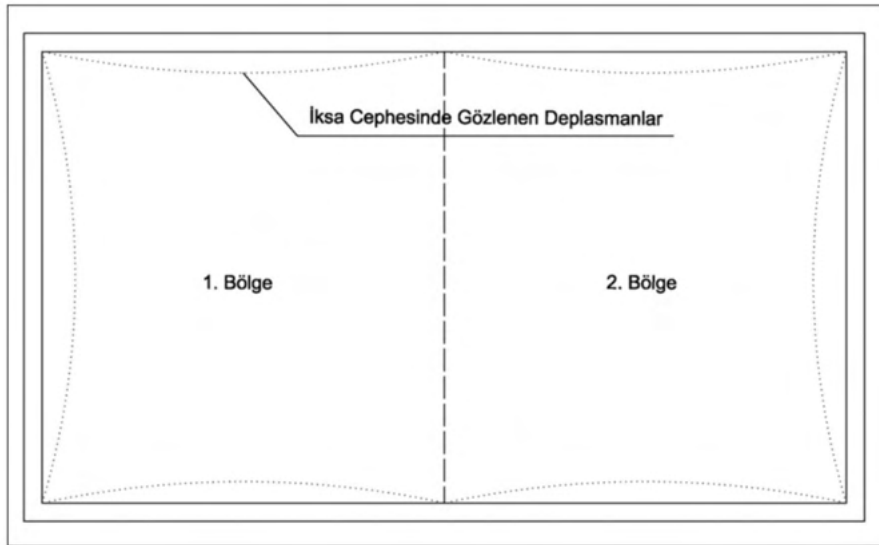
Şekil 3.5. Yukarıdan aşağıya kazı yöntemi (C. Ou, 2006)

Yukarıdan aşağı derin kazı yönteminde kullanılacak olan düşey destekleme elemanlarının ve akabinde yapılacak olan eşzamanlı kazı ve yapım işlerinin aksamadan tamamlanabilmesi için önerilen imalat sıralaması aşağıdaki gibidir;

- Düşey destek elemanlarının (diyafram duvar, fore kazık vb.) yapılması,
- Yapının oturacağı taban kazıklarının yapılması ve üzerine çelik düşey destekleme elemanlarının yerleştirilmesi,
- İlk kademe kazının tamamlanması,
- İlk kat döşemenin tamamlanması,
- İlk kat taşıyıcı çerçeve sistemin tamamlanması
- İkinci kademe kazı ile beraber ilk kademe için yapılan adımların projede belirtilen seviyeye kadar tekrarlanması ve temel seviyesine gelindiğinde temelin yapılıp yer altı inşaat faaliyetlerinin tamamlanması.

3.2.5 Anolu Kazı Yöntemi

Anolu kazı yöntemi geniş bir alanın parçalar haline kazılması esasına dayanmaktadır. Bir yapıda kullanılan kirişte en fazla sehîm değeriñin kirişin orta noktasında görûlmesi prensibine benzer şekilde bir alanda kazı yapılırken de en fazla yatay deplasman uzun kenarında orta noktasında gözlemlenmektedir. Tek seferde açılan cephe uzunluğu arttıkça orta noktasında oluşacak olan yatay deplasmanda aynı oranda fazla olacaktır. Bu nedenle geniş alanda derin kazılar yapılması gerekliliği oluştuğuunda inşaat sahası parçalara (anolara) bölünmekte ve kısım kısım kazı süreçleri tamamlanmaktadır. Böylece tek seferde açılacak olan cephe uzunluğu kısılacağı için cephenin orta noktasında gözlemlenecek olan maksimum yatay deplasman değeri de azalacaktır. Bu yöntemle birlikte daha güvenli bir derin kazı süreci yönetilmiş olacaktır. Ancak bu yöntemin beraberinde getirmiş olduğu en büyük dezavantaj proje süresini uzatmasıdır. Sahadaki kazı birkaç parça halinde ve her parçada kendi içerisinde kademe kademe tamamlanacağı için toplam proje süresi bu süreçten olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle günümüzde, güvenlik faktörleri göz önünde bulundurularak istinat yapısı arkasında kalan zeminin karakteristik davranış özelliklerine göre açılacak olan cephe uzunluğu maksimize edilmektedir. Bu sayede sağlanabilecek maksimum zaman/güvenlik oranı sağlanmış olmaktadır. Anolu kazı yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Anolu kazı yöntemi

3.2.6 Ankrajlı Kazı Yöntemi

Ankrajlı kazı yöntemi, iksa sistemi içerisinde yer alan düşey destekleme elemanlarına etki edecek olan yatay itkilerin iksa sistemi ardında kalan zemine taşıtılması esasına dayanmaktadır. Zemine yapılacak olan önceden açısı ve uzunluğu tasarım esaslarına göre belirlenmiş olan delgiler tamamlandığında delgi içerisine yerleştirilecek olan yatay destek elemanına göre öngermeli (aktif) ankrajlı ve zemin çivili (pasif ankrajlı) sistem olarak ikiye ayrılmaktadır. İki yöntemde de delgi prensibi aynı iken öngermeli ankraj sisteminde delgi içerisine çelik halatlar gönderilip gelen bu itki halatlar yardımıyla taşınırken, zemin çivisi sisteminde delgi içerisine nervürlü demirler atılarak gelen itki nervürlü inşaat donatıları yardımı ile taşınmaktadır. Aktif ve pasif ankrajı birbirinden ayıran en önemli özellik ise aktif (öngermeli) ankrajlar, imalatı tamamlanıp öngerme yükü verildiği andan itibaren yanal yükleri iksa yapısı arkasındaki zemine aktarmaya başlamaktadır. Ancak pasif ankrajlar (zemin çivisi) imalatı tamamlanıp iksa sistemi yanal deplasman göstermeye başladığında ankrajlar kademe kademe yükleri iksa yapısı arkasında kalan zemin tabakasına aktarmaya başlamaktadır.

Ankrajlı kazı yöntemi derin kazı metotları arasında en sık tercih edilenlerden biri konumunda yer almaktadır. Bunun sebebi imalatının hızlı ve kolay olması, kazı yapılacak alanı minimize edip kazıcı ekipmanlara geniş çalışma alanları sunması ve tabi ki inşaat mühendisliğinin üç temel prensibine de (ekonomi, estetik, emniyet) cevap verebilmesidir. Ancak ankrajlı kazı yöntemi sağlamış olduğu bu avantajlarla birlikte beraberinde dezavantajlar da getirmektedir. Özellikle zayıf zemin tabakalarının olduğu alanlarda çalışırken, imalatı tamamlanmış olan bir ankrajın kök bölgesindeki enjeksiyonun sağlıklı olup olmadığı gözle görülemeyen bir parametredir. Kök bölgesindeki enjeksiyonun sağlıklı yapılamaması durumunda ankraj hesaplanan öngerme yükünü taşıyamayacak, göçecektir. Göçmüş bir ankrajın onarımı mümkün olmayacaktır. Bu nedenle yeni bir öngermeli ankraj yapımı yolu izlenecek ve göçen ankraj için harcanan iş gücü, sarf malzeme ve maliyet sonuçsuz kalacaktır. Ayrıca ankrajlı kazı yönteminin beraberinde getirmiş olduğu bir diğer dezavantaj ise çevre yapıların güvenliğidir. Derin kazı tasarım esnasında kayma kamasının istinat yapısından uzakta kalması durumunda boyları 40-50m yi bulan ankrajların tasarlanması gerekebilmektedir. Bu da çevrede bulunan yapıların temelleri, altyapı enerji hatları ve yer altı yaşam alanları için bir

risk faktörü oluşturmaktadır. Bu bağlamda özellikle ankrajlı yöntem tercih edilen bir derin kazının tasarım adımlarını gerçekleştirmeden önce çevre yapıların konumlandırılması ve varsa alt yapı tesislerinin iyi analiz edilmesi büyük bir önem arz etmektedir.

3.2.6.1 Öngermeli Ankrajlı Kazı Yöntemi

Öngermeli ankrajlı kazı yönteminde zemin çivisi yönteminde kullanılan nervürlü donatılar yerini çelik halatlara bırakmaktadır. Çelik halat demetlerinden oluşan bu yatay destek elemanı istinat yapısına gelen yanal itki kuvvetini istinat yapısı arkasında kayma kaması dışında kalan zemine aktarmaktadır. Bu prensip dahilinde ilgili yatay destekleme elemanları istinat yapısında oluşması muhtemel yatay deplasmanları minimize etmektedir. Kayma kaması dışında kalan zeminin karakteristik özellikleri ve ankraja uygulanacak öngerme yükü de göz önünde bulundurulması gereken faktörlerin başında gelmektedir.

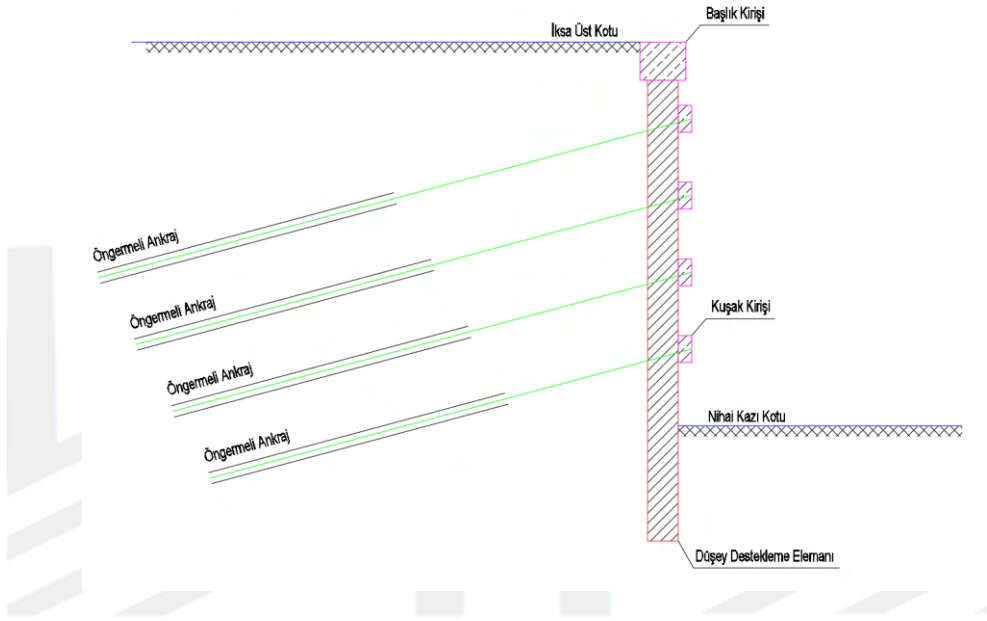
Öngermeli ankraj imalatında kullanılan ankraj halatı demeti kök bölgesi, serbest belge ve kafa bölgesi olarak 3 temel bölgeden oluşmaktadır. Zemin ile etkileşimde olacak olan çimento enjeksiyonu ile oluşturulmuş kök bölgesi ankrajın en önemli bölgesi konumundadır. Çünkü iksa sistemine gelecek yanal yükler önce ankrajın kafa bölgesinde karşılanacak serbest boy ile kök bölgesine aktarımı yapılacak ve enjeksiyonlu kök bölgesinden de yapı arkasında kalan zemine bu yanal yüklerin taşınması sağlanacaktır. Bu nedenle bir öngermeli ankraj tasarımı kök bölgesi boyu tayini ciddi hassasiyet gerektirirken bir husus iken, sahada uygulama aşamasında da ankrajın kök bölgesinin doğru teknikler ile enjeksiyonlanması kritik önem arz etmektedir. Bu enjeksiyonlama işlemi önce ankraj halatının yanından delgi dibine kadar gönderilen hortum vasıtasıyla dipten ağıza doğru yapılmakta, delgi bir kez dolduğunda bir süre (30-40 dk) beklenip zemin tarafından emilen ya da delgi içi çeperinde oluşan kaçaklardan sızan enjeksiyonu telafi etmek için patlatma adı verilen delgi ağzından 2. enjeksiyonlama işlemi yapılmaktadır. Bu hassasiyetler gösterilmediği senaryoda ankraj, üzerine öngerme yükü uygulandığında ya da zaman içerisinde oluşacak olan yanal hareketlerde, üzerine gelen yükü taşıyamayacak hem zaman-maliyet kaybına sebebiyet verecek hem de derin kazının güvenliğini tehlikeye atacaktır.

Öngermeli ankrajların kullanıldığı bir derin kazı destekleme sisteminin tasarımında bir başka önemli husus ise öngerme yükünün tayinidir. Ankraj için yapılacak taşıma gücü hesaplamaları doğrultusunda her bir ankrajın aktarması gereken yanal yük, iksa sisteminde tercih edilen düşey destekleme elemanları, yapı çukurunun derinliği, sürşarj yükleri, istinat yapısı arkasında kalan zemin tabakasının karakteristik özellikleri vb. dikkate alınarak tayin edilmektedir. Tayin edilip tasarımı gerçekleştirilen ankrajlar uygulama aşamasında Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından 2022 yılında yayınlanan Kazı Destek Yapıları Hakkında Yönetmelik kapsamında araştırma, uygunluk ve kabul deneylerine tabii tutularak tayin edilen yükün ilgili ankraj tarafından güvenli şekilde taşınıp taşınmadığı kontrol edilebilmektedir. Uygulanan testler ardından ilgili ankraj belirlenen nihai kilit yükünde kilitlenir ve zemin çivisi gibi herhangi bir yanal harekete gereksinim duymaksızın yük aktarıma başlamaktadır. Ancak öngerme yükü ankraja verilirken de dikkat edilmesi gereken başka bir husus vardır. Bu husus ankrajın kök bölgesine verilen enjeksiyonun zemin ile etkileşimini tam sağlayabileceği priz alma süresidir. Ankrajın kök bölgesine verilmiş olan enjeksiyonun havayla hiç denecek kadar az temasta bulunması priz süresini geciktirmektedir. Enjeksiyon-zemin etkileşiminin yeterli seviyeye ulaşması beklenmeden öngerme yükünün ankraj üzerine uygulanması durumunda ankraj başarısız olacak ve verilen yükü taşımayacak, zeminden sıyrılıp gelecektir. Bu nedenle edinilen saha uygulaması tecrübeleri sonucunda sağlıklı bir ankraj imalatı yapılması için gerekli priz bekleme süresi 6-7 gün olarak kabul edilmektedir. Aynı zamanda ankrajın kafa bölgesi ve istinat yapısı arasına yapılan kuşak betonunun uygulanan yükler altında deforme olmadan yüklerin aktarımına yardımcı olabilmesi için 6-7 günlük priz süresini doldurması gerekmektedir. İlgili priz sürelerinin minimum 7 (yedi) gün olması gerektiği Kazı Destek Yapıları Hakkında Yönetmelik’ te de açıkça belirtilmektedir.

Öngermeli ankrajlı derin kazılar gerek malzeme ve ekipman ulaşılabilirliği gerekse uygun coğrafi şartlardan dolayı tekniğinin iyi bilinmesi sebebi ile ülkemizde sıklıkla uygulanmakta olan bir derin kazı yöntemidir. Dar alanlarda yüksek verimlilik sağlayan bu yöntem kademe kademe kontrolün sağlanabilmesi ile de güvenli kazılar gerçekleştirebilmeyi sağlamaktadır. Aynı zamanda saha uygulaması esnasında yapı çukuru olarak belirlenen bölgeye içten iksalı kazı yöntemi gibi

herhangi bir destek elemanının denk gelmemesi ve dolayısıyla hızlı uygulama adımlarına sahip olması da öngermeli ankraj yöntemini fiyat/performans olarak üst seviyelerde tutmaktadır. Ancak öngermeli ankraj yöntemi sağlamış olduğu bu avantajlarda birlikte dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Bu dezavantajların başında imalatın gözle görülebilir olmaması gelmektedir. Nispeten pahalı ekipmanlara sahip olan öngermeli ankrajlar herhangi bir nedenden (zayıf zemin tabakasına denk gelmesi, yer altı suyu sebebiyle delgi çökmesi, uygulama esnasında gerekli özenin gösterilememesi vb.) dolayı başarısız olduğunda onarılması mümkün olmayan sistemlerdir. Bu nedenle doğması muhtemel böyle bir sonuç neticesinde ankraj tamamen yok sayılıp yerine yenisi yapılmakta ve dolayısıyla yok sayılan ankraj için harcanan maliyet, zaman ve iş gücü de beraberinde boşa gitmiş olmaktadır. Öngermeli ankraj yönteminin başka bir dezavantajı ise çevresel yapılardır. İksa perdesi yapı çukurunun konumlandırılacağı parseli daha efektif kullanabilmek için parsel sınırlarında konumlandırılmaktadır. Bu sebeple yapılacak olan ankrajlar iksa perdesinden başlayarak proje dahilinde yer yer 30-40 m uzaklıklara etki edebilmektedir. İksa yapılacak parselin çevresinde bulunan yapıların özellikle yer altı yapıları (otopark, sığınak, depo, enerji hatları vb.) iyi gözlemlenip tayin edilmediği takdirde bu yapılara zarar verilebilmektedir. Örneğin benzin istasyonunun yanında yapılacak olan bir iksa çalışmasında istasyonun yer altı tankları tayin edilmeden ankraj yapılması durumunda kuvvetle muhtemel bu tanklar delinecek ve delici ekipmanın zemine sürtünmesiyle oluşan ısı ile akaryakıtla birleşmesi durumunda ağır sonuçlar ortaya çıkabilecektir. Bu nedenle öngermeli ankraj yapılacak olan cephenin ardında bulunan çevresel yapılar iksa sisteminin tasarımı aşamasından önce büyük bir hassasiyetle kontrol edilip göz önünde bulundurulması gerekmekte ve deplase edilemeyen bir yapının yakınında çalışılması halinde sahadaki ekipler konu hakkında bilgilendirilip konunun önemi vurgulanmalıdır. Öngermeli ankrajlı derin kazı yönteminde tasarım adımları da büyük önem arz etmektedir. Genellikle kazı derinliği fazla olan uygulamalarda kullanılan bu yöntemin geoteknik analizlerinin doğru teknikler kullanılarak yapılması kritik öneme sahiptir. Yetersiz analiz ve tasarım durumunda ise kademe kademe yapılan uygulamalarda gerçekleştirilen aletsel gözlemlerden elde edilen verilerde öngörülenin çok üzerinde yanal deplasmanlarla karşı karşıya kalılabilmektedir. Bu deplasmanlar iksa yapısının güvenliğini tehlikeye atıp göçmelere sebebiyet verecek boyutlara ulaşabilir. Ulaşmaması durumunda ise

uygulaması tamamlanmış kazı seviyelerinde yeniden platformlar kurularak ek ankraj ve destekleme elemanlarının teşkil edilmesi gerekebilmektedir. Yapılacak olan bu ek uygulamalar da zaman, maliyet ve iş gücü kaybı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla öngermeli ankrajlı derin kazı tasarım aşamaları büyük bir titizlik ile uzman bir geoteknik mühendisi tarafından gerçekleştirilmelidir. Örnek bir öngermeli ankraj tasarımının kesit detayı Şekil 3.7’ de sunulmuştur.



Şekil 3.7. Öngermeli ankraj kullanılarak tasarlanmış bir iksa sistemi

Öngermeli ankrajlı kazı yönteminde de diğer yöntemlerde olduğu gibi uygulamalar kademe kademe yapılmakta ve gerekli aletsel gözlem metotları kullanılarak yapılan ankrajlar ve iksa yapısında yer alan düşey destekleme elemanlarında meydana gelen yatay deplasmanlar gözlem altında tutulmaktadır. Önerilen öngermeli ankraj uygulama adımları aşağıdaki gibidir;

- İksa sisteminde yer alan imalatı tamamlanan düşey destekleme elemanlarının başlık kirişi imalatı tamamlanır
- Düşey destekleme elemanlarının yapı çukuru tarafında kalan yüzü projede belirtilen yükseklikte (delgi makinasının çalışabilmesi için 90-100 cm fazla) kazılır,
- Delgi makinası hazırlanan platforma gelerek projede belirtilen açıklık, açı, çap ve uzunlukta ankraj delgilerini tamamlar,

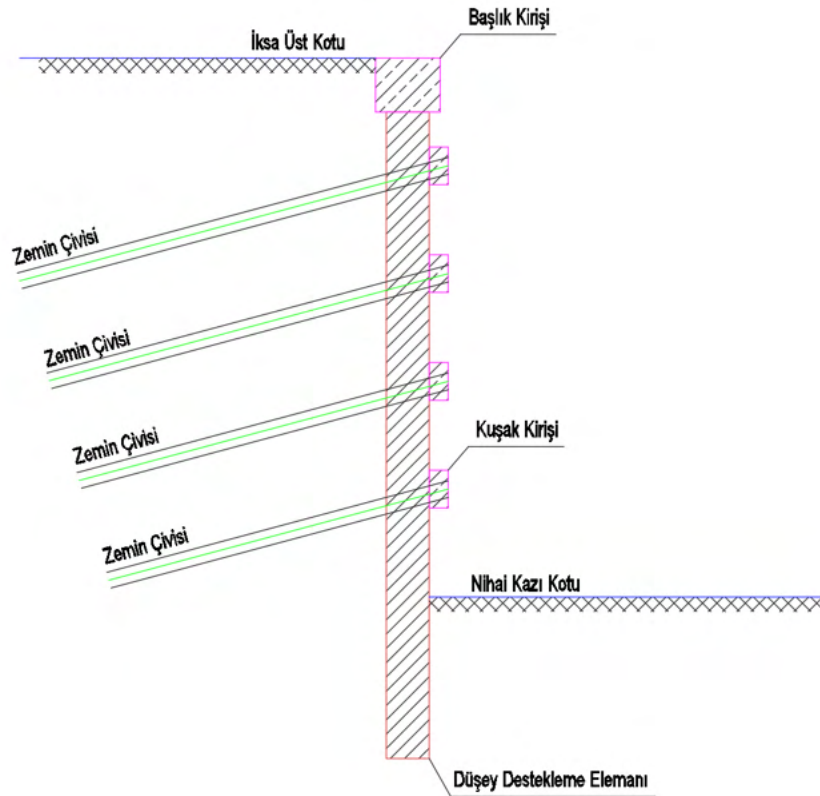
- Önceden dışarıda standartlarına ve uygulama projesinde belirtilen detaylara uygun hazırlanan ankraj halatı demetleri tamamlanan delgiler içerisinde kök boyu dipte kalacak şekilde konumlandırılır,
- Enjeksiyon hortumu ve bir pompa yardımı ile uygulama projesinde belirtilen su/çimento oranında hazırlanan çimento enjeksiyonunun, delgi içerisinde dipten ağza doğru dolması sağlanır,
- Delgi ağzından temiz çimento enjeksiyonu gelene kadar devam edilen bu işlem, temiz enjeksiyonun gelmesi ile tamamlanır ve 30-40 dk yapılan enjeksiyonun dinlenmesi için beklenir,
- 30-40 dk sonra aynı çimento enjeksiyonu, halat demeti üzerine yerleştirilmiş 2. enjeksiyon hortumu ile delgi içerisine doldurularak patlatma adı verilen işlem uygulanır. Bu işlemle birlikte zemin tarafından emilen enjeksiyon ve delgi çeperinde oluşan olası bir kaçıktan sızan enjeksiyon telafi edilip ankrajın kök bölgesinin sağlığı da kontrol edilmiş olur ve bu işleme delgi ağzından yeniden temiz enjeksiyon gelene kadar devam edilir,
- Akabinde ilgili ankraj kademesi için uygulama projede belirtilen ebatlarda kuşak kirişi imalatı tamamlanır. Çimento enjeksiyonunun ve kuşak kirişi betonunun uygulamasından da 6-7 gün sonra ankrajlara yine uygulama projesinde belirtilen öngerme yükleri hidrolik germe ekipmanları ile uygulanarak hem ankraj sağlığı test edilir hem de belirlenen yüke kilitlenerek ilgili ankrajın yük aktarımı yapmaya başlaması sağlanır.



Şekil 3.8. Öngermeli ankrajların kullanıldığı örnek bir iksa sistemi

3.2.6.2 Pasif Ankrajlı (Zemin Çivili) Kazı Yöntemi

Pasif ankrajlı (zemin çivili) derin kazı yönteminde temel prensip iksa yapısında bulunan düşey destekleme elemanlarına yerleştirilecek yatay destek elemanları (zemin çivileri) ile yapıya etkiyen yanal itki kuvvetini yapı arkasında kalan zemine aktarmaktır. Bu aktarım sırasında yatay destek elemanı olarak zemin çivileri (pasif ankrajlar) kullanılmaktadır. Zemin çivisini, aynı amaç doğrultusunda kullanılan öngermeli ankrajdan ayıran en karakteristik özellik ise herhangi bir öngerme/yükleme işlemi kullanılmamasıdır. Öngerme işlemi ile beraber yük aktarımına başlayan öngermeli ankrajın aksine zemin çivileri iksa yapısı ve dolayısıyla arkasında kalan zemin tabakasının yatay hareketi sonucu yük aktarımına başlamakta ve üzerine gelen yük arttıkça aktardığı yükte aynı oranda artmaktadır. Her destekleme elemanı gibi zemin çivileri de belirtilen ölçütler doğrultusunda bir maksimum aktarım kapasitesine sahiptir. Zemin çivilerinde bu aktarımın maksimum kapasitesi zemin çivisi imalatında kullanılan donatının ebatları, imalat esnasında enjeksiyon için kullanılan çimentonun kalitesi, iksa yapısı arkasında kalan zemin tabakasının karakteristik özelliklerine ve bu zemin tabakasının çimento enjeksiyonu ile arasında oluşan nihai adezyon miktarına bağlıdır.



Şekil 3.9. Zemin çivisi kullanılarak tasarlanmış bir iksa sistemi

Zemin çivileri kaya (sert) zeminlerde maksimum verime ulaştığı için kaya bulonu olarak ta adlandırılmaktadır. Pasif ankrajlı derin kazı yöntemi, iksa yapısında oluşması muhtemel yatay deplasman toleransının yüksek olduğu ve yapı çukuru derinliğinin nispeten daha sığ olduğu derin kazılarda sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca kalıcı olarak planlanan ya da uzun süre açık kalması muhtemel olan derin kazılarda öngermeli ankrajda kullanılan halatların muhtaç olduğu bakıma gereksinim duymayan donatılarla birlikte uzun süreli hizmet verebilmesi de zemin çivisini güçlü bir alternatif haline getirmektedir.

Zemin çivisi (pasif ankraj) imalatının bir derin kazı sahasındaki imalat adımları ise aşağıdaki gibidir;

- Uygulama projesinde belirtilen kot, uzunluk ve açıda istinat yapısını oluşturan düşey destekleme elemanları (fore kazık, mini kazık vs.) arasından delgiler yapılır,
- Önceden hazırlanan (enjeksiyon hortumu ve merkezleyici elemanları takılan) projede belirtilen ebattaki nervürlü donatılar tamamlanan delgiler içerisine yerleştirilir,
- Uygulama projesinde belirtilen su/çimento oranında hazırlanan çimento enjeksiyonu bırakılan çivi üzerine monte edilen enjeksiyon hortumlarından delgi içerisine gönderilerek, delginin dipten ağıza doğru homojen şekilde dolması sağlanır,
- Enjeksiyon işlemi tamamlanan zemin çivisi kademesinin önünde ilgili projesinin hesap adımları kapsamında belirlenen ve uygulama projesinde belirtilen kalınlıkta püskürtme beton veya kuşak betonu imalatı yapılır,
- Prizini alan kuşak betonunun üzerinde çivi kafalarına projenin hesap adımlarında zımbalama tahkiklerine göre belirlenmiş zemin çivisi plakaları ve rondelalar yerleştirilerek somunları sıkılır.

3.3 Düşey Destekleme Elemanları

Düşey destekleme elemanları genel olarak iksa sistemi üzerine gelen yanal itki kuvvetlerine karşı direnç gösteren ve arkalarında kalan zemini belirli sınırlar içerisinde tutmamızı sağlayan yapısal elemanlardır. Düşey destekleme sistemleri yalnız başlarına (konsol) olarak faaliyet gösterebileceği gibi yapı çukuru derinliğine ve zemin parametrelerine bağlı olarak tercih edilebilecek yatay destekleme

elemanları ile koordineli olarak ta kullanılabilir. Sıklıkla kullanılan düşey destekleme elemanlarının başlıca örnekleri fore kazıklar, mini kazıklar, diyafram duvarlar, kuyu perde duvar vb. olarak sıralanabilir. Derin kazı yöntemlerinde düşey destekleme elemanları yalnızca yatay yüklerin karşılanması için değil yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu zemin tiplerinde yapı çukuru için sızdırmazlık sağlanması amaçlı da kullanılabilirler.

3.3.1 Palplanş Perde

Palplanş duvarlar dışarda tayin edilen ebatlarda hazırlanan perde şeklinde elemanların birbirine kenetlenerek zemine çakılması ile elde edilen düşey destekleme elemanlarıdır. Boyuna oranla eni çok küçük olan bu elemanlar kesit dayanımını arttırmak adına genellikle U, Z ve T şekillerinde imal edilmektedirler. Zemine darbe veya titreşim yolu ile çakılan bu perdeler birbiri ile ek yerlerinden kenetlenerek kazı cephesi boyunca zemine çakılması ile tek parça bir düşey destekleme elemanı oluşturulmaktadır. Genellikle ahşap ya da çelik hammadde kullanılarak üretilen palplanş perdelerinin en çok fayda sağladığı alan sızdırmazlıktır. Yer altı su seviyesinin sızıntı yaptığı seviyenin altına kadar çakılan düşey destekleme elemanları ile kazı yapılacak alanın hem iksa sistemi sağlanmış olmakta hem de yer altı sularından etkilenmesi önlenmektedir. Palplanş perdelerin bir başka avantajı ise ihtiyaca göre parça parça arzu edilen şekillerde birleştirilebilmesi ve sökülme takım işleminin kolay olmasıdır. Bu avantajların yanında palplanş perdelerin derin kazı ve yapı aşamaları bittikten sonra sökülerek yeniden kullanılabilir olması da tercih edilmelerindeki en önemli nedenlerden biridir. Ancak palplanş perdeler bu avantajları dikkatli ve hassas kullanım koşulu ile sağlamaktadırlar. Dikkatsiz ve özensiz yapılan bir palplanş perde çalışması oturma, devrilme, yırtılma gibi durumlara maruz kalıp maliyet, zaman ve iş gücü kaybına sebebiyet verebilmektedir.

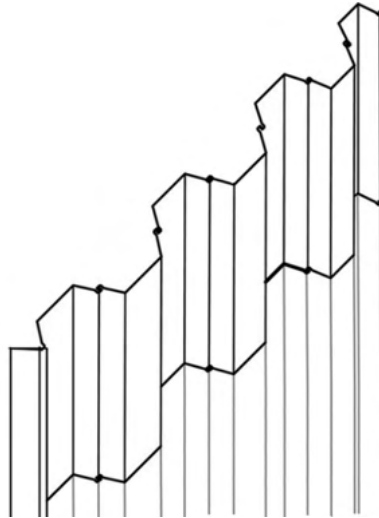
Palplanş perde yapılırken dikkat edilmesi gereken en büyük husus perde parçaların birbiri ile ek noktalarıdır. Parçalar ek noktalarından doğru birleştirilmez ise perdeler sızdırmazlık sağlayamayacağı için amacına hizmet edemeyecektir. Dikkat edilmesi gereken başka bir husus ise zemin tabakasının yapısıdır. Bu noktada palplanş perde uygulamasının yapılacağı alandaki sondaj logları detaylı şekilde analiz edilip doğru malzeme ve doğru çakma yöntemi tercih edilmelidir. Gerekli görülen hallerde deneme amaçlı test perdeleri yapılması yolu izlenmelidir. Aksi takdirde örneğin sert

bir zeminde yanlış seçilmiş bir palplanş perdesi ya da yanlış seçilen bir çakma yöntemi ile perdenin zemine çakılması halinde perde parçalarında yırtılmalar ve deformasyonlar meydana gelmesi söz konusu olabilmektedir. Bu sonuç dahilinde eleman yine amacına hizmet edemeyecek ve sızdırmazlık özelliğini sağlamayacaktır. Dolayısıyla sonuç yine maliyet, zaman ve iş gücü kaybı olacaktır. Palplanş perde uygulamasında bir başka dikkat edilmesi gereken faktör ise perde uzunluk tayinidir. Perdenin çakılacağı seviye iyi analiz edilip yer altı su seviyesinin sızıntı yapabileceği seviyenin altına kadar indirilmelidir. Aksi takdirde sonuç yine aynı olacak perde altından sızan suyun yapı çukurundaki çalışma sahasına geçişi ile uygulama başarısızlık ile sonuçlanacaktır.

Özetle tekrar tekrar kullanılabilen palplanş perdeleri, özellikle su ile yoğun temas altında bulunan yapıların (köprü ayakları, rıhtım yapıları vb.) derin kazı destekleme sistemlerinde sızdırmazlık ve düşey destekleme elemanı olarak kullanılan ancak hassas ve özenli işçilik ile bahse konu olan verimi sağlayan bir düşey destekleme elemanıdır.



Şekil 3.10. Örnek bir palplanş birleşim detayı-1 (Jiang, 2023)



Şekil 3.11. Örnek bir palplanş birleşim detayı-2 (Deckner 2016)



Şekil 3.12. Örnek bir palplanş imalatı (Baca, 2017)

3.3.2 Kuyu Perde Duvar

Kuyu perde duvarlar iksa sistemlerinde sık tercih edilen düşey destekleme elemanlarından biridir. İmalat yöntemi, zemin yüzeyinden itibaren hedeflenen derinliğe kadar anolar halinde el makineleri ile kazı yapılmasına ve tamamlanan kazının içerisine donatı ve kalıp sistemi kurularak betonlanmasına dayanmaktadır. Ancak günümüz şartlarında kuyu perde duvarlar muadil düşey destekleme elemanlarını (fore kazık, mini kazık diyafram duvar vs.) imal edebilen makinelerin yaygınlaşması ile daha az tercih edilir bir konuma gelmiştir. İnsan gücü ve kırılmaya müsait el aletleri ile kazı işlemlerinin yapılması, kazı esnasında sebep olmuş olduğu iş güvenliği problemleri, yüksek maliyeti ve gerektirmiş olduğu uzun zaman benzeri düşey destekleme elemanlarını kuyu perdelerine göre daha kullanışlı hale getirmiştir. Ancak kuyu perdelerin dezavantajlarının yanında getirmiş olduğu avantajlar halen sık tercih edilmelerindeki en büyük etkindir. Kuyu perdelerin en büyük avantajı fore kazık ve muadil düşey destekleme elemanlarında yaşanan parsel içindeki yer kaybını yaşatmamalıdır. Hatta öyledir ki kuyu perdeler iksa sistemi bünyesinde düşey destekleme elemanı görevlerini tamamladıklarında, üst yapı bünyesinde bina perdesi olarak ta hizmet verebilmektedirler (Çağlar, 2024). Bu sayede kuyu perdenin düşey destekleme elemanı olarak kullanıldığı iksa sistemlerinde parsel içi yer kaybı neredeyse sıfır mertebesine inmektedir. Bu da İstanbul gibi büyük ve parsel değeri yüksek olan yerlerde kritik öneme sahiptir. Kuyu perdelerin bir diğer avantajı ise diğer düşey destekleme elemanlarının

imalatını yapan makinelerin giremeyeceği dar çalışma alanlarında rahatlıkla teşkil edilebilmeleridir.



Şekil 3.13. Tamamlanmış bir kuyu perde imalatı (Köse, 2010)

3.3.3 Diyafram Duvar

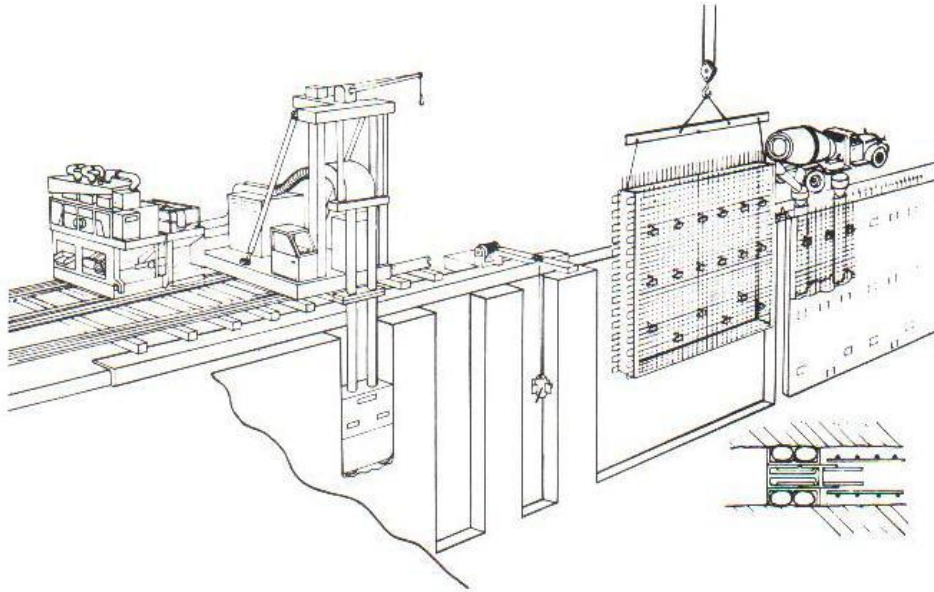
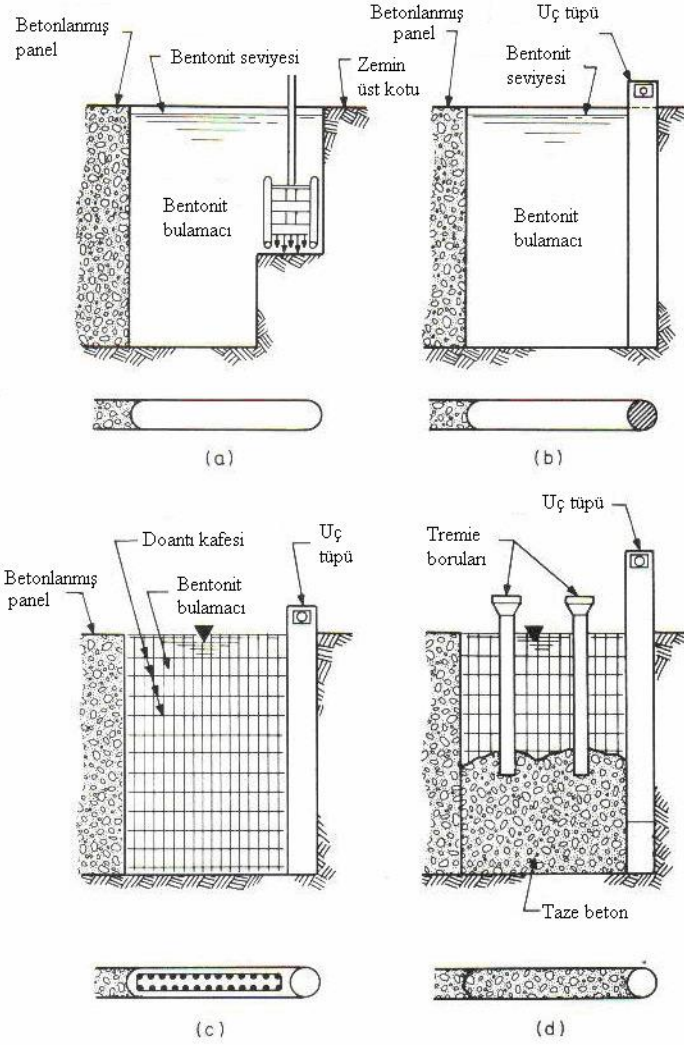
Bir yapının taşıyıcı elemanı olarak kullanılabilen diyafram duvarlar istinat ve sızdırmazlık amaçlı da kullanılabilmektedir. Sistemin esas almış olduğu imalat ve çalışma prensibi kuyu tip betonarme duvar ile benzerlik göstermektedir. Ancak kuyu tip betonarme duvarlardan farklı olarak bu düşey destekleme el işçiliği değil komplike bir makineler birliği çalışması vardır. Özel delgi makineleri kullanılan bu istinat yapısında en kritik unsur kazı esnasında kullanılan bentonit malzemesidir. Bentonit malzemesi kil esaslı bir malzeme olup kazı anında delgi içerisine pompalanarak kendini tutamayan zemin tabakasının yıkılması önler. Kendini tutabilen kohezyonu yüksek taşlı zeminlerde ise bentonit malzemesi kullanılarak duvar çeperinin mümkün olabildiğince pürüzsüz olması sağlanmaktadır. Bentonit malzemesinin oynamış olduğu bu önemli rol diyafram duvarların bulamaçlı hendek olarak ta adlandırılmasını sağlamıştır (Çınar, 2010).

Diyafram duvarların derin kazılarda sıklıkla tercih edilmesinin en büyük sebepleri kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir;

- Geçirimsizlik
- Yük taşıma kapasitesi
- Yer altı suyu ve zemin basıncı direnci

Genel olarak derin kazı esnasında iksa stabilitesinin korunması, oluşabilecek olası saha içerisine toprak kaymalarını engellemek ve çalışma sahası etrafında geçirimsiz bir perde oluşturmak amacı ile kullanılan diyafram duvarların uygulama adımları kısaca aşağıdaki gibidir;

- Zemin etütleri sonucunda elde edilen bilgiler dahilinde diyafram duvarların yardımcı bilgisayar programları ile tasarlanarak çalışma sahasının nerelerinde kullanılacağı kararlaştırılır.
- Sahada yerleşimi belirlenen diyafram duvarın uygulama alanında yerleri işaretlenir ve işaretlenen hat boyunca diyafram duvarın standartlara uygun imal edilebilmesi için kılavuz hendekler kazılır (Das, 2010).
- Duvarın kalınlığına ve zemin etüt raporundan edinilen bilgilere uygun tasarımı yapılan ve kılavuz hendek kazısı sırasında dışarıda hazırlanan demir donatı kafesleri kazısı tamamlanan hendek içerisine bir vinç yardımı ile indirilir (Bowles, 1996).
- Yerleştirilen donatı kafesinin hendek içerisinde sabitleme işlemlerinin yapılması ardından içerisinde donatı kafesi bulunan hendek kazısı tasarım aşamasında tayin edilen uygun beton sınıfında bir beton ile doldurulur.
- Son adımda ise imalatı tamamlanan betonarme duvar çevresinde sızdırmazlık ve yalıtım malzemeleri kullanılarak yapının duvara sahip olması gereken en önemli özelliklerden biri kazandırılır (Terzaghi, 1996)



Şekil 3.14. Diyafram duvar yapım aşamaları (Köse, 2011)

Yapım aşamaları kısaca özetlenen diyafram duvarlar günümüz geoteknik mühendisliğine birçok avantaj sağlamaktadır. Ancak sağlamış olduğu avantajlar beraberinde bazı dezavantajları da getirmektedir. Diyafram duvarların avantajların ve dezavantajları kısaca aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir;

Diyafram duvarın avantajları;

- Mukavemeti yüksek malzemeler ile saha uygulaması yapılan diyafram duvarlar yüksek yapı yüklerinin zemine aktarılmasında ciddi bir avantaj sağlamaktadır (Das, 2010).
- Tasarım süreçlerinde kalıcı olarak kullanımı öngörülen diyafram duvarlar karşılaştırıldıkları diğer düşey destek elemanlarından (fore kazık, kuyu perde duvar vs.) daha uzun süre bakım gerektirmeden yapı ömürlerine devam edebilmektedirler
- Çeşitli zemin tabakası yapısına sahip çalışma sahalarında verimli şekilde kullanılabilmekte olup hemen hemen her zemin tipinde uygulanabilmektedir

Diyafram duvarın dezavantajları;

- Diyafram duvar imalatlarında kazı derinliği ile doğru orantılı olarak maliyet de yükselmektedir (Bowles, 1996).
- Özellikle yer altı su seviyesinin saha yüzeyine yakın olduğu çalışma alanlarında diyafram duvar uygulamaları teknik bakımdan zorlayıcı olabilmektedir (Terzaghi, 1996).

3.3.4 Fore Kazık

Derin kazı sistemlerinde en sık tercih edilen düşey destekleme elemanlarından biri de fore kazıklardır. Proje gereklilikleri ve çalışma sahasında gözlemlenen hâkim zemin tipine göre çeşitli çap ve boylarda tasarlanıp uygulanabilen fore kazıklar yüksek zemin basınçlarına dayanabilen yapısı ile diğer düşey destekleme (kuyu temel, diyafram duvar vs.) elemanları arasında tercih edilebilirlik seviyesini arttırmıştır.

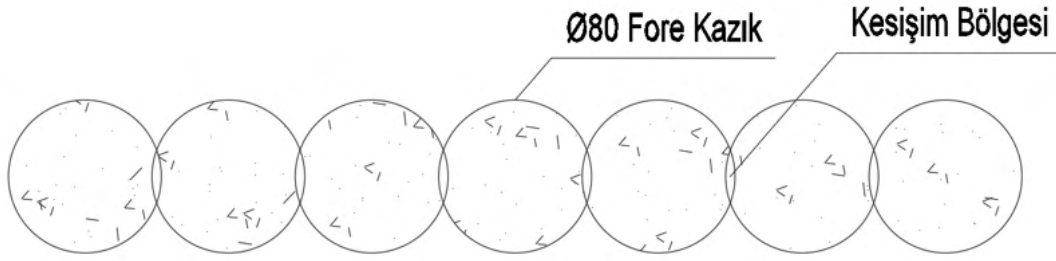
Farklı düşey ve yatay destekleme elemanları ile birlikte kombine şekilde kullanılabilen fore kazıklar tek başlarına konsol olarak ta kullanılabilir (Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği, 2022).

Fore kazıklar diğer düşey destekleme elemanları ile aynı prensip esasında çalışmaktadır. Bu prensip, iksa arkasında kalan zeminden aktarılan gerilmeleri karşılayarak bu bölgedeki zeminin hareketlerini sınırlamaktadır. Hareketi engellenen bahse konu zeminler aynı zamanda iksa arkasındaki yapıların yüklerinin aktarıldığı zeminlerdir. Dolayısıyla bu taşıyıcı zeminlerin izin verilen miktardan fazla hareket etmesi üzerlerinde bulunan yapıların oturmasına ve yapısal hasar görmelerine sebebiyet vereceği için fore kazıklar ile sağlanan zemin hareketinin engellenmesi büyük önem arz etmektedir



Şekil 3.15. Fore kazıkların kullanıldığı örnek bir iksa çalışması

Örnek bir derin kazı çalışmasında yaşanabilecek en büyük problemlerin başında çalışma alanının yer altı su seviyesinin altında kalması ve bu suyun çalışma alanını doldurmasıdır. Özellikle büyük çaplı alt yapı projelerinde ya da deniz gibi bir su kaynağına yakın yapılması gereken bir derin kazı çalışmasında bu problem büyük öneme sahiptir. Problemin bertaraf edilmesinde de fore kazıklar kullanılabilir. Fore kazıklar sırası ile bir donatılı bir donatısız olmak üzere birbirleri ile kesişecek şekilde tasarlandığında kesişen fore kazık adını almaktadır. Kesişen fore kazıklar ile çalışma sahası etrafında bir geçirimsizlik perdesi oluşturulmuş olmakta ve bahse konu problem de bu vesile ile bertaraf edilmiş olmaktadır (Das, 2010).



Şekil 3.16. Örnek bir kesişen fore kazık vaziyet planı

İksa temel elemanlarından biri olan fore kazıkların yapım aşamaları kısaca aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir;

- Her elemanda olduğu gibi fore kazıklar için de ilk adım saha çalışmaları öncesinde çalışma yapılacak alanda yapılmış zemin etüt raporlarının incelenip zemin tipinin anlaşılmasıdır. Ardından mühendislik özellikleri tayin edilen zemin tipi için yapı çukuru derinliği yani iksa sistemi önünde yapılacak toplam kazı mesafesi göz önünde bulundurularak fore kazık tasarımı yapılır. Bu tasarım yapılırken limit denge analizi, sonlu elemanlar yöntemi gibi yöntemlerin kullanıldığı bilgisayar programları tercih edilebilmektedir. Analiz sonuçları neticesinde kazık boyları, çapları ve donatı oranları gibi parametreler nihai hale getirilmektedir (Bowles, 1996).
 - Tasarım ve projelendirme aşamalarında belirlenen kazık aksları sahada işaretlenir ve fore kazık makinesi getirilerek aplikasyon noktalarında proje ebatlarına uygun delgiler tamamlanır.
 - Delgi işlemi devam ederken eş zamanlı olarak yapılan delgilere uygun fore kazık donatı kafesleri çalışma sahasında hazırlanır.
 - Delgi bitimi ile birlikte hazırlanan donatı kafesleri delgi çeperine zarar verilmeden delgi içerisine indirilir ve uygun kota geldiğinde sabitlenir.
 - Donatının sabitlenmesi ardından tiremi borusu yardımı ile fore kazığının beton dökme işlemi aşağıdan yukarıya doğru yapılır. Tiremi kullanılması en önemli amaç fore kazık betonunda segregasyon oluşmasına izin vermeden, betonun yerleştirilmesi ve betonun delginin altından üstüne doğru homojen olarak dökülmesini sağlamaktır (Das, 2010).
 - Bir hat boyunca fore kazık imalatının tamamlanmasının ardından kazıkların bir arada çalışmasını sağlayan başlık kirişi imalatı yapılır. Fore kazık filizlerinin bir kiriş ile birbirine bağlanmasını sağlayan bu sistem hat

boyunca kazıkların bir arada bir bütün gibi çalışmasını sağlamaktadır. Bu sayede iksa sistemine gelen zemin gerilmeleri hat boyunca yer alan kazıklara eşit şekilde dağıtılmakta ve bir kazığa direk olarak aktarılan yükün azaltılmasını sağlamaktadır.

- Birlikte çalışmaya ve zemin yüklerini taşımaya başlayan fore kazıkların önünde yapı çukuru kazısı başlatılmaktadır. Tasarımına göre önlerinde konumlandırılacak olan yatay destek elemanları uygun kazı kademelerine yerleştirilmektedir. Yatay destek elemanları ile kombine şekilde kullanılan fore kazıklar konsol fore kazıklara göre daha yüksek gerilmeler altında stabilitelerini koruyabilmektedirler (Terzaghi ve Peck, 1996).

İksa sistemlerine sağlamış oldukları avantajlar sebebiyle sıklıkla tercih edilen ve birçok farklı sistemle kombine şekilde çalışabilen fore kazıkların sağladığı avantajlar dahilinde beraberinde getirmiş olduğu dezavantajlar da mevcuttur. Fore kazıkların iksa sistemleri için avantajları ve dezavantajları şu şekilde özetlenebilmektedir;

Fore kazıklı iksa sistemlerinin avantajları;

- Yüksek zemin gerilmeleri ve su basınçları karşısında stabilitesini koruyabilen fore kazıklar, çevre yapılar da yapısal hasarlar oluşmadan çalışma sahasının hedeflenen yapı çukuru derinliğine kadar güvenli bir şekilde kazılmasında kritik rol oynamaktadırlar
- Fore kazıklar özellikle kesişecek şekilde tasarlandığında sağlamış oldukları geçirimsizlik özelliği ile çevrede ve yer altında bulunan suların çalışma sahasını doldurmasına engel olmaktadır. Bu özellikleri altyapı projelerinde (otopark, atık su tesisleri, kuru havuz yapıları vs.) fore kazıkları tercih sıralamasında ön plana çıkarmaktadır.
- Farklı zemin koşulları ve derin kazı türleri için farklı ebatlarda ve özelliklerde tasarlanabilen fore kazıklar bu proje bazlı kişiselleştirilebilme yetenekleri ile ön plana çıkmaktadır (Das, 2010).

Fore kazıklı iksa sistemlerinin dezavantajları;

- Fore kazıklı sistemler birçok farklı makinenin bir arada uyum içerisinde çalışması ile saha uygulaması yapılabilen elemanlardır. Bu sebeple proje büyüklüğünün azalması ile birlikte fore kazık fiyat/performans dengesi de

aynı oranda azalmaktadır. Büyük çaplı projeler için fizibilitesi yüksek olan bu düşey destek elemanı küçük çaptaki projeler için fazla maliyetli olarak değerlendirilebilmektedir (Bowles, 1996).

- Yer altı su seviyesinin yüksek, zemin koşullarının zayıf, zeminin kohezyonunun çok düşük olmasından kaynaklı iç stabilitenin korunamadığı durumlarda fore kazık uygulaması teknik açıdan zor olabilmektedir. Bu uygulama zorluğu proje süresinde ve maliyetinde artışa sebebiyet verebileceği gibi sistemin fizibilitesini ve güvenilirliğini de azaltmaktadır (Das, 2010).

3.3.5 Mini Kazık

Fore kazıklardan çap olarak farklılık gösteren mini kazıklar genellikle 15 cm ila 30 cm çaplarında tasarlanıp uygulanmaktadır. Fore kazık elemanına göre daha küçük makinelerle imal edilebilen mini kazıklar bu özelliğiyle esnek bir çalışma alanı imkânı sunmaktadırlar. Mini kazıklar özellikle kalabalık şehirler gibi yaşam alanının yoğun, çalışma alanının dar olduğu bölgelerde sağlamış oldukları bu avantaj ile ön plana çıkmaktadırlar (Brown, 2013).



Şekil 3.17. Mini kazıklı örnek bir iksa sistemi (Öçal Kişisel Arşiv, 2022)

Genellikle alüvyon, kil ve zayıf kaya gibi birimlerde kullanılan mini kazıklar fore kazıklarla aynı çalışma prensibi dahilinde çalışarak, iksa arkasında kalan zeminin hareketini sınırlamaktadırlar. Bahse konu sınırlama ile beraber ilgili zeminlerin yer değiştirmesini engellemektedirler. Yapım aşamaları fore kazık ile aynı olan mini

kazıklar tüm iksa destek elemanlarında olduğu gibi beraberlerinde avantajlar ve dezavantajlar getirmektedir. Getirmiş oldukları avantajlar ve dezavantajlar şu şekilde özetlenebilmektedir;

Mini kazık avantajları;

- Mini kazıklar zayıf zeminlerde dahi yüksek taşıma kapasiteleri ile ön plana çıkmaktadırlar
- Fore kazıklarda olduğu gibi büyük makinelere gereksinim duymayan bu düşey destek elemanı özellikle şehir içleri gibi yapılaşmanın yoğun olduğu dar çalışma sahalarda kolaylıkla uygulanabilme imkânı sağlamaktadırlar.
- Farklı zemin koşullarına uyumluluğu ile farklı çaplarda ve boylarda tasarlanabilen mini kazıklar bu özellikleri ile tasarım çeşitliliği sağlamaktadır.

Mini kazık dezavantajları;

- Diğer düşey destekleme elemanlarına göre daha yüksek maliyetlere sahip olabilmektedirler.
- Zayıf kayalar ve kil gibi zeminlerde kolaylıkla uygulanabilirken çok sert kayalarda ve aşırı yumuşak zeminlerde uygulama zorlukları yaşanabilmektedir. Yaşanması olası bu zorluklar beraberinde maliyet ve süre artışını da getirmektedir. Bu sebeple bazı projeler için ekonomik açıdan en uygun çözüm yolu olmaktan çıkabilmektedirler.
- Mini kazıklar küçük çaplara sahip oldukları için uygulama aşamasında yüksek hassasiyet ve teknik beceri gerektirir. Gerekli hassasiyet gösterilmediği takdirde başarısız imalatlar ile karşılaşılma ihtimali yüksektir. Başarısız imalatların sonucunda da yine süre ve maliyet artışı kaçınılmaz olmaktadır.

3.4 Yatay Destekleme Elemanları

Yatay destekleme elemanları derin kazıların destekleme sistemlerinin tasarımında ve saha uygulamalarında önemli bir paya sahiptir. Yatay destekleme elemanları derin kazı esnasında iksa sistemine etkileyen yatay itkileri karşılayarak düşey destekleme elemanlarının devrilmeye karşı dirençlerini arttırmakta ve olası zemin kaymalarının önüne geçmektedir. Özellikle büyük ve önemli yapıların iksa

projelerinde yatay destekleme elemanları sayesinde düşey destekleme elemanları ile yapısal stabilite artırılarak, çevre yapılarda herhangi bir stabilizasyon kaybı oluşturulmaksızın kazı derinliği arttırılabilmektedir. Özellikle şehirleşmenin sık olduğu bölgelerde bu husus ayrıca önem arz etmektedir. Bahse konu bölgelerde yapıların birbirine çok yakın şekilde konumlandırılması, yapılması muhtemel bir derin kazı faaliyeti süresince iksa sistemine çevresel yapılardan gelen sürşarj yükü etkisini arttırmaktadır. Yatay destek elemanları tam olarak bu noktada iksa sisteminin daha az yanal deplasman yaparak hizmet ömrüne devam etmesini sağlamaktadırlar. Dolayısıyla iksa yapısı ile beraber çevre yapıların altında bulunan zemin tabakaları da daha az yanal deplasman yapmaktadırlar. Sonuç olarak çevre yapılarda oluşabilecek deplasman/deformasyon miktarı minimize edilmiş olmaktadır.

Yatay destekleme elemanları genellikle proje ihtiyaçları ve iksa sisteminin uygulanacağı bölgede bulunan hâkim zemin tabakaları göz önünde bulundurularak seçilir ve tasarımı yapılır. Ayrıca yatay destek elemanlarının doğru tasarımında hedeflenen ve ihtiyaç duyulan kazı derinliği ve çevre yapıların iksa sistemine olan mesafesi, temel alt kotları, hassasiyetleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Doğru yatay destekleme elemanı seçimi yapılmadığı takdirde zemin hareketlerinin kontrol edilemez hale gelmesi ile düşey destekleme elemanlarında ve çevre yapılarda yapısal hasarların meydana gelmesi kuvvetle muhtemeldir

3.4.1 Püskürtme Betonlu (Shotcrete) Kaplama

İstinat yapısı yüzeyine yüksek basınçla beton püskürtülmesi esasına dayanan püskürtme beton uygulaması, derin kazılarda efektif olarak kullanılan yatay destekleme elemanları arasında yer almaktadır. Püskürtme beton kaplaması, iksa yapısı yüzeyinde bir katman oluşturarak zeminin stabilitesinin arttırılıp, hareketlerinin kontrol altında tutulmasında önemli rol oynamaktadır. Deformasyonları kontrol altında tutucu ve erozyon önleyici yatay destek elemanı olarak kullanılan püskürtme beton kaplamanın, hızlı uygulanabilirliği, kolay ham madde tedariği ve birçok yatay/düşey destekleme elemanı ile birlikte çalışabilme yeteneği bu uygulamanın tercih edilebilirliğini arttırmaktadır.



Şekil 3.18. Örnek bir püskürtme beton imalatı (Öçal Kişisel Arşiv, 2022)

Püskürtme beton uygulamasının iksa sistemlerinde yatay destekleme elemanı olarak sıklıkla tercih edilmesinin sebebi yukarıda özetlenen çeşitli avantajlardır. Bu avantajlar detaylı olarak şu şekilde açıklanabilmektedir;

- Püskürtme beton uygulandığı zemin yüzeyinde bir kaplama oluşturarak zemin yüzeyinde bölgesel olarak var olan zayıf yüzeylerin stabilize edilmesini sağlamaktadır. Bu sayede olası zemin kaymaları ve oluşabilecek ani deformasyonlar bertaraf edilmiş olmaktadır.
- Püskürtme beton özellikle granüler zeminlerde uzun vadeli kullanımda oluşabilecek erozyonları önlemektedir. Dolayısıyla zemin yüzeyinde oluşabilecek ani deformasyonlar haricinde uzun vadede oluşabilecek deformasyonların da önüne geçmektedir.
- Püskürtme beton hammaddesinin kolay tedarik edilmesi, uygulama kolaylığı ve ucuz maliyeti bu uygulamanın tercih edilebilirliğini önemli ölçüde arttırmaktadır.
- Püskürtme beton uygulama çeşitliliği ile farklı zemin tiplerine hızlı şekilde adapte edilebilmektedir. Bu özelliği, uygulamayı hem kil gibi ince daneli zeminlerde hem de kum gibi kalın daneli zeminlerde tercih edilebilir kılmaktadır.

İlgili yatay destekleme elemanının tercih edilebilirliğini arttıran bu avantajlar beraberinde dezavantajları da getirmektedir. Bahse konu dezavantajlar, püskürtme

betonun uzun vadede dayanıksız olabileceği ve kalınlık tayini olarak özetlenebilmektedir. Bu dezavantajlar detaylı olarak şu şekilde açıklanabilmektedir;

- Özellikle yer altı su seviyesinin yüksek olduğu ya da iksada kullanılan düşey destekleme elemanlarının arkasında su biriktiği durumlarda püskürtme beton yüzeyinde yapılacak drenaj sistemleri kritik öneme sahiptir. Kaplama arkasında birikecek su kaplamanın diğer noktalarına göre ince olan bölgelerine daha fazla basınç uygulayacak ve bu bölgeleri zaman içerisinde deforme edecektir. Bahse konu bu deformasyon kaplamaya zarar verecek ve bütünlüğünü bozacaktır. Bu sebeple püskürtme beton kaplamasında tercih edilecek drenaj sistemi, kullanılacak beton kalitesi ve tayin edilen kaplama kalınlığı iyi irdelenmelidir.

3.4.2 Boru (Strut) Destekleme

Strut boruları içten destekli iksa sistemlerinde kullanılan yatay destekleme elemanlarıdır. Çevresinde iksa önlemi alınacak olan çalışma alanının etrafında teşkil edilen düşey destekleme elemanlarına yatay toprak itkileri etkimektedir. Etkiyen bu itki strut boruları yardımıyla çalışma alanının karşılıklı cephelerinde yapılan düşey destekleme elemanları arasında aktarılmaktadır. Strut boruları yapılan analizler doğrultusunda uygulama projesinde belirtilen detaylar göz önünde bulundurularak doğru kazı kademelerinde yerleştirilmektedir. Yatay ve düşey elemanların birlikte çalıştığı bu sistemle iksa stabilitesi sağlanırken çevre yapıların da güvenliği sağlanmaktadır (Ou, 2006).

Boru destekleme sistemleri günümüzde diğer destekleme sistemlerine kıyasla ülkemizde daha az kullanılmaktadır. Bunun sebebi sağlamış olduğu avantajlar ve dezavantajlardır. Boru destekleme sistemlerinin sağlamış olduğu avantaj ve dezavantajların başlıcaları aşağıdaki gibidir;

- Tasarlanan bir iksa sisteminde özellikle yer altı suyunun bulunduğu durumlarda iksa sistemi üzerine etkiyen yatay itkilerin karşılanmasında efektif rol oynamaktadır.
- Strut boruları düşey destekleme elemanlarına yerleştirileceği için doğru tasarım yapılması halinde hemen hemen tüm zeminlerde kullanılabilir.

- Nispeten büyük çalışma alanlarında boru açıklığı da çalışma alanına ebatına doğru orantılı olarak artacağı için boruların burkulmaya karşı dayanımı azalmaktadır. Bu büyük açıklıklı çalışma sahalarında strut borularının efektifliğini azaltmaktadır.
- Yerleştirilen strut boruları çalışma alanı içerisinde çok fazla yer kapladığı için çalışma alanında makine hareket kabiliyeti azalmaktadır. Bu da çalışma sahasının boru yerleştirilen bölgelerinin aktif kullanılamaması sonucunu beraberinde getirmektedir.
- Yerleştirilecek strut borularının tasarımı büyük bir hassasiyet ve sahada ilgili kademelerde yerleştirilmesi ciddi bir özen gerektirmektedir. Yanlış tasarım yapılması, uygulama aşamasında boruların doğru yerleştirilmemesi ya da yeterince sabitlenmemesi durumunda boru dayanımları önemli ölçüde azalacaktır. Bu azalmada iksa sistemini ve çevre yapıları tehlikeye atabilecek durumlar ortaya çıkaracaktır (Aslan, 2017).
- Tasarım ve uygulama aşamasında bu denli hassasiyet gerektiren bir uygulamanın devamlı doğru yapıldığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu da geoteknik aletsel gözlem metotları ile mümkündür. Boru destekleme sistemlerinde cephelere sık inklinometre yerleştirilmesi ve sık sık deplasman kontrolleri yapılması gerekmektedir. Bu da proje maliyetini ve iş gücü kaybını arttıran bir faktör olarak öne çıkmaktadır.,

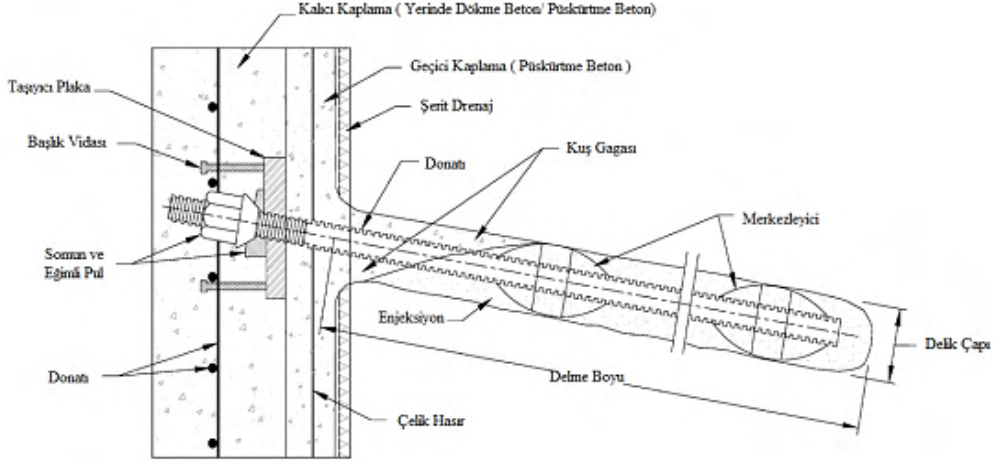


Şekil 3.19. Örnek bir içten iksalı destekleme sistemi (Öçal Kişisel Arşiv, 2022)

3.4.3 Zemin Çivisi

Zemin çivisi, şevli kazı aynasında ya da iksa işleri kapsamında imalatı tamamlanmış düşey destekleme elemanlarının aralarından projesine uygun ebatta açılan delgiler içerisine yerleştirilen nervürlü donatılara sistem üzerine etkiyen yatay itkilerin taşıtılması prensibine dayanmaktadır. Delgiye donatı yerleştirilmesi ardından delgi çimento enjeksiyonu ile doldurulmaktadır. Delgi içerisindeki çimento enjeksiyonu ve uygulama yapılan zemin arasında oluşan sürtünme kuvveti ile şevli kazı ya da iksa sistemi üzerine etkiyen yanal kuvvetler güvenli bir şekilde taşınmakta ve çevre yapıların güvenliği sağlanmaktadır. Bu yatay destekleme elemanının bir diğer adı pasif ankrajdır. Pasif adını almasının sebebi ise eleman üzerine herhangi bir öngerme kuvveti uygulanmamasıdır. Bahse konu yatay destekleme elemanı, şevli kazıda ya da iksa sistemi bünyesinde bulunan düşey destekleme elemanlarında oluşan yanal deplasmanlar ile yük taşıma görevini yerine getirmektedir. Dolayısıyla kazı aynasında yanal deplasman oluşmadığı durumlarda zemin çivilerinin de taşınması gereken bir yük bulunmamaktadır.

Zemin çivileri uygulandıkları iksa sisteminde deplasman toleransını arttırıcı özellik göstermektedir (Çınar, 2010). Kazandırdıkları bu özellik ile iksa perdesi önünde yapılan derin kazının daha uzun süre, geri dolgu yapılmasına gerek olmadan stabil kalmasını sağlamaktadırlar. Zemin çivileri kullanım sürelerine göre iki grupta incelenmektedir. 1. grup olan kalıcı zemin çivileri çivi donatılarının zeminle temas etmemesi ve dolayısıyla olası bir korozyon riskine karşı korunması için koruge borular ile birlikte delgi içerisine yerleştirilmekte ve belirli periyotlar halinde bakım işlemlerine tabi tutulmaktadırlar. 2. grup olan geçici zemin çivileri ise yalnızca zemin çivisi enstrümantasyonları kullanılarak delgi içerisine yerleştirilmekte ve derin kazı geri dolgusunun yapılması ile servis ömürlerini tamamlamaktadırlar. İki grup zemin çivisinde de ortak kullanılan zemin çivisi ekipmanları Şekil 3.20’de gösterildiği gibidir.

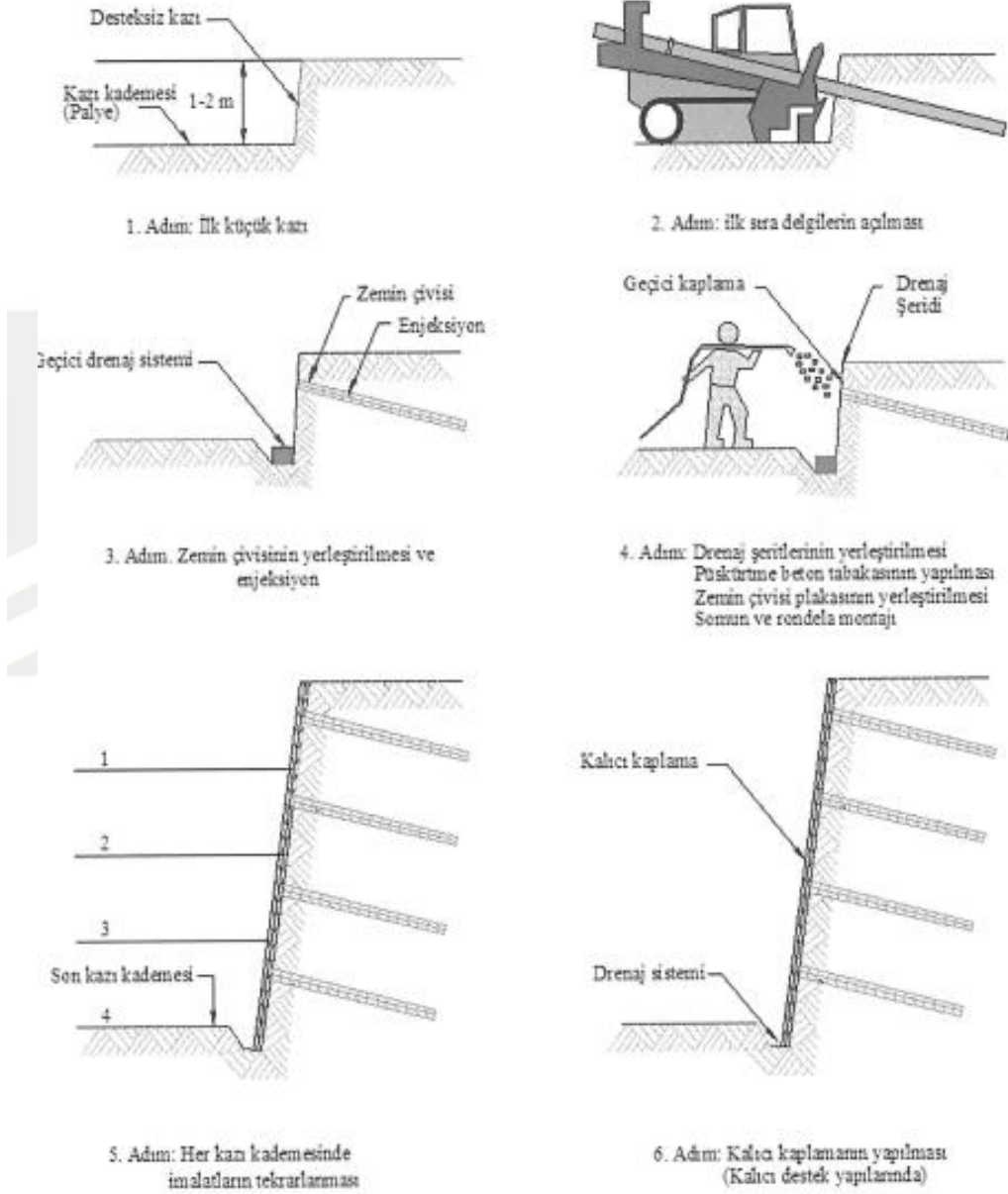


Şekil 3.20. Zemin çivisi ekipmanları (Porterfield vd., 1994)

Zemin çivileri, tasarım adımlarında verdikleri güvenin ve deplasman toleransının yanı sıra uygulama adımlarının kolaylığı ile de günümüzde sıkça tercih edilmektedir. Kazandırmış olduğu uygulama kolaylığı ile sarf malzemelerinin de az ve nispeten düşük maliyetli olması, zemin çivilerini diğer yatay destekleme elemanları arasında ön plana çıkarmaktadır. Aşağıda tipik bir zemin çivisinin uygulama adımları sırasıyla verilmiş olup, Şekil 3.21’de de görsel olarak gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 3.22’de örnek bir zemin çivisi imalatı anına ait görsel paylaşılmıştır.

- Şevli kazıda tasarım esaslarına uygun açıyla iksa kazıklarında ise 90 derece açı ile kazı kademesi tamamlanır,
- Delgi makinesi hazırlanan çalışma platformuna gelerek uygulama projesinde belirtilen boylarda ve seviyelerde zemin çivisi delgilerini tamamlar,
- Delgilerin içerisine önceden dışarda ekipmanları (merkezleyici vs.) monte edilmiş zemin çivisi donatısı yerleştirilir,
- Enjeksiyon tankında eş zamanlı olarak yoğun kıvamlı hazırlanmış olan çimento enjeksiyonu, enjeksiyon hortumları yardımı ile delgiye doldurulur. Enjeksiyonlama işleminde en önemli husus delginin dipten ağıza doğru dolmasıdır. Aksi halde delgi içerisinde kalabilecek artık zemin parçaları çimento bütünlüğünü bozabilecek ve olası dayanım kayıplarına yol açabilecektir.
- İmalat yapılan kazı aynasına çelik hasırlar döşenir ve sabitlenir,

- Kazı aynasına projesine göre ıslak veya kuru karışım püskürtme beton uygulaması yapılır,
- Çivilerin plakaları ve rondelaları yerleştirilerek somunları sıkılır,
- Nihai kazı kotuna ulaşılan kadar işlemler tekrar edilir.



Şekil 3.21. Zemin çivisi uygulama adımları (KDYY, 2022)



Şekil 3.22. Örnek bir zemin çivisi imalatı (Öçal Kişisel Arşiv, 2022)

Zemin çivileri, bahsedilen avantajlarının yanı sıra daha birçok avantaja sahiptir. Ancak bu avantajlar bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Zemin çivilerinin sahip olduğu avantaj ve dezavantajlar başlıca şu şekildedir (Yeni, 2024);

- Zemin çivisinin sağlamış olduğu en büyük avantaj öngermeli ankrajlara alternatif olmasıdır. Öngermeli ankrajdan daha kısa sürede ve daha az maliyetle imalatı yapılabilmektedir.
- Tasarım aşamasında öngörülen zemin kriterlerinin çalışma sahasında sağlanamadığı durumlarda uygulama projesinde çivi boyları ve/veya karelaajında yapılacak hızlı revizyonlar ile imalat sürecine hız kesmeden devam edilebilmektedir.
- Zemin çivisi imalatı küçük makineler ile yapılabildiği için özellikle şehir içi çalışma alanlarında kolay uygulanabilirlik sağlamaktadır.
- Yüksek su içeriğine sahip zeminlerde zemin çivisi imalatı yapılırken enjeksiyonlama adımı problem yaşanabilmektedir. Yaşanması muhtemel bu problem zemin çivi taşıma kapasitesini olumsuz yönde etkilemektedir.
- Küçük makinelerle imalatının yapılabilmesi özellikle şehir içini çalışma alanlarında zemin çivileri için bir avantaj iken sık karelaajlı bir imalat gerektirmesinin, çevre yapılar ve alt yapılar (su hatları, elektrik hatları vs.) için tehlike teşkil edebilecek olması bir dezavantajdır. Ayrıca zemin çivilerinin sık imalat gerektirmesinin bir başka dezavantajı da maliyettir.

Çalışma alanına göre aşırı sık zemin çivisi imal edilmek durumunda kalınması halinde proje maliyeti yükselecek ve sistem ekonomikliğini kaybedecektir.

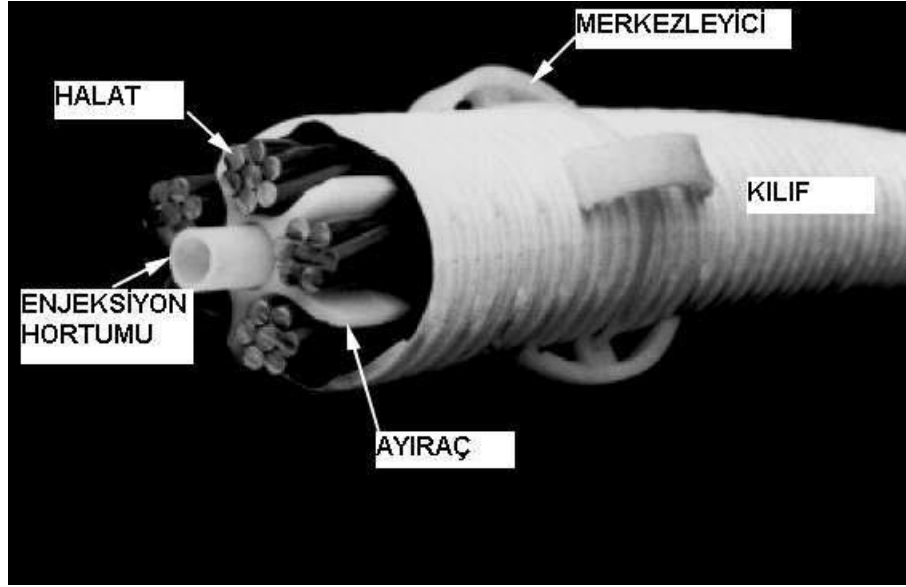
- Püskürtme betonla birlikte uygulanan zemin çivilerinde püskürtme beton ile zemin arasında drenaj sisteminin doğru kurulamayıp su akışının olması durumunda püskürtme beton zeminle aderans gösteremeyecektir. Bu sebeple zemin çivileri ile zemin tabakası arasında yükü dağıtıcı bir eleman olmayacağı için ciddi bir dayanım kaybı yaşanması söz konusu olacaktır.
- Zemin çivisi imalatı yapılabilmesi için şevli kazılarda yapılacak kazı kademesinin yaklaşık 2 metre derinlikte imalatlar tamamlanana kadar iç stabilitesi koruyabilmesi gerekmektedir. Özellikle ilk kademe kazılarında dolgu birimlere daha sık rastlandığı göz önünde bulundurulursa bu kriterin sağlanamaması söz konusu olabilmektedir. Dolgu birim dışında granüler yapıya sahip zeminlerde de (kum, çakıl vs.) aynı durum söz konusu olabilmekte bu da projenin başlama aşamasında köklü bir revizyona gidip öngermeli ankraja ya da kazıklı bir sisteme revize edilmesine sebebiyet verebilmektedir. Bahse konu revizyon proje süresinin ve maliyetinin artması anlamına gelmektedir.

3.4.4 Öngermeli Ankraj

Öngermeli ankraj elemanlarının temel çalışma prensibi, iksa sisteminde yer alan düşey destekleme elemanları üzerine etkiyen yanal itki kuvvetlerini iksa arkasında oluşan kayma kamasının dışındaki zemin tabakalarına aktarmaktır (Çopan, 2020). Bu yük aktarımı kayma kaması dışında oluşturulan enjeksiyonlu sabit bir kök bölgesine ankraj halatlarının sabitlenmesi esasına dayanmaktadır. Zemin çivileri (pasif ankrajlar) zaman içerisinde iksada oluşan yatay deplasmanlar ile yük aktarımı sağlarken öngermeli ankrajlar mühendislik hesapları sonucunda tayin edilen ve ankraja imalat sonunda uygulanan öngerme kuvveti ile ilgili yük aktarımını sağlamaktadırlar. Bu aktarım sayesinde öngermeli ankraj ile donatılmış bir iksa sisteminde bulunan düşey destekleme elemanları derin kazı işleri süresince yapısal stabilitelerini kaybetmeden servis ömürlerine devam edebilmektedirler.

Bir öngermeli ankrajın en temel parçası şüphesiz ki çelik halatlardır. Genellikle 7 adet çelik telin bir araya getirilerek spiral şeklinde sarılması ile oluşturulan çelik halatlar bir öngermeli ankrajda 7 adede kadar bir araya getirilerek halat demeti

halinde kullanılabilmektedirler. Öngermeli ankrajın diğer bir önemli parçası enjeksiyon hortumudur. Ankraj halatı demetinin, uygulama projesinde belirtilen detaylara uygun şekilde yapılmış delgi içerisine yerleştirilmesi akabinde enjeksiyon hortumu yardımıyla kök bölgesi enjeksiyonlanmakta ve yük aktarımı için kayma kaması arkasında sabit ve dayanıklı bir bölge oluşturulmaktadır. Öngermeli bir ankrajın sağlıklı şekilde yük aktarımı gerçekleştirerek yapısal stabiliteye destek olabilmesi için kök kısmı büyük önem arz etmektedir. Kök kısmının dipten ağıza doğru homojen şekilde enjeksiyon ile doldurulduğundan emin olunmalıdır. Öngermeli ankrajın diğer parçaları ise merkezleyiciler, ayraçlar, ara tıpa ve koruma kılıfıdır. Merkezleyiciler ankraj halatı demetinin delgi çeperine temas etmeden delginin merkezinde konumlanmasını sağlamaktadırlar. Bu sayede ankraj halatı demetinin etrafı eşit şekilde enjeksiyonlanmakta ve demetteki halatların zemin ile teması önlenerek olası bir korozyon ihtimalinin önüne geçilmektedir. Ayraçlar ise demette yer alan halatların birbirlerinden ayrı durmalarını sağlamaktadır. Bu sayede demette yer alan halatların araları da çimento enjeksiyonu ile dolmakta ve halatlar aynı demette yer almasına rağmen birbirlerinin çalışmasına etki etmemektedir. Ara tıpa ise bir öngermeli ankrajda kök boyu ile serbest boyun ayrı tutulmasını sağlamaktadır. Çalışma prensibi olarak kök boyu içerisinde yer alan çelik halatlar çimento enjeksiyonu ile zemine sabitlenmiş, serbest boy içerisinde yer alan halatlar ise uygulanacak olan öngerme kuvvetlerinin ve düşey destekleme sistemlerinde oluşacak yatay deformasyonların toleransı için serbest olmalıdır. Bir öngermeli ankrajda kök boyuna ve serbest boyu farklı çalışabilme özellikleri ara tıpa ile kazandırılmaktadır. Koruma kılıfı da esasında ara tıpa ile benzer görev görmektedir. Ankraj halatı demeti delgi içerisine yerleştirilirken serbest boyu koruma kılıfı içerisinde olacak şekilde yerleştirilir. Bu sayede serbest boy kısmına çimento enjeksiyonu dolması halinde bile enjeksiyon zemin ile temas etmeyip koruma kılıfı içerisinde kalacaktır. Dolayısıyla serbest boy kısmında bulunan çelik ankraj halatları çimento enjeksiyonu içerisinde kalsa bile zemine sabitlenmemektedir. Öngermeli ankrajda kullanılan ekipmanlar Şekil 3.23'te görsel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Öngermeli ankraj ekipmanları (Çınar, 2010)

Öngermeli ankrajın halat demetine monte edilen ekipmanlar kısaca bu şekilde özetlenebilirken bir de ankrajın dışında kullanılan ekipmanlar mevcuttur. Bir ankrajın dış ekipmanları başlıca ankraj plakası, ankraj kafası ve kamalar olarak sıralanabilmektedir. Ankraj plakası ankraja uygulanan öngerme yükünün kuşak kirişinde daha geniş bir alana yayılması sağlayan yardımcı ekipmandır. Ankraj kafası ve kamalar ise ankraja uygulanan öngerme kuvvetinin sabitlenmesini sağlamaktadır. Yerleştirilen ankraj kafasında bulunan konik deliklerden halatları dışarıya çıkartılmakta ve kamalar halatlara yerleştirilmektedir. Akabinde uygulanan öngerme kuvveti sonucunda kamalar ankraj kafasındaki konik deliklere sıkışmakta ve halat üzerine uygulanan kuvvet kaldırıldığında dahi halatlardaki germe kuvveti sabit kalmaktadır. Öngermeli ankrajlar bu dahili ve harici ekipmanların bir arada çalışması ile yük aktarımı sağlamaktadır. Her bir ekipmanın kalitesi ve doğru kullanımı ankrajın sağlıklı şekilde yük aktarımı yapabilmesi üzerinde kritik öneme sahiptir. Örnek bir öngermeli ankraj imalatına ait görsel Şekil 3.24’te paylaşılmıştır.



Şekil 3.24. Örnek bir öngermeli ankraj imalatı (Öçal Kişisel Arşiv, 2022)

Öngermeli ankrajlar gerek ülkemizde gerek dünyada geoteknik uygulamalarda sıklıkla tercih edilen bir yanal destekleme elemanıdır. Sıklıkla tercih edilmesindeki sebep sağlamış oldukları avantajlardır ancak sağlamış oldukları avantajlar tüm destekleme elemanlarında olduğu gibi birtakım dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Öngermeli ankrajların sağlamış oldukları avantajların başlıcaları şu şekildedir;

- İmalatları kısa sürede hızlı bir şekilde yapılabilmekte ve proje süresini ciddi şekilde kısaltmaktadırlar.
- Yapı çukuru sınırları içerisinde herhangi bir elemanlarının bulunmaması sebebiyle yapılacak olan deri kazıda parsel içerisinde yer kaybına sebebiyet vermemektedirler.
- Üzerlerine uygulanan öngerme kuvveti ile yapısal stabiliteleri test edilebilmektedir. Öngerme kuvvetini herhangi bir sebepten dolayı taşıyamayan bir ankraj olduğunda yerine yenisi yapılabilir. Dolayısıyla imalatı tamamlanan bir yatay destekleme elemanının fizibilitesi kontrol edilebilmektedir.
- İksa sistemine kazandırmış oldukları deplasman toleransı ile düşey destekleme elemanlarına belli sınırlar dahilinde deplasman yapabilme esnekliğini sağlamaktadırlar. Ankrajlı destekleme sistemlerinde oluşacak deplasman toleransları için belirtilen sınır ilgili yönetmelikte kazı derinliğinin %3'ü olarak tayin edilmiştir (KDYY, 2022).

- Öngermeli ankrajlar kayma kaması dışındaki ilgili zemin tabakasında kök bölgesinin oluşturulabileceği farklı zemin koşullarında uygun tasarım esasları kabul edilerek kullanılabilirler.
- Öngerme kuvvetinin kontrol edilebilirliği öngermeli ankrajın aktaracağı yükü de doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple çalışma sahasında bulunan zemin koşulları ve proje ihtiyaçları göz önünde bulundurularak öngerme kuvveti değiştirilmesi sonucunda ankrajın aktaracağı yük miktarı da doğrudan değişmiş olacaktır. Bu sayede öngermeli ankraj kapasitesi kolay bir şekilde kontrol altında tutulabilmektedir.

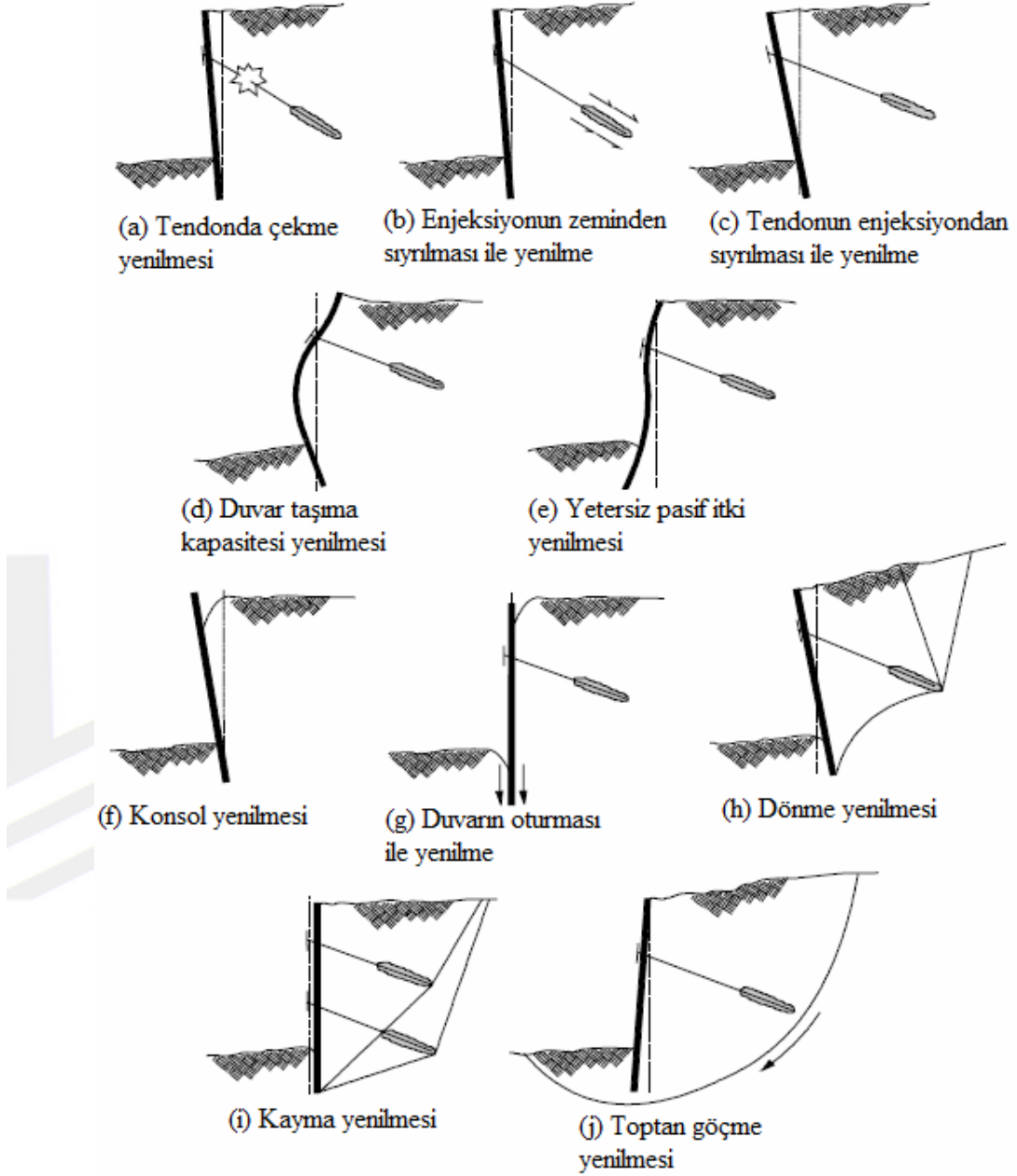
Sağlamış olduğu avantajlar sebebiyle sıklıkla tercih edilen bir yatay destekleme elemanı olan öngermeli ankrajların beraberinde getirmiş olduğu dezavantajlar da mevcuttur. Bu dezavantajların başlıcaları şu şekildedir;

- Zemin – enjeksiyon arasında yeterli sürtünme kuvvetinin bulunmadığı nispeten zayıf zeminlerde uygulanması hayli zordur. Genellikle böyle bir ortamda öngerme işlemi aşamasında enjeksiyonlanmış kök bölgesi uygulanan kuvvetle birlikte zeminden sıyrılarak stabilitesini kaybetmektedir. Dolayısıyla ilgili öngermeli ankrajın servis ömrü başlamadan bitmektedir. Bahse konu durumda öngermeli ankrajın yerine yenisi yapılması gerekmektedir. Bu da maliyet ve süre kaybı olarak başka bir dezavantaj olarak kendini göstermektedir.
- Yer altı su seviyesinin yüksek olduğu çalışma sahalarında kök bölgesinin kaliteli şekilde oluşturulması önemli bir husustur. Kök bölgesinin doğru oluşturulamaması ilgili ankrajın öngerme işlemi sırasında zeminden öngörülen reaksiyonu alamamasına sebep olacaktır. Bu da yine ankrajın zeminden ya da halat demetinin enjeksiyon içerisinden sıyrılması ile sonuçlanacaktır. Yine maliyet ve zaman kaybına sebebiyet veren yerine ankraj yapılması işlemini beraberinde getirecektir.
- Öngermeli ankrajların sağlamış oldukları deplasman toleransı genellikle avantaj gibi gözükse de bazı durumlarda iksa sistemi için bir dezavantaja dönüşebilmektedir. İksa sisteminin fazla deplasman yapması sonucu çevre yapılar da hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu sebeple öngermeli ankrajla donatılmış bir iksa sisteminde inklinometreler gibi aletsel gözlem metotları

kullanılarak yanal deplasmanlar devamlı kontrol altında tutulmalı kritik bir durum gözlenmesi halinde aciliyetle gerekli önlemler alınmalıdır.

- Öngermeli ankrajlar tasarım ve uygulama aşamalarında azami dikkat gerektiren yatay destekleme elemanlarıdır. Tasarım aşamasında yapılacak bir hata (yanlış serbest boy, kök boyu, öngerme yükü tayini vs.) ya da uygulama aşamasında yaşanacak bir dikkatsizlik (klipslerin düzgün konumlandırılmaması, doğru ön germe yükü uygulanmaması vs.) öngermeli ankraj elemanının yapısal stabilitesini ve yük aktarımı doğrudan etkileyecektir. Bu durumda öngermeli ankrajda göçme mekanizmalarından herhangi birinin gerçekleşmesi kaçınılmaz olacaktır.

Öngermeli ankrajların kullanıldığı bir iksa sisteminde çalışma sahası koşullarının doğru tayin edilememesi, çalışma sahasına uygun tasarım yapılmaması ya da uygulama aşamasında uygulama projesindeki detayların eksiksiz şekilde uygulanmaması sonucunda birtakım göçme mekanizmaları gerçekleşebilmektedir. Öngermeli ankraj tasarım aşamasında Şekil 3.25'te belirtilen göçme mekanizmalarının tahkiki göz önünde bulundurulmalıdır (Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği, 2022). Öngermeli ankrajlı iksa sistemlerinin göçme mekanizmaları şu şekildedir;



Şekil 3.25. Öngermeli ankrajlı iksa sistemi göçme mekanizmaları (KDYY, 2022)

- (a) Ankraj halatının serbest boyunda kopma yaşanması durumudur. Kök boyunun, enjeksiyon kalitesinin ve zemin-enjeksiyon sürtünme gerilmesinin uygun olduğu ancak yapılan ankrajın öngörülenden fazla gerilmeye maruz kalması sonucunda serbest boy bölgesinde bulunan halatların maksimum uzamasını yapmasından sonra kopmasıdır.
- (b) Zemin-kök bölgesi arasındaki sürtünme gerilmesinin yetersizliğinden kaynaklanan göçme mekanizmasıdır. Zemin profilinin yanlış analiz edilmesi, hesap ve tasarım safhasında yapılacak olası hatalar veya çalışma

sahasında hâkim zemin tabakalarının bölgesel farklılıklarından meydana gelmektedir. Bu göçme mekanizması gerçekleştiğinde ankraj kök bölgesiyle birlikte zeminden sıyrılarak kazı aynasından dışarıya doğru çıkmaktadır. Çoğunlukla kayma mukavemeti düşük zeminlerde meydana gelmekle birlikte ankraj kabul testlerinde sıklıkla kendini belli etmektedir (Dayıoğlu, 2010). Bu göçme mekanizmasının iksa sistemini herhangi bir tehlikeye sokmasına fırsat verilmeden kontrol edilebilmesi için öngerme deneylerinde ilgili ankraj hesap ve tasarım adımlarında tayin edilen ve uygulama projesinden belirtilen servis yükü değerinin belli katlarında yüke maruz bırakılmalıdır. Bu yük değeri geçici ankrajlar için servis yükünün 1,33 katı iken kalıcı ankrajlarda servis yükünün 1,5 katı olarak tayin edilmelidir (KDYY, 2022).

- (c) Kök bölgesinde yapılan enjeksiyon içerisinde ankraj halat demetinin sıyrılmasıdır. Genellikle yapılan çimento enjeksiyonunun kalitesinin sağlanamaması ya da delginin kök bölgesinin homojen şekilde enjeksiyonlanmaması durumlarında gözlenmektedir. Ortaya çıkarmış olduğu sonuçlar zemin-enjeksiyon sıyrılması ile aynı olmaktadır. Zemin-enjeksiyon sıyrılmasında olduğu gibi öngerme testleri ile önceden kendisini belli eden ve kontrol edilebilir bir göçme mekanizmasıdır.
- (d) Düşey destekleme elemanının üzerine etkiyen yanal itki kuvvetlerini güvenli şekilde taşıyamaması durumudur. Ankraj karelaajının, öngerme kuvvetinin, kök boyunun, serbest boyunun vs. hesap ve analiz adımlarında doğru belirlenememesi sonucu oluşabileceği gibi düşey destekleme elemanının yeterli kesit alanında tasarlanmamasından da kaynaklanabilmektedir. Bu göçme mekanizması yalnızca tasarım aşamasında yapılan hatalardan değil uygulama aşamasında projede belirtilen detaylara tam olarak uyulmaması sonucu da ortaya çıkabilmektedir.
- (e) Pasif itki katsayısının yetersizliğinden kaynaklanan göçme mekanizması genellikle tasarım ve analiz aşamasında kazık soket boyunun yetersiz tasarlanmasından ya da uygulama aşamasında beton dökümü esnasında tiremi kullanılmamasından kaynaklı oluşmaktadır. Tiremi kullanılmadan beton dökümü yapılan kazıklarda sıklıkla segregasyon görülmekte ve özellikle alt bölümde kazık doğru oluşturulamamaktadır. Kazığın gerek

tasarımdan gerek uygulamadan dolayı yetersiz soket boyuna sahip olması aktif toprak basıncını dengeleyici olarak çalışan pasif toprak basıncının yetersiz oluşmasını sağlayacak ve bunun sonucunda bahse konu göçme mekanizması oluşacaktır.

- (f) Düşey destekleme elemanının kesiti ve soket boyu yeterli olmasına rağmen oluşan bu göçme mekanizması genellikle birden çok ankraj kademesinin kazısının birlikte yapılması sonucu oluşmaktadır. Öngerme işlemi başarılı bir şekilde tamamlanmayan ankraj hattının bir sonraki kademe kazısı gerçekleştirilmemeli, ankraj kademeleri sırası ile tamamlanarak yapılmalıdır. Düşey destekleme elemanının ilgili yönetmelikte belirtilen sınır değerinden (deplasman/kazı derinliği $=\%3$) daha fazla deplasman yapması sonucu oluşan bu göçme mekanizmasının önüne geoteknik enstrümanlar kullanılarak yapılacak aletsel gözlemler ile geçilebilmektedir.
- (g) Yapılacak düşey destekleme elemanının herhangi bir bölgesinde dökülen betonda süreklilik sağlanamaması yahut hesap ve tasarım aşamasında düşey destekleme elemanının sağlam birime soketlenmemesi sonucu oluşmaktadır. Tüm ankrajları başarılı şekilde yapılmış bir iksa sisteminde gözlenebileceği gibi henüz ilk ankraj kademesi yapılmamış iksa sistemlerinde de gözlenebilmektedir. Uygulama safhasında yapılacak gözlemler, doğru beton dökümü ve yapılacak süreklilik testleri ile bu göçme mekanizması önlenmektedir.
- (h) Düşey destekleme elemanının ankrajlar ile birlikte aşırı deplasman yapması durumudur. Çoğunlukla ankraj öngerme kuvvetlerinin yetersizliğinden ya da ankraj kök bölgesinin kayma kaması içerisinde kalmasından dolayı oluşmaktadır.
- (i) Düşey destekleme elemanının ankrajlarla birlikte yatayda ötelenmesi sonucu oluşmaktadır. Genellikle ankraj kök bölgesinin kayma kaması içerisinde kalması, kök boyunun yetersiz tasarlanması ve yanlış öngerme yükü tayinleri sonucu bu göçme mekanizması meydana getirmektedir.
- (j) Kayma kamasının iksa sisteminin altından geçmesi durumunda ortaya çıkmaktadır. Düşey destekleme elemanında tasarlanan yetersiz soket boyu, ankrajların kök boyunun kayma kaması içerisinde kalması gibi sebeplerden oluşmaktadır. Çevresel yapılara ve iksa sistemine geri dönüşü olmayan yapısal hasarlara sebebiyet vermektedir.

Özel koşullara sahip olamayan tipik bir çalışma sahasında yapılacak öngermeli ankraj imalatı için aşağıdaki adımlar sırasıyla uygulanmaktadır.

- Sahada ilgili aksta çalışma platformu hazırlanır.
- Hazırlanan platformda öngermeli ankraj uygulama noktalarının aplikasyonları yapılır.
- Delgi işlemine başlanır ve projede belirtilen ankraj toplam boyu (serbest boy + kök boyu) kadar devam edilir.
- Delgi işleminin bitiminde delici ekipman delgi içerisinden çıkartılır ve hazırlanmış ankraj halatı demeti dışarıda 1 metrelik germe payı kalacak şekilde delgiye yerleştirilir.
- Her imalat günü sonunda gün içerisinde halatı yerleştirilmiş ankraj delgilerine enjeksiyon işlemi yapılır.
- Karıştırıcı kazanında ağırlıkça 2/3 (su/çimento) oranında hazırlanıp dinlendirme kazanında bekleyen çimento enjeksiyonu, enjeksiyon hortumları ve pompa yardımı ile delgilere doldurulur.
- Bir ucu enjeksiyon pompasına bağlı olan hortumun diğer ucu ankraj halatı demeti üzerine monte edilmiş 1. enjeksiyon hortumuna bağlanır. Ankraj delgisinin dipten ağıza doğru çimento enjeksiyonu ile dolması sağlanır.
- Ankraj delgisi ağzında temiz çimento enjeksiyonu görülmesi ardından enjeksiyonlama işlemine 30 dk kadar ara verilir. Verilen ara süresi boyunca delgi içerisinde enjeksiyon seviyesi gözlemlenir. Aranın ardından halat demeti üzerine monte edilmiş 2. enjeksiyon hortumu vasıtasıyla delgi dibinden ağzına doğru çimento enjeksiyonu verilerek delginin enjeksiyon ile dolduğundan emin olunur.
- Ankraj enjeksiyon işlemi tamamlanan aksta uygulama projesinde belirtildiği ebatlarda kuşak kirişi imalatı yapılır.
- Ankraj enjeksiyonlama tarihini takiben 6 gün beklenir ve 7. gün ilgili kademedeki ankrajların kabul deneyi ve öngerme işlemi yapılır.
- Öngerme deneyi kapsamında bahse konu ankraj önce ilgili ankraj için uygulama projesinde belirtilen test yüküne, belirtilen servis yükünün ilk kademedeki %40 diğer kademelerde %15'lik yük dilimleri oranında yüklenip her kademedeki belirli süre beklenerek kademeli şekilde gerilir. Her yük kademesinde ankraj halatlarının uzama miktarları ölçülür. Ardından ankraj

zerindeki germe yükü ilgili ankraj için uygulama projesinde belirtilen servis yüküne kadar boşaltılır ve akabinde bu yükte kilitlenir. Not edilen toplam uzama miktarları kullanılarak maksimum elastik uzama miktarı doğrultusunda ankraj performansı tayin edilir.

- Her ankraj kademesi kazısında sahada bulunan inklinometrelerden deplasman okumaları alınacaktır. Alınan okumalarla iksada oluşan deplasmanlar gözlem altında tutulur.



şekil 3.26. Tipik bir ankraj öngerme işlemi (al kişisel arşiv, 2022)

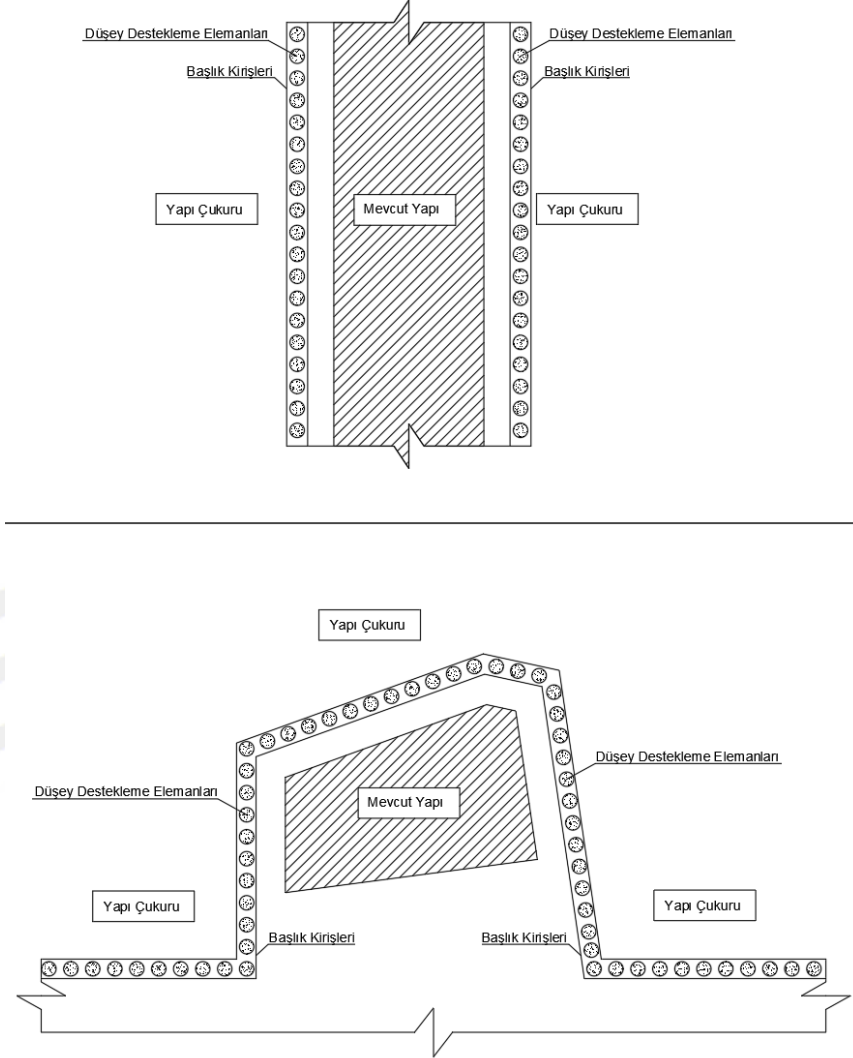
3.4.5 Tie-back

Derin kazılarda sıklıkla tercih edilen yatay destekleme elemanlarına kıyasla daha nadir tercih edilen ve nispeten daha özel denebilecek tie-back adında bir yatay destekleme elemanı daha bulunmaktadır. Uygulama ve tasarım aşamalarında yük aktarım elemanı olarak çelik halat kullanılan bu destekleme elemanı, çelik halat yerine demir donatı kullanıldığı halde tie-rod adını da almaktadır. Bahse konu yatay destek elemanı genellikle liman yapılarında yapılacak derin kazı çalışmalarında denize yakınlık ve yer altı su seviyesinin yüksekliğinden kaynaklı taşıyıcılık özelliği düşük zemin tabakalarının bulunması sebebiyle tercih edilmektedir. Taşıma kapasitesi ve sürtünme gerilmesi seviyesi nispeten düşük olan bu zeminlerde öngermeli ankraj yapılması halinde kök bölgesinin doğru oluşturulamama ihtimali yüksektir. Tie-back elemanların bu noktada sağlamış olduğu en büyük kazanç enjeksiyonla oluşturulmuş bir sabit bir kök bölgesine ihtiyaç duymamasıdır.

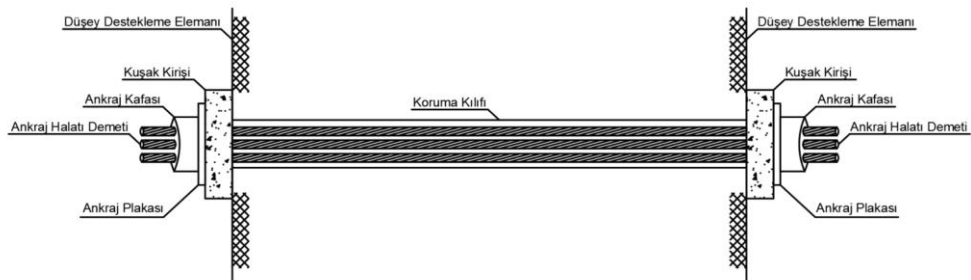
İlgili yatay destekleme elemanı, iksa hattıyla çakışan ve yapısal stabilitesinin korunması gereken yapıların mevcut olduğu çalışma sahalarında yapılacak derin kazı destekleme sistemlerinde de öngermeli ankraj ve zemin çivilerine kıyasla daha efektif ve ekonomik bir mühendislik çözümü sunmaktadır. Bahse konu durumda öngermeli ankraj yapılması halinde enjeksiyonlu kök bölgelerinin birbiri ile çakışma ihtimali yüksektir. Bu çakışma durumunda ankrajlar birbiri ile temas edeceği için öngörülen taşıma kapasitesini sağlayamayacaklardır. Tie-back elemanlar enjeksiyonlu bir kök bölgesine ihtiyaç duymadan yük aktarımı yapabilmesi kabiliyeti ile bu noktada ön plana çıkmaktadır.

Özel geoteknik çözüm gerektiren başka bir durum da çalışma sahasının ortasında bulunan ve yapısal stabilitesinin korunması gereken bir yapının etrafında derin kazı yapılması gerekmesi durumudur. Böyle bir durumda klasik öngermeli ankraj yapmak, kazı aynası arkasında kök boyunun oluşturulması için yeterli genişlikte zemin olmaması sebebiyle mümkün olmamaktadır. Belirtilen durumda yapı etrafında teşkil edilen düşey destekleme elemanları karşılıklı olarak tie-back elemanlar ile birbirine sabitlenebilmektedir. Tie-back elemanlar efektif şekilde çift taraflı yük aktarımını sağlayarak hem bahse konu yapının hem de teşkil edilen iksa sisteminin yapısal stabilitesini sağlayabilmektedir.

Tie-back elemanlarının yatay destekleme elemanı olarak tercih edildiği örnek durumlar Şekil 3.27’ de, bir tie-back elemenda kullanılan ekipmanlar Şekil 3.28’te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.27. Tie-back elemanının kullanılabileceği örnek durumlar (Öçal kişisel arşiv, 2022)



Şekil 3.28. Tie-back ekipmanları (Öçal kişisel arşiv, 2022)

3.4.5.1 Tie-back Çalışma Prensibi

Tie-back elemanların çalışma prensibi karşılıklı teşkil edilen düşey destekleme elemanlarının çelik halatlar ile birbirine sabitlenmesi esasına dayanmaktadır. Karşılıklı teşkil edilen düşey destekleme elemanları iki tarafta da kazıklı bir sistem olabileceği gibi bir tarafta kazıklı sistem diğer tarafta ise sabit bir betonarme perde olarak ihtiyaca göre teşkil edilebilmektedir. Yapılan sabitleme ile iksa sistemi üzerine etkiyen yanal itki kuvvetleri düşey destekleme elemanlarına çift taraflı olarak homojen şekilde dağıtılmaktadır. Uygulanan öngermeli kuvveti ile yük aktarımı sağlayan tie-back elemanları bu özelliği ile öngermeli ankrajlar ile benzerlik göstermektedir. Ancak öngermeli ankrajlardan farklı olarak çelik halatlar kök bölgesindeki enjeksiyonlu kısma değil kazı aynasının arkasında oluşturulan betonarme bir perdeye ya da çift taraflı (simetrik) şekilde yapılan derin kazıklarda arka sıra kazıklara sabitlenmektedir. Tie-back elemanlar uygulama şekli olarak ise tie-rod elemanlar ile büyük oranda benzerlik göstermektedir. Tie-rod elemanlardan farklı olarak ise tie-rod elemanlarda zemin gerilmelerinin ve sürşarj yüklerinin arka sıra kazıklara ya da betonarme destek perdesine aktarımını sağlayan demir donatılar, tie-back elemanlarda yerini öngermeli çelik halat demetlerine bırakmaktadır. Tie-rod elemanlar ve tie-back elemanlar çalışma prensipleri açısından karşılaştırıldığında aralarında öngermeli ankraj ve zemin çivisi arasındaki ilişkiye çok benzer bir ilişki olduğu gözlemlenmektedir.

3.4.5.2 Tie-back Avantajları

Tie-back elemanlar gerek çalışma sahasına kolay adapte edilebilmesi gerekse tasarım aşamasında sunmuş olduğu kolaylık ile geoteknik çözümleme kapsamında uygulama, hesap ve analiz adımlarında birçok avantaj sağlamaktadır. Tie-back elemanların sağlamış olduğu avantajlar şu şekilde ön plana çıkmaktadır:

- Geoteknik çözüm olarak yatay ve düşey destekleme elemanlarının birlikte yer aldığı bir iksa sistemi gerektiren liman yapılarında sıklıkla tie-back elemanlar tercih edilmektedir. Öngermeli ankrajlar ve zemin çivileri çalışma prensibi olarak çimento enjeksiyonu ile oluşturulmuş sabit bir kök bölgesine ihtiyaç duymaktadır. Ancak yapılacak iksa sistemi arkasında, kök bölgesinin oluşturulması öngörülen bölgede, genellikle alüvyon (taşıma gücü ve sürtünme kapasitesi düşük zemin) tabakaları yer almaktadır. Bu

durumda da bahse konu yatay destek elemanlarında zemin-enjeksiyon sıyrılmasına dayalı göçme mekanizmasının oluşması kaçınılmaz olabilmektedir. Tie-back elemanların bu noktada sağlamış olduğu en büyük avantaj iksa sistemi arkasında enjeksiyonla oluşturulmuş sabit bir kök bölgesine ihtiyaç duymamasıdır. Tie-back elemanlar tasarım aşamasında belirlenecek bir uzaklıkta inşa edilecek olan sabit bir betonarme perdeye sabitlenerek iksa sistemi üzerine etkiyen yatay itki kuvvetlerini güvenli şekilde taşıyabilmektedir.



Şekil 3.29. Tie-back kullanılmış örnek bir iksa çalışması (Öçal kişisel arşiv, 2022)

- Çalışma sahası etrafında yapılacak bir iksa hattı üzerinde tarihi yapı, yüksek gerilim hattı taşıyan bir elektrik direği vs. gibi yapısal stabilitesi korunması gereken bir yapı bulunması halinde ya da çalışma sahasının parsel alanı şekli sebebiyle iksa hattında iç bükey bir kenar oluşabilmektedir. Böyle bir geoteknik problemin çözümde karşılıklı öngermeli ankrajların veya zemin çivilerinin kök bölgelerinin birbiri ile temas etmesi bahse konu yatay destekleme elemanlarında önemli taşıma kapasitesi kayıplarına sebebiyet verebilmektedir. Tie-back elemanlar bu noktada yine sabit bir kök bölgesine ihtiyaç duymadan çift taraflı yük aktarımı yapabilmesi yeteneği ile önemli bir avantaj sağlamaktadır.



Şekil 3.30. Yüksek gerilim hattı direği etrafında tie-back kullanılan bir derin kazı
(Öçal kişisel arşiv, 2022)

- Yapısal stabilitesi korunması gereken bir yapının etrafında derin kazı yapılması gerekliliği olması halinde ise tie-back elemanlar yine önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bahse konu geoteknik problemin çözümünde

öngermeli ankraj ve zemin çivilerinin kök bölgelerini oluşturmak için yeterli mesafe bulunmaması kuvvetle muhtemeldir. Bu noktada tie-back elemanlar yine çimento enjeksiyonu ile oluşturulmuş sabit bir kök bölgesine ihtiyaç duymayışı ile ön plana çıkmaktadır.



Şekil 3.31. Bir yapı etrafında tie-back elemanlar ile teşkil edilen örnek bir iksa sistemi çalışması (Öçal Kişisel Arşiv, 2022)

- Tie-back elemanların çift taraflı çalışma mekanizması ile bir taraf için teşkil edildiğinde diğer taraf için de teşkil edilmiş olmaktadır. Bu özelliği ile proje süresinde önemli bir avantaj sağlarken proje maliyetini de aynı şekilde azaltmaktadır.
- Enjeksiyonla oluşturulmuş bir kök bölgesine ihtiyaç duymaması ile diğer yatay destekleme elemanlarında yaşanması olası bir kök kesişimi sonucunda oluşacak dayanım kaybı problemini ortadan kaldırmaktadır.
- Tie-back elemanı kullanılan bir iksa sisteminde geoteknik aletsel gözlem metotları ile düşey destekleme elemanlarının deplasmanları kolayca kontrol edilebilmektedir. Deplasman değerlerinin yönetmelikte belirtilen sınır değerlerini aşması halinde iksa sistemine hızlıca müdahale edilebilmektedir.
- Herhangi bir eleman-zemin etkileşime sahip olmayan tie-back elemanların imalatı ve performansı uygulanan öngerme yükünün esnekliği ile kolaylıkla kontrol altında tutulabilmektedir.

3.4.5.3 Tie-back Dezavantajları

Tie-back elemanlar sunmuş olduğu çeşitli avantajlarından yanında bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Bu dezavantajlardan bir kısmı kritik sonuçlar ortaya çıkarabilme potansiyeline sahipken bir kısmı nispeten daha tolere edebilir dezavantajlar olarak ön plana çıkmaktadır. Tie-back elemanların başlıca dezavantajları aşağıdaki gibidir:

- İksa sistemlerinde yatay destekleme elemanı olarak kullanılan tie-back elemanların beraberinde getirmiş olduğu dezavantajların en önemlisi şüphesiz ki uygulama zorluğudur. Uygulama aşamasında ön sıra kazıkların arasından geçildikten delgi işlemine yatayda ve düşeyde sapma yapılmadan devam edilmelidir. Delgi ekipmanının arka sıra kazıklara denk gelmesi durumunda kazıkların zarar görebilmesi ve taşıyıcı özelliklerini kaybetmeleri kuvvetle muhtemeldir. Bu sebeple tie-back elemanlar özellikle uygulama aşamasında büyük bir hassasiyet gerektirmektedir.
- Tie-back ile donatılmış düşey destekleme elemanlarına sahip bir iksa sisteminde ön germe kuvveti doğru tayin edilmelidir. Çelik halatlarda aşırı yüklenme durumunda kopmalar yaşanabileceği gibi yetersiz yükleme durumunda da yük aktarımının tam kapasite ile sağlanamaması yaşanabilmektedir. İki durumda da tie-back elemanların yük aktarma kapasitesi tasarım aşamasında belirlenen değerlerin altında kalabilmektedir. Bu durumun sonucunda ise düşey destekleme elemanlarında yönetmelikte izin verilen sınır deplasman değerinin üzerine çıkılması ve hatta bu deplasmanla birlikte çevre yapıların hasar görmesi bile söz konusu olabilecektir.
- Tie-back elemanların beraberinde getirmiş olduğu başka bir dezavantaj ise düşey destekleme elemanları ile ilgilidir. Tie-back elemanlar sabit bir kök bölgesi olmaksızın iki düşey destekleme elemanın birbirine sabitlenmesi ilkesi ile çalışmaktadır. Bu nokta birbirine sabitlenecek düşey destekleme elemanları kritik önem arz etmektedir. Tasarım ya da uygulama aşamasında düşey destekleme elemanlarının doğru teşkil edilmemesi/edilememesi durumunda tie-back elemanlar üzerlerine etkiyen öngerme kuvveti ile yük aktarımı sağlarken doğru teşkil edilmeyen/edilemeyen düşey destekleme elemanlarının yapısal stabilitesine zarar verebilecektir. Dolayısıyla iksa

sisteminde kritik deplasmanların ve yapısal hasarların gözlenmesi kaçınılmaz olacaktır.

- Tie-back tercih edilmek durumunda kalınmış bir iksa sisteminde yer alan düşey destekleme elemanlarının yatay deplasmanı sık sık geoteknik aletsel gözlem metotları ile kontrol edilmelidir. Öngerme kuvvetinin dışında yanal toprak itkileri doğrultusunda da tie-back elemanların üzerine etkiyen ve aktarmaları gereken yükün artış gösterebilmesi olasıdır. Bu yük artışı durumunda tie-back elemanların kopmaya veya aşırı uzamaya maruz kalabilmektedir. Dolayısıyla yük aktarma kapasitelerinde ya tamamen ya da kısmi bir kayıp yaşanabilmektedir.

3.4.5.4 Tie-back Tasarım Esasları

Çalışma prensibi olarak öngermeli ankrajlar ile büyük benzerlik gösteren tie-back elemanların tasarım aşamaları da aynı oranda benzerlik göstermektedir. Öngermeli ankrajlardan farklı olarak tie-back elemanlar çimento enjeksiyonlu bir kök bölgesi yerine arka sırada bulunan düşey destekleme elemanlarına sabitlenirler. Ayrıca açılı olarak tasarlanan öngermeli ankrajların aksine tie-back elemanlar iki düşey destekleme elemanı arasına açısız (düz) bir şekilde yerleştirilmektedir. Öngermeli ankrajların tasarımında oluşturulacak kök bölgesi için mevcut zemin tabakalarının özellikleri de göz önünde bulundurularak dış stabilite, serbest bölge için ise kullanılan çelik halat malzemesinin dayanım değerleri göz önünde bulundurularak iç stabilite tahkiki yapılmaktadır. İki değer arasından küçük olan değer ankrajın sınırlandırıcı yükü olarak kabul edilmektedir. Ancak tie-back elemanlarda bu süreç öngermeli ankrajlardakinden farklı ilerlemektedir. Tie-back elemanlar zeminle herhangi bir temas içerisinde olmadığı için dış stabilite tahkikine ihtiyaç duymamaktadır. Bu noktada tie-back dayanımını sınırlayıcı faktör kullanılan çelik halatın malzeme özellikleri ve sahada ihtiyaç duyulan tie-back boyudur. Dolayısıyla tipik bir tie-back için malzeme dayanım parametreleri ve fiziki özellikleri kullanılarak eksenel rijitlik değeri belirlenebilmektedir. İnceleme alanında her bir tie-back imalatı için saha uygulamalarında genellikle kullanıldığı gibi 3 adet 0.6" çapında çelik halatlar kullanılması planlanmıştır. Bu doğrultuda 1 adet çelik halat kesit alanı 140 mm^2 olarak hesaplanırken bu halattan 3 adet kullanıldığı göz önünde bulundurulduğunda $A_{\text{çelikhalat_toplam}} = 420 \text{ mm}^2$ olarak hesaplanmaktadır. Saha uygulamalarında standart olarak kullanılan çelik ankraj

halatının elastisite modülü ise imalatçı firmalar tarafından $E_{\text{çelikhalat}} = 195000 \text{ MPa}$ olarak paylaşılmaktadır. Bu bilgiler ışığında 3x0.6” halatın bir araya getirilmesi ile oluşturulan tipik bir tie-back eleman için eksenel rijitlik değeri, $E \cdot A$ eşitliği kullanılarak 81.9 kN olarak hesaplanabilmektedir. Tipik bir tie-back elemanının plastik deformasyonlara uğramadan (dayanımını kaybetmeden) taşıyabileceği maksimum yük ise ASTM A416 standartları doğrultusunda öngörülebilmektedir. Bu doğrultuda bir halat için 260 kN olarak belirtilen karakteristik çekme dayanımı 3 adet halat kullanıldığında 3 ile çarpılarak 780 kN olarak hesaplanabilmektedir. Ancak hesaplanan bu değer karakteristik değer olup Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği Tasarım El Kitabında tayin edilecek öngerme kuvvetinin karakteristik çekme dayanımının %60’ından fazla olamayacağı açıkça belirtilmektedir (Kazı Destek Yapıları Tasarım El Kitabı, 2022). Dolayısıyla 0.6” çapında 3 adet çelik halat kullanılarak teşkil edilen bir tie-back elemanı için tayin edilebilecek maksimum öngerme yükü (tasarım çekme dayanımı) 468 kN (yaklaşık 46 ton)’dur. Dolayısıyla ilgili yük için hesaplanacak elastik uzama miktarı tie-back için belirlenecek maksimum uzama miktarıdır. Elastik uzama formülü aşağıda belirtildiği gibidir.

$$\frac{P * L}{E * A}$$

P: Uygulanan kuvvet (kN)

L: Eleman boyu (m)

E: Elemanı oluşturan malzemenin elastisite modülü (GPa)

A: Elemanın kesit alanı (m²)

Belirtildiği gibi tie-back elemanlar için maksimum uzama miktarının hesaplanması safhasında uygulanan kuvvet değeri için ankraj halat demetinin tasarım çekme dayanımı kullanılmalıdır.

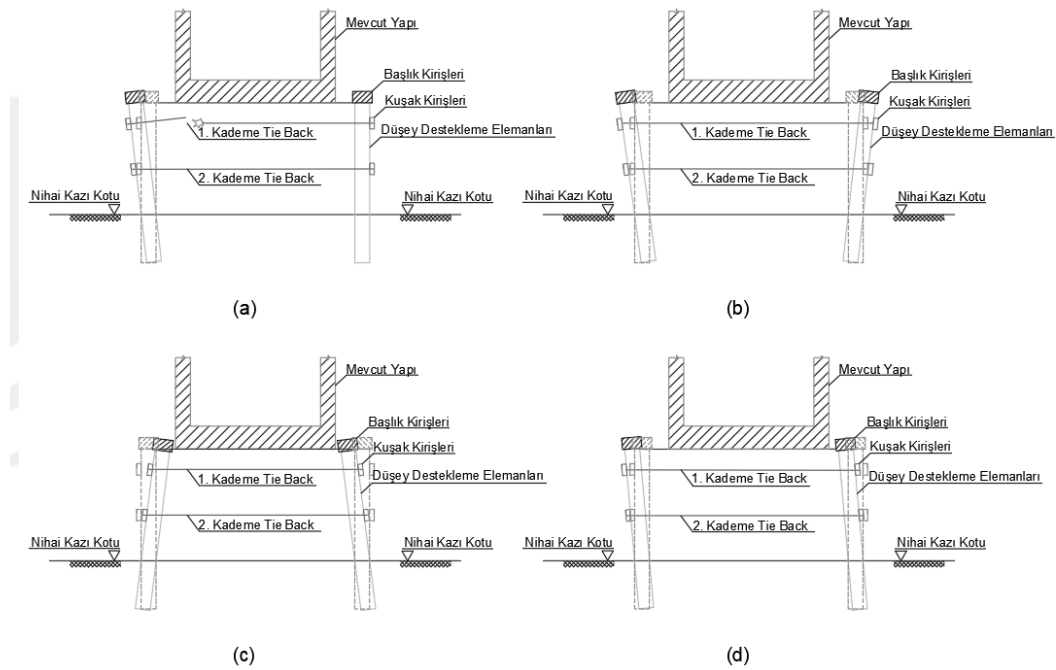
Ancak halatlara etkiyen yükün artması tie-back elemanların performansını olumsuz yönde etkileyecek ve tie-back elemanlar ilgili yükleri daha düşük güvenlik katsayıları ile daha fazla risk teşkil ederek taşıyacaklardır. Bu sebeple tie-back ile donatılmış bir iksa sisteminin tasarımında bir tie-back üzerine etkiyen yük, tie-back yatay/düşey aralıklarının özenle seçilmesi ile minimize edilebilecektir.

Yatay destekleme elemanı olarak tie-back kullanılan iksa sistemlerinin tasarımında dikkat edilmesi gereken başka bir faktör ise kuşak kirişlerinde meydana gelebilecek zımbalama durumunun kontrol edilmesidir. Öngerme kuvvetinin tie-back üzerine uygulanması ve yükün kilitlenmesi ile birlikte yük ilk olarak tie-back arkasına yerleştirilen çelik plakalar ile kuşak kirişlerine, kuşak kirişleri vasıtasıyla düşey destekleme elemanlarına aktarılacaktır. Dolayısıyla kuşak kirişlerinde olası bir zımbalama dayanımı problemi yaşanması halinde yük aktarımı gerçekleşemeyecek ve tie-back elemanların kafa bölgelerinde yaşanacak ani göçmeler sonucunda tahsis edilen iksa sisteminde yapısal hasarların oluşması kaçınılmaz olacaktır. Kuşak kirişleri için doğru tayin edilecek boy donatı adedi, çapı, etriye sıklığı, beton kalitesi vb. unsurlar ile olası bir zımbalama probleminin önüne geçilebilmektedir. Bahse konu unsurların doğru tayin edilmesi ve kuşak kirişinin zımbalama kontrolünün yapılması ise TS500 standardında belirtilen hesap adımları ile mümkün olmaktadır. Tie-back ile donatılmış bir iksa sisteminin tasarımında sonlu elemanlar yöntemini ya da limit denge yöntemini esas alan bilgisayar programları kullanılabilir. Bu programlarda temel prensip tasarlanacak olan iksa sisteminin çevre yapılarda minimum deplasman oluşmasına müsaade ederek üzerine etkiyen yatay itki kuvvetlerini ve çevre yapılardan kaynaklanan sürşarj yüklerini güvenle taşıyabilmesidir. Sonlu elemanlar yöntemi prensibi ile analizler gerçekleştiren Plaxis 2D adlı bilgisayar programı ile düşey destekleme elemanlarında meydana gelmesi muhtemel olan yatay/düşey deplasmanlar öngörülebilir. Ayrıca yatay/düşey destekleme elemanlarına etkiyen normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri de irdelenerek elemanların iç ve dış stabiliteleri değerlendirilebilir. Tasarım esaslarının doğru uygulanmadığı olası bir durumda çalışma sahasında yapılacak tie-back uygulamalarında gerekli hassasiyet gösterilmiş olsa dahi göçme mekanizmalarının oluşma ihtimali kuvvetle muhtemel olacaktır.

3.4.5.5 Tie-back Göçme Mekanizmaları

Tie-back elemanlar düşey destekleme elemanlarına gelen yanal kuvvetleri iksa cephesinde bulunan düşey destekleme elemanlarına homojen olarak dağıtan yatay destekleme elemanlardır. Bu özellikleri ile tie-back elemanlar iksa sisteminin, üzerine etkiyen gelen yanal itki kuvvetleri güvenle taşımalarını sağlamaktadırlar. Yanal yüklerin güvenle taşınması ise derin kazının tamamlanmasını ve akabinde

yapımı planlanan yapının inşaatını mümkün kılmaktadır. Ancak tie-back elemanlar bahse konu yük aktarımını yalnızca doğru tasarım ve uygulama süreçleri sonucunda sağlayabilmektedirler. Tasarım ve uygulama süreçlerinde yaşanması muhtemel herhangi bir problem ya da dikkatsizlik sonucunda tie-back elemanlar göstereceği göçme mekanizmaları ile düşey destekleme elemanlarının yönetmelikte izin verilen yanal deplasman değerlerini aşmasına ve iksa yapısının kritik bir durum içerisine girmesine sebep olabilecektir. Bu durumda iksa sistemlerinde nihai amaçlardan biri olan çevre yapıların güvenliği de tehlikeye atılmış olacaktır. Tie-back elemanların göçme mekanizmalarından başlıcaları Şekil 3.32’de gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Tie-back Göçme Mekanizmaları (Öçal kişisel arşiv, 2022)

- a. Tie-back elemanların geoteknik tasarım sürecinde düşey destekleme elemanlarının maruz kalacağı yanal itki kuvveti hesaplanmaktadır. Hesaplanan kuvvet doğrultusunda tie-back elemanların kazı aynasına yerleştirilme sıklığı ve her bir tie-back elemana uygulanacak öngerme kuvveti tayin edilmektedir. Tayin edilen sıklık ve öngerme kuvvetleri doğrultusunda analizler yapılarak öngörülen iksa sisteminin hesaplanan yanal kuvveti güvenle taşıyıp taşıyamayacağı belirlenmektedir. Bu aşamada tasarım parametrelerinin yanlış tayin edilmesi ya da kullanılan çelik halatın üretiminde yaşanan bir problemten dolayı yeterli kalitede olmaması sonucunda bu göçme mekanizması gerçekleşebilmektedir. Düşey

destekleme elemanlarında ani deplasman artışları ve dolayısıyla iksa sisteminin hızla taşıma kapasitesini kaybetmesi ile sonuçlanan bu göçme mekanizmasının önüne geçilebilmesi için öncelikle tasarım aşamasındaki geoteknik parametrelerin doğru tayin edildiğinden emin olunmalıdır. Uygulama aşamasında ise çelik halat kalitesi her tie-back elemanda ayrı ayrı kontrol edilmelidir. Öngerme işleminin uygulanması aşamasında tespit edilen halat uzaması miktarlarının sınırlar içerisinde olduğu kontrol edilmelidir. Uygulama aşamasından sonra ise iksa hattında konumlandırılacak inklinometreler ile düşey destekleme elemanlarının göstermiş olduğu yatay deplasmanlar sık sık kontrol edilmelidir. Öngörülenin aksi bir durum gözlemlendiğinde iksa kritik deplasmanlar yapmadan önce derhal geri dolgu yapılmalı ve durum kapsamlı şekilde analiz edilip doğru çözüm yöntemi araştırılmalıdır.

- b. Bahse konu göçme mekanizması genellikle tie-back elemanlara yeterli miktarda öngerme kuvveti uygulanmaması sonucu oluşmaktadır. Bu durumda düşey destekleme elemanları üzerine etkiyen yanal itki kuvvetlerini yeteri kadar gerili olmayan tie-back elemanlar eşit şekilde iksa sistemine aktaramamaktadır. Yük aktarımının yapılamaması sonucunda yanal yükler düşey destekleme elemanlarında öngörülme-yen yatay deplasmanlara sebebiyet vermektedir. Bu deplasman sonucunda tie-back elemanlar sınır değerlerin üzerinde uzamalar göstermekte ve düşey destekleme elemanlarının yatay hareketlerini doğru şekilde sınırlayamamaktadır. Düşey destekleme elemanlarındaki yatay deplasmandan kaynaklı tie-back elemanlarda oluşan bu aşırı uzamanın önüne geçilmemesi genellikle tie-back elemanların kopması ile sonuçlanmaktadır. Kopma sonucunda iksa sisteminde ani bir taşıma gücü kaybı oluşmakta ve çevre yapılar için güvenliği tehlikeye atabilecek durumlar yaşanabilmektedir.
- c. İlgili göçme mekanizması genellikle tie-back elemanlara olması gerekenden fazla öngerme kuvveti uygulandığı durumlarda oluşmaktadır. Fazla öngerme kuvvetine maruz bırakılan tie-back elemanlar kopmaz ise sabitlendikleri düşey destekleme elemanlarını birbirine doğru yaklaştıracaktır. Bu da düşey destekleme elemanları üzerine etki eden eğilme momentlerini kritik değerlere çıkarabilmektedir. Önlem alınmadığı

takdirde kritik eğilme momenti değerlerini aşan düşey destekleme elemanlarının yapısal stabilitelerinde bozulmalar meydana gelmesi ve elemanlarda ciddi miktarda taşıma gücü kayıpları oluşması kaçınılmazdır. Oluşan taşıma gücü kaybı çevre yapılara zarar verebileceği gibi ani göçmelere de sebep olabilmektedir. Bu sebeple tasarım aşamasında yapılacak analiz ve hesaplarda büyük bir hassasiyetle belirlenecek olan ön germe kuvvetinin saha çalışmalarında da aynı hassasiyet ile uygulanması gerekmektedir.

- d. Bu göçme mekanizmasının oluşması genellikle tie-back tasarımından ziyade iksa sistemi ile derin kazı karşısında stabilitesi korunmak istenen yapının doğru tanımlanamaması ile alakalıdır. Tie-back ile donatılmış düşey destekleme elemanları yapının iki tarafında simetrik şekilde yapılmaktadır. Gerekli simetri sağlanmaz ve tie-back elemanlar ile birbirine bağlantılı olan karşılıklı iki iksa sistemine yapıdan aktarılan sürşarj ya da yapının oturduğu zemin tabakalarından aktarılan yanal itki kuvvetleri eşit aktarılmaz bir tarafa diğer tarafa göre daha fazla aktarılması durumunda fazla yüke maruz kalan tarafta bulunan iksa sistemi yönetmelikte izin verilen sınır deplasman değerlerinden fazla deplasman yapacaktır. Karşılıklı iki sistemin birbiri ile bağlantılı olduğu göz önünde bulundurulduğunda nispeten daha az yüke maruz kalan iksa sistemi fazla yüke maruz kalan iksa sistemi ile birlikte hareket edecektir. Bu birlikte hareketin sonucunda iksa sistemleri ile beraber stabilitesi korunmak istenen yapıda önemli stabilite kayıpları yaşayacaktır. Önlem alınmadığı takdirde yapının ve iksa sisteminin kullanılamaz hale gelmesi kaçınılmaz olacaktır. Bu sebeple tasarım aşamasında yapı doğru tanımlanmalı aktarılan yükler doğru hesaplanmalı ve bu yükler karşılık teşkil edilen düşey destekleme elemanlarına eşit şekilde aktarılmalıdır. Aynı hassasiyet saha uygulamaları aşamasında yapılacak olan aletsel gözlem metotlarının kullanımında da gösterilmelidir.

3.4.5.6 Tie-back Uygulama Adımları ve Dikkat Edilecek Hususlar

Tie-back imalatı hassas ve kolayca düşey destekleme elemanlarına hasar verme potansiyeli olan bir uygulamadır. Dolayısıyla proje maliyetini ve süresini önemli ölçüde azaltıp efektif geoteknik çözümleri beraberinde getirirken uygulama sırasında yapılacak bir dikkatsizlik ya da gerekli hassasiyetin gösterilememesi

durumunda düşey destekleme elemanlarına verilebilecek olası bir hasarla proje maliyetini ve süresini aynı şekilde uzatabilme potansiyeline sahiptir. Bu sebeple uygulama adımlarının sırasına özen gösterilmesi büyük önem arz etmektedir. Tipik bir tie-back imalatının uygulama adımları aşağıda belirtildiği gibidir:

- İlk kademe kazısı

Stabilitesi korunacak olan yapının iki tarafında düşey destekleme elemanlarının tamamlanmasını takiben eş zamanlı olarak 1. kademe tie-back kazısı yapılır. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken en büyük husus ilk sıra tie-back kademesinin mevcut saha kotundan çok aşağıda olmamasıdır. İlk sıra tie-back imalatları tamamlanıp yük aktarımına başlayana kadar bu bölgede teşkil edilen düşey destekleme elemanları konsol olarak çalışacak ve üzerlerine etkiyen yanal itki kuvvetlerini yalnız başlarına taşıyacaklardır.



Şekil 3.33. Tie-back çalışması yapılmış bir çalışma platformu (Öçal kişisel arşiv, 2022)

- Çalışma platformlarının hazırlanması

İki tarafta da kazı tamamlanır ve çalışma platformları oluşturulur. Çalışma platformları hazırlanırken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta delgi işlemlerini yapacak olan makinenin hareket kabiliyetinin sınırlanmayacağı şekilde hazırlanmasıdır.



Şekil 3.34. Tie-back imalatı için hazırlanmış bir çalışma platformu (Öçal kişisel arşiv, 2022)

- Delgi açısının doğru ayarlanması

Yapının bir tarafındaki düşey destekleme elemanlarının aralarından uygulama projesinde belirtilen kottan yatay şekilde arka taraftaki ilgili kazıkların arasından çıkılacak şekilde delgi tamamlanır. Bu aşamada ise kritik faktör delginin düşey ve yatay açısıdır. Delgi kazıklara tam dik olacak şekilde ve yatay eksene tam paralel olacak şekilde başlamalıdır. Aksi takdirde arka sıra kazıkların arasından delgi ekipmanı çıkamayacak ve kazıklara takılacaktır. Bu da arka sıra kazıkların yapısal stabilitesine zarar vererek bütünlüğünü bozacaktır.



Şekil 3.35. Tie-back aplikasyon noktasına yanaşmış delgi makinesi (Öçal kişisel arşiv, 2022)

- Koruma kılıfının önemi

Tasarım aşamasında belirlenen adette çelik halata sahip halat demeti delgi içerisine koruma borusu içerisinde yerleştirilir. Uygulamanın bu aşamasında ise dikkat edilmesi gereken nokta koruma borusudur. Koruma borusu kullanılmadığı takdirde delgi içerisinde yaşanacak olası yıkılmalarda çelik halat demetinin hasar görmesi ya da uygulanan ön germe yükünü tam olarak kullanamayıp taşıma gücü kaybına uğraması kaçınılmaz olacaktır.



Şekil 3.36. Koruma boruları içinde öngerme işlemine hazır tie-back elemanlar
(Öçal kişisel arşiv, 2022)

- Kuşak kirişi dışında öngerme işlemi için yeterli pay bırakılması

Halatların yerleştirilmesi ardından ilgili aksta kuşak kirişi imalatı çelik halat demetlerinin başı germe işlemi için kirişin dışında kalacak şekilde tamamlanır. Kuşak kirişi imalatı yapılırken ankraj halatı demetinin ön germe pistonunun yerleştirilebileceği kadar dışarıda bırakılması kritik önem arz etmektedir. Aksi takdirde ön germe işlemi yapılamayacağı için tie-back elemanlar yük aktarımında bulunamayacaktır. Gerekli özen gösterilmediği halde halat demetinin yeterli uzunluktaki başka bir halat demeti ile değiştirilmesi gerekmektedir. Bu da proje maliyetinin artması anlamına gelmektedir.



Şekil 3.37. Tie-back imalat aksında kuşak kirişi betonu dökme işlemi (Öçal kişisel arşiv, 2022)

- Öngerme yükünün uygulanması

Kuşak kirişi imalatının tamamlanması ardından ilgili tie-back elemanlara tasarım ve analiz aşamasında tayin edilen öngerme yükü uygulanmaktadır. Öngerme kuvvetinin doğru uygulanıp uygulanmadığı halat demetinde gerçekleşen toplam uzama miktarının teorik ve maksimum elastik uzama miktarları ile kıyaslanması ile irdelenebilmektedir. Ayrıca Kazı Destek Yapıları Yönetmeliğinin 3.2.4.3 maddesinde öngermeli ankrajlar için belirtilen kabul testi ile de öngerme yükünün tie-back elemanlar üzerine uygulanma doğruluğu araştırılıp uygulanan öngerme yükü altında tie-back performansı belirlenebilmektedir. Tie-back elemanın aşırı ya da yetersiz uzama göstermesi halinde ön germe yükünün yanlış uygulandığı ya da kullanılan çelik hatta üretimden kaynaklanan bir problem yaşandığı düşünülebilecektir. Uzaman miktarının öngörülen aralıkta olmaması halinde ön germe kilitleme işlemi yapılmadan delgi içerisine yerleştirilmiş ankraj halatı demeti değiştirilmelidir.



Şekil 3.38. Tie-back öngerme işlemi (Öçal kişisel arşiv, 2022)

- Aletsel gözlem ile tie-back elemanların iksa sistemine etkisinin irdelenmesi

Ön germe yükünün uygulanması ile birlikte tie-back elemanlar düşey destekleme elemanları üzerine etkiyen yanal itki kuvvetlerini iksa perdesine aktarmaya başlamaktadır. Ön germe işleminin ardından 1-2 gün içerisindeki aksın hemen arkasında yer alan ilgili inklinometrelerden yatay deplasman ölçümü alınması gerekmektedir. Alınan ölçümün sonucunda elde edilen verilerin aynı kazı derinliğinde tie-back elemanlara ön germe işlemi uygulanmadan önceki ölçüm ile kıyaslanmalı ve tie-back elemanların doğru çalışıp çalışmadığı kontrol edilmelidir.



Şekil 3.39. Tie-back hattının arkasına yerleştirilmiş inklinometre – 1 (Öçal kişisel arşiv, 2022)



Şekil 3.40. Tie-back hattının arkasına yerleştirilmiş inklinometre – 2 (Öçal kişisel arşiv, 2022)

1. Nihai kazı kotuna kadar işlemler tekrar edilmektedir. Her kazı kademesinde aksların arkasında teşkil edilecek geoteknik enstrümantasyonlar ile düşey destekleme elemanlarının yapmış olduğu yatay deplasmanlar kontrol edilmelidir.

TİE BACK KULLANILAN ÖRNEK BİR ÇALIŞMA SAHASININ İNCELENMESİ

Tie-back elemanlar enjeksiyonlanmış bir kök boyuna ihtiyaç duymadan yük aktarımı sağlayabilen yapısıyla iksa sistemlerinde nadiren karşılaşılan bir yatay destekleme elemanıdır. İki sıra kazığın ya da bir sıra kazık ile sabit bir betonarme elemanın birbirine sabitlenmesi esasına dayanan tie-back elemanlar, düşey destekleme elemanları üzerine etkiyen yanal itki kuvvetlerini iksa sistemine homojen şekilde dağıtabilmektedir. Genellikle çalışma sahasında iksa hattıyla çakışan ya da çalışma alanının ortasında kalan ve yapısal stabilitesinin korunması gereken önemli bir yapının etrafında derin kazı yapılması gerekliliği meydana geldiği durumlarda tie-back elemanlar sağlamış olduğu çeşitli avantajlar ile ön plana çıkıp tercih edilebilir bir yatay destekleme elemanı olmaktadır. Yalova'da bulunan bir çalışma sahasında teşkil edilen iksa sisteminde tie-back elemanlar yatay destekleme elemanı olarak tercih edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde ilgili inceleme sahasında tie-back elemanların iksa sistemlerinde yatay destekleme elemanı olarak kullanılan bölgeleri için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan geoteknik tasarım analizleri, saha uygulamalarından elde edilen aletsel ve saha gözlem verileri, tie-back için olası alternatif metotlar detaylı olarak incelenmiştir. İnceleme kapsamında alternatif metotların tie-back yöntemi ile kıyaslanması yapılmış ve optimum geoteknik çözüm yöntemi irdelenmiştir.

4.1 Çalışma Sahasında Tie-back Kullanım Alanları

Çalışma sahasının ortasından geçen ve bünyesinde hizmet verdiği tesis için kritik öneme sahip olan 4.2 m genişliğinde ve 68.0 m uzunluğunda bir boru köprüsü bulunmaktadır. Ancak boru köprüsünün iki tarafında da yapılması planlanan yapılar için derin kazı yapılması gerekliliği doğmuştur. Boru köprüsünün yapısal bir hasar almadan her iki tarafında yapılan derin kazı işlemleri sırasında köprünün stabilitesi, düşey destekleme elemanı olarak mini kazık, yatay destekleme elemanı olarak ise tie-back kullanılan bir iksa sistemi ile sağlanmıştır. İlgili iksa sisteminde Ø30 cm

apında mini kazıklar $L = 8.00-9.45$ m boylarında ve $s = 0,45$ m ara ile, tie-back elemanlar ise mini kazık kazı aynasında 1,80 m yatay, 2.50 m düşey ara ve $L = 5,60$ m uzunluğunda tasarlanmış ve saha uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Her bir tie-back eleman 0.6" apında 3 adet 7 sarımlı elik halattan oluşmaktadır. Tie-back elemanlar için tasarım aşamasında tayin edilen ve saha uygulamasında kullanılan öngerme yükü ise 200 kN 'dur. İksa sisteminin teşkil edildiğı bölgede mini kazık aksında geoteknik aletsel gözlem metotları ile deplasman kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Uygulamanın gerçekleştirildiğı çalışma hattına mini kazık imalat aşamasında yerleştirilen inklinometre ile periyodik olarak mini kazıklarda oluşan yatay deplasman kontrolleri sağlanmışır. Bahse konu çalışmanın saha uygulamasının görseli Şekil 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Çalışma sahasında yer alan boru köprüsü iksa sistemi (Öçal kişisel arşiv, 2022)

Örnek olarak incelenen çalışma sahasında iksa hattıyla önemli bir yapının çakışması durumu da yaşanmıştır. Tie-back elemanlar, bu durum kapsamında da iksa sistemi bünyesinde teşkil edilerek mevcut yapının yapısal stabilitesinin korunmasında önemli bir rol oynamıştır. Çalışma sahası içerisinde yer alan ve ayak açıklığı 4,5 m olan yüksek gerilim hattı taşıyan pylon tipi bir elektrik direğı iksa hattıyla çakışmıştır. Elektrik direğinin kaldırılması ya da başka bir yere taşınması ciddi bir maliyet ve zaman kaybını beraberinde getireceğı için ilgili direk etrafında yapılması planlanan derin kazıların desteklenmesi ve yapı temel alt kotuna kadar

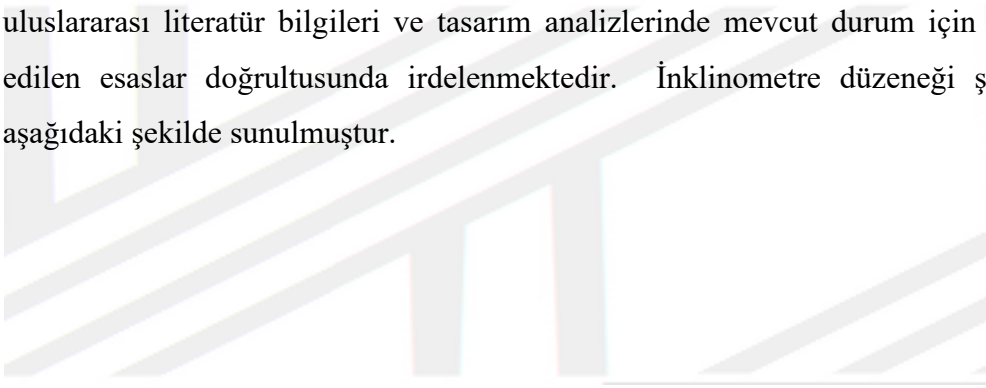
güvenle kazı yapılabilmesi için iksa önlemi alınması gerekliliği doğmuştur. Bu iksa önleminde de boru köprüsünde olduğu gibi mini kazıklı ve tie-back elemanlı bir geoteknik çözüm kullanılmıştır. İksa sisteminde Ø30 mini kazıklar $L = 7.5$ m boyunda, $s = 0.45$ m aralıklı olarak 2 aks olarak çift sıra şeklinde imal edilmiştir. Çift sıra mini kazıkların aks aralığı ise 0.9 m olarak tasarlanmıştır. İlgili iksa sisteminde 3 adet 0.6" 7 sarımlı çelik halattan oluşan çelik halat demetleri kullanılarak oluşturulan tie-back elemanlar ise 9.7 – 14.3 m boylarında yatayda 1.8 m aralıklı 4 sıra, düşeyde ise yine 1.8 m aralıklı 2 sıra olarak kullanılmıştır. Kullanılan çözüm dahilinde elektrik direğinin stabilitesi derin kazı süresi boyunca korunmuş ve derin kazı süreçleri başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

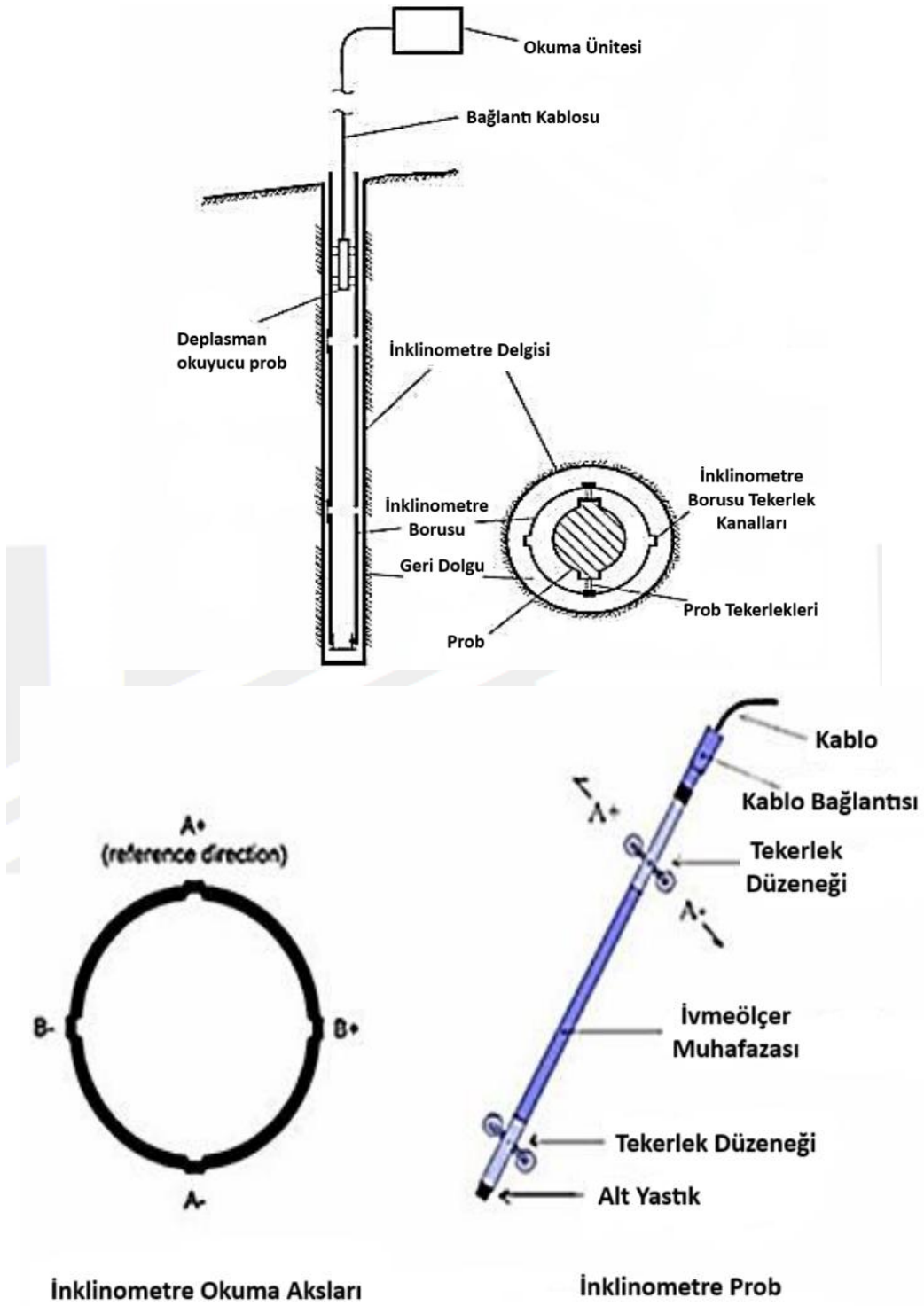


Şekil 4.2. İksa hattı ile çakışan elektrik direği için alınan iksa önlemi (Öçal kişisel arşiv, 2022)

Yeni yapılacak yapıların çalışma sahalarında derin kazı yapılması gerekliliğinin olduğu durumlarda yapılacak derin kazıların desteklenmesi için derin kazı destekleme sistemleri kullanılmaktadır. İksa olarak da adlandırılan derin kazı destekleme sistemleri, çevre yapıların sürşarj yüklerinden ve istinat yapısı arkasında kalan toprak basınçlarından kaynaklı oluşan yanal itkiler doğrultusunda meydana gelmesi öngörülen yanal hareketlerin kısıtlanmasında efektif rol oynamaktadır. Yatay ve düşey destekleme elemanlarından oluşan iksa sistemleri, derin kazıların güvenli tamamlanıp, çalışma alanının yapılması planlanan yeni yapılar için belirlenen temel alt kotu seviyesine kazılmasına olanak sağlamaktadır.

Ancak çalışma prensibi derin kazılarda kazı aynasının yanal hareketinin kısıtlanması ilkesi esasına dayanan iksa sistemlerinin tasarım analizlerinin gerçek saha verileri ile kıyaslanması ve doğruluk oranlarının tayin edilmesi kritik öneme sahiptir. Ayrıca anlık yatay deplasman takibinin yapılarak olası bir göçme durumu öncesinde önlem alınabilir bir noktada oluşması olası göçme mekanizmasının öngörülebilmesi ve yatay/düşey destekleme elemanlarının yük aktarım ve taşıma verimliliklerinin irdelenebilmesi için saha gözlem ve geoteknik enstrümantasyonlar kullanılarak yapılan aletsel gözlem verilerinden yararlanılmaktadır. Çalışma alanında iksa sisteminin imalatı aşamasında tahsis edilen ve düzenli periyotlarla veri okuma işleri gerçekleştirilen aletsel gözlem ve süreç boyunca çalışma sahasında yapılan geoteknik saha gözlem verileri güncel yönetmelikler, güncel uluslararası literatür bilgileri ve tasarım analizlerinde mevcut durum için kabul edilen esaslar doğrultusunda irdelenmektedir. İnklinometre düzeneği şeması aşağıdaki şekilde sunulmuştur.





Şekil 4.3. İnclinometre düzeneği şeması

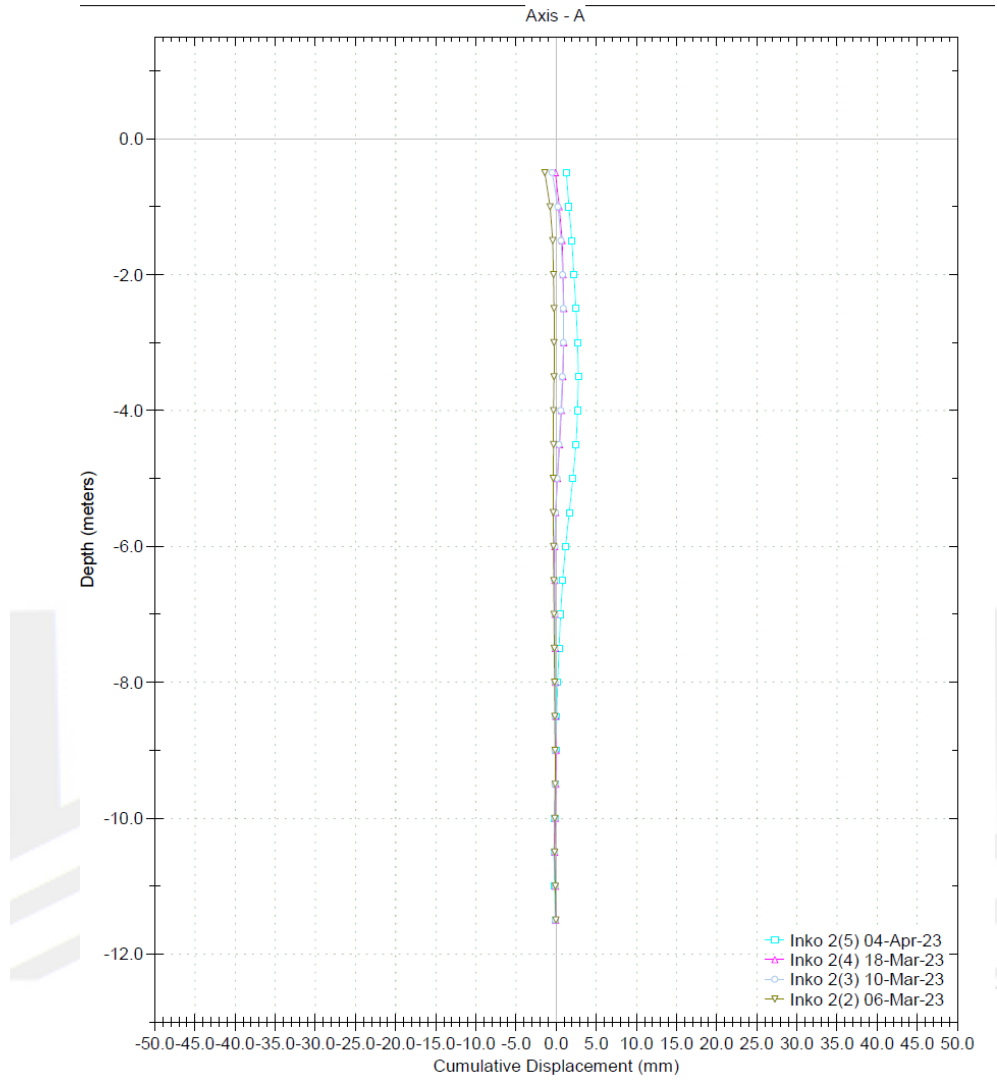
İnceleme alanında tie-back kullanılan iki farklı bölge olan boru köprüsü bölgesinde 1 adet, elektrik direği bölgesinde ise 2 adet inclinometre, düşey destekleme elemanları ile eş zamanlı olarak tahsis edilmiştir. İnclinometreler ile derin kazı destekleme işlemleri süresince iksa sisteminde yanal yüklerin taşınması görevinde

bulunan düşey destekleme elemanlarında oluşan yatay deplasmanlar periyodik olarak kontrol edilmiştir. İnklinometreler düşey destekleme elemanlarında yatay deplasman değerini kontrol etmekle kalmayıp deplasman kontrol periyotlarının, iksa sisteminde yük aktarıcı olarak görev alan tie-back elemanların imalatından önce ve sonra olarak düzenlenmesi ile tie-back elemanların iksa sisteminin yanal hareket kısıtlayıcı özelliğine sağlamış olduğu katkı da irdelenebilmiştir.

Çalışma sahasında ilgili akslarda yerleştirilen inklinometrelerin ölçüm işleri ve veri toplama sürecinde RST marka dijital inklinometre cihazı kullanılmıştır. Kullanılan cihaz 1 adet prob, 1 adet kablo makarası ve 1 adet okuyucu el cihazından oluşmaktadır. Prob cihazı 25.4 mm çapa sahip olup 25 metrede ± 2 milimetre doğruluk oranına sahiptir. İnklinometre okuma cihazının kablosu ise 6.4 mm çapında olup 1.8 kN kopma mukavemetine sahiptir. 50 cm’ de 1 okuma alabilme özelliğine sahip olan kablo sistemi ile sahadaki inklinometrelerden alınan okumalarda, okuma aralığı 50 cm olarak uygulanmıştır. Sahadaki inklinometrelerden alınan okuma verilerinin değerlendirilme ve yorumlanma sürecinde ise Inclinalanalysis adlı bilgisayar programı kullanılmıştır. Kullanılan program sayesinde alınan okuma verileri kümülatif düşey mesafe / deplasman grafiklerine dönüştürülmüştür. Grafikler yorumlanarak derin kazı destekleme sisteminde yer alan düşey destekleme elemanlarının tahsis edilen boy süresince göstermiş olduğu yatay deplasmanlar ve çalışma performansları irdelenmiştir. Saha ölçümlerinde kullanılan RST İnklinometre Veri Toplama Cihazı ve Inclinalanalysis programında oluşturulan örnek bir kümülatif düşey mesafe /yatay deplasman grafiği aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 4.4. RST inklinometre veri toplama cihazı (rstinstruments.com)



Şekil 4.5. Inclinalanalysis programında oluşturulan örnek bir kümülatif
inklinometre grafiği

4.2 İnceleme Alanı Jeolojisi, Zemin Profili ve Geoteknik Parametreler

4.2.1 İnceleme Alanı Jeolojisi ve Zemin Profili

İnceleme alanındaki doğal zemin koşullarının incelenmesi, jeolojik ve jeoteknik parametrelerin belirlenmesi amacıyla inşaatı planlanan yapının konumlandırılacağı parsel sınırları içerisinde yer alacak şekilde 24 adet zemin sondajı ve bu sondajların 8 tanesinde toplam 52 adet presiyometre deneyi yapılmıştır. Yapılan sondajlardan alınan temsili zemin numuneleri üzerinde inceleme alanında yer alan zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin tayin edilebilip tasarım parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla çeşitli laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca

bahse konu çalışma sahasında 30 metre derinliğe kadar bulunan zemin tabakalarının kalınlığının tayini ve bu tabakalardaki kayma dalgası hızlarının (V_{s30}) gözlemlenerek yerel zemin sınıfının belirlenebilmesi için 6 profil boyunca sismik kırılma deneyi gerçekleştirilmiştir.

4.2.1.1 Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)

Saha deneyleri kapsamında çalışma alanında bulunan hâkim zemin tabakalarının mühendislik özelliklerini tayin etmek amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deney 65,5 kg şahmerdan adındaki bir ağırlığa 76 cm yükseklikten periyodik olarak serbest düşüş yaptırılması ve şahmerdanın zeminde 45 cm ilerlemeyi kaç vuruşta yapacağı 15 cm'lik setler halinde kaydedilmektedir. Deney sonucunda SPT N_{30} değeri hesaplanırken ilk 15 cm'lik ilerlemeyi sağlayan düşüş sayısı göz ardı edilmekte ve 15. cm ile 45. cm arasındaki 30 cm'lik ilerlemeyi sağlayan düşüş sayısı SPT N_{30} olarak tayin edilmektedir. İnceleme alanında 24 adet sondaj delgisinde her 1.5 m'de 1 adet olacak şekilde SPT deneyleri yapılmıştır.

4.2.1.2 Presiyometre Deneyi

Presiyometre deneyi, deneyin yapıldığı derinlikte bulunan ilgili zemin tabakasının mekanik davranışlarının tespit edilmesinde önemli rol oynayan deneylerden biridir. Zeminin oturma potansiyelinin tahmin edilmesinde, şev analizleri için gerekli olan parametrelerin öngörüsünün yapılmasında ve özellikle bahse konu zemin tabakasının elastisite modülünün tayin edilmesi doğrultusunda bu deney efektif olarak kullanılmaktadır. Günümüzde kullanılan presiyometre deney aletinin benzeri ilk kez 1950'li yıllarda Almanya'da Louis Menard tarafından kullanılmıştır. Bu deney düzeneğinin çalışma prensibi zeminin üzerine etkiyen basınç altında deformasyon hareketlerinin gözlemlenmesi esasına dayanmaktadır. Deneyin uygulanma aşamasında, zeminde oluşturulan silindirik delgi içerisine prob adı verilen esnek balon yerleştirilmekte ve bu balon su basıncı ile şişirilmektedir. Şişen balon delgi çeperine basınç uygulamakta ve zemin bu basınç karşısında karakteristik özellikleri doğrultusunda bir takım deformasyon hareketleri sergilemektedir. Zeminin sergilemiş olduğu bu deformasyon hareketlerinin ölçülüp literatür bilgileri kullanılarak zeminin davranışının yorumlanması ve limit basınç, net limit basınç ve elastisite modülünün tespit edilmesi ile deney sonuçlanmaktadır (Alptekin, 2020). İnceleme alanında bulunan zeminlerin mekanik davranış ve

potansiyel deformasyon hareketlerinin tayin edilebilmesi için 8 adet sondaj delgisinde toplam 52 adet presiyometre deneyi gerçekleştirilmiştir.

4.2.1.3 Jeofizik Ölçümler

Jeofizik ölçümler inceleme alanında yer alan zemin tabakaları içerisinde deprem dalgalarının yayılım özellikleri, frekans aralıkları ve büyütme özellikleri hakkında bilgi edinmek için uygulanan ölçümlerdir. İnceleme alanında yer alan zemin ve kaya tabakaları hakkında detaylı bilgi edinilebilecek adet ve aralıkta gerçekleştirilen jeofizik ölçümlerin temel amacı çalışma sahasında bulunan zemin ve kaya tabakalarının; fiziksel ve mekanik özelliklerini, dolgu tabakalarının kalınlıklarını, gerçekleşmiş ve olası kütle hareketlerini, karstik boşluklarını, olası sınılaşma potansiyellerini ve yer altı suyunun varlığı ile var olan suyun zemin tabakaları içerisinde yönelimini belirlemektir. Jeofizik deneyler kapsamında en çok tercih edilen yöntemlerden biri Aktif Kaynaklı Yüzey Dalgası Analizi (MASW) 'dir. Genellikle şehir merkezleri gibi gürültülü ortamlarda tercih edilen aktif kaynaklı yüzey dalgası analizi yöntemi gürültülü ortamların yanında açılım mesafesi nispeten dar olan, yer altı suyu bulunan, dayanım seviyesi düşük ara zemin tabakalarına sahip, çalışma alanlarında S dalgalarının hızlarının tespit edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. İnceleme alanında bulunan zemin tabakalarında s dalgalarının yayılım hızının ve zemin tabakalarının kalınlıklarının tayin edilebilmesi amacıyla 6 profilde aktif kaynaklı yüzey dalgası analizi deneyi gerçekleştirilmiştir.

4.2.1.4 Laboratuvar Deneyleri

Derin kazı tasarımlarının en önemli safhalarından biri de inceleme alanındaki zemin tabakalarının fiziksel ve mekanik özelliklerinin tayin edilerek karakteristik geoteknik tasarım parametrelerinin tespit edilmesidir. Tasarımda kullanılacak olan geoteknik parametrelerin tespit edilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerin başında laboratuvar deneyleri gelmektedir. İnceleme alanında açılan sondaj kuyularının ve/veya araştırma çukurlarının belirli derinliklerinden alınan temsili numunelerin çalışma sahasında yer alan zemin tabakalarını en kapsamlı temsil edecek şekilde alındığından emin olunmalıdır. Ayrıca alınan numunelerin sahadaki zemin tabakalarını en kapsamlı şekilde temsil etmesi gözetilirken alınan numunelerin TS EN ISO 22475-1 standardına da uygun şekilde alınmış olmasına

dikkat edilmelidir. İnceleme alanında yapılacak olan iksa tasarımında kullanılan geoteknik tasarım parametreleri belirlenirken zemin etüdü kapsamında yapılan laboratuvar deneylerine ait sonuç verileri de kullanılmıştır.

İnceleme alanında gerçekleştirilen zemin etüdü çalışmaları kapsamındaki saha - laboratuvar deneyleri ve jeofizik çalışmalar sonucunda inceleme alanında gözlemlenen kumlu çakıllı kil niteliğindeki alüvyonel birimin düşeyde ve yatayda sık geçişli olduğu tespit edilmiş olup Altınova Formasyonuna ait olduğu sonucuna varılmıştır.

4.2.2 İnceleme Alanındaki Zeminlerin Geoteknik Parametreleri

Yapılan sondaj çalışmaları, arazi deneyleri, laboratuvar deneyleri ve jeofizik çalışmalar neticesinde inceleme alanında yapı temellerinin oturtulacağı Altınova Formasyonuna ait zemin birimlerin yerel zemin sınıfı, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY, 2018) ilgili parametreler için belirtilen limit değerler gözetilerek ZD olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.1. Yerel zemin sınıfı tablosu (TBDY 2018)

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_s)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe /30 cm]	$(c_u)_{30}$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	–	–
ZB	Az ayrışmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500	–	–
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 – 360	15 – 50	70 – 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25$ kPa) içeren profiller	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas killler, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killler, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killler, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killler.			

İnceleme alanında ilgili bölgeler için gerçekleştirilerek sayısal analizler kapsamında kullanılacak olan zemin parametreleri belirlenirken; ilgili sahada gerçekleştirilmiş saha deneyleri, laboratuvar deneyleri, ilgili şartname ve yönetmelikler ve güncel uluslararası literatürden yararlanılmıştır. İnceleme alanı

için yapılacak geoteknik tasarımlarda kullanılması için sondaj logları, SPT, presiyometre ve laboratuvar deneyleri beraber irdelenerek bu zemin tabakalarının mühendislik parametreleri belirlenmiştir.

Çalışma sahası için hazırlanan idealize zemin profili çalışmalarında boru köprüsünün bulunduğu bölgede yaklaşık olarak yüzeyden itibaren 16,0 m derinliğe kadar kumlu çakıl-çakıllı kum birim bulunurken, bu birimin devamında kuyu sonuna kadar parametreleri belirtilen kil birim yer almaktadır. Çalışma sahasında elektrik direğinin bulunduğu bölgede ise yalnızca boru köprüsü bölgesindekiyle aynı fiziksel ve mekanik özelliklerde olan kil birim gözlemlenmiştir. İki ayrı bölgede gözlemlenen ve tasarım analizlerinde kullanılan zemin parametreleri Tablo 4.2’te gösterildiği gibidir.

Tablo 4.2. İnceleme alanındaki zeminlerin geoteknik parametreleri

Parametre	Sembol	Birim	Kumlu Çakıl Çakıllı Kum	Kil
Birim Hacim Ağırlık	γ	kN/m ³	18.5	18.3
Kohezyon	c	kPa	1.0	10.0
İçsel Sürtünme Açısı	ϕ	°	32.0	28.0
Elastisite Modülü	E	MPa	25.0	20.0

4.3 Performans Analizleri

İnceleme alanında bulunan boru köprüsü ve elektrik direği bölgelerinde teşkil edilecek olan iksa sistemlerinin geoteknik tasarım ve analizleri için iki ayrı temsili geoteknik model kurulmuştur. Modellerin kurulması ve analizlerin gerçekleştirilip teşkil edilecek olan iksa sistemlerinde kullanılacak yatay ve düşey destekleme elemanlarının davranışlarının irdelenebilmesi için sonlu elemanlar yöntemi prensibi ile çalışan Plaxis 2D programı kullanılmıştır.

Plaxis 2D programı yalnızca doğrusal olmayan malzeme davranışlarının incelenmesini anlaşılır kılmakla kalmayıp yapı-zemin etkileşimini de değerlendirebilmek amacıyla tercih edilmiştir. İnceleme alanında gerçekleştirilen

zemin etüt çalışmaları sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda, aynı saha içerisinde bulunan iki farklı bölge için iki farklı geoteknik model kurulmuştur.

Çalışma alanının ilgili bölgelerinde bulunan zemin tabakalarının geoteknik modellere nasıl tanımlanacağı tasarım aşamasında irdelenen konuların başında gelmiştir. Zemin tabakalarının tanımlanması için program veri tabanında bulunan iki farklı zemin modeli göz önünde bulundurulmuştur.

İki modelden ilki lineer elastoplastik davranışlar çerçevesinde çalışan ve tanımlama için yalnızca 5 temel parametreye (kohezyon, içsel sürtünme açısı, dilatasyon açısı, elastisite modülü ve poisson oranı) ihtiyaç duyan mohr-coulomb modelidir. Nispeten daha basit ilkeler kapsamında tanımlama gerektiren bu model genellikle taşıma gücünün tayin edilmesi ve şev stabilitesi gibi geoteknik problemlerin çözülmesinde efektif olarak kullanılmaktadır. İkinci model ise Hardening soil zemin modelidir. 1999 yılında Schanz ve arkadaşları tarafından geliştirilen bu zemin modeli, elastisite teorisi prensibi esasına bağlı olarak zeminleri tanımlamaktadır (Çelik, 2017). Bahse konu model malzemelerin göçme öncesindeki davranışlarını lineer olmayan bir şekilde tanımlamaktadır. Bilgisayar yazılımına girilecek 3 farklı sertlik parametresi (yükleme sertliği, boşaltma sertliği ve bir boyutlu konsolidasyon sertliği) ile zemin tabakasının tanımlanmasını sağlayan bu zemin modeli ihtiyaç duymuş olduğu parametreler ile yüklem-boşaltma koşullarını gerçeğe yakın tanımlayarak zemin rijitliğini doğruluk payı yüksek olarak tayin edebilmektedir.

Farklı zemin koşullarında incelenen farklı çalışmalarda Hardening soil modelinin zemin tabakalarının davranışının tanımlanmasında mohr-coulomb modeline göre daha doğru sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bu çalışmalara örnek olarak 2013 yılında Santosh Khanal tarafından yapılan araştırma gösterilebilir. Yapılan çalışmada İsviçre, Portekiz ve Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan üç farklı çalışma sahasında sığ temellerin taşıma güçlerinin ve oturma potansiyellerinin belirlenmesi amacıyla plaka yüklem deneyleri yapılmış ve saha deneylerinden elde edilen veriler Plaxis 2D programında Hardening soil modeli ile tanımlanan zemin profili için elde edilen tasarım verileri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda Hardening soil zemin modeli ile tanımlanan farklı zemin türlerinin sayısal analizleri sonucunda elde edilen davranış biçimlerinin plaka yüklem deneyinde tespit edilen davranış biçimine nispeten daha benzer olduğu saptanmıştır.

Dolayısıyla ilgili çalışma ışığında, geoteknik analizler kapsamında Hardening soil modeli ile tanımlanan zemin profilinin mohr-coulomb zemin modeli ile tanımlanan zemin profiline göre zemin davranışı hakkında daha doğru tahminler yaptığı söylenebilmektedir. Yalova’da bulunan ve tie-back elemanlar ile desteklenmiş iksa sistemlerinin davranış biçiminin incelendiği bu çalışmada da inceleme alanında yapılan sondajlarda ve laboratuvar deneylerinde tespit edilen zemin tabakalarının modellemesinde zemin tabakalarının davranışları hakkında daha doğru tespitler yapılabilmesi amacıyla Hardening soil zemin modeli tercih edilmiştir.

Hardening soil zemin modeli ile zemin profillerinin tanımlanması aşamasında drenajlı ve drenajsız olarak iki seçenekten birinin seçilmesi gerekmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda Rafal F. Obrzud ve Andrzej Truty tarafından 2018 yılında yayınlanan Hardening soil zemin modeli için zemin tanımlama rehberi çalışmasında drenajlı ve drenajsız seçeneklerinin hangi durumlar altında seçilmesi halinde zemin davranış modellerinin daha doğru gözlemlenebileceği belirtilmiştir. Çalışma kapsamında hızlı yükleme koşullarında (deprem etkisi, ani oturmalar vs.) veya kil gibi düşük geçirgenliğe sahip zemin tabakalarının tanımlanmasında drenajsız durum seçilmesi gerekirken, yavaş yükleme koşullarında (derin kazı destekleme sistemleri, uzun süreli yapı yükleri altında gerçekleşen davranışlar vs.) veya geçirgenliği nispeten daha fazla olan kum gibi zemin tabakalarının tanımlanmasında drenajlı durum seçilmesi tavsiye edilmektedir.

Tasarım analizlerinde kullanılacak geoteknik modeller kurulurken kullanılan program girdisi bilgileri aşağıdaki tabloda gösterildiği gibi kullanılmıştır. Tablo 4.3’te sunulan veriler bölgede bulunan zemin tabakalarının verileri iken Tablo 4.4’te sunulan veriler mini kazık, ankraj halatı demet gibi yapısal elemanların verileridir.

Tablo 4.3. Geoteknik modellerde kullanılan zemin tabakaları program girdileri

Parametre	1	2
Zemin Birimi Adı	Kil	Kumlu Çakıl Çakıllı Kum
Zemin Modeli	Hardening Soil	Hardening Soil
Drenaj Tipi	Drained	Drained
Renk		
γ_{unsat} (kN/m ³)	18.30	18.50
γ_{sat} (kN/m ³)	18.30	18.50
e_init	0.50	0.50
n_init	0.33	0.33
E ₅₀ ^{ref} (kN/m ³)	20.00E3	25.00E3
E _{oed} ^{ref} (kN/m ³)	20.00E3	25.00E3
E _{ur} ^{ref} (kN/m ³)	60.00E3	75.00E3
c _{ref} (kN/m ³)	10.00	1.00
ϕ (phi) (°)	28.00	32.00
ψ (psi) (°)	0.00	2.00

Tablo 4.4. Geoteknik modellerde kullanılan yapısal elemanların program girdileri

Parametre	1	2	3	4	5
Eleman Adı	Ø30 Mini Kazık s = 0.45m	3x0.6" Ankraj Halatı s = 1.8m	Ø26 Nervürlü Donatı s = 1.8 m	Ø32 Nervürlü Donatı s = 1.8 m	Ø40 Nervürlü Donatı s = 1.8 m
Renk					
Materyal Tipi	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic
Isotropic	Yes	-	-	-	-
EA1(kN/m)	3.926E6	-	-	-	-
EA2 (kN/m)	3.926E6	-	-	-	-
EI (kN m ² /m)	22.09E3	-	-	-	-
d (m)	0.2598	-	-	-	-
w (kN/m/m)	0.78	-	-	-	-
v (nu)	0.15	-	-	-	-
L_spacing (m)	-	1.80	1.80	1.80	1.80
EA (kN)	-	81.9E3	103.5E3	156.8E3	245.0E3

Bahse konu inceleme alanında bulunan boru köprüsü ve elektrik direği temellerinden zemine aktarılacak gerilmeler sırasıyla 35 kPa ve 100 kPa olarak öngörülmüştür. İlgili çalışma alanlarında yapılacak iksa sistemi tasarımı analizleri için belirtilen gerilme değerleri kullanılmıştır.

4.3.1 Boru Köprüsü Bölgesi İksa Sistemi Performans Analizi

Çalışma sahasında yaklaşık olarak sahanın ortasından geçen ve yapılması planlanan yapıyı iki parçaya ayıran bir boru köprüsü bulunmaktadır. Ayak açıklığı yaklaşık

olarak 4.2 m olan boru köprüsünün hızlıca başka bir bölgeye deplase edilmesi veya tamamen kaldırılıp faaliyetine son verilmesi içerisinde yer aldığı tesis için arz etmiş olduğu önemden dolayı ihtimaller arasında yer almamıştır. İki tarafında eş zamanlı olarak yapılması gereken, derinliği yaklaşık 6 m olan derin kazılar için bir derin kazı destekleme (iksa) sistemi tasarımı yapılması gerekliliği doğmuştur. Yapılan iksa sistemi tasarım analizlerinde kullanılan yatay/düşey destekleme elemanlarının yapısal davranışlarının incelenebilmesi, boru köprüsünde meydana gelmesi olası hareketlerin değerlendirilebilmesi ve yapılacak betonarme yapıların üzerlerine etkiyen tesir kuvvetlerinin irdelenerek donatı oranlarının kararlaştırılması için sonlu elemanlar yöntemi prensibi ile çalışan Plaxis 2D adındaki bilgisayar yazılımı tercih edilmiştir.

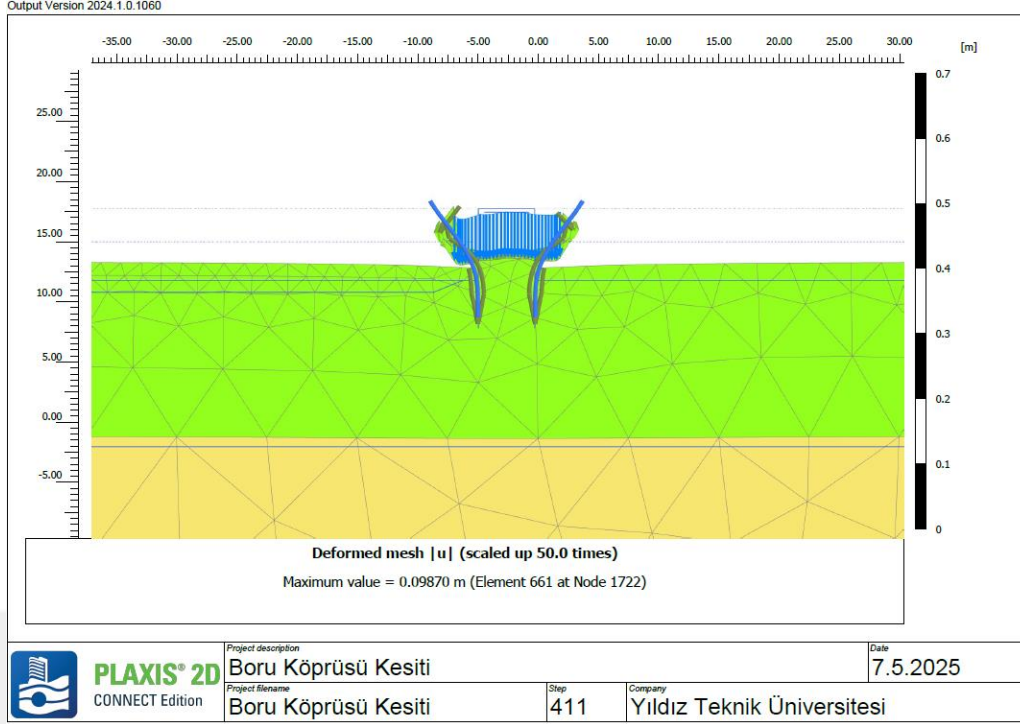
Yapılan geoteknik tasarım analizleri kapsamında ilk olarak ilgili iksa sisteminin teşkil edilmesi için yalnızca konsol düşey destekleme elemanları kullanılarak sistemin herhangi bir yatay destekleme elemanına ihtiyaç duyup duymadığı sorgulanmıştır. Akabinde ihtiyaçlar doğrultusunda tie-back elemanlar düşey destekleme elemanları arasında konumlandırılmıştır ve tie-back elemanların geoteknik modele etkisi irdelenmiştir. İnceleme sonucunda alternatif bir çözüm metodu olan tie-rod elemanların kullanılması halinde iksa sistemdeki davranışın değişimi incelenmiştir ve sistem optimizasyonunun yapılması amaçlanmıştır.

Analiz sonuçlarının kıyaslanması aşamasında ise deformasyon modeli, maksimum yatay deplasman değerleri ve yatay/düşey destekleme elemanlarına etkiyen tesir kuvvetleri göz önünde bulundurulmuştur. Değerlendirmenin sonunda ise analiz sonuçlarının birbiri ile kıyaslanması yapılırken, ayrıca saha uygulamaları gerçekleştirilen sistemin analiz sonuçları ile saha uygulamalarından elde edilen aletsel ve saha gözlem verileri de kıyaslanmış ve analiz sonuçlarının doğruluk oranları irdelenmiştir.

4.3.1.1 Konsol İksa Sistemi Analizi

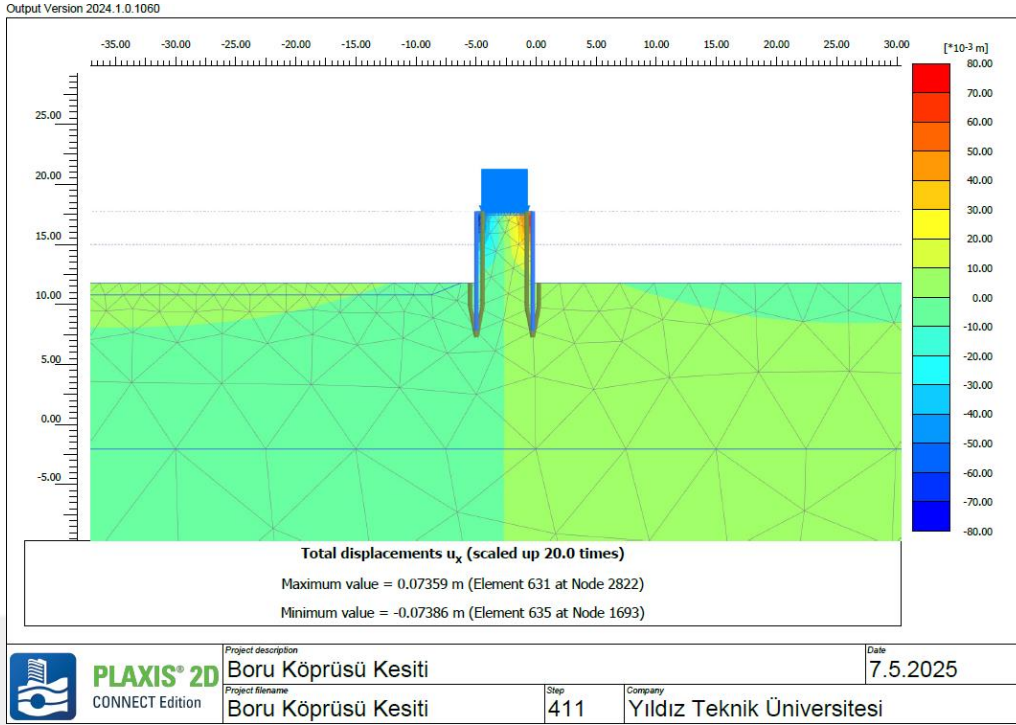
Boru köprüsü için yapılan geoteknik analizler kapsamında ilk olarak çalışma alanının temsili bir modeli bilgisayar yazılımı yardımı ile kurulmuş ve zemin tabakaları ile mevcut köprü yapısından zemine aktarılan gerilmeler tanımlanmıştır. Tanımlanan geometrik model üzerinde ilgili boru köprüsünün iki yanında yapılacak derin kazı kademeleri belirlenmiştir. Kazı kademelerinin belirlenmesi aşamasında

zemin etüt veri raporunda belirtilen mevcut saha kotları ve inceleme alanı için hazırlanan statik projeler dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda derin kazı kademelerinin boru köprüsünün her iki tarafında yaklaşık 6 metre olması gerekmektedir. Yapılması planlanan derin kazı faaliyetleri süresince, boru köprüsü temellerinden zemine aktarılabilecek gerilmelerin ve 6 m derinlikte kazı aynası yüzeyine etkiyecek olan aktif toprak basıncının güvenli taşınarak kazıların istenilen derinlikte tamamlanması ve kazı esnasında boru köprüsünde yapısal bir hasara neden olunmaması için uygun destekleme elemanlarını bünyesinde barındıran bir iksa sistemi gerekliliği doğmuştur. Uygun iksa sisteminin tercihi aşamasında çalışma bölgesinin dar ve hassas bir bölge olması göz önünde bulundurulmuş ve düşey destekleme elemanı olarak 45 cm aralıklı Ø30 cm çapında ve $L = 9,45$ m mini kazıklar tasarlanmıştır. Tercih edilen bu düşey destekleme elemanı ile daha küçük makineler kullanılarak dar çalışma sahasında makine hareket kabiliyeti artırılmıştır. Ayrıca boru köprüsüne olası bir makine teması olması durumunda temas eden makine muadil düşey destekleme sistemlerini teşkil eden makinelere (fore kazık, diyafram duvar vs.) nispeten daha hafif bir makine olacağı için köprünün alacağı hasar minimize edilmiştir. Tasarlanan mini kazıklar eksenel rijitlikleri hesaplanarak programda kurulan geoteknik modele tanımlanmıştır. Düşey destekleme elemanlarının da geoteknik modele tanımlanması ardından iksa sisteminin yatay bir destekleme elemanına duymuş olduğu ihtiyacı tespit etmek amacıyla program çalıştırılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Dolayısıyla bu kapsamda, bahse konu kazı derinlikleri sağlanırken boru köprüsünün ve düşey destekleme elemanlarının göstermiş olduğu yapısal davranışlar irdelenmiştir. Analiz sonucunda ilgili kazıların konsol şekilde teşkil edildiği durumda zemin ve köprü temeli yüklerinin güvenli taşınması için yalnızca düşey destekleme elemanlarının yeterli olmadığı tespit edilmiştir. Herhangi bir yatay destekleme elemanı kullanılmadan yalnızca düşey destekleme elemanlarının konsol çalıştırılması esasına dayanan modelin çözümlenmesinde, iksa sistemine aktarılan yüklerin taşınmasında konsol mini kazıkların tek başına yeterli olmadığı genel stabilite ve mini kazık elemanına tesir eden kuvvetler incelenerek tespit edilmiştir. Plaxis programında gerçekleştirilen sayısal analizlere ait deformasyon modeli, maksimum yatay deplasman, düşey destekleme elemanlarına etki eden tesir kuvvetleri diyagramları aşağıdaki şekillerde sunulmuştur.



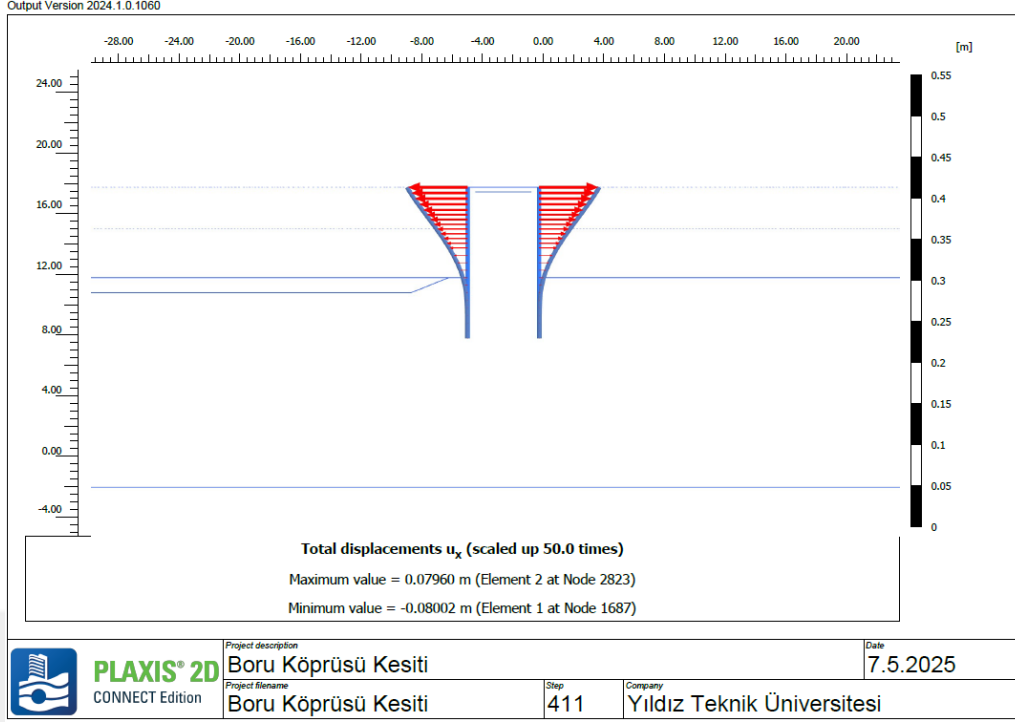
Şekil 4.6. Boru köprüsü bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde deformasyon modeli

Plaxis 2D programında ilgili bölge için gerçekleştirilen konsol mini kazıklı iksa sistemi modelinin analiz sonuçlarının değerlendirilme aşamasında ilk olarak deformasyon modeli incelenmiştir. Yapılması planlanan derin kazı çalışmasının tasarlandığı geoteknik modelde nihai kazı kotuna ulaşılamaadan teşkil edilen düşey destekleme elemanlarında göçme mekanizması gözlemlenmiştir. Dolayısıyla mini kazıkların konsol çalışması esasına dayanan bir iksa sisteminin çalışma sahasında ilgili bölgede uygulanması durumunda boru köprüsünde yapısal stabilite kayıpları yaşanabileceği hatta uygulanan iksa sistemi önünde yapılacak derin kazılar sonucunda boru köprüsünde toptan göçme durumu da yaşanabilme ihtimali bulunduğu söylenebilir. Öngörülen olası göçme durumunun 50 kat büyütülmüş ölçekli gösterimi Şekil 4.6’da sunulmuştur.



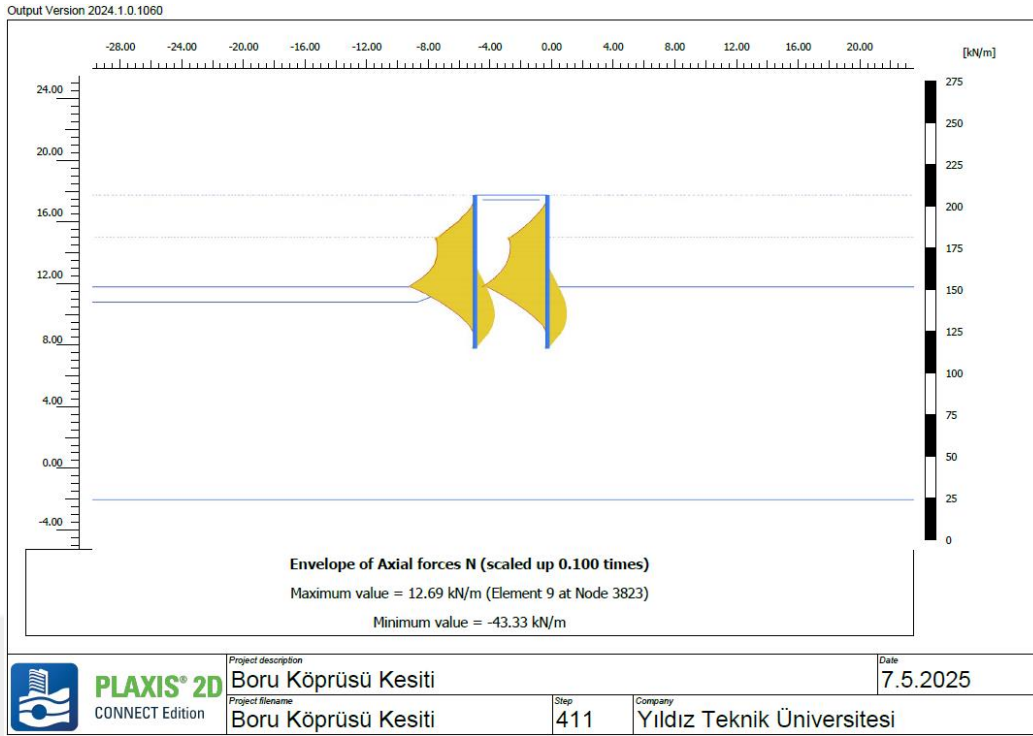
Şekil 4.7. Boru köprüsü bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde oluşan maksimum yatay deplasman

Konsol düşey destekleme elemanları ile tasarımı gerçekleştirilen ve göçme durumu gözlemlenen iksa sisteminin geoteknik modelinde modelin yatayda yapmış olduğu maksimum deplasman değeri de incelenmiştir. Herhangi bir yatay destek kullanılmadan yalnızca mini kazıklarla boru köprüsü yanlarında iksa sistemi oluşturulması ve derin kazıların yapılmaya çalışması durumunda ilgili derin kazıların nihai kazı kotuna kadar hedeflenen güvenlik faktörleri altında tamamlanamayacağı öngörülmektedir. Şekil 4.7’de de gösterildiği üzere geoteknik modelde nihai kazı kotuna ulaşılmadan modelde gözlemlenen maksimum yatay deplasman değerinin 7 cm mertebelerinde olabileceği belirlenmiştir. Ayrıca başka bir değerlendirme kriteri olan düşey destekleme elemanlarında gözlemlenen maksimum yatay deplasman değerinin de Şekil 4.8’de gösterildiği üzere 7 cm’in üzerinde olacağı tahmin edilmektedir.

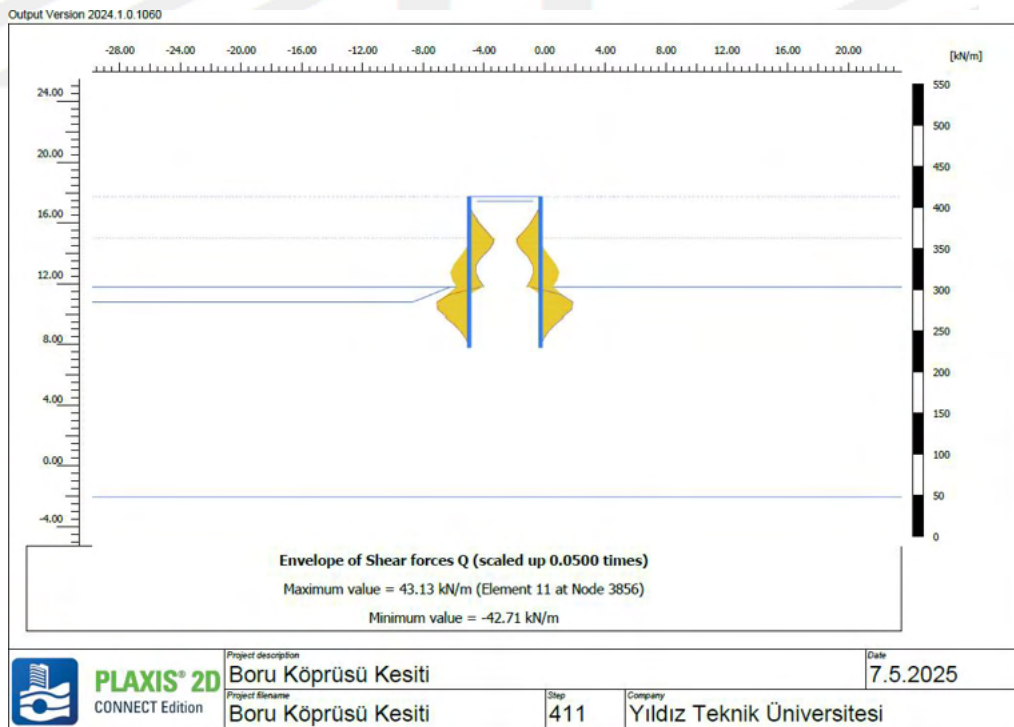


Şekil 4.8. Boru köprüsü bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde mini kazıklarda beklenen maksimum yatay deplasman

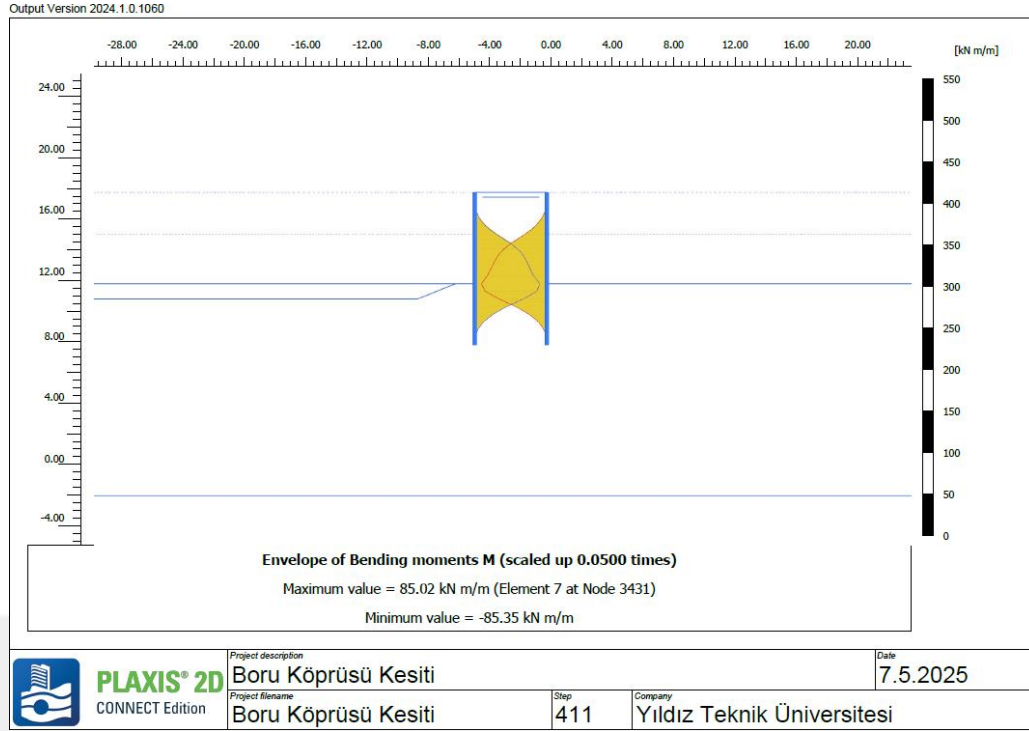
İnceleme alanında yer alan boru köprüsü bölgesinde konsol mini kazıkların, iksa sistemi üzerine etkileyen aktif toprak basıncını ve sürşarj yüklerini yatay destekleme elemanı olmadan taşımaya ve yapılacak derin kazının güvenle tamamlanabilmesi için çalıştığı geoteknik modelde nihai kazı kotuna ulaşılmadan göçme durumunun meydana geldiği gözlemlenmiştir. İlgili göçme durumundan hemen önce mini kazıklar üzerine etkileyen maksimum normal kuvvet – yönde 19.5 kN mertebelerinde iken, maksimum kesme kuvveti + yönde 19.4 kN mertebelerinde ve maksimum eğilme momenti değeri ise + yönde 38.4 kNm mertebelerindedir. Geoteknik modelde tanımlanan konsol mini kazıklar üzerine etkileyen maksimum tesir kuvvetlerinin diyagramları Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de sırasıyla sunulmuştur.



Şekil 4.9. Boru köprüsü bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum normal kuvvet



Şekil 4.10. Boru köprüsü bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum kesme kuvveti



Şekil 4.11. Boru köprüsü bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum eğilme momenti

4.3.1.2 Boru Köprüsü Bölgesi Tie-back Elemanlı İksa Sistemi Analizi

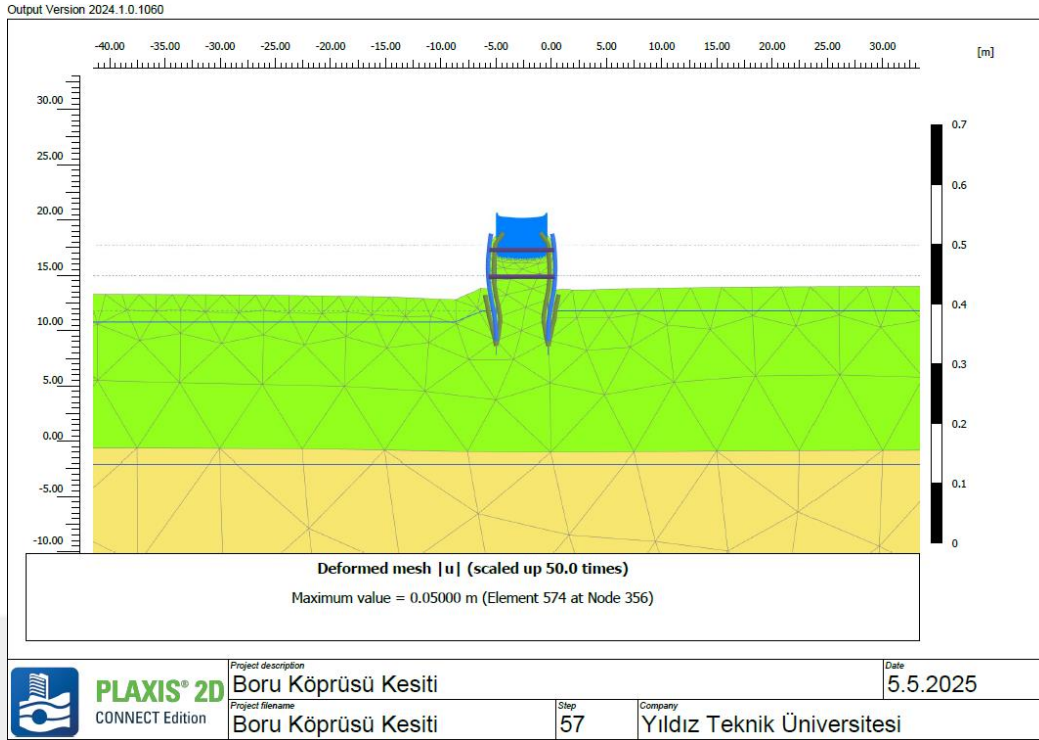
Plaxis programında tasarlanan geoteknik modelin analizlerinde de görüldüğü üzere bahse konu boru köprüsü etrafında yalnızca düşey destekleme elemanları ile teşkil edilen iksa sistemi boru köprüsünden kaynaklanan sürşarj yüklerinin ve yapılacak derin kazı sonucunda iksa perdesi arkasında oluşacak yanal toprak itkilerinin taşınıp, köprüde yapısal stabilite kayıplarına sebep olunmadan derin kazıların güvenli yapılamayacağı kanaatine varılmıştır. Bu sebeple teşkil edilecek iksa sisteminde düşey destekleme elemanlarının tercih edilecek uygun yatay destekleme elemanları ile birlikte kullanılması gerektiği tespit edilmiştir.

Bir öngermeli ankrajın kök boyunun Kazı Destek Yapıları Yönetmeliğinin 3.2.2.3.a maddesinde araştırma testleri ile kanıtlanmadığı sürece zemin birimlerde 8.0 m'den kısa tasarlanamayacağı belirtilmektedir. Çalışma alanında bahse konu bölgede yatay destekleme elemanlarının konumlandırılması gereken açıklık (boru köprüsünün yanlarında yapılacak derin kazıların arasındaki mesafe) yaklaşık 5 metredir. Bu mesafenin ilgili yönetmelik kapsamında bir öngermeli ankraj elemanının kök bölgesinin yerleştirilmesi için bile yetersiz olduğu göz önünde bulundurularak yatay destekleme elemanı olarak öngermeli ankraj kullanılması

muhtemel tercihler arasında görülmemiştir. Başka bir yatay destekleme alternatif tercihi ise zemin çivisidir. Ancak zemin çivilerinin iksa aynasına çok sık yerleştirilmesi gerekliliği, sık yerleşim sonucu iki taraftan yerleştirilen çivilerin iksa içerisinde birbiri ile bağlantı yapıp taşıma gücü kayıplarına sebebiyet verebilme ihtimali ve öngermeli ankrajda olduğu gibi iki derin kazı bölgesi arasındaki mesafenin yetersizliği, zemin çivisini de muhtemel yatay destekleme elemanı tercihleri arasından çıkarmıştır. Bu noktada yatay destekleme elemanı olarak karşılıklı iki betonarme kazığın birbirine çelik halat demetleri ile sabitlenmesi esasına dayanan tie-back elemanlar güçlü bir mühendislik alternatifi olarak ön plana çıkmıştır.

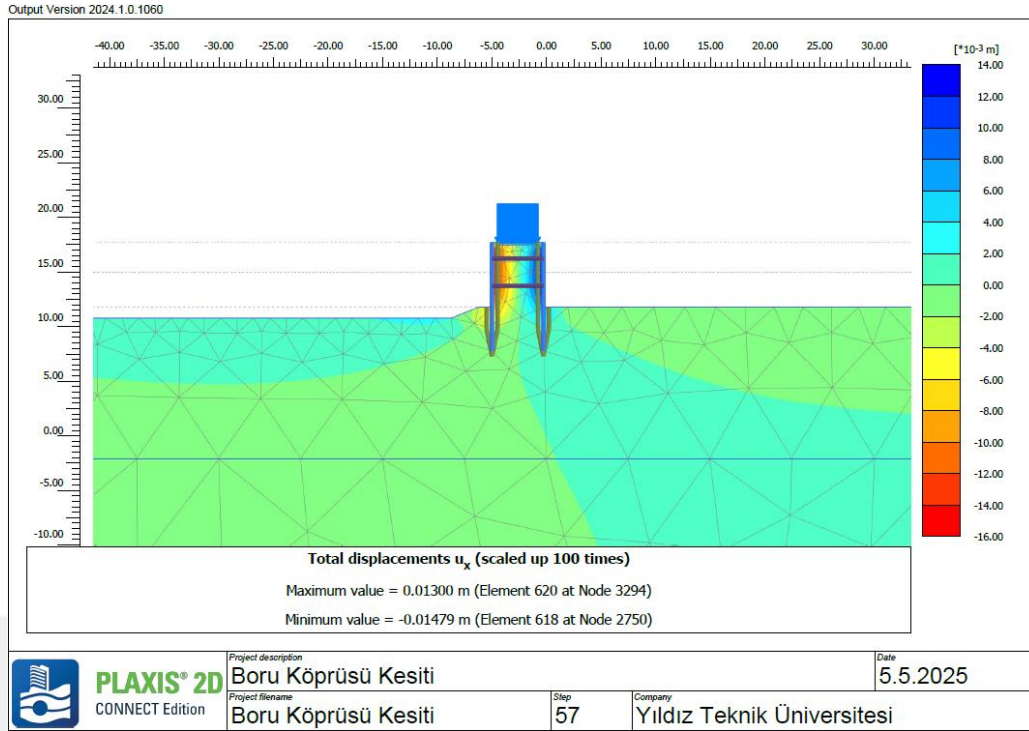
Tie-back elemanlar hem çift taraflı çalışması hem de minimum düzeyde sarf malzeme gerektirmesinin sağlamış olduğu ekonomiklik ile tasarım analizlerine dahil edilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen boru köprüsü bölgesi temsili geoteknik modelinin mini kazıkların ve tie-back elemanların birlikte kullanıldığı iksa destekleme sistemi ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda ilgili kompozit iksa sistemi ile boru köprüsünün yapısal stabilitesinde kritik düzeyde herhangi bir kayıp oluşmayacağı ve toprak yüklerinin güvenli şekilde taşınarak derin kazıların hedeflenen güvenlik faktörleri dahilinde nihai kazı kotuna kadar tamamlanıp, yeni yapıların inşaatının yapılabilmesinin mümkün kılınacağı belirlenmiştir.

Yapılan analizlerin değerlendirilme sürecinde geoteknik modelde ve kullanılan düşey destekleme elemanlarında gözlemlenmesi tahmin edilen yatay deplasmanlar, mini kazık elemanlara etkimesi beklenen maksimum normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri ve tie-back elemanlara etkimesi beklenen maksimum çekme kuvveti değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca tie-back elemanların bünyesinde bulunduğu iksa sisteminin yatay deplasman miktarlarını sınırlandırma miktarı da değerlendirmeler kapsamında irdelenen başka bir konu olarak ön plana çıkmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, iksa sisteminin teşkil edileceği bölgede bulunan zemin tabakalarının ve betonarme elemanların davranışlarına ait Plaxis 2D programında oluşturulan sonuç diyagramları ve diyagramların mühendislik yorumları aşağıdaki başlıklarda detaylı olarak sunulmuştur.



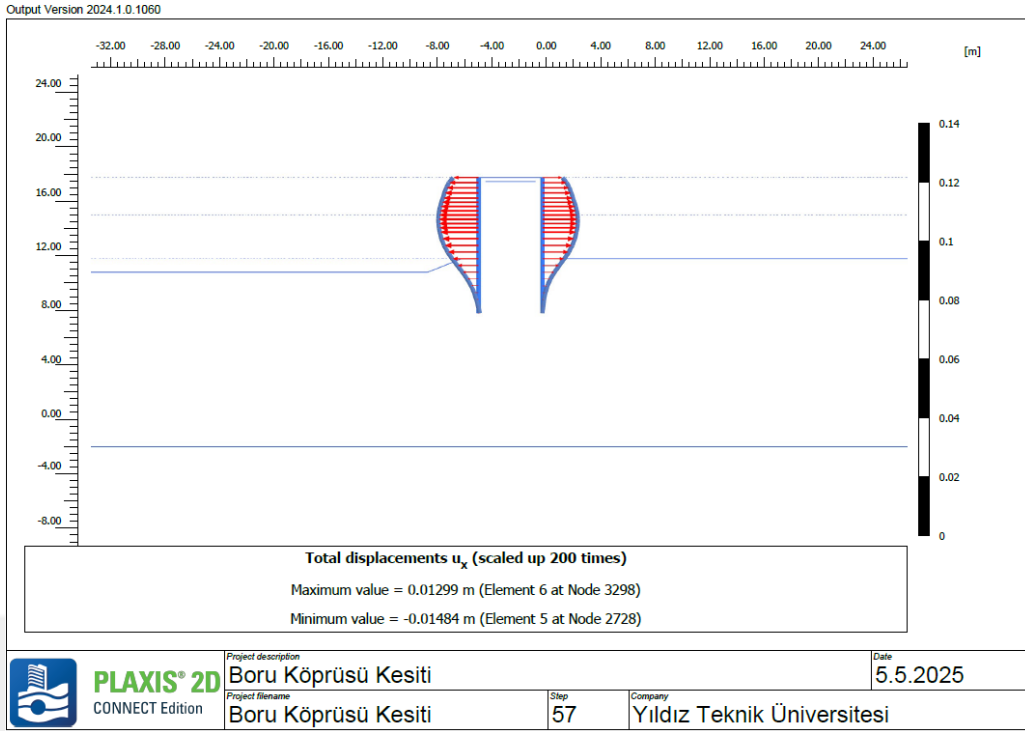
Şekil 4.12. Boru köprüsü bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde deformasyon modeli

Boru köprüsü için tasarlanan ve analizleri gerçekleştirilen, tie-back elemanlar ile donatılmış mini kazıklı iksa sistemi ile oluşturulan geoteknik modelin deformasyon modelinde de görüldüğü üzere tie-back elemanlar aktif olarak düşey destekleme elemanları arasında yük aktarımının gerçekleşmesini sağlamıştır. Gerçekleşen yük aktarımı sayesinde mini kazıklı iksa sistemi üzerine etkiyen yanal itkiler, iksa aynasına nispeten daha homojen yayılım göstermiş olup düşey destekleme elemanlarının konsol durumlarına göre daha bir arada çalışmalarını sağlamıştır. Tie-back elemanlar tarafından iksa sisteminin yanal yönde güçlendirilmesi ile bir önceki modelde gerçekleşenin aksine bu modelde derin kazılar nihai kazı kotuna kadar güvenle yapılabilmiştir. Yanal hareketi kısıtlanmış iksa sistemi ile tasarlanan geoteknik model için güvelik katsayısı değeri $FS = 3,13$ olarak Plaxis 2D programında hesaplanmıştır. Hesaplanan güvenlik katsayısı değerinin Kazı Destek Yapıları Yönetmeliğinde geçici iksa sistemleri için belirtilen güvenlik katsayısı değerini ($FS = 1.35$) karşıladığı tespit edilmiştir (Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği, Madde 2.9.3.4).



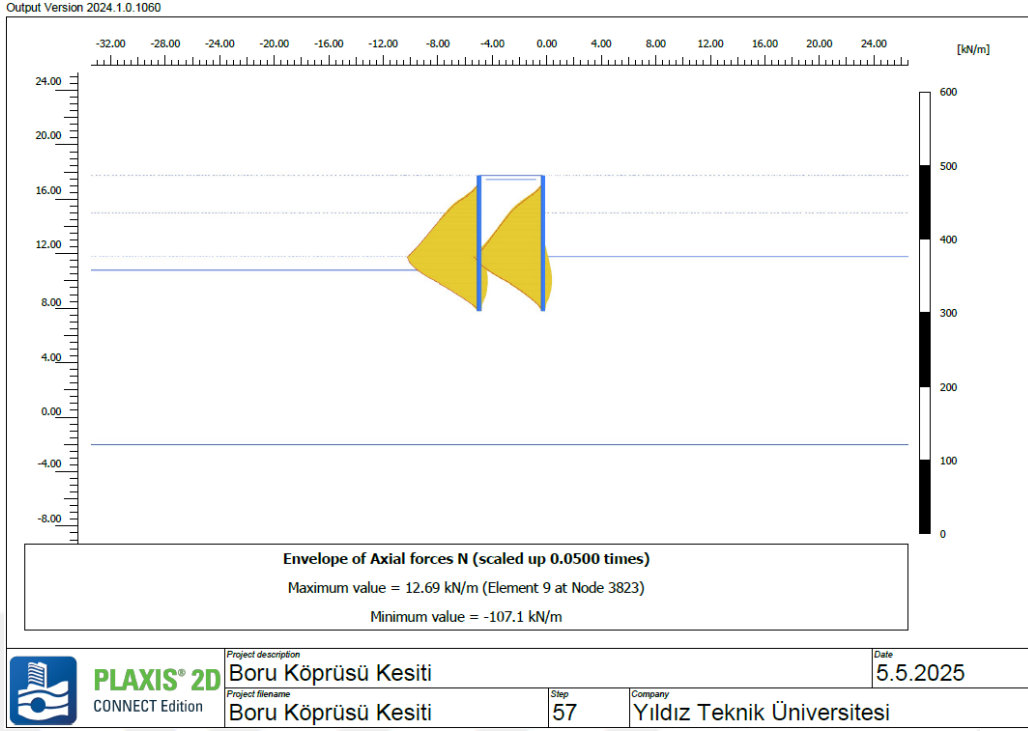
Şekil 4.13. Boru köprüsü bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde oluşan maksimum yatay deplasman

İksa sisteminde düşey destekleme elemanı olarak $\varnothing 30$, $L = 9.45$ m, $s = 0.45$ m mini kazıkların, yatay destekleme sisteminde ise $3 \times 0.6''$ $L = 5.60$ m çelik ankraj halatı demetinden oluşan tie-back elemanlar kullanılarak tasarlanan geoteknik modelin analizleri kapsamında geoteknik modelde oluşması muhtemel yatay deplasmanlar da incelenmiştir. Bu bağlamda kurulan iksa sisteminin, üzerine etkiyen yanal itkileri güvenle taşıdığı ancak yük aktarımı sonucunda 1.5 cm mertebelerinde yatay deplasman yapabileceği öngörülmüştür. Öngörülen deplasman kullanılarak hesaplanan yanal deplasman/kazı derinliği oranı ($\delta h/H = 0.015/6.00 = \%0.25$) değerinin Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2018'de yayınlanan Kazı Çukurlarının Desteklenmesi ile İlgili Uygulanacak Esaslar genelgesinde yatay destekli iksa sistemleri için belirtilen limit yanal deplasman/ kazı derinliği oranı değerinin ($\delta h/H = \%5$) altında kaldığı belirlenmiştir (Kazı Çukurlarının Desteklenmesi ile İlgili Uygulanacak Esaslar Genelgesi, Madde 1.15.19). Ayrıca bahse konu maksimum yanal deplasman/kazı derinliği oranı ($\delta h/H = \%0.25$) yine aynı yıl içerisinde ilgili bakanlık tarafından yayınlanan Kazı Destek Yapıları Yönetmeliğinin 2.12.7 numaralı maddesinde ankrajlı sistemler için belirtilen limit değer olan $\delta h/H = \%3$ değerini de sağlamaktadır.

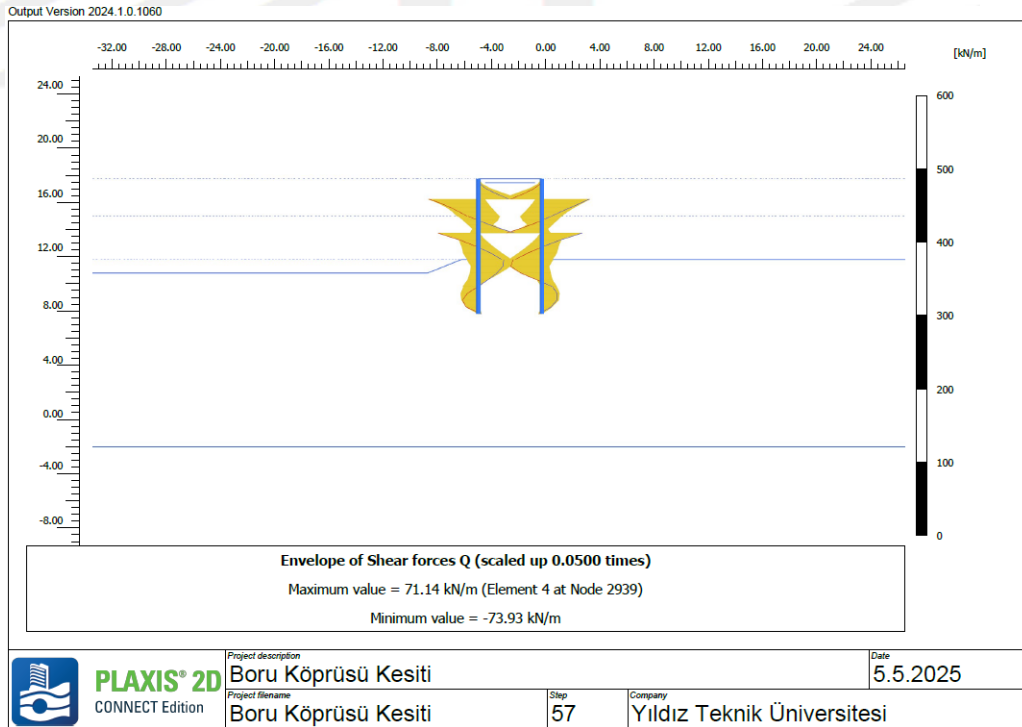


Şekil 4.14. Boru köprüsü bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde mini kazıklarda beklenen maksimum yatay deplasman

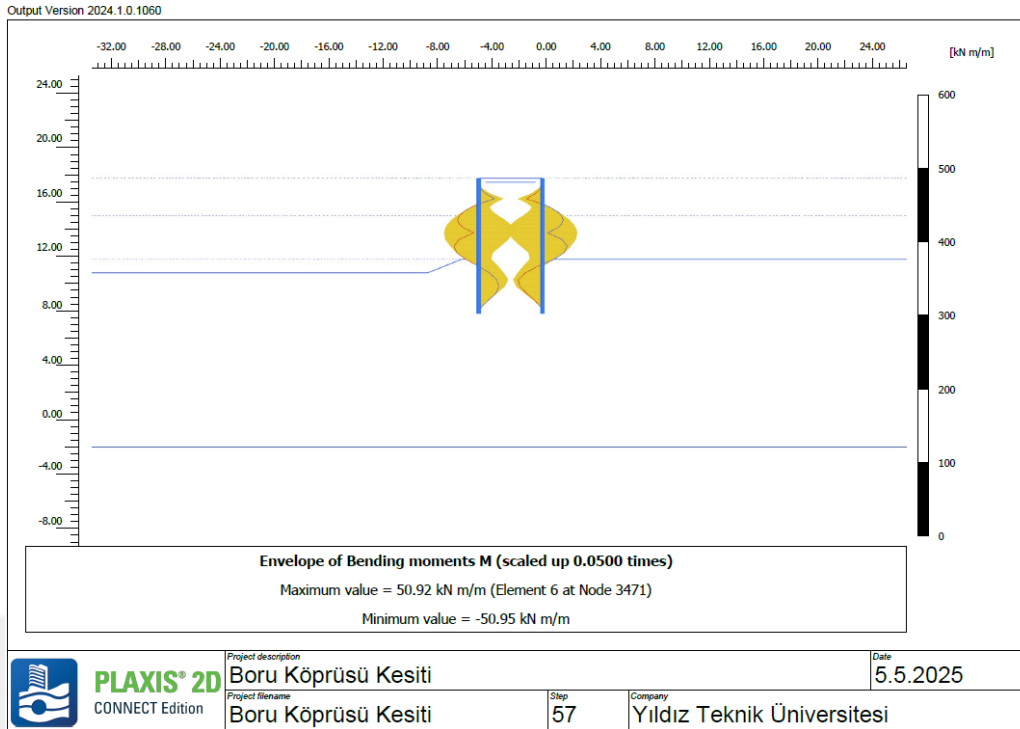
Tie-back ile güçlendirilmiş mini kazıklı iksa sisteminin aktif toprak yüklerini ve boru köprüsü temellerinden zemine aktarılan sürşarj yüklerini güvenle taşıyıp, yapılacak yeni yapıların derin kazılarının güvenle yapılabilmesini ve derin kazı esnasında çevre yapıların hasar almamasını sağladığı geoteknik modelin analizinde yatay ve düşey destekleme elemanlarının üzerlerine etkiyen tesir kuvvetleri de incelenmiştir. İncelemeler yük aktarımının sağlanıp nihai kazı kotuna kadar derin kazının tamamlandığı durumda yapılmıştır. Bahse konu durumda mini kazıklar üzerine etkiyen maksimum normal kuvvetin – yönde 48.2 kN, maksimum kesme kuvvetinin - yönde 33.3 kN ve maksimum eğilme momenti değerinin ise – yönde 22.9 kNm olacağı öngörülmüştür. İki sıra olarak tasarlanan yatay destekleme elemanlarında ise her iki sıra tie-back elemanlar üzerine etkiyen maksimum normal kuvvetin ise yaklaşık olarak uygulanan öngerme yüküne (200 kN) eşit olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15. Boru köprüsü bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkileyen maksimum normal kuvvet



Şekil 4.16. Boru köprüsü bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkileyen maksimum kesme kuvveti



Şekil 4.17. Boru köprüsü bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkileyen maksimum eğilme momenti

Structural element	Node	Local number	X [m]	Y [m]	N [kN]	N _{min} [kN]	N _{max} [kN]
NodeToNodeAnchor_1_1	2341	1	-4.950	16.250	210.615	0.000	223.683
Element 1-1 (Node-to-node anchor)	2939	2	-0.250	16.250	210.615	0.000	223.683
NodeToNodeAnchor_2_1	3263	1	-4.950	13.750	201.351	0.000	201.351
Element 2-2 (Node-to-node anchor)	3471	2	-0.250	13.750	201.351	0.000	201.351

Şekil 4.18. Tie-back elemanlar üzerine etkileyen maksimum normal kuvvet

Çalışma sahasının ilgili bölgesinde bulunan ve tahmini olarak zemine 35 kPa mertebesinde bir sürşarj yükü aktaran boru köprüsünün iki yanında eş zamanlı olarak yapılması planlanan derin kazı süreçlerinin, düşey destekleme elemanı olarak 45 cm aralıklı Ø30 cm çapında ve $L = 9.45$ m mini kazıkların, yatay destekleme elemanı olarak ise 3x0.6" çelik halatlardan oluşan $L = 5.6$ m uzunluğunda $s = 1.8$ m aralığında tie-back elemanların kullanıldığı bir derin kazı destekleme sistemi ile güvenle tamamlanabileceği kanaatine yapılan analizlerin sonuçları değerlendirilerek varılabilmektedir. Ancak tasarlanan derin kazı destekleme sisteminin ekonomi ve verimlilik oranlarının değerlendirilebilmesi ve sistematik optimizasyonunun maksimum noktaya ulaştırılabilmesi amacıyla aynı geoteknik model farklı tie-back yatay aralıkları ile de analiz edilmiştir. Yapılan analizlerde tie-back yatay aralık değişiminin tasarlanan iksa sistemi üzerindeki

etkisinin irdelenebilmesi için yatay aralık değeri $s = 0.9$ m ve $s = 3.6$ m olarak değiştirilerek analizler yeniden yapılmıştır. Gerçekleştirilen analizlerin sonuçlarına göre tie-back yatay aralığının artması ile düşey destekleme elemanlarında gerçekleşmesi muhtemel maksimum yatay deplasman miktarının 6 mm mertebelerinde arttığı, düşey destekleme elemanları üzerine etkiyen moment değerinin yaklaşık olarak aynı kaldığı, normal kuvvet ve kesme kuvvetinin ise negatif yönde azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca tasarlanan geoteknik modelin göçmeye karşı güvenlik katsayısının ise tie-back yatay aralığının artması ile 0.15 mertebelerinde azaldığı tespit edilmiştir. Analiz sonuçları aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

Tablo 4.5. Boru köprüsü bölgesi tie-back yatay aralığı değişiminin analiz sonuçlarına etkisi

Yatay Mesafe	Düşey Destekleme Elemanlarında Oluşan				Güvenlik Katsayısı (FS)
	N (kN)	V (kN)	M (kNm)	ΔL (mm)	
0,9	-60.1	-55.0	28.6	8.4	3.33
1,8	-48.2	-33.3	22.9	14.8	3.14
3,6	-46.0	-26.9	26.2	20.5	2.98

Tie-back kullanılarak tasarlanan bir derin kazı destekleme sisteminde tie-back yatay ve düşey aralıkları kritik öneme sahiptir. Tie-back elemanların düşey ve yatay aralıklarının doğru tayin edilmesi projede ekonomiyi sağlarken zaman kaybını da minimize etmektedir. Ayrıca doğru aralık tayini ile tie-back elemanlar iksa sistemine etkiyen yanal itki kuvvetlerini düşey destekleme elemanlarına daha homojen bir şekilde aktarabilmektedir. Dolayısıyla tie-back elemanların yük aktarım kapasitesinin maksimum noktaya ulaştırılabilmesi için optimum yatay ve düşey aralıklar tercih edilmelidir.

Çalışma alanının boru köprüsü bölgesi için tasarlanan tie-back ile güçlendirilmiş derin kazı destekleme sisteminde tie-back yatay aralığının değişimi ile analiz sonuçlarının değişimi yukarıda detaylı olarak irdelenmiştir. Çalışma alanının ilgili bölgesi için kurulan geoteknik modelde düşeyde 2 sıra tie-back $s_v = 1.8$ m aralıklı olarak tasarlanmış ve saha uygulamaları bu doğrultuda tamamlanmıştır. Yatay aralık değişiminin irdelenmesine benzer olarak düşey aralık değişiminin ve dolayısıyla tie-back adedinde yapılacak olası bir değişimin de tasarlanan geoteknik modelin analiz sonuçlarına etkisinin irdelenebilmesi amacıyla aynı geoteknik

model üzerinde 1 sıra ve 3 sıra tie-back kullanılarak analizler tekrarlanmıştır. 3 sıra tie-back kullanılarak tasarlanan geoteknik modelde tie-back düşey aralığı $s_v = 1.25$ m olarak tayin edilmiş, 1 sıralı sistemde ise tie-back kazı aynası derinliğinin orta noktasında konumlandırılmıştır. 3 farklı tie-back adedi ve aralığına göre gerçekleştirilen analizler sonucunda tie-back düşey aralığının artıp adedin de 1'e düşürüldüğü durumda güvenlik katsayısının yaklaşık 1.00 mertebelerinde azaldığı, düşey destekleme elemanlarında gerçekleşmesi beklenen maksimum yatay deplasman miktarının ise yaklaşık 5 mm arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca düşey destekleme elemanlarına etkiyen tesir kuvvetleri için de tie-back düşey aralığının artması ile maksimum normal kuvvetin azaldığı, maksimum kesme kuvvetinin arttığı ve maksimum eğilme momenti değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Tie-back düşey aralığının azalıp tie-back adedinin 3 sıraya çıkarılması ile birlikte ise gözlemlenen güvenlik katsayısı değerinde yaklaşık 0.10 mertebesinde bir artış gözlemlenirken, düşey destekleme elemanlarında meydana gelmesi muhtemel maksimum yatay deplasman miktarının ise 0.9 mm azaldığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak düşey destekleme elemanlarına etki eden tesir kuvvetlerinde maksimum normal kuvvet ve kesme kuvveti miktarlarının negatif yönde arttığı belirlenirken, maksimum eğilme momenti değerinin ise yaklaşık 7 kNm miktarında arttığı tespit edilmiştir. Farklı tie-back düşey aralığı ve adedi kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin sonuçları aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

Tablo 4.6. Boru köprüsü bölgesi için farklı tie-back düşey aralığı ve adedi ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçları

Düşey sıra	Düşey Destekleme Elemanlarında Oluşan				Güvenlik Katsayısı (FS)
	N (kN)	V (kN)	M (kNm)	ΔL (mm)	
1	-46.7	-34.6	34.9	19.6	2.16
2	-48.2	-33.3	22.9	14.8	3.14
3	-40.9	-40.2	29.8	13.9	3.23

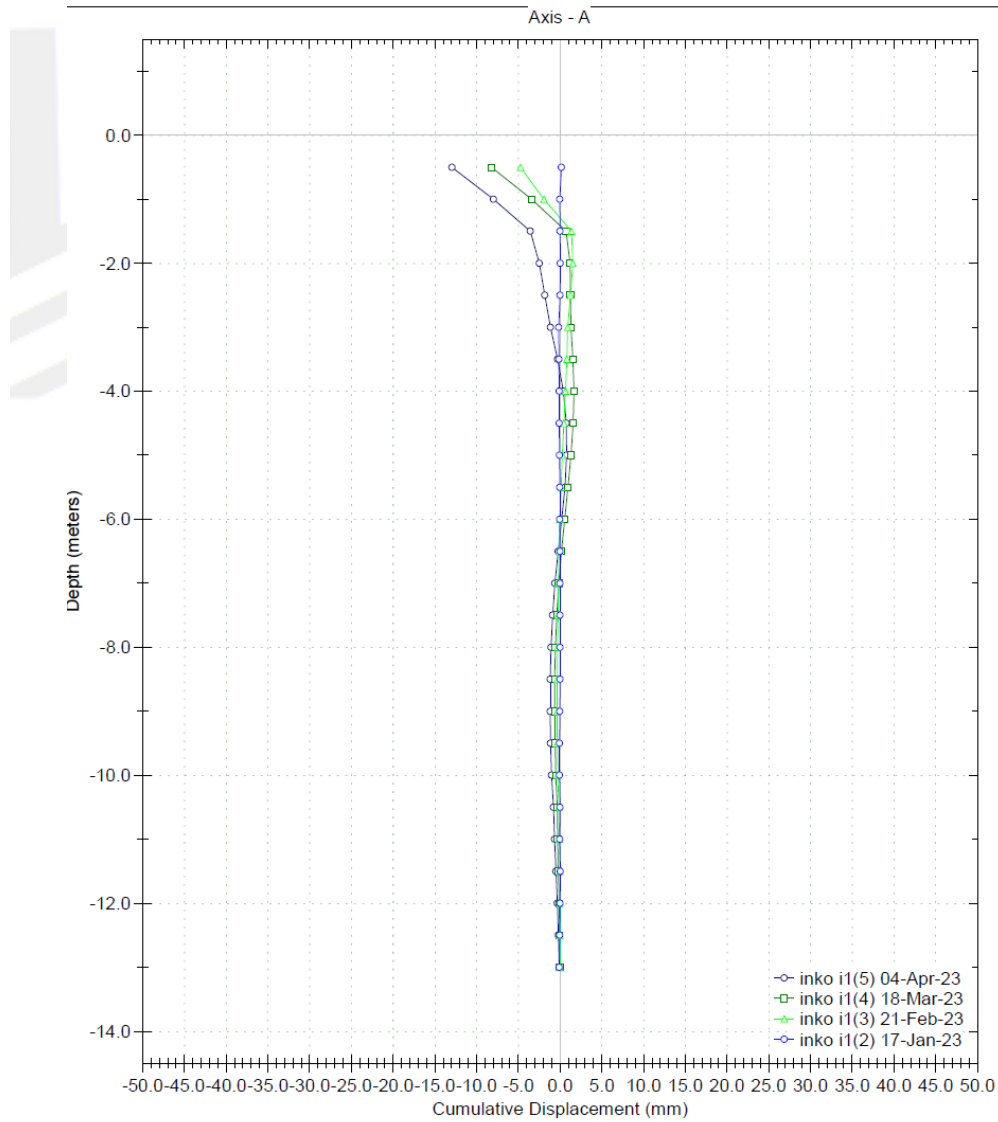
4.3.1.3 Boru Köprüsü Bölgesi İksa Sistemi Aletsel Gözlem Verileri

Çalışma sahasında çift taraflı derin kazı yapılması gereken bölgelerden biri boru köprüsü etrafıdır. Etrafında yapılacak derin kazı çalışmaları sürecinde boru köprüsünün yapısal stabilitesinin korunması ve eş zamanlı olarak derin kazıların da

güvenli bir şekilde yapılabilmesi için bir iksa sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan, geoteknik analizleri gerçekleştirilen ve bu doğrultuda saha uygulamaları gerçekleştirilen derin kazı destekleme sisteminde düşey destekleme elemanı olarak Ø30 mini kazıklar kullanılırken, yatay destekleme elemanı olarak ise 3x0.6” tie-back elemanlar kullanılmıştır. İksa sisteminin saha uygulamaları aşamasında derin kazı kademeleri süresince düşey destekleme elemanlarında meydana gelen yatay deplasmanlar, tie-back elemanların iksa sistemine sağlamış olduğu katkı ve olası bir göçme mekanizmasının gerçekleşme ihtimali aletsel gözlem yöntemleri ile periyodik olarak kontrol edilmiştir. Gerçekleştirilen kontrollerde aletsel gözlem metodu olarak inklinometre kullanılmıştır. İksa hattının hemen arkasına düşey destekleme elemanları ile eş zamanlı olarak 1 adet L = 13,0 m boyunda inklinometre yerleştirilmiştir. İksa hattında başlık kirişi imalatlarının tamamlanmasından sonra ve kazı süreçlerinin başlamasından önce ilgili inklinometreden sıfır okuması alınmıştır. Derin kazı kademeleri süresince her kademede tie-back imalatları öncesi ve sonrası inklinometre okumaları periyodik olarak alınmıştır. Nihai kazı kotuna ulaşıp 2. Sıra tie-back elemanlara da öngerme kuvvetinin uygulanması ardından inklinometreden nihai okuma alınmıştır. İnklinometreden alınan tüm okumalar sonucunda toplanan veriler ile oluşturulan kümülatif düşey mesafe / yatay deplasman grafiği (Şekil 4.19. Boru köprüsü bölgesi inklinometre ölçüm verileri incelendiğinde iksa hattında gerçekleşen maksimum yatay deplasman miktarı yaklaşık olarak 14 mm olarak tespit edilmiştir. Tespit edilen maksimum yatay deplasman miktarının kazı derinliğine oranı ($\delta h/H = 0.014/6.00 = \%2,3$) Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2018’de yayınlanan Kazı Çukurlarının Desteklenmesi ile İlgili Uygulanacak Esaslar genelgesinde yatay destekli iksa sistemleri için belirtilen limit yanal deplasman/ kazı derinliği oranı değerinin ($\delta h/H = \%5$) altında kaldığı belirlenmiştir (Kazı Çukurlarının Desteklenmesi ile İlgili Uygulanacak Esaslar Genelgesi, Madde 1.15.19). İksa hattında gözlemlenen maksimum yatay deplasman miktarının (14 mm) geoteknik tasarım aşamalarında öngörülen maksimum yatay deplasman miktarının (15 mm) yaklaşık 1 mm altında kaldığı belirlenmiştir. Dolayısıyla tasarım analizlerinin konservatif mühendislik bakış açısıyla yapıldığı söylenebilir. İnceleme alanının ilgili bölgesinde saha uygulaması gerçekleştirilen iksa sistemi için gerçekleştirilen geoteknik tasarım analizlerinin sahada gerçekleşen maksimum yatay deplasman miktarı ile büyük oranda benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. İnklinometre

grafiğinde de görüldüğü üzere düşey destekleme elemanlarının baş kısımlarına derin kazı destekleme sistemi içerisine doğru bir deplasman var iken orta kısımlarında yapı çukuruna doğru bir deplasman gerçekleşmiştir. Gözlemlenen bu deformasyon modeli geoteknik tasarım analizlerinde gözlemlenmesi öngörülen deformasyon modeli ile benzerlik göstermektedir.

Sonuç olarak düşey destekleme elemanı olarak mini kazıkların, yatay destekleme elemanı olarak ise tie-back elemanların kullanıldığı bir iksa sistemi ile yaklaşık 35 kPa sürşarj yüküne sahip boru köprüsünün her iki tarafında ilgili köprüde herhangi bir yapısal hasara sebebiyet verilmeden derin kazı işlemleri güvenli bir şekilde tamamlanabilmektedir.



Şekil 4.19. Boru köprüsü bölgesi inklinometre ölçüm verileri

Aletsel gözlem verileri dışında iksa sisteminde derin kazı kademeleri süresince başka bir kontrol parametresi de tie-back elemanların üzerlerine etkiyen öngerme yükleri altında göstermiş olduğu uzama miktarlarıdır. Bu parametrenin kontrolü ile, tie-back elemanların öngerme yükünün tasarım analizleri kapsamında belirtilene uygun şekilde uygulanıp uygulanmadığı ve tie-back elemanların çalışma performansının irdelenmesi amaçlanmıştır. İksa sistemi üzerine etkiyen yanal itkilerin sistem içerisinde yer alan düşey destekleme elemanı olarak belirlenen mini kazıklar tarafından güvenli bir şekilde taşınmasında, tasarım analizlerinde de belirlendiği üzere teşkil edilecek yatay destekleme elemanlarının yük aktarımını doğru ve tam kapasite ile gerçekleştirmesi büyük önem arz etmektedir. Yatay destekleme elemanlarının bu denli kritik bir göreve sahip olduğu noktada belirlenen öngerme kuvvetlerinin doğru şekilde uygulanması iksa sisteminin temel bileşenlerinden biridir. Belirlenen öngerme yükünden fazla yük uygulanması durumunda tie-back elemanlarda kopma yaşanıp tie-back elemanlar tamamen servis dışı kalabileceği gibi ilgili tie-back elemanlarda aşırı uzama gözlemlenmesi durumunda ise tie-back elemanlar plastik deformasyonlar göstererek sahip olmaları gereken performansın çok altında kalacaktır. Aksi durumda tie-back elemanların üzerine uygulanan öngerme yükünün belirlenenden az olması halinde ise yük aktarımı yine doğru şekilde gerçekleşmeyecek ve iksa sisteminde göçme mekanizmalarının gözlemlenmesi ile çevre yapılarda kritik yapısal hasarlar oluşması kaçınılmaz olacaktır.

İnceleme alanında ilgili bölgede teşkil edilen iksa sisteminde yatay destekleme elemanı olarak teşkil edilen tie-back elemanların üzerlerine etkiyen öngerme yükleri altında göstereceği uzama miktarları elastik uzama formülü ile hesaplanarak öngörülmüştür. Saha uygulamaları kapsamında tie-back elemanların öngerme sürecinde ilgili öngerme yükleri altında tie-back elemanlarda gerçekleşen uzama miktarları not edilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan elastik uzama formülü aşağıda sunulmuştur;

$$\frac{P * L}{E * A}$$

P: Uygulanan kuvvet (kN)

L: Eleman boyu (m)

E: Elemanı oluşturan malzemenin elastisite modülü (GPa)

A: Elemanın kesit alanı (m²)

İlgili bölgede teşkil edilen iksa sisteminin yatay destekleme elemanlarının oluşturulmasında 195.000 MPa elastisite modülüne ve toplam 420 mm² kesit alanına sahip çelik halatlar kullanılmıştır. Geoteknik tasarım aşamalarında tayin edilen öngerme kuvveti ($T_{\text{öngerme}} = 200 \text{ kN}$) ise saha uygulamalarında birebir uygulanmıştır. Dolayısıyla yukarıda belirtilen eşitlik kullanılarak boru köprüsü bölgesinde tahsis edilen derin kazı destekleme sisteminde yer alan tie-back elemanların uygulanan ön germe yükleri altında göstermiş olduğu uzama miktarları teorik değerleri 14 mm olarak hesaplanmıştır. Tie-back tasarım esaslarında belirtildiği üzere tie-back maksimum uzama miktarı, ilgili formülde uygulanan yük değeri için ankraj halat demetinin tasarım çekme dayanımı (460 kN) kullanılarak hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla ilgili tie-back uzunluğu için maksimum elastik uzama miktarı 31 mm'dir. Sahada gerçekleşen uzama miktarları ise imalat süreçleri boyunca not edilmiş ve Tablo 4.7'de sunulmuştur. Hesaplanan teorik ve maksimum uzamak miktarları, saha uygulamalarında gerçekleşen uzama miktarları ile kıyaslandığında öngerme yükünün tie-back elemanlara tasarım analizlerinde belirlendiği miktarda doğru şekilde uygulandığı söylenebilir.

Tablo 4.7. Boru köprüsü bölgesi tie-back öngerme yükü - uzama

Boru Köprüsü Bölgesi Tie-back Öngerme Verileri			
Tie-back No	Gerçekleşen Uzama Miktarı (mm)	Tie-back No	Gerçekleşen Uzama Miktarı (mm)
T-1	13	T-21	18
T-2	13	T-22	25
T-3	13	T-23	16
T-4	12	T-24	21
T-5	18	T-25	26
T-6	15	T-26	18
T-7	13	T-27	21
T-8	14	T-28	18
T-9	14	T-29	18
T-10	14	T-30	21
T-11	18	T-31	20
T-12	22	T-32	18
T-13	11	T-33	19
T-14	15	T-34	20
T-15	19	T-35	24
T-16	11	T-36	17
T-17	8	T-37	19
T-18	6	T-38	20
T-19	19	T-39	20
T-20	16	T-40	30

4.3.1.4 Boru Köprüsü Bölgesi İksa Sistemi Alternatif Çözüm Yöntemi

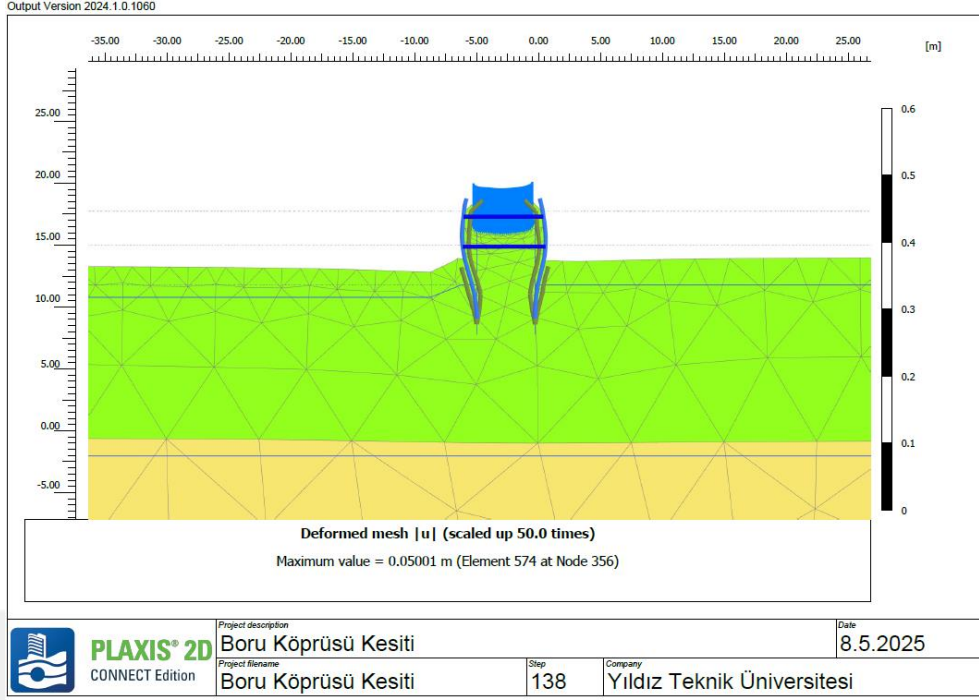
Dünyanın farklı bölgelerinde bulunan çalışma alanlarında yaşanan benzer geoteknik problemlerin çözümü ve yapılması planlanan derin kazıların çevre yapılar ve yapı çukuru için herhangi bir tehlike arz etmeden güvenli tamamlanabilmesi amacıyla tie-rod adı verilen ve tie-back elemanlar ile büyük benzerlik oranına sahip yatay destekleme sistemlerinin de tercih edildiği bilinmektedir. İnceleme alanında yatay destekleme elemanı olarak kullanılması planlanan tie-back elemanların yerine alternatif bir çözüm, dünyadaki benzer geoteknik problemlerin çözümü büyük bir başarı oranı yakalamış olan tie-rod elemanların kullanılmasıdır.

Tie-rod ve tie-back elemanlar temel çalışma prensipleri kapsamında karşılaştırıldığında aralarındaki ilişkinin öngermeli ankraj ve zemin çivisi arasındaki ilişkiye çok benzer olduğu gözlemlenmektedir. Tie-back elemanlar üzerlerine uygulanan öngerme kuvveti sayesinde yatay yüklerin iksa perdesine homojen dağıtılmasını sağlarken tie-rod elemanlar herhangi bir öngerme işlemi olmaksızın üstlerine etkiyen yatay yüklerin etkisi ile yük aktarımı yapmaktadır. Dolayısıyla tie-back elemanların manuel olarak yük aktarımına başlatıldığı ancak tie-rod elemanların üzerlerine aktaracakları yükün etkisiyle birlikte kademeli ve otomatik olarak yük aktarımına başladığı söylenebilir. Tie-rod elemanların tie-back elemanlardan yapısal olarak tek farkı, tie-back elemanların çelik halat, tie-rod elemanların ise nervürlü demir donatı ile tahsis edilmesidir. Bulonlar yardımıyla kuşak kirişlerine sabitlenen tie-rod elemanlar, iksa sistemi üzerine etkiyen yanal itki kuvvetlerinin homojen olarak dağıtılmasını sağlamaktadır. Ancak tahmin edilebileceği üzere gerek bulonların montajı için tie-rod elemanların baş kısmına yiv açılması gerekliliği, gerekse nervürlü demir donatıların çelik halatlara göre daha ağır, hantal ve pahalı olması sebebiyle tie-rod elemanlar tie-back elemanlar karşısında dezavantajlı bir konuma düşmektedir.

Ancak yapılacak olan geoteknik uygulamanın fizibilitesinin değerlendirilip analiz sonuçlarının kapsamlı değerlendirilebilmesi ve alternatif çözüm metodlarında gerçekleşmesi muhtemel senaryoların irdelenebilmesi için bahse konu boru köprüsü bölgesinde tasarlanan iksa sistemi modelinde tie-back elemanlar yerine tie-

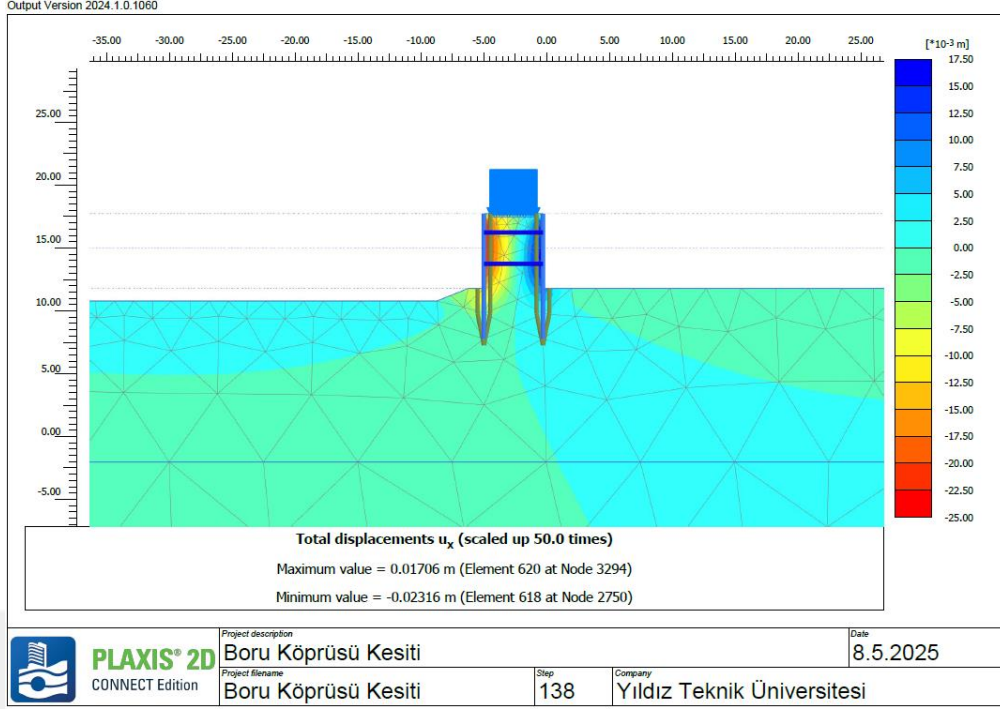
rod elemanların kullanıldığı sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda yatay destekleme elemanı olarak tie-rod elemanların kullanıldığı iksa sisteminin, üzerine etkiyen yanal yükler altında tie-back ile donatılmış iksa sistemine çok benzer yapısal davranışlar gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sebeple proje maliyeti, uygulama avantajları, metot farklılıkları gözetilerek uygulaması yapılacak derin kazı destekleme sisteminin tie-back elemanlar ile donatılmış mini kazıklı iksa perdesi olmasına karar verilmiştir.

Yatay destekleme elemanı olarak tie-rod, düşey destekleme elemanı olarak ise mini kazık kullanılan iksa sistemi modelinin geoteknik analizi sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal çözümlemeler gerçekleştiren Plaxis 2D programında yapılmıştır. Yapılan analizin sonuçlarının değerlendirilmesi safhasında yatay ve düşey destekleme elemanlarından oluşan kompozit iksa sisteminin davranışı, düşey destekleme elemanlarında meydana gelmesi muhtemel maksimum yanal deplasman miktarları, yatay/düşey destekleme elemanlarına etkimesi tahmin edilen tesir kuvvetlerinin incelemesi yapılmıştır. Ayrıca ilgili modelde gözlemlenen sonuçların tie-back elemanlar kullanılarak analiz edilen sayısal modelden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanması yapılmıştır. Gerçekleştirilen analiz kapsamında irdelenen parametrelerin sonuç diyagramları aşağıdaki şekillerde sunulmuş ve detaylı olarak açıklanmıştır.



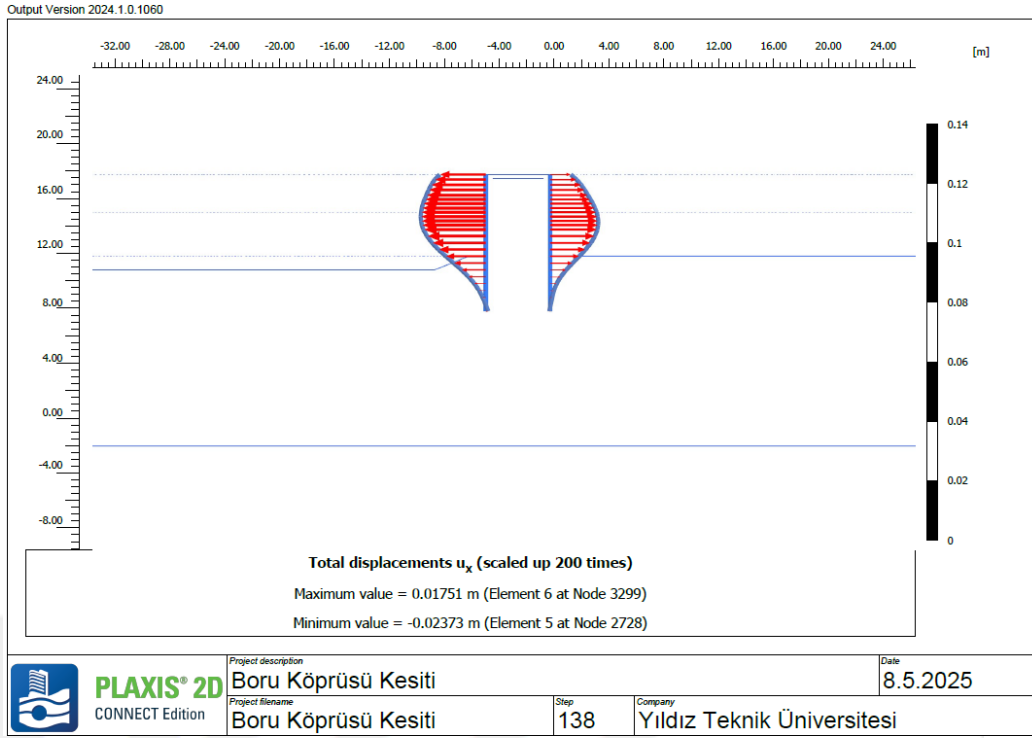
Şekil 4.20. Boru köprüsü bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde deformasyon modeli

Boru köprüsü için alternatif bir çözüm yöntemi olarak tasarlanan ve analizleri gerçekleştirilen tie-rod elemanlar ile donatılmış mini kazıklı iksa sistemi ile oluşturulan geoteknik modelin deformasyon modeli incelemelerinde görüldüğü üzere tie-rod elemanlar iksa sistemine etkileyen yanal yükleri düşey destekleme elemanlarına yük aktarımının gerçekleşmesini sağlamıştır. Deformasyon modelinin tie-back kullanılan geoteknik modelin deformasyon modeline benzerliği dikkat çekmektedir. Tie-rod elemanlar ile güçlendirilmiş iksa sisteminin yanal itkileri taşınması ve yanal deplasmanları sınırlandırması ile tie-back elemanlı geoteknik modelde olduğu gibi derin kazıların nihai kazı kotuna kadar güvenle yapılabilmesi sağlanmıştır. Ayrıca alternatif geoteknik model için Plaxis 2D programında gözlemlenen güvelik katsayısı değerinin ($FS = 3.14$) tie-back kullanılan geoteknik modelin güvenlik katsayısı değeri ($FS = 3.13$) ile neredeyse aynı olduğu tespit edilmiştir. Bu tespit sonucunda tie-back kullanılan geoteknik çözüm yönteminin tie-rod kullanılan geoteknik çözüm yöntemi ile benzer güvenlikte bir çözüm yöntemi olduğu söylenebilir. Her iki geoteknik çözüm yönteminde de hesaplanan güvenlik katsayıları değerinin Kazı Destek Yapıları Yönetmeliğinde geçici iksa sistemleri için belirtilen güvenlik katsayısı değerini ($FS = 1.35$) karşıladığı tespit edilmiştir (Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği, Madde 2.9.3.4).



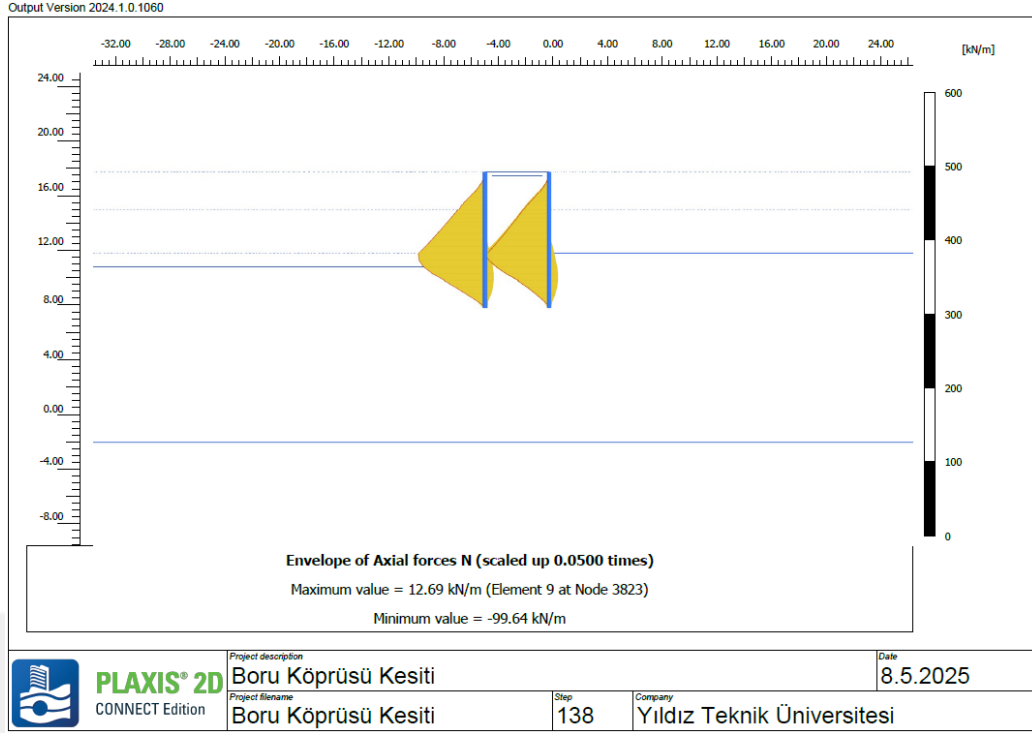
Şekil 4.21. Boru köprüsü bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde oluşan maksimum yatay deplasman

Boru köprüsü bölgesi için tasarlanan ve yatay destekleme elemanı olarak tie-rod elemanların tercih edildiği iksa sisteminin sayısal analizlerinin gerçekleştirildiği geoteknik modelde, tüm modelde gözlemlenmesi beklenen yatay deplasman miktarı da incelemeler kapsamına dahil edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizler sonucunda iksa sisteminde oluşması olası yatay deplasmanın değerinin 2,3 cm olduğu belirlenmiştir. Belirtilen deplasman miktarı kullanılarak hesaplanan maksimum yanal deplasman/kazı derinliği oranı ($\delta h/H = 0.023/6.00 = \%3.8$) değerinin Çevre ve Şehircilik Bakanlığının ilgili genelgesinde yatay destekli iksa sistemleri için belirtilen limit maksimum yanal deplasman/ kazı derinliği oranı değerinin ($\delta h/H = \%5$) altında kaldığı belirlenmiştir (Kazı Çukurlarının Desteklenmesi ile İlgili Uygulanacak Esaslar Genelgesi, Madde 1.15.19). Belirlenen deplasman değeri tie-back kullanılarak analizleri gerçekleştirilen geoteknik modelde gözlemlenmesi olası maksimum yanal deplasman değeri (1.5 cm) miktarı ile benzer mertebelerdedir. Bu sebeple aynı bölgede ilgili kazı derinliği için tasarlanan ve yalnızca tercih edilen yatay destekleme elemanının değiştirildiği iki farklı geoteknik modelin analiz sonuçlarına göre olası yatay deplasman değerinin tercih edilen yatay destekleme elemanına bağlı milimetre mertebesinde değişim gösterdiği söylenebilir.

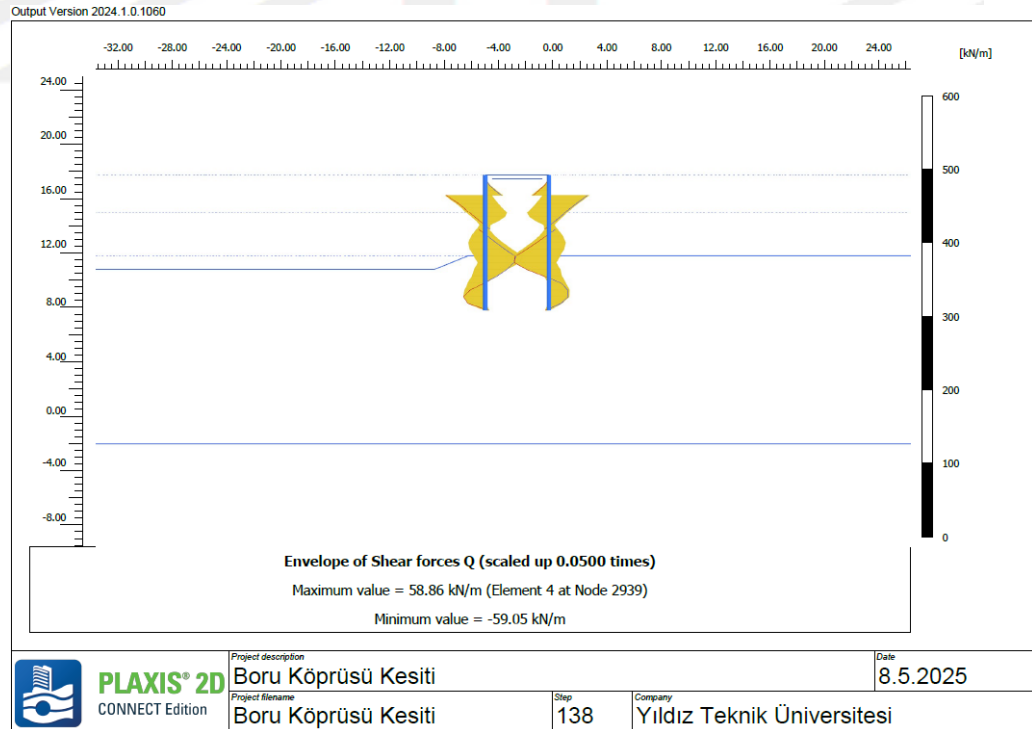


Şekil 4.22. Boru köprüsü bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde mini kazıklarda beklenen maksimum yatay deplasman

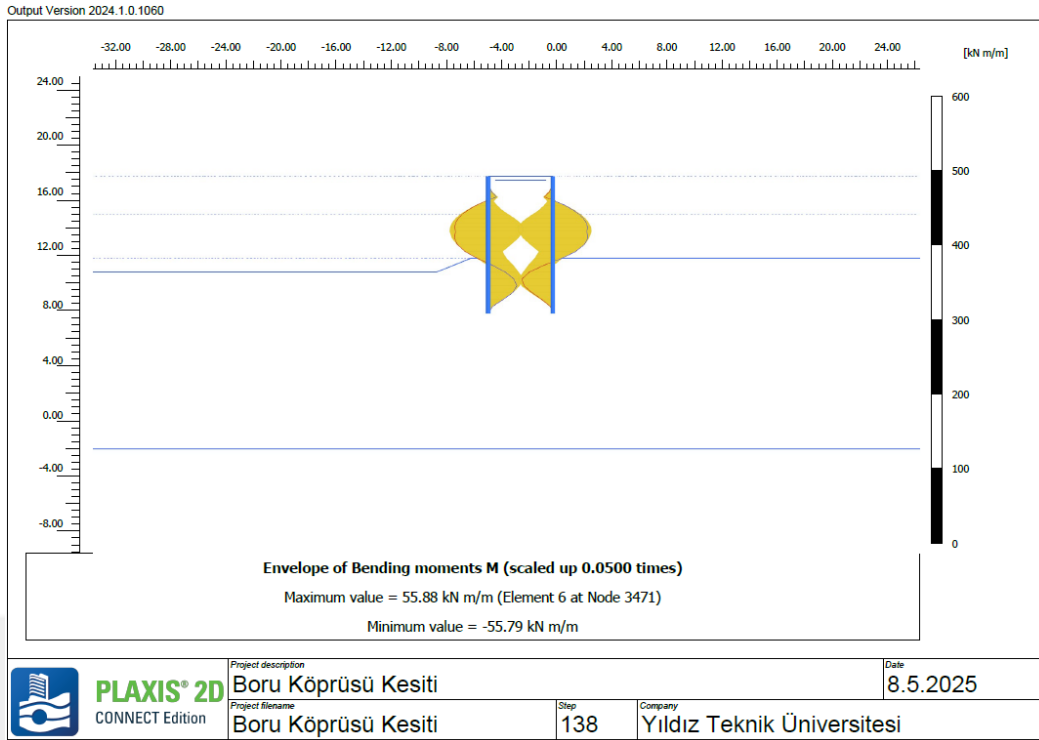
Çalışma alanında bulunan boru köprüsü etrafında yapılacak iksa sistemlerinin geoteknik modellemesinde alternatif çözüm yöntemi olarak tie-rod ile donatılmış mini kazıklar kullanılmıştır. Tasarlanan iksa sisteminde kullanılan yatay ve düşey destekleme elemanları üzerine, yük aktarımı ve taşıma süreçlerinde, etkiyen tesir kuvvetleri analizler kapsamında incelenmiştir. İncelemeler sonucunda mini kazıkların ve tie-rod elemanların yanal yükler altında doğrusal olmayan davranış biçimleri ve yük taşıma kapasiteleri değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler doğrultusunda derin kazı işlemlerinin nihai kazı kotuna kadar tamamlandığı durumda mini kazıklara etkiyen maksimum normal kuvvetin – yönde 44.8 kN, maksimum kesme kuvvetinin – yönde 26.6 kN ve maksimum eğilme momenti değerinin + yönde 25.1 kNm olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yatay destekleme elemanı olarak yük aktarımında kullanılan tie-rod elemanlara etkiyen maksimum normal kuvvet değerinin 1. sıra için yaklaşık 153 kN, 2. sıra için yaklaşık 29 kN olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.23. Boru köprüsü bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum normal kuvvet



Şekil 4.24. Boru köprüsü bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum kesme kuvveti



Şekil 4.25. Boru köprüsü bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum eğilme moment

Structural element	Node	Local number	X [m]	Y [m]	N [kN]	N _{min} [10 ⁻³ kN]	N _{max} [kN]
NodeToNodeAnchor_1_1	2341	1	-4.950	16.250	146.597	-6.703	153.950
Element 1-1 (Node-to-node anchor)	2939	2	-0.250	16.250	146.597	-6.703	153.950
NodeToNodeAnchor_2_1	3263	1	-4.950	13.750	29.492	0.000	29.492
Element 2-2 (Node-to-node anchor)	3471	2	-0.250	13.750	29.492	0.000	29.492

Şekil 4.26. Tie-rod elemanlar üzerine etkiyen maksimum normal kuvvet

Derin kazı destekleme sistemlerinde sıklıkla tercih edilen yatay destekleme elemanlarından biri olan zemin çivilerinde genellikle Ø32 nervürlü inşaat donatısı kullanılmaktadır. Tie-rod elemanlar da herhangi bir öngerme yükü uygulanmaksızın üzerlerine etkiyen yanal toprak itkileri altında zamanla kademeli olarak yük aktarımında bulunma esasına dayanan çalışma prensipleri ile zemin çivilerine ciddi bir benzerlik göstermektedir. Bu sebeple yukarıda detaylı analiz sonuçları verilen tie-rod elemanlar günümüzde zemin çivisi imalatlarında sıklıkla tercih edilen Ø32 nervürlü inşaat donatısı kullanılarak tasarlanmıştır. Ancak boru köprüsü için tasarlanan derin kazı destekleme sisteminde yatay destekleme elemanı olarak tie-rod elemanların kullanıldığı alternatif bir çözüm yöntemi olarak oluşturulan geoteknik modelde tie-rod elemanlarda kullanılan donatı çapının sistem

üzerinde etkisinin araştırılabilmesi için tie-rod elemanların Ø26 ve Ø40 gibi farklı çaplara sahip donatılardan oluşturulduğu geoteknik modeller de analiz edilmiştir.

Aynı geoteknik modelde 3 farklı donatı çapı ile oluşturulmuş tie-rod elemanlar ve 3 adet 0.6" çelik halattan oluşan tie-back elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçlarının irdeleme aşamasında güvenlik katsayıları, düşey destekleme elemanlarında gözlemlenen maksimum yatay deplasman ve elemanlara etkiyen tesir kuvvetleri incelenmiştir. Ayrıca farklı çaplarda nervürlü donatı kullanılarak oluşturulan tie-rod elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin sonuçlarının tie-back kullanılan geoteknik modelin analiz sonuçları ile benzerlik oranı da değerlendirme kapsamına dahil edilmiştir.

Gerçekleştirilen inceleme ve kıyaslamalar sonucunda tie-rod elemanlarda kullanılan donatı çapının artması ile düşey destekleme elemanlarında maksimum eğilme momenti değeri hemen hemen aynı kalırken, meydana gelmesi muhtemel maksimum yatay deplasman değerinin ise 1.0 mm, mertebelerinde azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak düşey destekleme elemanlarında normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin 1 kN mertebelerinde negatif yönde artış göstermesi ile tasarlanan geoteknik modeli güvenlik katsayısı değerinde 0.2 – 0.3 mertebelerinde düşüş gözlemlenmiştir. Farklı donatı çapları ile oluşturulan tie-rod elemanlı modellerin çelik halatlardan oluşan tie-back elemanların kullanıldığı geoteknik modelin analiz sonuçlarına büyük oranda benzerlik gösterdiği saptanmıştır. Gerçekleştirilen analizlere ait sonuçlar tablosu aşağıda sunulmuştur.

Tablo 4.8. Boru köprüsü bölgesi farklı donatı çaplarında tie-rod elemanlı sistem analiz sonuçları ve tie-back elemanlı sistem analiz sonuçları

Donatı Çapı (Ø)	Düşey Destekleme Elemanlarında Oluşan				Güvenlik Katsayısı (FS)
	N (kN)	V (kN)	M (kNm)	DL (mm)	
26	-44.1	-25.9	25.3	24.8	2.89
32	-44.8	-26.6	25.2	23.7	3.14
40	-45.0	-27.1	25.3	23.0	2.97
Çelik Halat	-48.2	-33.3	22.9	14.8	3.14

4.3.2 Elektrik Direği Bölgesi İksa Sistemi Performans Analizi

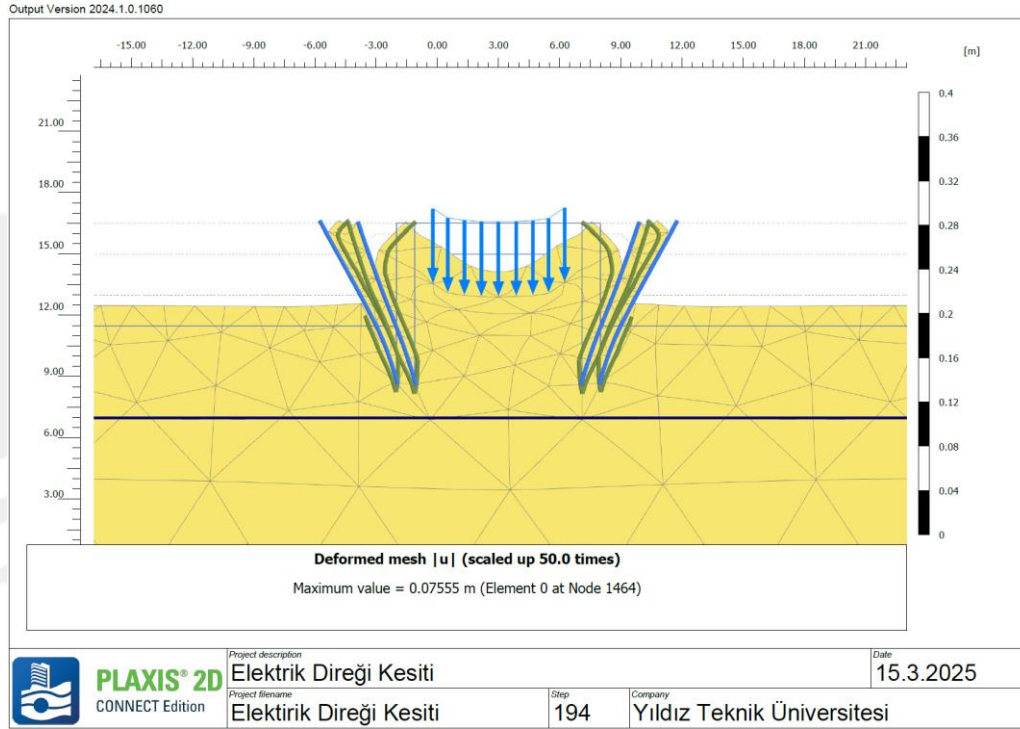
İnceleme alanının başka bir bölgesinde, bölgenin elektrik aktarım sistemi için büyük önem arz etmekte olan bir yüksek gerilim elektrik direği bulunmaktadır. Bahse konu elektrik direğinin etrafında zemin seviyesinin, yapılacak yeni yapıların temellerinin zemine oturacağı nihai kazı kotuna ulaşılabilmesi için mevcut saha kotundan yaklaşık 6,0 metre kazı yapılması gerektiği tespit edilmiştir. Elektrik direğinin deplase edilmesi ya da faaliyetine son verilmesi mümkün olmadığı için etrafında yapılacak yeni yapıların derin kazı çalışmaları için bir iksa sistemi tasarlanması gerekliliği doğmuştur. Elektrik direği temellerinden zemine aktarılacak yaklaşık gerilme değeri (100kPa) ve 6,0 metre yüksekliğinde zemin tabakasının oluşturmuş olduğu aktif toprak basıncı, ilgili iksa sistemi için tasarım taşıma kapasitesinin belirlenmesinde kritik rol oynamıştır. Yapılan geoteknik tasarım analizleri kapsamında öncelikle bahse konu derin kazı destekleme sisteminin teşkil edilmesi için sadece düşey destekleme elemanları kullanılarak, sistemin olası bir yatay destekleme elemanı ihtiyacı sorgulanmıştır. İksa sisteminin yalnızca konsol düşey destekleme elemanları ile oluşturulması halinde planlanan derin kazıların hedeflenen güvenlik faktörlü altında tamamlanamayacağı saptanmıştır. Yapılan saptama sonrasında ihtiyacı karşılayacağı düşünülen tie-back elemanlar iksa sisteminde yatayda ve düşeyde 1.8 m aralık ile konumlandırılmış ve tie-back elemanların geoteknik modele etkisi irdelenmiştir. Sistem optimizasyonunun sağlanabilmesi için inceleme sonucunda alternatif bir çözüm metodu olan tie-rod elemanların kullanılması halinde iksa sistemdeki davranışın değişimi incelenmiştir. Analiz sonuçlarının karşılaştırılması safhasında deformasyon modeli, düşey destekleme elemanlarında meydana gelmesi öngörülen maksimum yatay deplasman miktarı, düşey ve yatay destekleme elemanlarına etkiyen tesir kuvvetleri göz önünde bulundurulmuştur.

İncelemenin sonunda ise sayısal analiz sonuçlarının birbiri ile kıyaslanmasının yanında saha uygulaması yapılan derin kazı destekleme sisteminin analiz sonuçları ile saha uygulamalarından elde edilen aletsel ve saha gözlem verileri de kıyaslanmıştır. Bahse konu kıyaslanama sonucunda sayısal analiz sonuçlarının doğruluk oranları irdelenmiştir.

4.3.2.1 Konsol İksa Sistemi Analizi

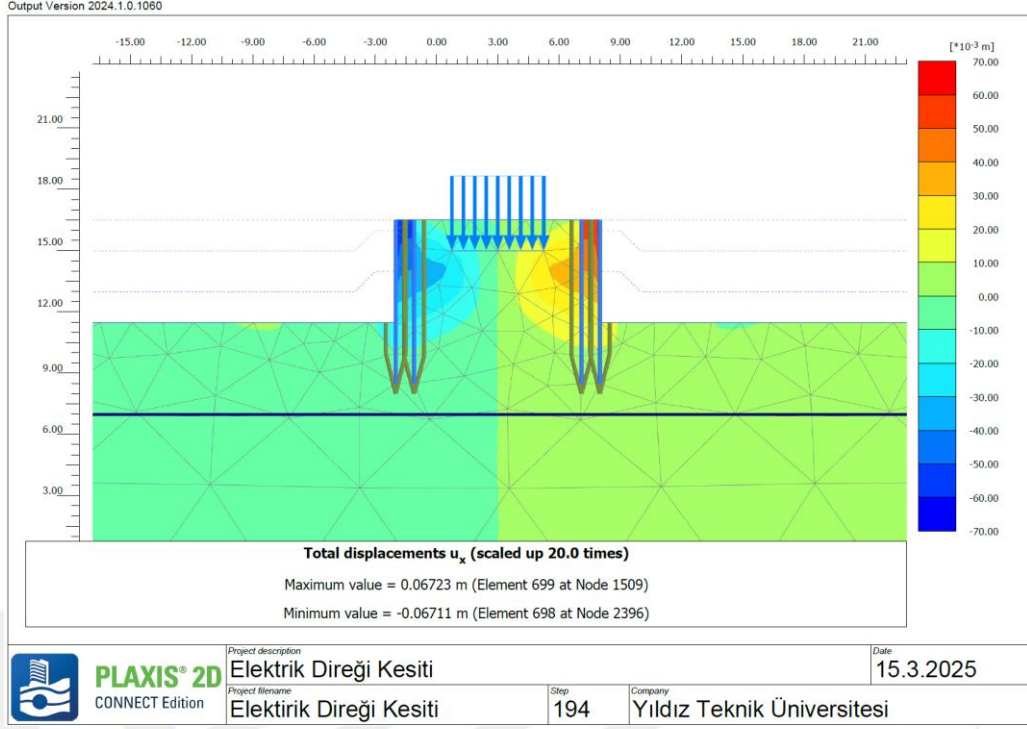
Elektrik direği için yapılan geoteknik analizler kapsamında, çalışma alanında elektrik direği ile iksa hattının çakıştığı bölgede elektrik direğinden kaynaklanan sürşarj yüklerinin ve iksa perdesi arkasında kalan zemin tabakasından kaynaklanan yanal itkilerin taşınması, hangi şartlar altında yapılması planlanan derin kazıların güvenle tamamlanabileceğinin irdelenmesi için çalışma bölgesinin temsili bir geoteknik modeli sonlu elemanlar yöntemi prensibi esaslı ile çalışan Plaxis 2D programında oluşturulmuştur. Oluşturulan geoteknik modelde önce ilgili alanda bulunan zemin tabakalarının kalınlıkları tanımlanmıştır. Ardından zemin tabakalarının karakteristik davranış özelliklerinin programa tanıtılması için tabakalara ait dayanım parametreleri (kohezyon, içsel sürtünme açısı, elastisite modülü) geoteknik raporda mühendislik parametreleri başlığı altında belirtilen bilgiler göz önünde bulundurularak tanımlanmıştır. Kurulan geoteknik model üzerinde zemin tabakalarının tamamıyla tanımlanması ile birlikte zemin etüt veri raporunda, statik ve mimari projelerde belirtilen mevcut ve düzenlenmiş zemin kotları ile yapılara ait temel alt kotları bilgileri dahilinde kazı kademeleri belirlenmiştir. Elektrik direği etrafında yapılması planlanan yaklaşık 6,0 metre yüksekliğindeki derin kazılar sırasında zemin tabakalarının ve dolayısıyla elektrik direğinin yanal hareketini kısıtlayıcı bir iksa sisteminin tasarlanması aşamasına geçilmiştir. Çalışma alanının, elektrik direğinin hemen altında yer alması, elektrik direğinin olası makine darbelerine karşı hassas olması ve bölgenin üzerinden yüksek gerilim hatlarının geçmesi sebebiyle düşey destekleme elemanı olarak fore kazıklar seçilememiş yerine, Ø30 cm çapında, $L = 7.5$ m boyunda ve $s = 0.45$ m aralığında mini kazıklar çift sıra olmak üzere yapısal stabilitesinin korunması amacıyla elektrik direği etrafında tasarlanan derin kazı destekleme sisteminin düşey destekleme elemanları olarak yerleştirilmiştir. Yerleştirilen mini kazıkların eksenel rijitlikleri boru köprüsü kesitinde olduğu gibi programda kurulan geoteknik modele tanımlanmıştır. Mevcut durumda yalnızca düşey destekleme elemanları ile oluşturulan iksa sisteminin yatay bir destekleme elemanına duymuş olduğu ihtiyacın tespit edilmesi amacıyla mevcut durum analiz edilmiştir. Analiz kapsamında elektrik direği temellerinde meydana gelen yatay/düşey deplasman miktarı ve mini kazıkların üzerlerine etkiyen yükler altında davranışları incelenmiştir. İnceleme sonucunda yalnızca mini kazıklarla tasarlanan iksa

sisteminin yanal iksa perdesine etkiyen yanal yüklerin taşınmasında, deplasmanların sınırlanmasında ve bahse konu derin kazıların elektrik direğinde yapısal stabilite kayıplarına sebebiyet verilmeden güvenle tamamlanmasında yeterli olmadığı kanaatine varılmıştır. Plaxis 2D programında gerçekleştirilen sayısal analizlere ait deformasyon modeli, maksimum yatay deplasman, düşey destekleme elemanlarına etki eden tesir kuvvetleri diyagramları aşağıdaki şekillerde sunulmuştur.



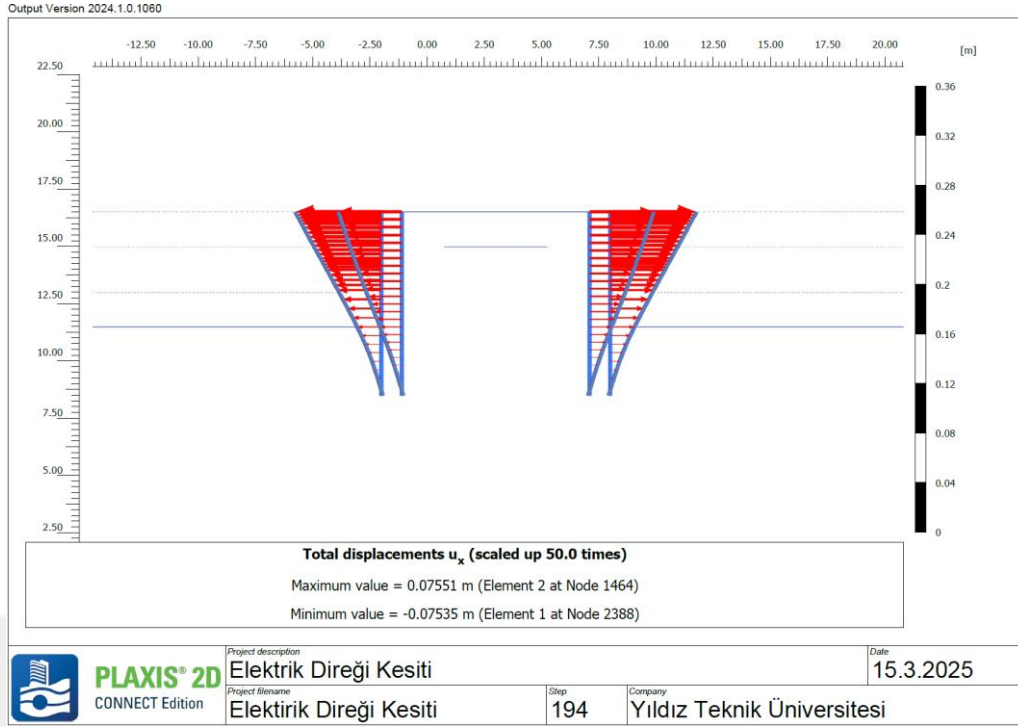
Şekil 4.27. Elektrik direği bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde deformasyon modeli

Plaxis 2D programında elektrik direği bölgesi için tasarlanan geoteknik modelin analizlerinin incelenmesi sırasında ilk olarak deformasyon modeli incelenmiştir. Tasarımı yapıldı model üzerinde ilgili bölgeye yerleştirilen konsol mini kazıklardan oluşan iksa sisteminin, nihai kazı kotuna kadar kazının yapıldığı durumda üzerine etkiyen yanal itkileri güvenle taşıyamadığı ve sınır yatay deplasman değerlerinin üzerine çıkarak göçme mekanizmasının oluştuğu gözlemlenmiştir. Analiz sonucuna göre bölgede yapılması planlanan derin kazıların konsol mini kazıklı iksa sistemi ile desteklenmesinin yeterli olmayacağı, bahse konu durumda derin kazıların çevre yapılar ve yapı çukuru için herhangi bir tehlike arz etmeden yapılamayacağı kanaatine varılmıştır.



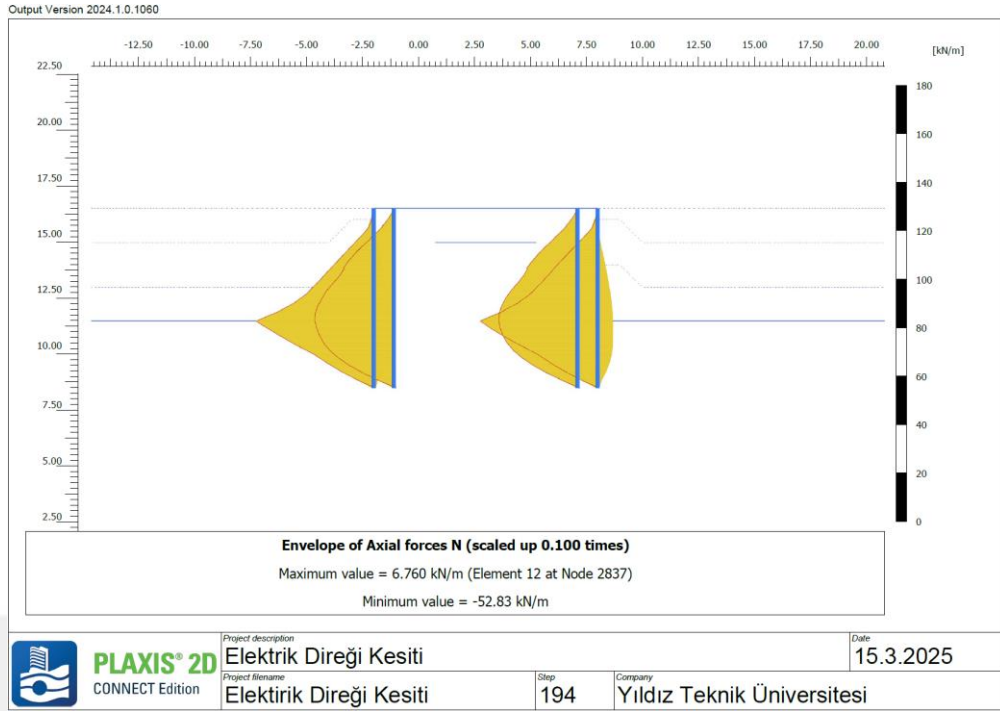
Şekil 4.28. Elektrik direği bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde oluşan maksimum yatay deplasman

İrdelenen analizlerde gözlemlenen göçme mekanizmasının sebeplerinin daha doğru tespit edilip doğru yatay destekleme elemanının tercih edilebilmesi amacıyla göçme mekanizmasının olduğu durumda düşey destekleme elemanlarında meydana geleceği düşünülen maksimum yatay deplasman değerleri incelenmiştir. İnceleme sonucunda bahse konu durumda göçme mekanizması oluşumundan hemen önce tüm modelde gözlemlenen maksimum yatay deplasman değerinin – yönde 7.0 cm mertebelerinde olduğu gözlemlenmiştir. Gözlemlenen değer, göçme durumu yaşanmamış olsa dahi ilgili yönetmelikte mevcut durumdaki kazı miktarında konsol sistemler için belirtilen maksimum yatay deplasman değerinin çok üzerindedir.



Şekil 4.29. Elektrik direği bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde mini kazıklarda beklenen maksimum yatay deplasman

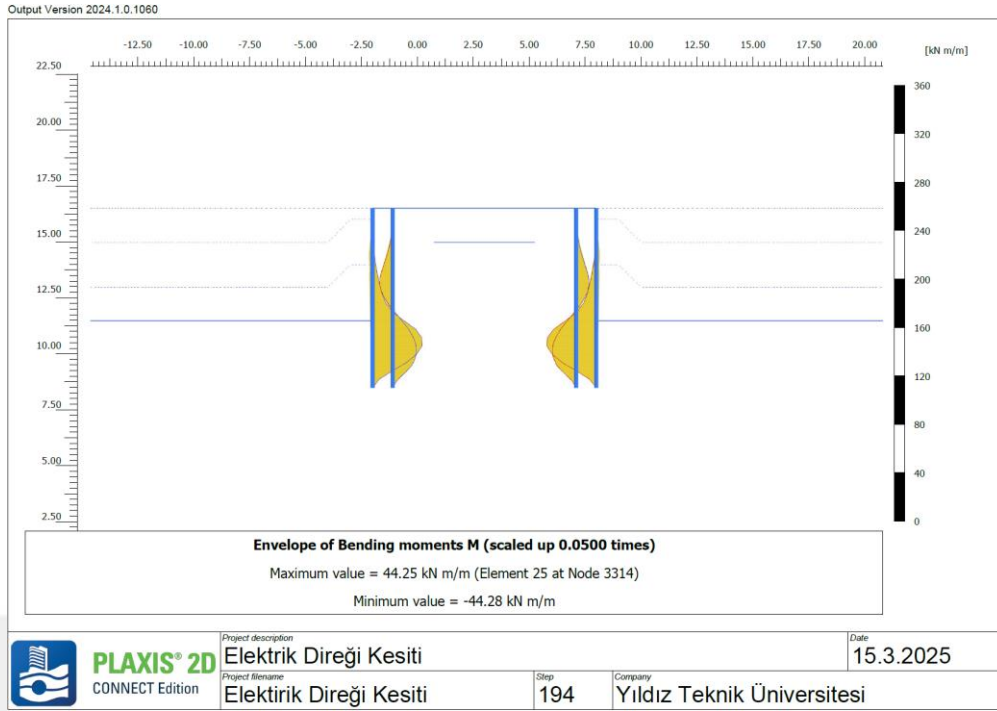
İnceleme alanının elektrik direği bölgesinde yapılması planlanan derin kazıların yatay yönde hareketlerinin sınırlandırılması için tahsis edilecek iksa sisteminin konsol mini kazıklardan oluştuğu geoteknik model üzerinde analizler yapılmıştır. Derin kazıların nihai kazı kotuna kadar yapıldığı durumda derin kazıların desteklenmesi için kurulan iksa sisteminde konsol mini kazıkların yeterli olmadığı kanaatine varılmıştır. Ancak göçme mekanizmasının oluştuğu durumdan hemen önce düşey destekleme elemanları üzerine etkiyen tesir kuvvetlerinin belirlenmesi kullanılması gereken yatay destekleme elemanın doğru tercih edilebilmesi için büyük önem arz etmektedir. Bahse konu göçme durumunun hemen öncesinde mini kazıkların üzerine etkiyen maksimum normal kuvvet – yönde 23.77 kN mertebelerinde iken, maksimum kesme kuvveti + yönde 15.55 kN mertebelerinde ve maksimum eğilme momenti değeri ise - yönde 19.23 kN*m mertebelerindedir. Dolayısıyla seçilecek yatay destekleme elemanının kazıklar üzerine etkiyen tesir kuvvetlerini önemli ölçekte azalabilecek etkinliğe sahip olmalıdır. Geoteknik modelde tanımlanan mini kazıklar üzerine etkiyen maksimum tesir kuvvetleri diyagramları Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de sırasıyla sunulmuştur.



Şekil 4.30. Elektrik direği bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum normal kuvvet



Şekil 4.31. Elektrik direği bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum kesme kuvveti

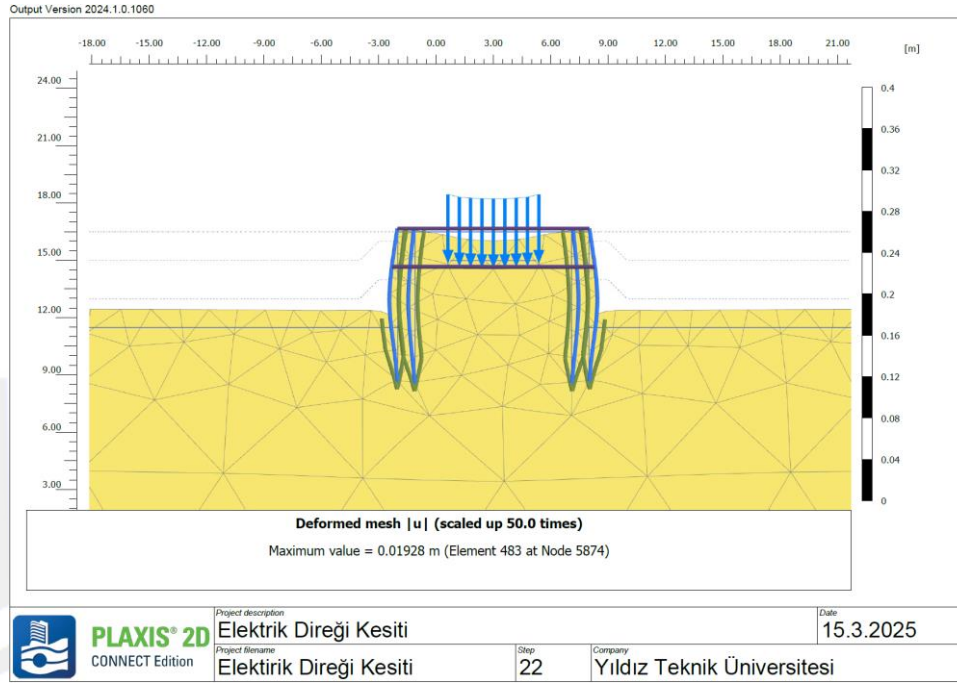


Şekil 4.32. Elektrik direği bölgesi konsol mini kazıklı geoteknik modelde mini kazıklara etkileyen maksimum eğilme momenti değeri

4.3.2.2 Tie-back ile Güçlendirilmiş İksa Sistemi Analizi

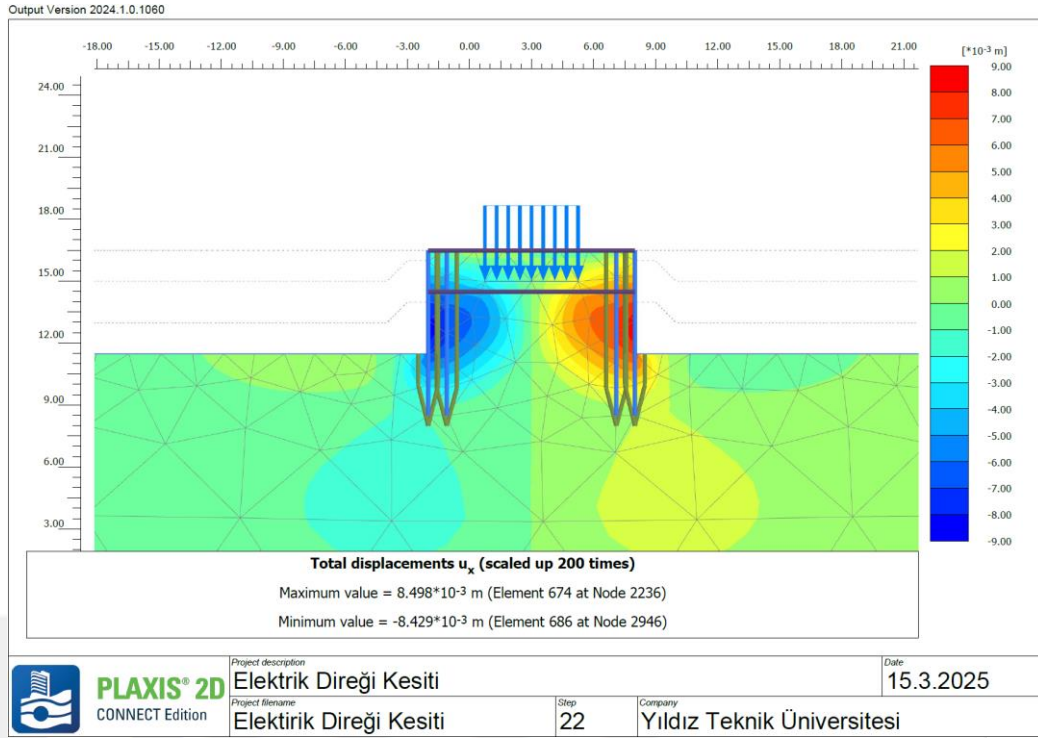
Plaxis 2D programında kurulan geoteknik model analizlerinde iksa sisteminde bir yatay destekleme elemanı ihtiyacı tespit edilmiştir. Tespit edilen bu ihtiyacın giderilmesi için, elektrik direğinin iki tarafında eş zamanlı olarak derin kazı yapılması gerekliliği ve iki taraf arasındaki açıklığın minimum miktarının öngermeli ankraj veya zemin çivisi imalatı yapılması için yeterli olmaması kriterleri göz önünde bulundurularak yatay destekleme elemanı olarak tie-back elemanlar seçilmiştir. Tie-back elemanlar çimento şerbeti ile oluşturulmuş bir kök bölgesine ihtiyaç duymaksızın iksa sistemi üzerine etkileyen yanal kuvvetlerin sistem bünyesinde yer alan düşey destekleme elemanlarına aktarımını çift taraflı olarak sağlaması özelliği ile inceleme alanının bu bölgesindeki geoteknik ihtiyacın karşılanmasında ön plana çıkmıştır. Bölgede teşkil edilecek olan çift taraflı kazıkların ara mesafeleri 9,7 m ile 14,3 m arasında değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple ilgili bölge için kurulan geoteknik modelde tie-back elemanlar uzunlukları ara mesafeye uygun, düşeyde $s = 1,8$ m aralıkla 2 sıra, yatayda ise ara mesafeleri $s = 1,8$ m olacak şekilde 4 adet toplam 8 adet olarak tasarıma dahil edilmiştir. Tie-back elemanların dahil edildiği derin kazı destekleme sisteminin geoteknik modeli

analiz edilmiş ve yatay-düşey destekleme elemanlarının üzerlerine etkiyen yükler altında göstermiş oldukları davranışlar ile kompozit iksa sisteminin davranışı incelenmiştir. İnceleme sonuçlarına ait diyagramlar aşağıdaki şekillerde sunulmuştur.



Şekil 4.33. Elektrik direği bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde deformasyon modeli

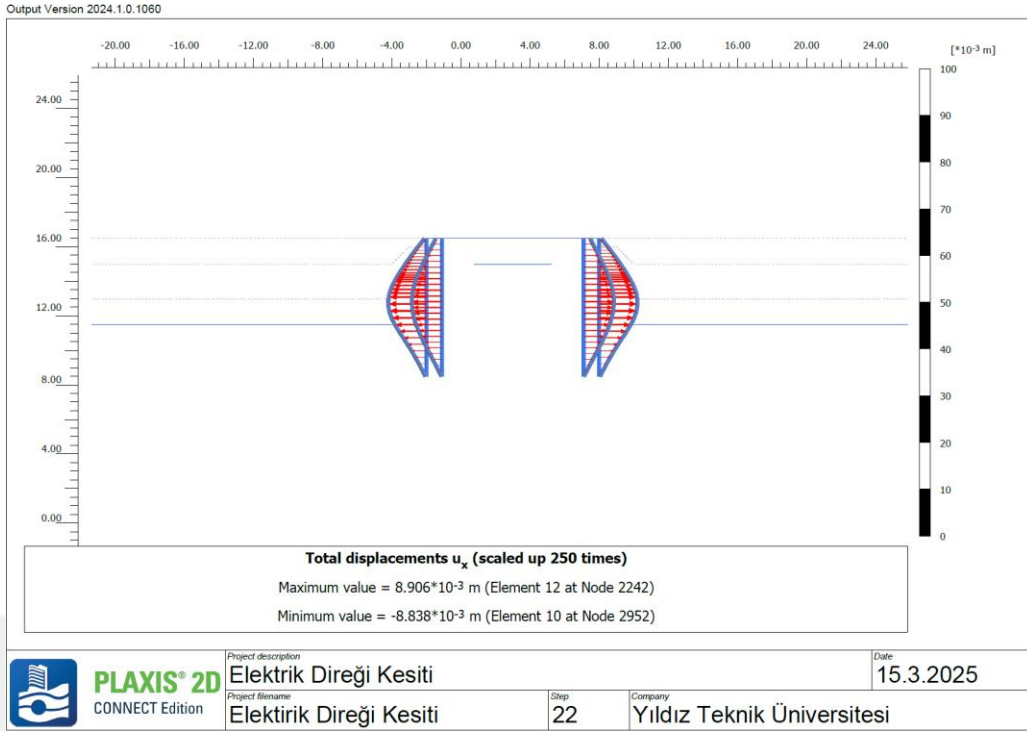
Elektrik direği bölgesi için tasarlanan ve analizleri gerçekleştirilen geoteknik modelde düşey destekleme elemanı olarak Ø30 mini kazıklar kullanılırken, yatay destekleme elemanı olarak 3x0.6” çelik halatlarla oluşturulan tie-back elemanlar kullanılmıştır. Yapılan analizlerin sonucunda elektrik direği etrafında yapılması planlanan derin kazıların, destekleme sistemlerinin efektif bir şekilde kullanılması ile nihai kazı kotuna kadar güvenli şekilde yapılabileceği tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarında gözlemlenen deformasyon modeli incelendiğinde mini kazıkların ve tie-back elemanların belirli oranlarda yatay deplasman gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak destekleme elemanları göstermiş olduğu bu deplasmanlar ile elektrik direğinin ve kazı aynasının yanal hareketini geçici olarak yeterli güvenlikte sağlayabileceği tespit edilmiştir. Geoteknik model için güvenlik katsayısının Plaxis 2D programında $FS = 2.73$ olduğu belirlenmiştir. Belirlenen güvenlik katsayısı ilgili yönetmelikte geçici sistemler için belirtilen $FS > 1,35$ değerini sağlamaktadır (Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği, Madde 2.9.3.4).



Şekil 4.34. Elektrik direği bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde oluşan maksimum yatay deplasman

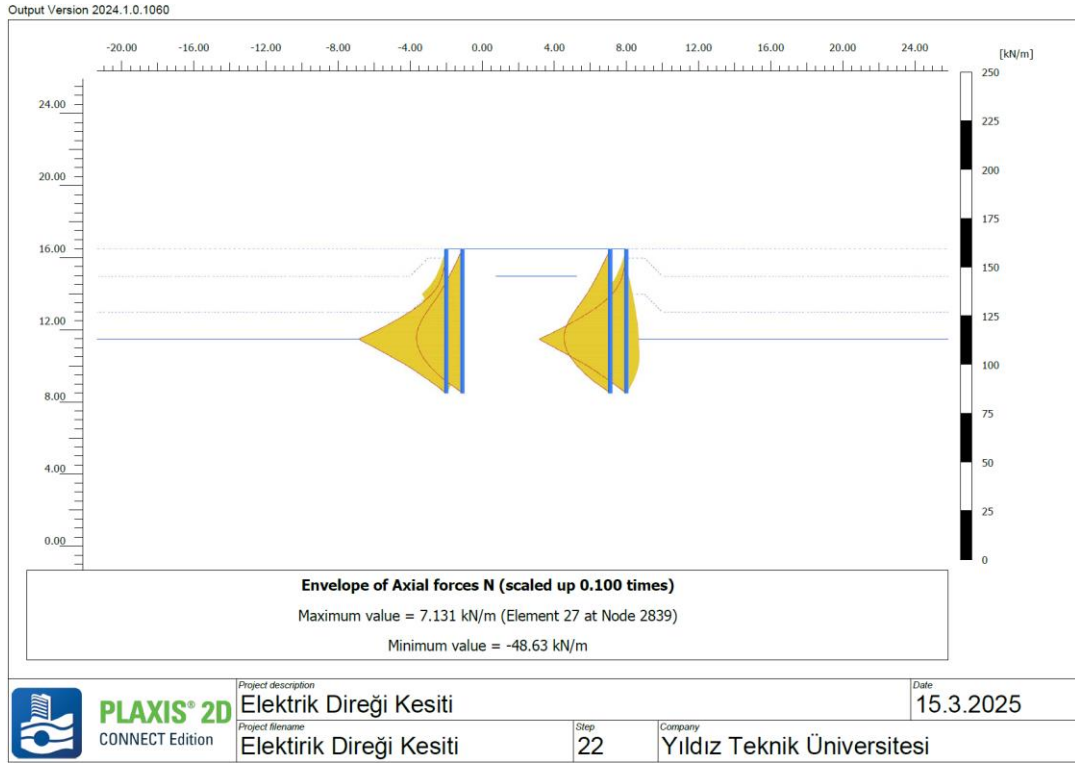
İksa sisteminde düşey destekleme elemanı olarak $\varnothing 30$, $L = 7.5$ m, $s = 0.45$ m mini kazıkların, yatay destekleme sisteminde ise $3 \times 0.6''$ $L = 10.00$ m çelik ankraj halatı demetinden oluşan tie-back elemanlar kullanılarak tasarlanan geoteknik modelin analizleri kapsamında geoteknik modelde oluşması muhtemel yatay deplasmanlar da incelenmiştir.

Bu kapsamda tasarlanan iksa sisteminin, üzerine etkiyen yanal itkileri taşıması aşamasında – yönde 8.5 mm yatay deplasman yapabileceği belirlenmiştir. Belirlenen maksimum deplasman miktarı kullanılarak hesaplanan maksimum yanal deplasman/kazı derinliği oranı ($\delta h/H = 0.085/6.00 = \%1.42$) değerinin Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2018’de yayınlanan Kazı Çukurlarının Desteklenmesi İle İlgili Uygulanacak Esaslar genelgesinde yatay destekli iksa sistemleri için belirtilen limit yanal deplasman/ kazı derinliği oranı değerinin ($\delta h/H = \%5$) altında kaldığı belirlenmiştir (Kazı Çukurlarının Desteklenmesi İle İlgili Uygulanacak Esaslar Genelgesi, Madde 1.15.19). Ayrıca belirlenen oran Kazı Destek Yapıları Yönetmeliğinin 2.12.7 numaralı maddesinde ankrajlı sistemler için belirtilen limit değer olan $\delta h/H = \%3$ değerini de sağlamaktadır.

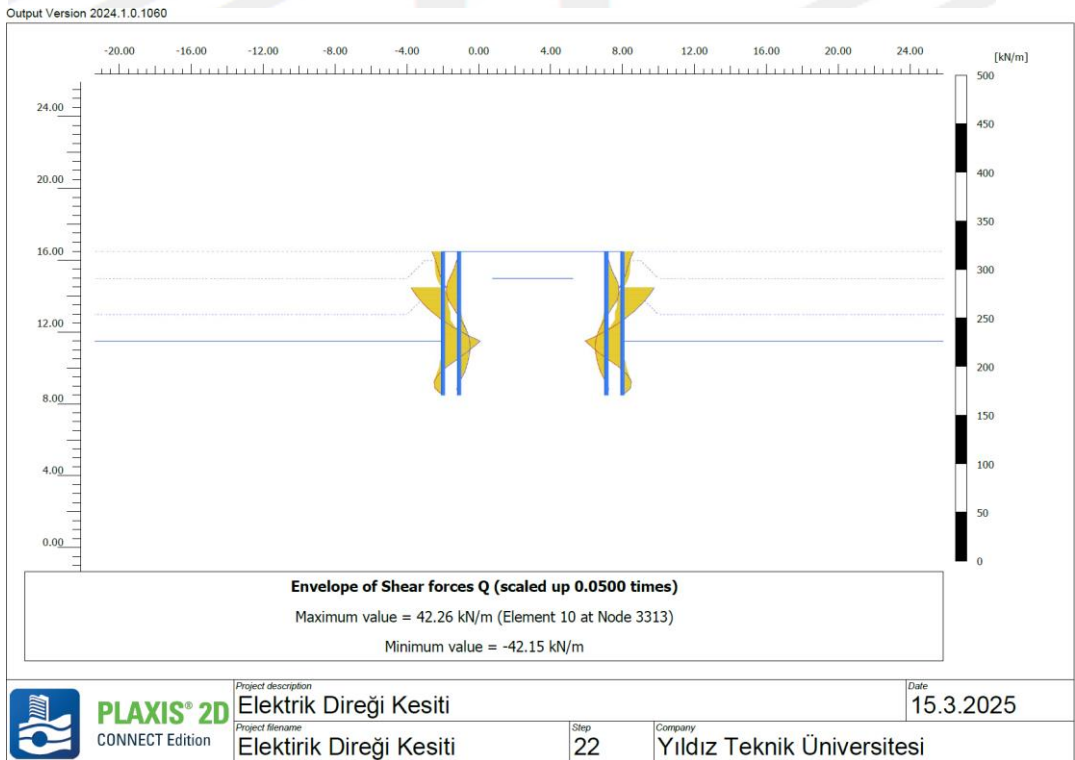


Şekil 4.35. Elektrik direği bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde mini kazıklarda beklenen maksimum yatay deplasman

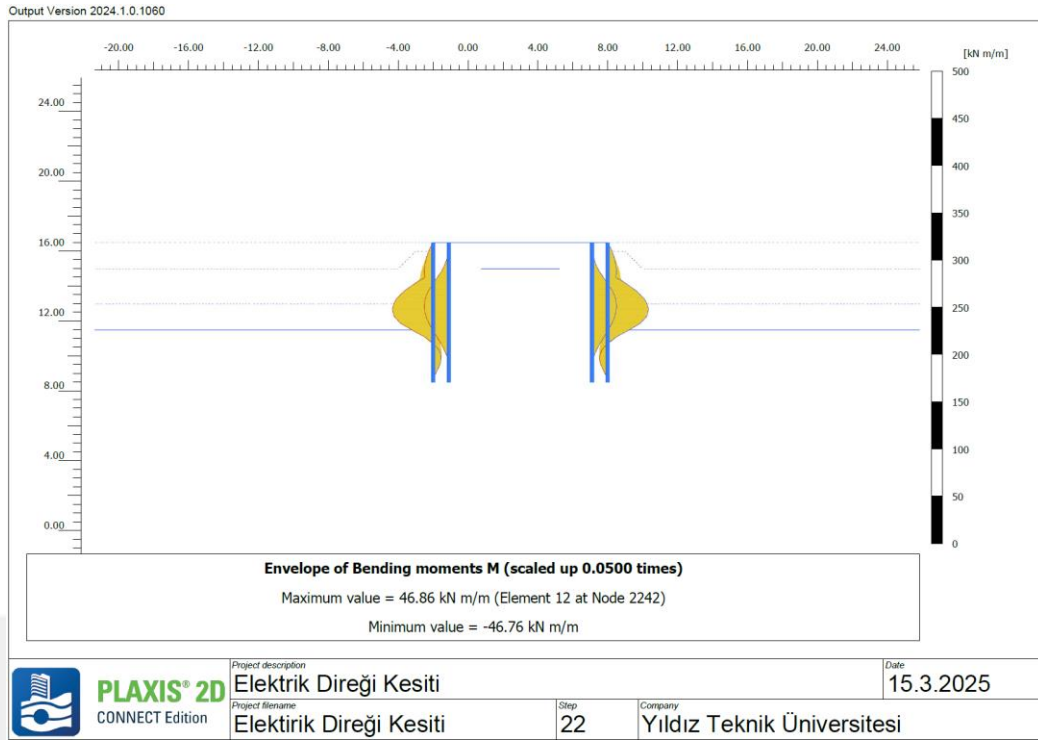
Yapılacak olan yeni yapılar için elektrik direği etrafında yapılması planlanan derin kazıların desteklenmesi ve kazıların elektrik direğinin yapısal stabilizasyonunun hasara neden olunmadan güvenle tamamlanabilmesi için ilgili bölgede mini kazıkların ve tie-back elemanların birlikte kullanıldığı bir iksa sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan geoteknik modelde mini kazıklar ve tie-back elemanlar ile oluşturulan iksa sisteminin derin kazı destekleme sistemi olarak efektif olarak kullanılabildiği tespit edilmiştir. Yapılan analizlerin sonuçlarının irdelenmesi kapsamında yatay ve düşey destekleme elemanlarının, yük aktarımı ve aktarılan yüklerin taşınması sırasında davranışlarının incelenmesi amacıyla mini kazıklara ve tie-back elemanlara etki eden tesir kuvvetlerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Yapılan değerlendirme sonucunda mini kazıklar üzerine etkiyen maksimum normal kuvvetin – yönde 21.90 kN, maksimum kesme kuvvetinin + yönde 19.00 kN ve maksimum eğilme momenti değerinin ise - yönde 21.10 kN*m olacağı öngörülmüştür. İki sıra olarak tasarlanan yatay destekleme elemanlarında ise birinci sıra tie-back elemanlar üzerine etkiyen maksimum normal kuvvet yaklaşık 22 kN, ikinci sıra tie-back elemanlar üzerine etkiyen maksimum normal kuvvetin yaklaşık 70 kN olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.36. Elektrik direği bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum normal kuvvet



Şekil 4.37. Elektrik direği bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkiyen maksimum kesme kuvveti



Şekil 4.38. Elektrik direği bölgesi tie-back elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkileyen maksimum eğilme moment

Structural element	Node	Local number	X [m]	Y [m]	N [kN]	N _{min} [10 ⁻³ kN]	N _{max} [kN]
NodeToNodeAnchor_1_1	2388	1	-2.000	16.500	22.133	-125.769	22.133
Element 1-1 (Node-to-node anchor)	1464	2	8.000	16.500	22.133	-125.769	22.133
NodeToNodeAnchor_2_1	1609	1	8.000	14.500	70.260	0.000	70.260
Element 2-2 (Node-to-node anchor)	2461	2	-2.000	14.500	70.260	0.000	70.260

Şekil 4.39. Tie-back elemanlar üzerine etkileyen maksimum normal kuvvet

Çalışma sahasının ilgili bölgesinde bulunan ve tahmini olarak zemine 100 kPa mertebesinde bir sürşarj yükü aktaran yüksek gerilim elektrik direğinin etrafında eş zamanlı olarak yapılması planlanan derin kazı süreçlerinin, düşey destekleme elemanı olarak 45 cm aralıklı Ø30 cm çapında 90 cm aks aralığına sahip 2 sıra ve $L = 7.5$ m mini kazıkların, yatay destekleme elemanı olarak ise 3x0.6" çelik halatlardan oluşan $L = 9.7 - 14.3$ m uzunluğunda $s = 1.8$ m aralığında tie-back elemanların kullanıldığı bir derin kazı destekleme sistemi ile güvenle tamamlanabileceği yapılan analizler sonucunda tespit edilmiştir. İlgili derin kazı destekleme sisteminde kullanılan tie-back elemanların yatay aralıklarının tayininin doğru şekilde yapıldığının irdelenebilmesi için çalışma sahasının bahse konu bölgesi için tasarlanan geoteknik modelde yalnızca tie-back yatay aralıkları değiştirilerek bir dizi analiz daha yapılmıştır. Yapılan ek analizlerde tie-back

aralıkları $s = 0.9$ m ve $s = 3.6$ m olarak revize edilmiş ve analiz sonuçları birbiri ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda tie-back yatay aralığının artması ile düşey destekleme elemanlarında meydana geleceği öngörülen maksimum yatay deplasman miktarında yaklaşık 0.4 cm artış gözlemlenmiş olup güvenlik katsayısı değerinde ise 0.15 mertebelerinde bir düşüş tespit edilmiştir. Düşey destekleme elemanlarına etki eden tesir kuvvetlerinde ise normal kuvvet değerinde negatif yönde 0.7 kN mertebelerinde bir artış gözlemlenirken, kesme kuvveti değeri yaklaşık olarak aynı kalmış, eğilme momenti değeri ise yaklaşık olarak 0.8 kN*m mertebelerinde artış göstermiştir. Yapılan ek analizlere ait sonuçları aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

Tablo 4.9. Elektrik direği bölgesi tie-back yatay aralığı değişiminin analiz sonuçlarına etkisi

Yatay Mesafe	Düşey Destekleme Elemanlarında Oluşan				Güvenlik Katsayısı (FS)
	N (kN)	V (kN)	M (kNm)	DL (cm)	
0,9	-21,7	19,4	20,5	0,7	2,85
1,8	-21,9	19,0	21,1	0,9	2,73
3,6	-22,4	19,1	21,3	1,1	2,70

Çalışma sahasının elektrik direği bölgesi için tasarlanan tie-back elemanlar ile güçlendirilmiş mini kazıklardan oluşan derin kazı destekleme sisteminin geoteknik model analizlerinde tie-back yatay aralığının değişiminin iksa sisteminin performansına etkisinin yanında düşey aralığının ve adedinin değişiminin de sistem üzerindeki etkisi gerçekleştirilen analizlerle irdelenmiştir. Bahse konu analizlerin bir arada değerlendirilmesi ile ilgili bölge için tasarlanan iksa sisteminin tasarım optimizasyonu sorgulanmıştır.

Tie-back elemanların düşey aralığının optimizasyonu için yapılan analizler kapsamında iksa sisteminin 1, 2 ve 3 sıra tie-back ile güçlendirilmesi ihtimalleri üzerinde durulmuştur. Analizlerde yalnızca tie-back düşey sırasının iksa sistemine etkisinin gözlemlenebilmesi için tüm analizlerde tie-back yatay aralığı $s = 1.8$ m olarak tayin edilmiştir. 1 sıra tie-back kullanılması durumunda tie-back iksa başlık kirişinde konumlandırılmış, 2 sıra tie-back için düşey aralık $s = 1.8$ m olarak tayin edilmiş ve 3 sıra tie-back için düşey aralık $s = 1.6$ m olarak belirlenmiştir. Farklı tie-back sıra adedi ve düşey aralıkları için gerçekleştirilen analizler sonucunda tie-back düşey aralığının değişmesi ile gözlemlenen güvenlik katsayısı değerinin 1.76

ve 3.17 mertebelerinde, düşey destekleme elemanlarında gerçekleşmesi muhtemel maksimum yatay deplasman miktarının ise 0.8 cm ile 1.2 cm mertebelerinde değiştiği gözlemlenmiştir. Düşey destekleme elemanlarına etkiyeceği öngörülen tesir kuvvetlerinin ise benzer oranlarda değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarına ait özet sonuçlar tablosu aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

Tablo 4.10. Elektrik direği bölgesi için farklı tie-back düşey aralığı ve adedi ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçları

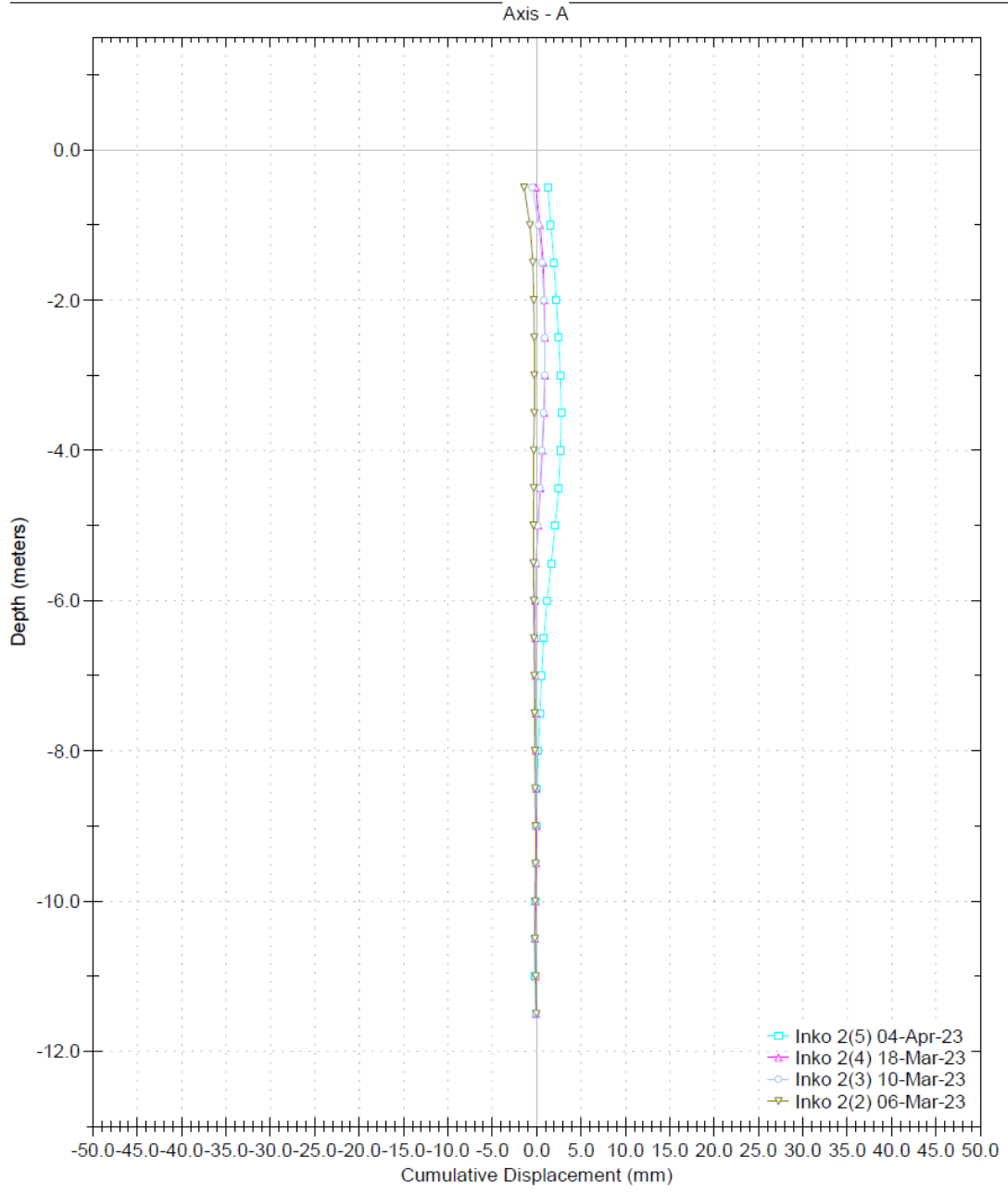
Düşey Sıra	Düşey Destekleme Elemanlarında Oluşan				Güvenlik Katsayısı (FS)
	N (kN)	V (kN)	M (kNm)	ΔL (cm)	
1	- 22,4	20,5	23,8	1,2	1,76
2	- 21,9	19,0	21,1	0,9	2,73
3	- 21,7	18,4	19,6	0,8	3,17

4.3.2.3 Elektrik Direği Bölgesi İksa Sistemi Aletsel Gözlem Verileri

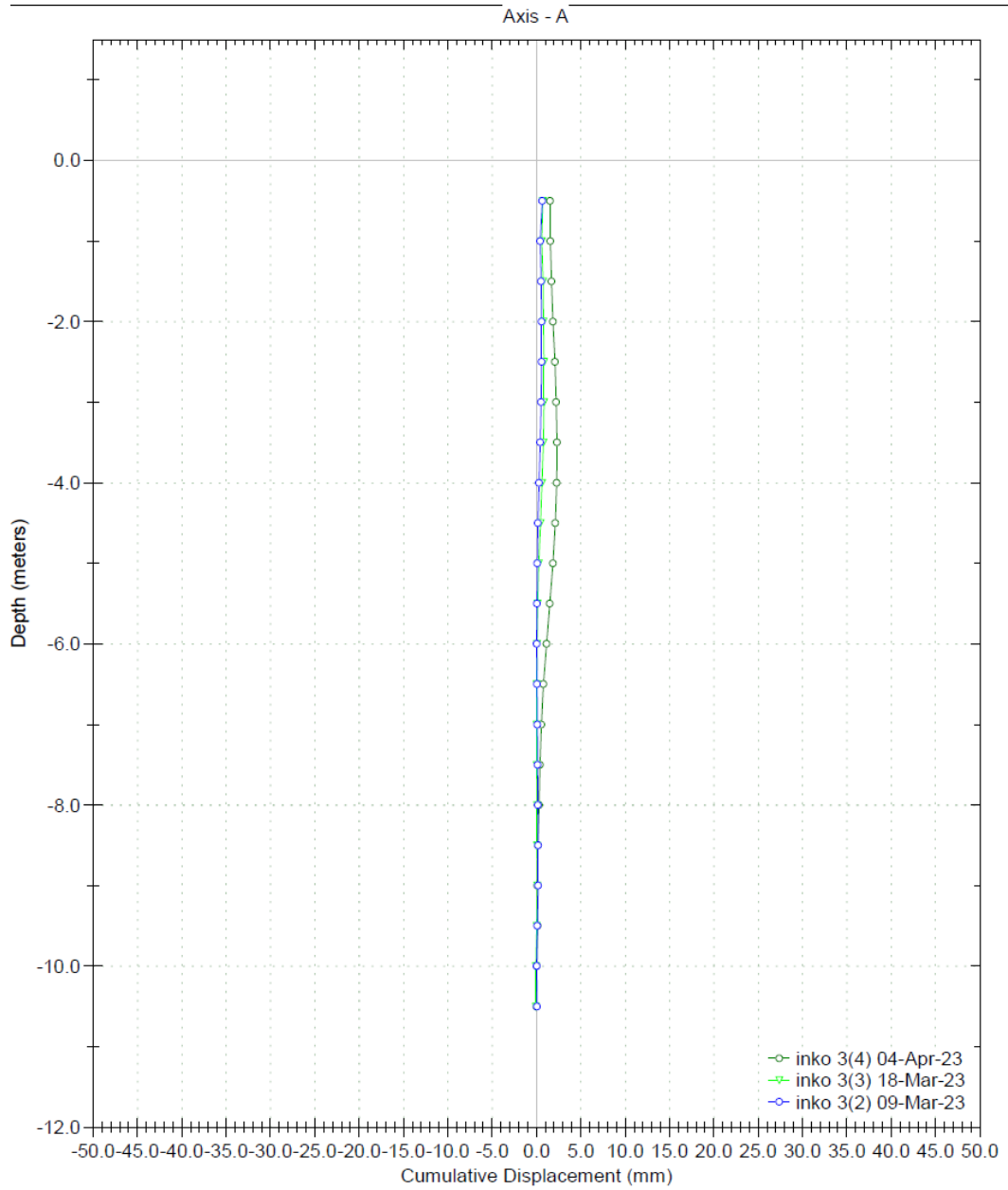
İnceleme alanında derin kazı destekleme sisteminin yatay destekleme elemanı olarak tie-back elemanların kullanıldığı bölgelerden biri de elektrik direği bölgesidir. İlgili bölgede bulunan yüksek gerilim hattı taşıyan elektrik direğinin etrafında yapılması planlanan derin kazıların desteklenmesi için tahsis edilen iksa sisteminde mini kazıklar düşey destekleme elemanı olarak tie-back elemanlar ise yatay destekleme elemanı olarak kullanılmıştır. Kurulan iksa sisteminin yük taşıyıcı düşey destekleme elemanı olan mini kazıkların derin kazı kademeleri boyunca yatay deplasmanlarının takibinin yapılması, yük aktarıcı yatay destekleme elemanı olarak kullanılan tie-back elemanların çalışma performanslarının değerlendirilmesi ve iksa sisteminde oluşması muhtemel herhangi bir göçme mekanizması hakkında erken bir öngöründe bulunulabilmesi için bu bölgede teşkil edilen iksa sisteminin karşılıklı 2 noktasına $L=10.5m$ boyunda inklinometreler yerleştirilmiştir. Yerleştirilen inklinometrelerden derin kazı işlemlerine başlanmadan önce sıfır okumaları alınmış ve derin kazı kademeleri süresince periyodik olarak okumalar gerçekleştirilmiştir. Nihai kazı kotuna kadar derin kazının tamamlandığı durumda alınan 2 numaralı inklinometre okumasında iksa sisteminde gözlemlenen yaklaşık deplasman 4 mm iken 3 numaralı inklinometrede ise gözlemlenen maksimum yatay deplasman değeri 3 mm olarak tespit edilmiştir. Tespit edilen maksimum yatay

deplasman miktarının kazı derinliğine oranı ($\delta h/H = 0.004/6.00 = \%0.67$) Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2018’de yayınlanan Kazı Çukurlarının Desteklenmesi ile İlgili Uygulanacak Esaslar genelgesinde yatay destekli iksa sistemleri için belirtilen limit yanal deplasman/ kazı derinliği oranı değerinin ($\delta h/H = \%5$) altında kaldığı belirlenmiştir (Kazı Çukurlarının Desteklenmesi ile İlgili Uygulanacak Esaslar Genelgesi, Madde 1.15.19). Ayrıca hem analizler sonucunda tespit edilen hem de sahada gerçekleşen maksimum yatay deplasman/kazı derinliği Kazı Destek Yapıları Yönetmeliğinin ilgili maddesinde belirtilen limit değeri sağladığı saptanmıştır.

Tahsis edilen iksa sisteminin geoteknik tasarımları aşamasında ise gözlenmesi öngörülen maksimum yatay deplasman miktarı 8.5 mm olarak belirlenmiştir. Gerçekleşen maksimum yatay deplasman miktarı tasarım analizlerinde öngörülen maksimum yatay deplasman miktarının yaklaşık 4.5 mm altında kaldığı gözlemlenmiştir. Gerçekleşen maksimum yatay deplasman miktarının geoteknik tasarımlarda öngörülen maksimum yatay deplasman miktarı ile büyük oranda benzerlik gösterdiği hesaplanmıştır. İnklinometrelerde gözlemlenen deformasyon modeli ise tasarım analizlerinde gerçekleşeceği öngörülen deformasyon modeli ile benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla tie-back ile güçlendirilmiş mini kazıklı iksa sisteminin çevre yapılar için herhangi bir yapısal deformasyona sebep olunmadan bahse konu derin kazının güvenle yapılabilmesinde hem tasarım aşamasında hem saha uygulamaları aşamasında başarılı olmuştur.



Şekil 4.40. Elektrik direği bölgesi 2 numaralı inklinometre ölçüm verileri



Şekil 4.41. Elektrik direği bölgesi 3 numaralı inklinometre ölçüm verileri

Aletsel gözlem verilerinin yanı sıra derin kazı kademeleri süresince saha gözlemleri de yapılmıştır. Yapılan saha gözlemlerinde esas amaç tie-back elemanların performansının irdelenmesi olmuştur. Tie-back performansı ise uygulanan öngerme yükü ile doğrusal bir etkileşim içerisindedir. Tie-back elemanlara uygulanan öngerme yükü ise derin kazı destekleme sisteminde gerçekleşmesi olası bir göçme mekanizmasının oluşumunda kritik bir etkiye sahiptir. Olması gerekenden fazla uygulanacak bir öngerme yükü çift taraflı düşey destekleme elemanlarını birbirine doğru çekip bir göçme mekanizması oluşturabilecekken, öngerme kuvvetinin yeterli miktardan az uygulanması da düşey destekleme elemanlarının yapı çukuruna

doğru yanal hareket göstererek bir göçme mekanizması oluşturmaya sebebiyet verecektir. Dolayısıyla öngerme yükünün doğru uygulanıp uygulanmadığı tie-back ile desteklenmiş bir derin kazı destekleme sisteminde büyük önem arz etmektedir. Öngerme yükünün denetimi ise tie-back olarak kullanılan çelik halatların üzerlerine uygulanan öngerme yükü altında göstermiş olduğu elastik uzama miktarının teorik elastik uzama miktarına oranı ile sağlanabilmektedir. Çelik halatların yük altında olması gerekenden az ya da fazla uzama göstermesi halinde öngerme yükünün doğru uygulanmadığı söylenebilir. Öngerme yükünün olası doğru uygulanamamasının sebebi yük uygulama esnasında yapılan teknik bir hatadan ya da öngerme krikosunda meydana gelen bir hatadan kaynaklı olabileceği gibi çelik halatta meydana gelen bir üretim hatasından da kaynaklanabilir. Tie-back elemanların üzerlerine uygulanan öngerme kuvveti altında göstermiş olduğu uzama miktarı ise elastik uzama formülü ile hesaplanabilmektedir. Elastik uzama formülü ise aşağıdaki denklemde paylaşılmıştır.

$$\frac{P * L}{E * A}$$

P: Uygulanan kuvvet (kN)

L: Eleman boyu (m)

E: Elemanı oluşturan malzemenin elastisite modülü (GPa)

A: Elemanın kesit alanı (m²)

İnceleme alanında kullanılan tie-back elemanlar için elastisite modülü 195.000 MPa ve toplam kesit alanı 420 mm² çelik halatlar kullanılmıştır. Geoteknik tasarım aşamalarında tayin edilen öngerme kuvveti ise saha uygulamalarında birebir uygulanmıştır. Elektrik direği bölgesinde tahsis edilen derin kazı destekleme sisteminde yer alan tie-back elemanların uygulanan ön germe yükleri altında göstermiş olduğu uzama miktarları ise aşağıdaki tabloda sunulmuştur. Tablodan da görülebileceği üzere tie-back elemanlar üzerlerine uygulanan 200 kN'luk öngerme yükü altında yaklaşık olarak elastik uzama miktarlarında uzama göstermiş ve maksimum elastik uzama miktarlarının altında kalmıştır. Hesaplanan ve saha uygulamalarında gerçekleşen uzama miktarları kıyaslandığında öngerme yükünün tie-back elemanlara tasarım analizlerinde belirlendiği miktarda doğru şekilde uygulandığı söylenebilir.

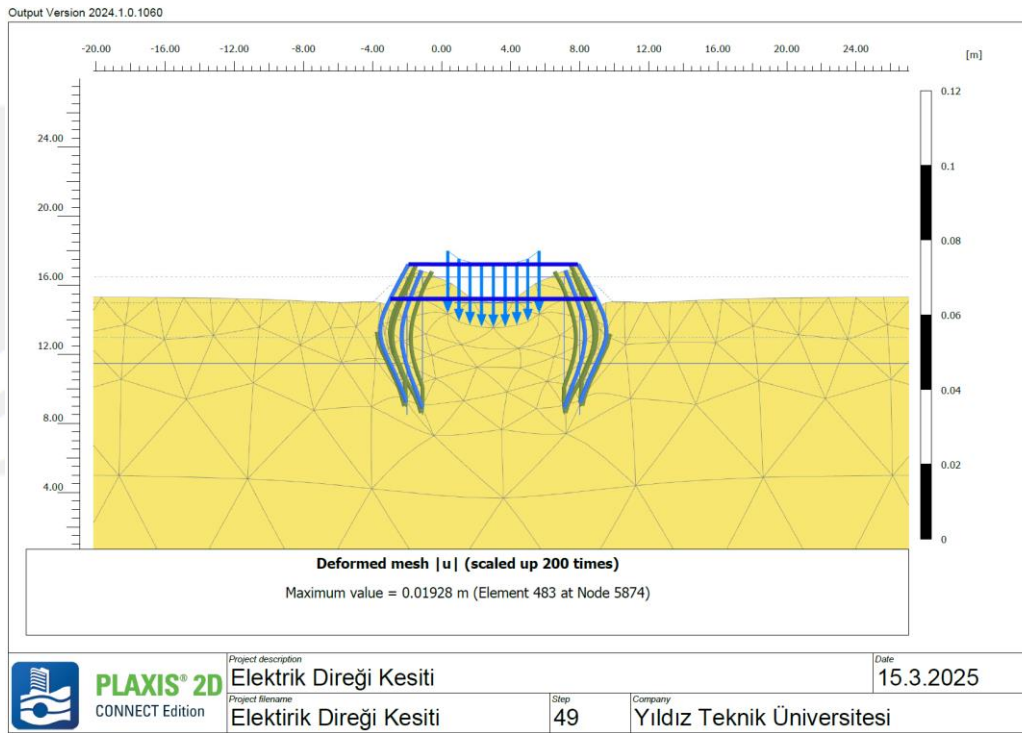
Tablo 4.11. Elektrik direği bölgesi tie-back uzama miktarları

Elektrik Direği Bölgesi Tie-back Öngerme Verileri				
Tie-back No	Tie-back Boyu (m)	Uzama Miktarı Limit Değeri (mm)	Teorik Uzama Miktarı (mm)	Gerçekleşen Uzama Miktarı (mm)
T1-1	9.70	55	24	29
T1-2	10.70	61	26	22
T1-3	13.70	78	33	21
T1-4	14.30	82	35	24
T2-1	9.70	55	24	24
T2-2	10.70	61	26	25
T2-3	13.70	78	33	26
T2-4	14.30	82	35	27

4.3.2.4 Elektrik Direği Bölgesi İksa Sistemi Alternatif Çözüm Yöntemi

Elektrik direği etrafında yapılacak derin kazıların kazı aynalarında oluşacak yanal toprak yüklerinin ve mevcut elektrik direği yapısından kaynaklanan sürşarj yüklerinin taşınması ve bahse konu derin kazının nihai kazı kotuna kadar güvenle yapılabilmesi için derin kazı destekleme sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemde düşey destekleme elemanı olarak mini kazıklar kullanırken yatay destekleme elemanı olarak tie-back elemanlar kullanılmıştır. Çelik halatların bir araya getirilmesi ile oluşan halat demetinden oluşan tie-back elemanlar yerine nervürlü inşaat donatıları ile oluşturulan tie-rod elemanlar boru köprüsünde olduğu gibi elektrik direği bölgesinde de alternatif bir çözüm yöntemi olarak değerlendirilmiştir. İki yatay destekleme elemanının karşılaştırılması yapıldığında tie-rod elemanlar gerek bulon takılacak uçlarına yiv açılması gerekliliği, gerekse kullanılan malzemelerin ağırlığı ve hantal oluşuyla tie-back elemanlar karşısında dezavantajlı bir konuma sahip olarak nitelendirilmiştir. Ayrıca tie-back elemanların daha ekonomik oluşu da tercih edilme nedenleri arasındadır. Ancak saha uygulanması düşünülen tie-back elemanlar ile donatılmış mini kazıklı iksa sisteminin verimliliğinin ve fiyat/performans oranının kontrol edilebilmesi amacıyla tie-rod elemanlar ile donatılmış mini kazıklı iksa sisteminin geoteknik modeli de Plaxis 2D programında analiz edilmiş ve sonuçlar tie-back elemanlı geoteknik modelin analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır. İki farklı modelin analizlerinin kıyaslanması sonucunda tie-back ve rod arasında kayda değer bir fark

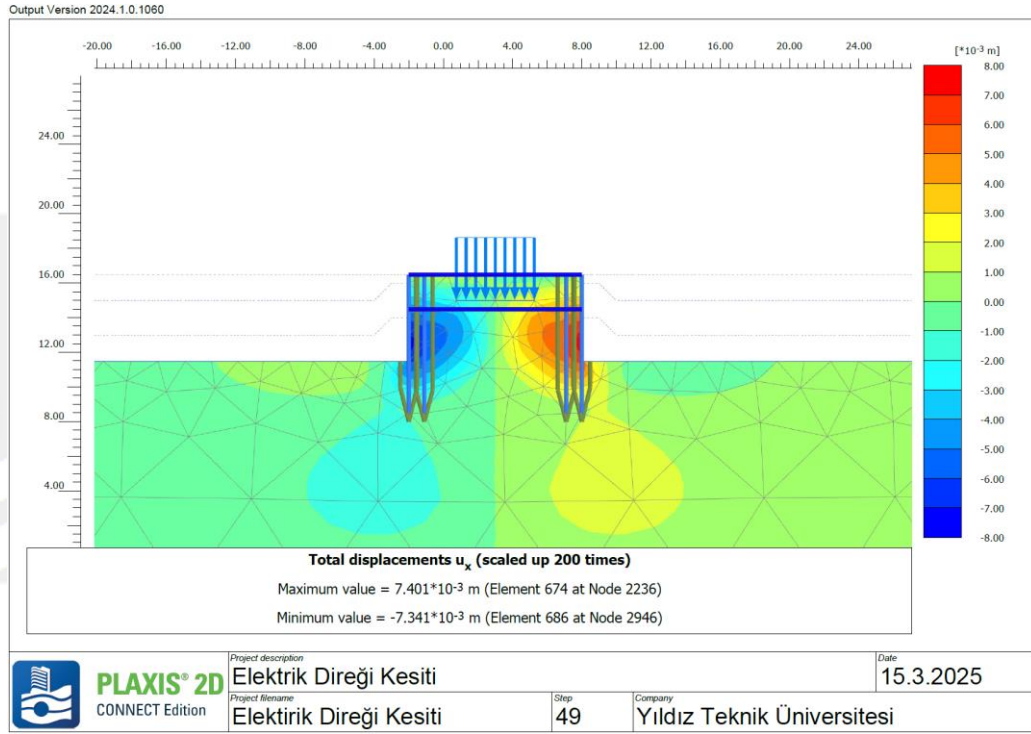
gözlemlenmemiş olup tie-back elemanlar sağlamış oldukları avantajlar ile saha uygulamaları için daha verimli olarak değerlendirilmiş ve uygulama projelerinde kullanılmak üzere tercih edilmiştir. Yatay destekleme elemanı olarak tie-rod, düşey destekleme elemanı olarak ise mini kazık kullanılan iksa sistemi modelinin geoteknik analizinin sonuçları tüm modelin birlikte göstermiş olduğu davranış, düşey destekleme elemanlarında oluşacağı tahmin edilen yatay deplasman miktarı ve yatay/düşey destekleme elemanlarına etki edeceği öngörülen tesir kuvvetlerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda değerlendirmelerin yapıldığı diyagramlar aşağıdaki şekillerde sunulmuştur.



Şekil 4.42. Elektrik direği bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde deformasyon modeli

İnceleme alanının elektrik direği bölgesi için alternatif bir çözüm yöntemi olarak değerlendirilen tie-rod elemanlar ile donatılmış mini kazıklı iksa sisteminin geoteknik modelinin analizlerinin değerlendirilmesi kapsamında ilk olarak deformasyon modeli incelenmiştir. Deformasyon modeli tie-back elemanlı geoteknik model ile büyük benzerliğe sahip iken düşey destekleme elemanlarında gözlemlenen deformasyon miktarının tie-back elemanlı geoteknik modele göre daha az olduğu kanaatine varılmıştır. Tie-rod elemanlarda tie-back elemanlar gibi iksa sistemi üzerine etkiyen yanal yüklerin düşey destekleme elemanlarına

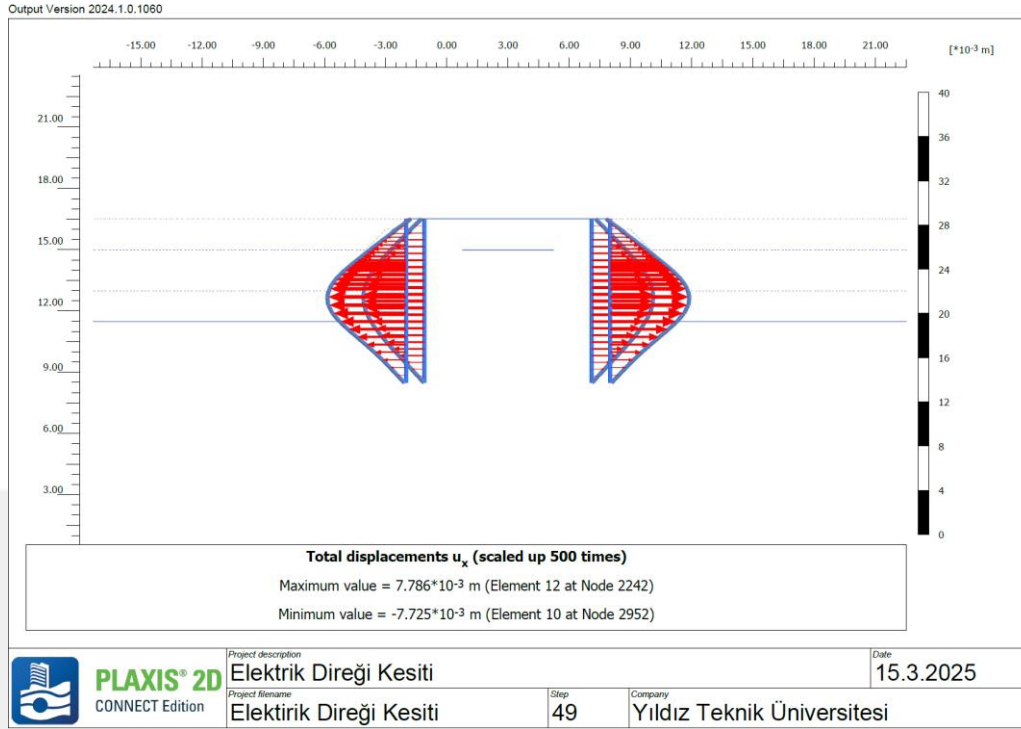
aktarılmasında efektif rol oynamıştır. Oynadıkları bu rol ile derin kazının nihai kazı kotuna kadar güvenle yapılabilmesini sağlamışlardır. Tie-rod elemanlı geoteknik modelin analizleri kapsamında Plaxis programında nihai kazı kotunda modelin güvenlik katsayısı $FS = 2,86$ olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan güvenlik katsayısı değeri tie-back elemanlı geoteknik modelde olduğu gibi ilgili yönetmelikte geçici derin kazı destekleme sistemleri için belirtilen $FS > 1.35$ değerini karşılamaktadır (Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği, Madde 2.9.3.4).



Şekil 4.43. Elektrik direği bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde oluşan maksimum yatay deplasman

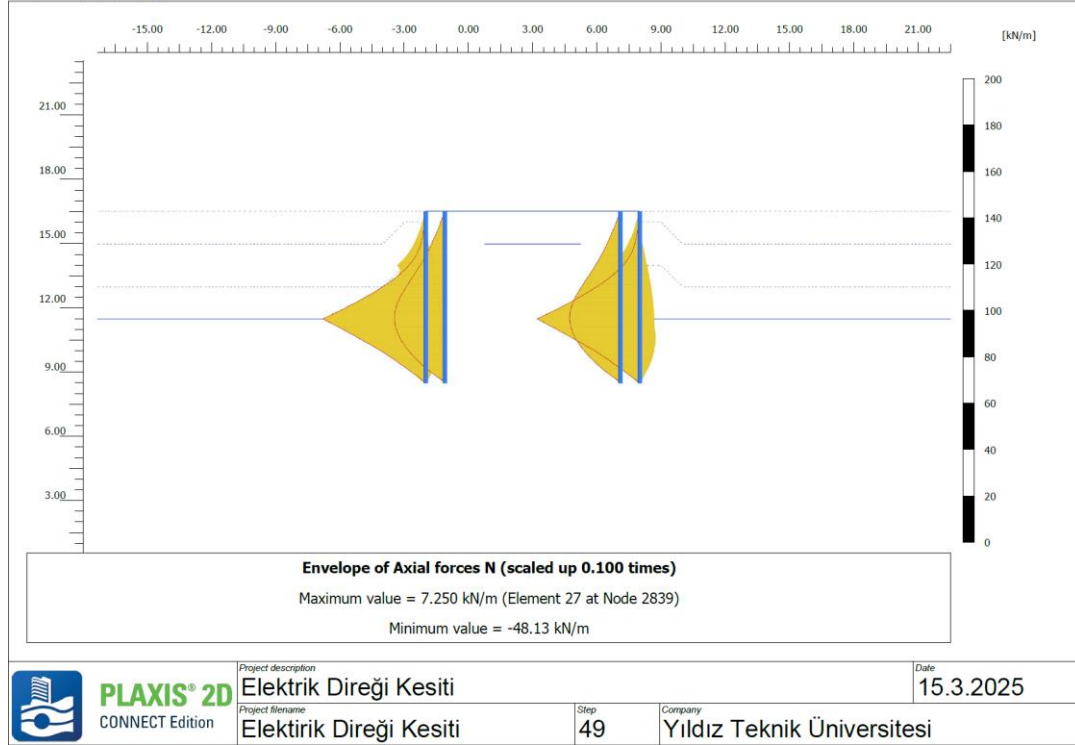
İnceleme alanının elektrik direği bölgesinde yapılması planlanan derin kazı destekleme sistemi tasarımları için alternatif bir çözüm yöntemi olarak düşünülen yatay destekleme elemanı olarak tie-rod elemanların kullanıldığı geoteknik modelin analiz sonuçlarının incelenmesi esnasında düşey destekleme elemanlarında oluşacağı öngörülen maksimum yatay deplasman miktarı da değerlendirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizler sonucunda iksa sisteminde oluşması olası yatay deplasmanın değerinin 7.5 mm mertebelerinde olduğu belirlenmiştir. Belirlenen maksimum yatay deplasman değeri ile tie-back kullanılarak oluşturulan geoteknik modelde gözlemlenen maksimum yatay deplasman değeri arasında yaklaşık 1 mm fark olmakla birlikte bu fark ilgili kazı derinliği için ihmal edilebilir

bir fark olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak iki modelde de gözlemlenen maksimum yatay deplasman değerinin neredeyse eşit olduğu söylenebilir.

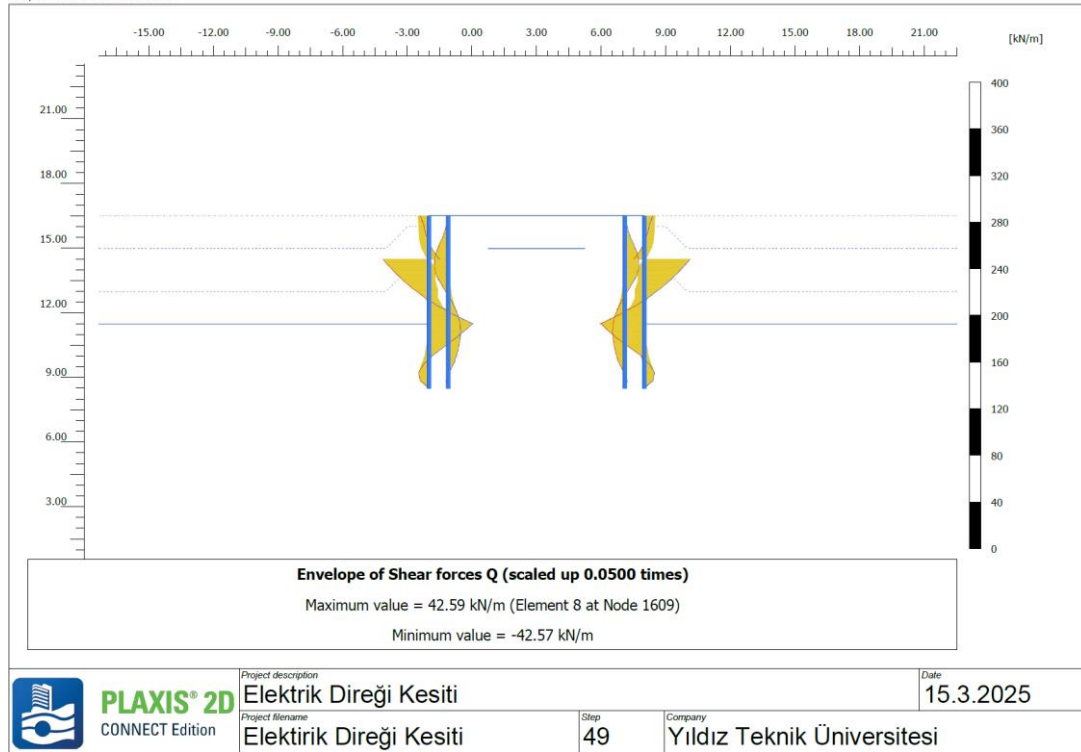


Şekil 4.44. Elektrik direği bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde mini kazıklarda beklenen maksimum yatay deplasman

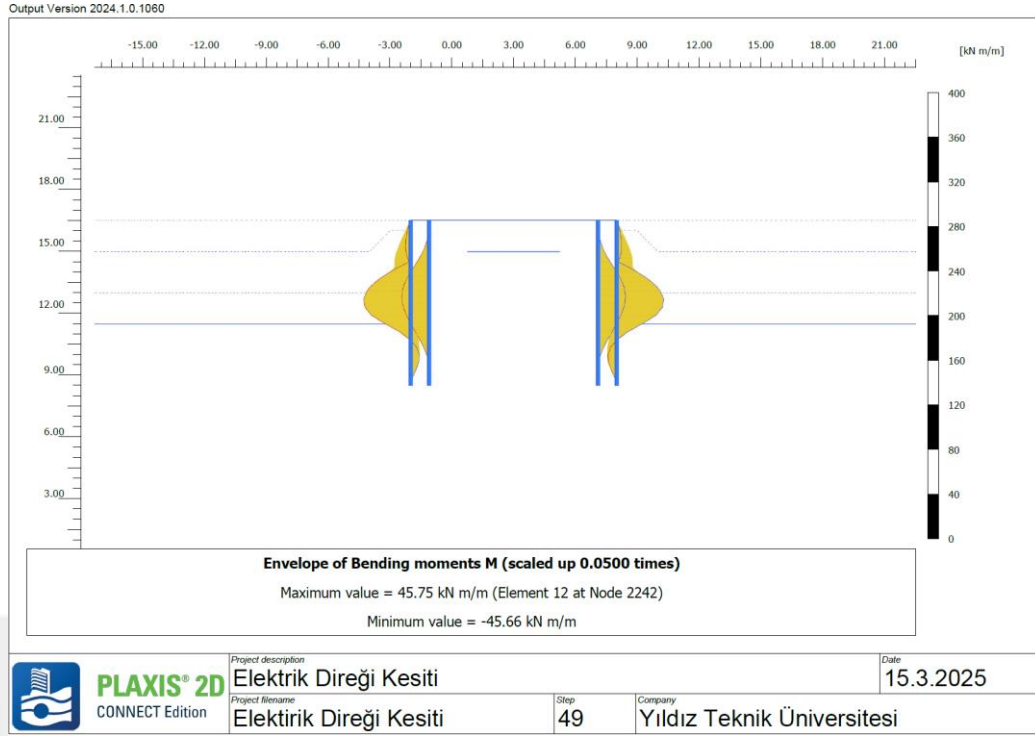
Alternatif bir iksa sistemi seçeneği olarak değerlendirilen tie-rod elemanlar ile desteklenmiş mini kazıkların derin kazı destekleme sistemi olarak kullanılması esasına dayanan geoteknik modelin analiz sonuçlarında düşey destekleme elemanlarının davranışlarının irdelenebilmesi için üzerlerine etkiyen tesir kuvvetleri de incelenmiştir. Ayrıca tie-rod elemanların da yük aktarımı aşamasında verimliliklerinin ve malzeme davranışlarının tayin edilebilmesi için tie-rod elemanlar üzerine etkiyen normal kuvvetin maksimum değerleri her ki kademe için ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan incelemeler doğrultusunda derin kazı işlemlerinin nihai kazı kotuna kadar tamamlandığı durumda mini kazıklara etkiyen maksimum normal kuvvetin – yönde 21.6 kN, maksimum kesme kuvvetinin + yönde 19.2 kN ve maksimum eğilme momenti değerinin + yönde 20.6 kN*m olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yatay destekleme elemanı olarak yük aktarımında kullanılan tie-rod elemanlara etkiyen maksimum normal kuvvet değerinin 1. Sıradakiler için yaklaşık 19 kN mertebelerinde 2. Sıradakiler için yaklaşık 78 kN mertebelerinde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.45. Elektrik direği bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkileyen maksimum normal kuvvet



Şekil 4.46. Elektrik direği bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkileyen maksimum kesme kuvveti



Şekil 4.47. Elektrik direği bölgesi tie-rod elemanlı geoteknik modelde mini kazıklara etkileyen maksimum eğilme momenti

Structural element	Node	Local number	X [m]	Y [m]	N [kN]	N _{min} [10 ⁻³ kN]	N _{max} [kN]
NodeToNodeAnchor_1_1	2388	1	-2.000	16.500	19.393	-137.618	19.423
Element 1-1 (Node-to-node anchor)	1464	2	8.000	16.500	19.393	-137.618	19.423
NodeToNodeAnchor_2_1	1609	1	8.000	14.500	78.155	0.000	78.155
Element 2-2 (Node-to-node anchor)	2461	2	-2.000	14.500	78.155	0.000	78.155

Şekil 4.48. Tie-rod elemanlar üzerine etkileyen maksimum normal kuvvet

Günümüzde teşkil edilen derin kazı destekleme sistemlerinde zemin çivisi tasarım ve imalat süreçlerinde sıklıkla Ø32 nervürlü inşaat donatısı tercih edilmektedir. Yukarıda elektrik direği bölgesi için tasarlanan derin kazı destekleme sistemi için oluşturulan alternatif çözüm metodunda Ø32 nervürlü inşaat donatısı ile oluşturulan tie-rod elemanların yatay destekleme elemanı olarak iksa sistemine dahil edildiği durum için gerçekleştirilmiştir. Donatı çapının oluşturulan iksa sistemine etkisinin irdelenebilmesi için tasarlanan aynı geoteknik model Ø26 ve Ø40 nervürlü inşaat donatısı ile oluşturulan tie-rod elemanlar kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca farklı donatı çaplarına sahip tie-rod elemanlar ile analiz edilen geoteknik modellerde gözlemlenen sonuçların birbiri ile ve tie-back elemanlı geoteknik modelin analizlerinde gözlemlenen sonuçlar ile kıyaslanması yapılmıştır. Kıyaslama sonucunda tie-rod elemanda kullanılan donatı çapının artması ile

güvenlik katsayısının 0.03, maksimum yatay deplasman değerinin 0.2 cm mertebelerinde azaldığı gözlemlenmiştir. Derin kazı destekleme elemanı olarak tie-back kullanılan geoteknik analiz sonuçları ile farklı ebatlarda donatı kullanılarak oluşturulan tie-rod elemanlar kullanılarak tasarlanan geoteknik modellerin analiz sonuçları kıyaslandığında büyük oranda benzerlik tespit edilmiştir. Tie-back kullanılan geoteknik modelin analiz sonuçlarına en yakın sonuçlar ise Ø26 donatı kullanılarak oluşturulan tie-rod elemanların yatay destekleme elemanı olarak kullandığı geoteknik model analiz sonuçları olmuştur. Farklı donatı ebatları kullanılarak oluşturulan tie-rod elemanların kullanıldığı ve çelik halat kullanılarak oluşturulan tie-back elemanların kullanıldığı geoteknik analizlerinde düşey destekleme elemanlarında gözlemlenen tesir kuvvetleri ve maksimum yatay deplasman miktarları ile modellerin göçmeye karşı güvenlik katsayıları aşağıdaki tabloda sunulmuştur. Ayrıca 3 farklı donatı ebatı kullanılarak tasarlanan geoteknik modellerde gözlemlenen sonuçlar ve tie-back kullanılarak gerçekleştirilen analizde gözlemlenen sonuçlar tabloda sunulmuştur.

Tablo 4.12. Elektrik direği bölgesi farklı donatı çaplarında tie-rod elemanlı sistem analiz sonuçları ve tie-back elemanlı sistem analiz sonuçları

Donatı Çapı (Ø)	Düşey Destekleme Elemanlarında Oluşan				Güvenlik Katsayısı (FS)
	N _{max} (kN)	V _{max} (kN)	M _{max} (kNm)	ΔL (mm)	
26	-21,8	18,7	21,2	9.0	2.86
32	-21,6	19,2	20,6	8.0	2.86
40	-21,6	21,4	20,1	7.0	2.83
Çelik Halat	-21,9	19,0	21,1	8.5	2.73

5.1 Sonuçlar ve Tespitler

Bu çalışmada, Yalova'da bulunan bir çalışma sahasında yapılması planlanan yapının derin kazı süreçlerinde yaşanan özel bir geoteknik problem ve bu problem için uygulanan alternatif mühendislik çözümü incelenmiştir. İnceleme kapsamında sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan Plaxis 2D programıyla sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sayısal analizler doğrultusunda öngörülen iksa sistemi performansı, saha uygulamalarında safhasında geoteknik aletsel gözlem (inklinometre) yöntemleri ile toplanan veriler ile kıyaslanmıştır. Ayrıca ilgili yatay destekleme elemanlarına uygulanan öngerme kuvvetleri altında gerçekleştirmiş oldukları uzama değerleri de literatürde yer alan malzeme parametrelerine dayalı maksimum uzama limitleri kullanılarak kıyaslanmıştır. Bu bağlamda teşkil edilen iksa sistemi performansının detaylı şekilde irdelenmesine ek olarak olası alternatif mühendislik çözümleri de değerlendirmeler kapsamında incelenmiştir.

Çalışma sahasının içinde bünyesinde hizmet verdiği tesis için kritik öneme sahip olan ve sahanın ortasından geçmesiyle yapılması planlanan yapıyı 2 parçaya ayıran bir boru köprüsü ve aynı sahanın başka bir bölgesinde iksa hattıyla çıkışan, bölgenin elektrik dağıtımında önemli paya sahip olan bir yüksek gerilim elektrik direği mevcuttur. Mevcut olan bu yapıların etrafında eş zamanlı olarak yapılması gereken derin kazı faaliyetleri süresince yapıların herhangi bir hasara maruz kalmadan kazıların tamamlanabilmesi için uygun bir iksa sistemi tasarımı gerekliliği doğmuştur. Uygun iksa sistemi seçimi aşamasında, bahse konu alanların çok dar olması ve ilgili yapıların çelik taşıyıcı sistemlerinin beraberinde getirmiş olduğu hassasiyet sebebiyle bu bölgelerde klasik öngermeli ankraj ya da zemin çivisi gibi yatay destekleme elemanlarının kullanılamayacağı kanaatine varılmıştır. Bu nedenle çalışma sahasının ilgili bölgeleri için daha önce benzer problemlerin yaşandığı sahalarda sağlamış olduğu efektif mühendislik çözümleri ile ön plana çıkan ve tie-back adı verilen yatay destekleme elemanları ile özel bir derin kazı

destekleme sistemin tasarımı ve saha uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Tasarımı ve saha uygulamaları gerçekleştirilen tie-back elemanlı derin kazı destekleme sistemi ile çalışma sahasının ilgili bölgelerinde yapılması planlanan derin kazı faaliyetleri hedeflenen temel altı kotlarına kadar yönetmelik ve şartnamelerce belirlenen güvenlik faktörleri doğrultusunda tamamlanabilmiştir. Bu bağlamda teşkil edilen iksa sisteminin performans analizleri gerçekleştirilmiştir. İksa sistemleri için tasarım aşamalarında belirli kriterler doğrultusunda öngörülen performans parametreleri, uygulama aşamasında gerçekleştirilen geoteknik aletsel gözlem enstrümantasyonları ile toplanan performans verileri ile kıyaslandığında öngörülerin büyük oranda doğruluk payına sahip olduğu kanaatine varılmıştır. Dolayısıyla tasarımı sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen ve yatay destekleme elemanı olarak tie-back elemanların kullanıldığı örnek bir iksa sistemi sayesinde tasarım aşamasında belirlenen güvenlik faktörlerini sağlanarak, derin kazıların çalışma sahasında hedeflenen temel altı kotuna kadar tamamlanabileceği saptanmıştır. Tasarım ve saha verilerinin kıyaslanması sonucu tie-back elemanlı derin kazı destekleme sisteminin performans analizi için aşağıdaki sonuçlar tespit edilmiştir:

- Çalışma sahasının farklı iki bölgesini temsil eden geoteknik modellerde sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen sayısal analizler neticesinde farklı boy ve açıklıklarda Ø30 mini kazıklar ve 3x0.6” çelik halat ile oluşturulan tie-back elemanlar kullanılarak teşkil edilen iksa sistemleri için güvenlik faktörleri Plaxis 2D programında hesaplanmıştır. Elektrik direği bölgesinde teşkil edilen iksa sistemi için güvenlik katsayısı değeri nihai kazı durumunda $FS = 2.93$ iken, boru köprüsü bölgesinde yer alan iksa sistemi için bu değer nihai kazı durumunda $FS = 3.13$ olarak tespit edilmiştir. Tespit edilen güvenlik katsayısı değerleri Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği’nde geçici destekleme sistemleri için belirtilen $FS = 1.35$ değerini sağlamaktadır (Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği, Madde 2.9.3.4). Dolayısıyla çalışma sahasının iki farklı bölgesinde yer alacak derin kazı destekleme sistemlerinin tasarımı kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizler için ilgili yönetmelikçe belirlenen güvenlik katsayısı değeri ($FS = 1.35$) tie-back elemanlar kullanılarak sağlanmıştır.

- Tie-back elemanlı iksa sistemleri için gerçekleştirilen performans analizleri kapsamında bir diğer parametre düşey destekleme elemanlarında gerçekleşeceği öngörülen maksimum yatay deplasman miktarıdır. Kazı aynalarında gerçekleşecek yatay deplasmanların sınırlandırılması amacıyla teşkil edilen derin kazı destekleme sistemleri için bu parametre kritik bir öneme sahiptir. İlgili iksa sistemleri için 3x0.6" çelik halattan oluşan tie-back elemanlar kullanılmış ayrıca sistem optimizasyonunun sağlanması için alternatif bir yatay destekleme elemanı olan ve Ø26, Ø32 ve Ø40 nervürlü donatılardan oluşan tie-rod elemanlar kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Uygulama alanında teşkil edilen iksa sistemlerinde tie-back elemanlar kullanılmış ve düşey destekleme elemanlarında meydana gelen maksimum yatay deplasmanlar geoteknik bir aletsel gözlem enstrümantasyonu olan inklinometreler ile gözlem altında tutulmuştur. Aşağıdaki tabloda analizler sonucunda düşey destekleme elemanlarında meydana geleceği öngörülen maksimum yatay deplasman değerleri ve sahada teşkil edilen iksa sistemi bünyesinde yer alan düşey destekleme elemanlarında meydana gelen maksimum yatay deplasman değerleri sunulmuştur.

Tablo 5.1. Gerçekleşen ve öngörülen maksimum deplasman miktarları

Çalışma Alanı	Gerçekleşen Maksimum Deplasman (mm)	Yatay Destekleme Elemanı	Kullanılan Materyal	Öngörülen Maksimum Deplasman (mm)
Boru Köprüsü	14.00	Tie-back	3x0.6" çelik halat	15.00
		Tie-rod	Ø26 donatı	24.80
			Ø32 donatı	23.70
			Ø40 donatı	14.80
Elektrik Direği	4.00	Tie-back	3x0.6" çelik halat	8.50
		Tie-rod	Ø26 donatı	9.00
			Ø32 donatı	8.00
			Ø40 donatı	7.00

- Geliştirilen iksa sistemlerinin sayısal analizleri kapsamında tie-back performansının derinlemesine irdelenebilmesi için yatay ve düşey aralığının değişiminin iksa sistemine etkisi de sorgulanmıştır. Çalışma alanının 2

farklı bölgesini temsilen tasarımı gerçekleştirilen geoteknik modeller üzerinde farklı yatay ve düşey açıklıklarına sahip tie-back ve tie-rod elemanlı iksa sistemlerinin sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına ait özet tablo aşağıda sunulmuştur.

Tablo 5.2. Tie-back yatay-düşey aralık değişiminin iksa sistemine etkisi

Çalışma Alanı	Yatay Destekleme Elemanı	Yatay Aralık (m)	Düşey Aralık (m)	Düşey Destekleme Elemanlarında Oluşan				Güvenlik Katsayısı (FS)
				N (kN)	V (kN)	M (kNm)	DL (mm)	
Boru Köprüsü	Tie-back	0.9	2	-60.1	-55.0	28.6	8.4	3.33
		1.8		-48.2	-33.3	22.9	14.8	3.14
		3.6		-46.0	-26.9	26.2	20.5	2.98
		1.8	1	-46.7	-34.6	34.9	19.6	2.16
			2	-48.2	-33.3	22.9	14.8	3.14
			3	-40.9	-40.2	29.8	13.9	3.23
		Elektrik Direği	Tie-back	0.9	2	-21.7	19.4	20.5
1.8	21.9			19.0		21.1	9.0	2.7
3.6	-22.4			19.1		21.3	11.0	2.7
1.8	1			-22.4	20.5	23.8	12.0	1.8
	2			-21.9	19.0	21.1	9.0	2.7
	3			-21.7	18.4	19.6	8.0	3.2

- Tie-back elemanlar kullanılarak teşkil edilen örnek iksa sistemlerinde yatay destekleme elemanlarının performansı doğrudan öngerme yükü ile ilişkilidir. Optimum miktardan fazla ya da az öngerme yükü neticesinde iksa sisteminde olası göçme mekanizmalarının yaşanması kaçınılmazdır. Öngerme yükünün kontrolü ise uygulanan yük altında elemanların gösterdiği davranışlar ile kontrol edilebilmektedir. Yükleme sonrasında göstermiş oldukları uzama miktarları elemanlarda mevcut herhangi bir yapısal kusurun kontrolünü gerçekleştirirken aynı zamanda yük miktarının doğruluğunu da teyit etmektedir. Çalışma sahasında tie-back elemanların yatay destekleme elemanı olarak kullanıldığı iksa sistemlerinde öngerme kuvvetlerinin uygulanması safhasında yatay destekleme elemanlarında gözlemlenen uzama miktarları kaydedilmiş ve akabinde kaydedilen değerler literatürde yer alan elastik uzama limitleri doğrultusunda değerlendirilmiştir. Tasarım aşamasında sahada kullanılacak tie-back elemanlar için belirlenen 200 kN öngerme yükü saha çalışmaları

aşamasında belirtilen miktarda uygulanmıştır. Uygulanan öngerme yükleri altında tie-back elemanlarda gözlemlenen uzama miktarları ve elastik uzama limitleri aşağıdaki tabloda detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 5.3. Tie-back elemanlar için hesaplanan ve gerçekleşen uzama miktarları

Boru Köprüsü Bölgesi Tie-back Öngerme Uygulaması Uzama Verileri									
Tie-back No	Tie-back Boyu (m)	Uzama Miktarı Limit Değeri (mm)	Teorik Uzama Miktarı (mm)	Gerçekleşen Uzama Miktarı (mm)	Tie-back No	Tie-back Boyu (m)	Uzama Miktarı Limit Değeri (mm)	Teorik Uzama Miktarı (mm)	Gerçekleşen Uzama Miktarı (mm)
T-1	5.6	31	14	13	T-21	5.6	31	14	18
T-2	5.6	31	14	13	T-22	5.6	31	14	25
T-3	5.6	31	14	13	T-23	5.6	31	14	16
T-4	5.6	31	14	12	T-24	5.6	31	14	21
T-5	5.6	31	14	18	T-25	5.6	31	14	26
T-6	5.6	31	14	15	T-26	5.6	31	14	18
T-7	5.6	31	14	13	T-27	5.6	31	14	21
T-8	5.6	31	14	14	T-28	5.6	31	14	18
T-9	5.6	31	14	14	T-29	5.6	31	14	18
T-10	5.6	31	14	14	T-30	5.6	31	14	21
T-11	5.6	31	14	18	T-31	5.6	31	14	20
T-12	5.6	31	14	22	T-32	5.6	31	14	18
T-13	5.6	31	14	11	T-33	5.6	31	14	19
T-14	5.6	31	14	15	T-34	5.6	31	14	20
T-15	5.6	31	14	19	T-35	5.6	31	14	24
T-16	5.6	31	14	11	T-36	5.6	31	14	17
T-17	5.6	31	14	8	T-37	5.6	31	14	19
T-18	5.6	31	14	6	T-38	5.6	31	14	20
T-19	5.6	31	14	19	T-39	5.6	31	14	20
T-20	5.6	31	14	16	T-40	5.6	31	14	30
Elektrik Direği Bölgesi Tie-back Öngerme Uygulaması Uzama Verileri									
Tie-back No	Tie-back Boyu (m)	Uzama Miktarı Limit Değeri (mm)	Teorik Uzama Miktarı (mm)	Gerçekleşen Uzama Miktarı (mm)	Tie-back No	Tie-back Boyu (m)	Uzama Miktarı Limit Değeri (mm)	Teorik Uzama Miktarı (mm)	Gerçekleşen Uzama Miktarı (mm)
T1-1	9.7	55	24	29	T2-1	9.7	55	24	24
T1-2	10.7	61	26	22	T2-2	10.7	61	26	25
T1-3	13.7	78	33	21	T2-3	13.7	78	33	26
T1-4	14.3	82	35	24	T2-4	14.3	82	35	27

Yalova’da bulunan örnek çalışma sahasında tie-back elemanlar kullanılarak geoteknik modelleri kurulan ve sonlu elemanlar yöntemiyle Plaxis 2D yazılımında sayısal analizleri gerçekleştirilen derin kazı destekleme sistemlerinin

performansları belirtilen kriterler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Değerlendirme neticesinde örnek sahada olduğu gibi klasik yatay destekleme elemanlarının tercih edilemediği bölgelerde tie-back elemanların tercih edilmesinin hem tasarım hem de saha uygulamaları aşamalarında efektif bir mühendislik çözümü sunduğu kanaatine varılmıştır. Performans analizinde göz önünde bulundurulan yazılım üzerinde tespit edilen güvenlik katsayısı değeri, düşey destekleme elemanlarında oluşan maksimum yatay deplasman değeri, bu değer in kazı derinliğine oranı, düşey destekleme elemanları üzerine etkiyen tesir kuvvetleri, yatay destekleme elemanlarına uygulanan öngerme kuvveti, elemanların bu kuvvet altında göstermiş olduğu davranış biçimi gibi faktörlerin tamamında güncel yönetmelik, şartname ve literatürde belirtilen maksimum limit değerler sağlanmıştır. Bu sebeple yatay destekleme elemanı olarak çimento şerbetiyle oluşturulmuş bir kök boyuna ihtiyaç duymayan tie-back elemanların kullanımı mevcut bir yapı etrafında eş zamanlı olarak derin kazı faaliyetlerinin hedeflenen güvenlikle tamamlanmasında kritik rol oynamıştır.

Tie-back elemanlar, özellikle örnek çalışma sahasında olduğu gibi özel geoteknik problemlerin çözümüne ihtiyaç duyulduğu durumlarda klasik yatay destekleme elemanlarına güçlü bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadır. Tie-back elemanların yatay destekleme elemanı olarak kullanılacağı bir derin kazı destekleme sisteminin sayısal analizleri ve saha uygulamaları safhalarında aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmesi tie-back performansının belirtilen efektiflikte kullanılabilmesi ve derin kazı faaliyetlerinin hem inşası planlanan yapıya ait yapı çukuru hem de çevre yapılar için herhangi bir tehlike arz etmeden güvenle hedeflenen temel alt kotuna kadar tamamlanabilmesi için kritik önem arz etmektedir:

- Tie-backli bir derin kazı sisteminin tasarımında ilk faktör şüphesiz ki malzeme seçimidir. İksa sisteminin konumlandırılacağı bölge geometrik olarak detaylı şekilde incelenmeli, çevre yapıların sürşarj yükleri ve zemin tabakalarından iksa aynasına etkiyeceği düşünülen aktif toprak basınçları doğru hesaplanmalıdır. Mevcut zemin etüt çalışmalarının sonuçları da geometrik incelemelerle birlikte gerçekleştirilmeli, bölge iyi analiz edilmelidir. Özetle tie-back bir yatay destekleme elemanıdır ve yatay destekleme elemanlarının iksa sistemlerindeki görevi yük aktarımını

sağlamaktadır. Doğru tie-back tasarımı için öncelikle aktarılması gereken yanal itki kuvvetleri doğru tayin edilmelidir.

- Malzeme seçiminde başka bir önemli husus tie-back elemanlar için kullanılacak çelik halat adedi ve öngerme yüküdür. Taşınması gerek yük tie-back elemanlar için belirlenecek öngerme kuvvetini doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda doğru yük hesabı beraberinde doğru öngerme yükü tayinini de getirecektir. Öngerme yükünün belirlenmesi ile beraber çelik halat malzeme parametreleri göz önünde bulundurularak halat adedi tayin edilmelidir. Gereğinden az halat kullanılması halinde çelik halatların elastik uzama limitlerini aşarak plastik davranışlar göstermesi kaçınılmaz olacak ve tie-back elemanların yük aktarım kapasitesi azalarak olası bir göçme mekanizmasının gerçekleşmesi ihtimali artacaktır.
- Tie-back elemanlar iksa sistemi bünyesinde yatay yük aktarıcı destekleme elemanı olarak görev almaktadır. Bu bağlamda yük aktarımını, iksa sistemi üzerine etkileyen yanal itkileri kuşak kirişleri ile düşey destekleme elemanları arasında homojen olarak dağıtarak sağlamaktadırlar. Dolayısıyla tasarımı gerçekleştirilen bir tie-back için öngerme yükünün önemli olduğu kadar bu yükü düşey destekleme elemanlarına aktarırken kullanmış olduğu ekipmanlarda kritik öneme sahiptir. Bu noktada tie-back elemanda tercih edilecek olan kafa, plaka ve kuşak kirişi gibi elemanlar yük aktarımının doğru ve hedeflenen performansta gerçekleşmesi için büyük bir önem arz etmektedir.
- Gerçekleştirilen sayısal analizlerde sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan Plaxis 2D programı tercih edilmiştir. Zemin parametrelerinin yazılıma tanımlanması için ise Hardening Soil modeli kullanılmıştır. Hardening Soil modeli içerisinde ise yavaş yükleme koşullarını temsil etmesi amacıyla drenajlı sistem tercih edilmiştir. Çalışma sahasında geoteknik aletsel gözlem yöntemleri ile elde edilen veriler ile Hardening Soil modeli ile tanımlanan zeminlerin program üzerinde öngörülen davranışı tutarlılık göstermektedir. Dolayısıyla zaman içerisinde yavaş yüklemelere maruz kalacağı düşünülen örnek bir iksa sistemi tasarımında Hardening Soil modeli ve drenajlı sistem tercih edilerek gerçeğe en yakın zemin davranışları öngörülebilmektedir.

- Tasarım safhasında dikkat edilmesi gereken başka bir hususta tie-rod ve tie-back kıyaslanmasıdır. Örnek çalışma sahası için gerçekleştirilen sayısal analizlerinde her iki yatay destekleme elemanı da incelenmiş ve analiz sonuçlarının birbiri ile büyük oranda benzerlik gösterdiği saptanmıştır. İnceleme alanındaki koşullar için tie-back elemanlar tercih edilmiş olsa da benzer geoteknik problemlerin yaşandığı başka bir çalışma sahasında tie-back elemanlar yerine tie-rod elemanların tercih edilmesi ile proje süresi ve maliyeti optimize edilebilecektir. Bu sebeple çalışma prensipleri ve sayısal analiz sonuçları olarak birbirine yüksek oranda benzerlik gösteren bu iki yatay destekleme elemanın birbiri yerine tercih edilmesi durumu mutlaka tasarım aşamasında değerlendirilmelidir.
- Yatay destekleme elemanı olarak tie-back elemanların tercih edildiği iksa sistemlerinde örnek çalışma sahasında olduğu gibi geoteknik aletsel gözlem yöntemlerinin kullanılması büyük öneme sahiptir. Düzenli periyotlar halinde gerçekleştirilen aletsel gözlemler ile iksa sisteminde oluşan yatay deplasman miktarları takip edilebilmekte, kümülatif deplasman grafikleri ile iksa sisteminin zaman içinde davranışı kontrol edilebilmekte, yatay destekleme elemanlarının sisteme olan katkısı irdelenebilmekte ve en önemlisi göçme mekanizmaları gözlemlenerek olası bir yapısal hasar öncesinde önlemler alınabilmektedir. Dolayısıyla çalışma kapsamında anlatılan örnek inceleme alanında olduğu gibi inklinometre vb. aletsel gözlem yöntemlerinin efektif kullanımı iksa sistemi performansının irdelenebilmesi için büyük önem arz etmektedir.
- Tie-back uygulamasında eleman performansının gözlemlenebileceği başka bir nokta ise uygulanan öngerme yükleri altında elemanların göstermiş olduğu davranış biçimi ve uzama miktarlarıdır. 200 kN öngerme yükü altında örnek çalışma sahasında teşkil edilen tie-back elemanların göstermiş olduğu uzama miktarı verileri kaydedilmiş ve akabinde literatürde yer alan malzeme özelliklerine bağlı elastik uzama limitleri doğrultusunda teorik ve maksimum uzama miktarlarına göre değerlendirilmiştir. İnceleme alanında imalatı tamamlanan tie-back elemanların tamamında teorik ve gerçekleşen uzama miktarları arasında %10-15 bir fark bulunmakla birlikte tamamı elastik uzama limit değerinin altında uzama miktarları göstermiştir. Dolayısıyla tie-back elemanların uygulanan yük altında göstermiş olduğu

davranışların elastik bölgede kaldığı bulgusu saptanmıştır. Ancak öngerme yükünün olası yanlış uygulanması ya da yanlış tayin edilmesi durumunda elemanlarda gözlemlenecek olan plastik davranışlar sonucu tie-back elemanlar yük aktarım elemanı olarak çalışamayacaktır. Bu bağlamda teşkil edilen iksa sistemin olası bir göçme mekanizmasının oluşması kaçınılmaz olacaktır.

- Tie-back uygulamasında dikkat edilmesi gereken bir faktörde şüphesiz ki çalışma platformunun doğru hazırlanması ve delgi açısıdır. Doğru platformda doğru yatay ve düşey delgi açısı ayarlanmaması halinde makinenin delgi takımı arka sırada bulunan düşey destekleme elemanlarına denk gelerek yapısal hasarlara sebebiyet verilme tehlikesi ile karşı karşıya kalınacaktır. İksa sistemi bünyesinde yatay yüklerin taşınmasında en büyük pay sahibi olan düşey destekleme elemanlarında oluşacak olası bir süreksizlik durumunda ilgili düşey destekleme elemanı servis ömrüne devam edemeyecek ve o bölgedeki yük çevre elemanlar tarafından taşınmak durumunda kalınacaktır. Bu bağlamda gerekenden fazla yük taşımak durumunda kalan çevre düşey destekleme elemanları tasarım kapasitelerinin üzerinde yüklere maruz kalacak ve limit değerlerin üzerinde tesir kuvvetleri ile karşı karşıya kalabileceklerdir.

Bu çalışmada Yalova'da bulunan örnek bir çalışma sahasında yapılacak yapıların derin kazı faaliyetlerinin sürdürülebilmesi için yatay destekleme elemanı olarak tie-back elemanların tercih edildiği derin kazı destekleme sistemlerinin performansı incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan Plaxis 2D programında tasarımı gerçekleştirilen temsili geoteknik modeller üzerinde ilgili bölgede bulunan zeminlerin mühendislik özellikleri ve kullanılacak malzemelerin karakteristik özellikleri tanımlanarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler doğrultusunda saha uygulamaları tamamlanmıştır. Saha uygulamaları aşamasında geoteknik enstrümantasyonlar ile toplanan aletsel gözlem ve saha gözlemlerinde toplanan veriler kaydedilerek iksa performansı gözlem altında tutulmuştur. Çalışma kapsamında belirtilen koşullar ve hususlara dikkat edilerek teşkil edilen bir iksa sisteminde tie-back elemanların yatay destekleme elemanı olarak kullanılması ile birlikte çalışma sahasının ilgili bölgelerindeki derin kazı faaliyetleri başarı ile tamamlanmıştır. Nihai temel alt kotuna kadar derin kazı

faaliyetlerinin hedeflenen güvenlik limitleri altında tamamlanması ardından iş geliştirme süreçlerinde elde edilen sayısal analiz verileri ile saha uygulamaları aşamasında toplanan aletsel gözlem verileri kıyaslanarak ilgili derin kazı destekleme sistemlerinin performansı irdelenmiştir. Kıyaslama sonucunda elde edilen bilgiler neticesinde tie-back elemanların iksa sistemine sağlamış olduğu katkı ispatlanmış ve gerçekleşen iksa sistemi performansının sayısal analizlerde öngörülen performansla büyük oranda tutarlılık içerisinde olduğu tespit edilmiştir.



- Alptekin, I. (2020). *1999 Gölçük depreminin Avcılar bölgesine etkisi ve Avcılar bölgesinde uygulanan zemin iyileştirme yöntemleri* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/>
- Aslan, V. (2017). *Derin kazıların sayısal analizi için parametrik bir çalışma* (Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/>
- Azeiteiro, R. J. N., Skopal, V., Clifford, F., & Widfeldt, M. (2019). The combined use of geostructures and ground improvement to the rehabilitation of existing quay walls. In *Proceedings of the XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE 2019): Geotechnical Engineering – Foundation of the Future* (Paper No. 0513). Reykjavik, Iceland: Icelandic Geotechnical Society (IGS). <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0513>
- Bahar, M. (2009). *Diyafram duvarlı iksa perdelerinde ölçülen ve tahmin edilen deplasmanların karşılaştırılması* (Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/>
- Bell, A. L. (1915). The stability of earth walls. *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 199(1915), 107–132. <https://doi.org/10.1680/imotp.1915.16512>
- Bowles, J. E. (1966). *Foundation analysis and design*. McGraw-Hill.
- Brzakala, W., & Baca, M. (n.d.). The measurement and control of building vibrations in course of sheet pile wall and Franki pile driving. Wroclaw University of Science and Technology, Faculty of Civil Engineering.
- Cai, Z. Y., Li, J. L., Xu, G. M., & Liu, Y. X. (2009). Studies on development of an innovative type sheet-pile-bulkhead. In M. Hamza, K. Y. Yong, & F. Bouassida (Eds.), *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (pp. 712–715). IOS Press. <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-712>
- Çağlar, M. S. (2024). *Kuyu temel tasarımlarına yönelik yer değiştirme kontrolünün sonlu elemanlar ve yapay sinir ağları yöntemleriyle karşılaştırma analizi* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Gedik Üniversitesi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/>
- Çelik, S. (2017). Tünel kazısından dolayı zemin yüzeyindeki oturmaların Mohr-Coulomb ve pekleşen zemin modelleriyle nümerik tahminlerinin karşılaştırılması [Araştırma makalesi]. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(4), 95–102. <https://doi.org/10.21597/jist.2017.202>
- Çınar, A. (2010). *Trakya formasyonunda yapılan öngermeli ankrajlı derin kazıların sonlu elemanlar ile modellenmesi* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik

- Üniversitesi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/>
- Çopan, M. (2009). *Derin kazılı iksa sisteminin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi: İstanbul – BASF Teknopark örneği* (Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/>
- Das, B. M. (2011). *Principles of foundation engineering* (7th ed., SI ed.). Cengage Learning.
- Dayıoğlu, M. (2010). *Derin kazıların incelenmesi ve derin kazı uygulaması üzerine bir örnek: Harbiye Kongre Merkezi derin temel kazısı* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/>
- Deckner, F., Viking, K., & Hintze, S. (2017). Wave patterns in the ground: Case studies related to vibratory sheet pile driving. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(6), 2863–2878. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0285-x>
- Düzceer, R., Gökalp, A., & Yörük, R. (2004, April). Artificial island construction in North Caspian Sea, Kazakhstan. In *Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. Missouri University of Science and Technology. <https://scholarsmine.mst.edu/icchge/5icchge/session05/24>
- Ebrahimian, B. (2014). *Performance-based design of geotechnical structures: From theory to practice* (Doktora tezi). University of California, Los Angeles.
- Elgamal, A. (2021). A numerical assessment of jetty side support system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 727(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/727/1/012022>
- Galal, E. M., Youssef, D. E., & Tolba, E. R. (2022). A study of sheet pile quay wall rehabilitation methods. *Port Said Engineering Research Journal*, 26(3), 37–45. <https://doi.org/10.21608/pserj.2022.131369.1174>
- Gökçek, H. Ç. (2014). *Derin kazılar nedeni ile oluşan deplasmanların ileriye ve geriye doğru analizi* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/>
- Grosch, J. J., & Al-Yahyai, K. S. (1988, June). Anchored bulkhead failure on the Arabian Gulf. In *Second International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering* (pp. 1201–1207). Missouri University of Science and Technology. <https://scholarsmine.mst.edu/icchge/2icchge/2icchge-session6/6>
- Ha, L. T. D., & Do, B. Q. (2017). Creating a program for calculating horizontal deformations in depth using inclinometer sensors. *Journal of Mining and Earth Sciences*, 58(6), 43–52. Hanoi, Vietnam: Hanoi University of Mining and Geology.
- Iai, S. (2001). Seismic performance-based design of port structures and simulation techniques. In PIANC (Ed.), *Seismic design guidelines for port structures* (pp. 1–12). Balkema.
- Jalili, M., Habibi, M., Roodi, G. H., & AbadiMarand, M. (2009, June). Various parallel quay walls with shore: Kish commercial port case history. In

- Performance-based design in earthquake geotechnical engineering: From case history to practice* (Tsukuba, Japan, June 15–19, 2009).
- Jørgensen, M. A., & Hansen, A. (2016). Geotechnical engineering for a new container terminal in Lomé, Togo, West Africa. In *Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting: Challenges in Nordic Geotechnic* (pp. 879–888). Reykjavik, Iceland: Icelandic Geotechnical Society (IGS).
- Karaosmanoğlu, A. (2018). *Derin kazıda farklı iksa sistemlerinin kullanımı* (Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/>
- Khanal, S. (2013). *Backcalculation of plate loading tests using PLAXIS 2D and the Hardening Soil Model* (Master's thesis). Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering.
- Kocaman, M. (2008). *Zemin etütlerinde geoteknik ve jeofizik yöntemlerin kullanılması ve dikkat edilmesi gereken hususlar* (Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/>
- Köse, H. K. (2011). *Derin kazılar ve derin kazı uygulamasına bir örnek: Hilton Garden Inn Sütlüce Derin Temel Kazısı* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/>
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.
- Morikawa, Y., & Kikuchi, Y. (2009). Model tests on reinforcement effect of an anchorage work added to the existing anchored sheet pile wall. In M. Hamza et al. (Eds.), *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (pp. 1469–1472). IOS Press. <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-1469>
- Obrzud, R. F., & Truty, A. (2018). *The Hardening Soil Model – A practical guidebook* (Z Soil.PC 100701 report, rev. 21.10.2018). Zace Services Ltd. <https://www.zsoil.com>
- Ou, C.-Y. (2006). *Deep excavation: Theory and practice*. Taylor & Francis.
- Öçal Kişisel Arşivi, 2022
- Premalatha, P. V., Sandeep, G., Jayabalan, P., & Muthukkumaran, K. (2021, August). Numerical modelling and analysis of a berthing structure with tie rod. International Conference in Ocean Engineering (ICOE 2009), IIT Madras, Chennai, India. <https://www.researchgate.net/publication/353769353>
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Türkiye bina deprem yönetmeliği (TBDY 2018)*. Resmî Gazete (18 Mart 2018, Sayı: 30364, Mükerrer). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-1.htm>
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022). *Kazı destek yapıları tasarım ve uygulama esasları*. <https://kamu.csb.gov.tr>
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Yapı İşleri Genel Müdürlüğü. (2022). *Kazı güvenliği ve alınacak önlemler genelgesi* (Sayı No: 2022/15). <https://www.csb.gov.tr>

- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Yapı İşleri Genel Müdürlüğü. (2023). *Kazı destek yapıları yönetmeliği: Tasarım el kitabı (Temmuz 2023 basımı)*. <https://www.csb.gov.tr>
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Yapı İşleri Genel Müdürlüğü. (2023). *Zemin ve Temel Etüdü Uygulama Esasları ve Rapor Formatına Dair Tebliğ*. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2023/02/20230203-5.htm>
- Ük, M. (2009). *Derin kazılar ve derin kazılara bir örnek: Flame Towers projesi iksa sistemi* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/>
- Vasić, M. (2015). *A multidisciplinary approach for the structural assessment of historical constructions with tie-rods* (Doctoral dissertation). Politecnico di Milano.
- Yeni, A. (2023). *Ayrışmış kayada zemin çivili duvar performansının incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/>
- Yıldız, M. C. (2015). *İstinat duvarına etkileyen dinamik toprak basınçları* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. İTÜ Akademik Açık Arşiv. <https://polen.itu.edu.tr/items/69010e7a-acdf-4234-8b0d-fc4984e29c4fPolenITU>
- Yoo, C.-Y. (2001). Finite element analysis of braced excavations in layered soils. *Computers and Geotechnics*, 28(8), 445–465. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(01\)00015-8](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(01)00015-8)
- Zhao, Y., Cao, J., & Yu, Y. (2023). A simplified method for calculating deformation and internal force of foundation pit enclosure structure under bidirectional excavation. *Underground Space*, 8(6), 1504–1515. <https://doi.org/10.1007/s40703-023-00186-x>

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Öçal, İ., Selçuk, M.E., (2025) "Yalova'da tie-back kullanılan bir derin kazı destekleme sisteminin performans analizi: bir vaka çalışması" 14. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve İnovasyon Kongresi, Bildiri Tam Metni Kitabı (s. 1310-1325), Konya

