



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YATAY DESTEKLİ KALICI İKSA YAPILARININ KAZI DESTEK YAPILARI
YÖNETMELİĞİNE UYGUN TASARIMI**

Turhan KARA

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Cihan ÖSER**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

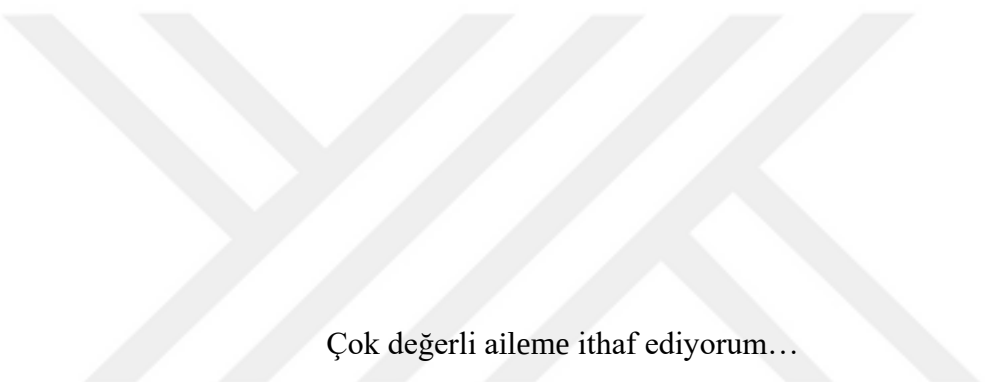
Kasım, 2024

TEZ KABUL VE ONAYI

Turhan KARA tarafından, **Doç. Dr. Cihan ÖSER** danışmanlığında hazırlanan **YATAY DESTEKLİ KALICI İKSA YAPILARININ KAZI DESTEK YAPILARI YÖNETMELİĞİNE UYGUN TASARIMI** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **26/11/2024** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

	İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Doç. Dr. Cihan ÖSER	☒
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa	Kabul
	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU	☒
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa	Kabul
	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Niyazi Uğur TERZİ	☒
	Aksaray Üniversitesi	Kabul
	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret



Çok değerli aileme ithaf ediyorum...

BÜTÇE DESTEKLERİ

YATAY DESTEKLİ KALICI İKSA YAPILARININ KAZI DESTEK YAPILARI YÖNETMELİĞİNE UYGUN TASARIMI

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Lisans eğitimim sırasında ilgisini eksik etmeyip beni geoteknik anabilim dalına yönlendiren, değerli fikirlerini esirgemeyen Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN'a teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans tezim süresince beni her konuda destekleyen, yol gösterici olan danışmanım Sayın Doç. Dr. Cihan ÖSER'e bütün içtenliğimle teşekkür ederim. Tez yazım aşamasında Erasmus değişim programına katılmama izin verip birçok yer görmemi ve farklı kültürleri tanımamı sağladığı için ayrıca teşekkür ederim.

Kasım 2024

Turhan KARA

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI.....	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ.....	xiii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xvi
ÖZET	xviii
ABSTRACT	xx
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	4
2.1. KAZI DESTEKLEME SİSTEMLERİ.....	5
2.1.1. Kazıklı Duvar	5
2.1.2. Zemin Ankrajı	7
2.1.3. Zemin Çivisi.....	12
2.1.4. Çelik Boru Destekleme Elemanı (Strut).....	13
2.1.5. Diyafram Duvar.....	14
2.1.6. Kuyu Temel.....	16
2.2. TÜRKİYE’de KDYY ÖNCESİ KULLANILAN YÖNETMELİKLER ve GENELGELER	17
2.2.1. Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler Genelgesi	17
2.2.2. KDYY Yönetmeliği İçeriği ve Önemi	18
2.3. KDYY’E GÖRE ZEMİN ANKRAJLARININ TASARIM ESASLARI	19
2.3.1. Sınır Durumları	19
2.3.2. Kazı Kategorileri.....	20
2.3.3. Yatay Toprak Basıncı Dağılımı.....	20
2.3.4. Kısmi Katsayılar Metodu	21

2.3.5. Toptan Göçmeye Karşı güvenlik.....	22
2.3.6. Ankraj Serbest Bölgesi.....	23
2.3.7. Ankraj Kök Bölgesi.....	24
2.3.8. Analiz Aşamaları.....	26
3. YÖNTEM	27
3.1. BİR VAKANIN YENİDEN ANALİZİ	27
3.1.1. Mevcut Proje Bilgileri.....	27
3.1.2. Proje Çıktıları	31
3.1.3. Vakanın Yeniden Tasarım Bilgileri	33
3.2. NÜMERİK MODELLERİN ANALİZİ.....	39
3.2.1. Genel Bilgiler	40
3.2.2. Deplasman Kriteri	45
3.2.3. Deprem Etkisi.....	45
3.2.4. Betonarme Kesitlerin Donatı Hesabı.....	46
3.2.5. Maliyet Analizi.....	47
3.3. HESAPLARDA KULLANILAN YAZILIMLAR	50
3.3.1. Sonlu Elemanlar Yazılımı	50
3.3.2. Limit Denge Analiz Yazılımı	52
4. BULGULAR	54
4.1. BİR VAKANIN YENİDEN ANALİZİ BULGULAR	54
4.1.1. Birinci Aşama Sonuçları	54
4.1.2. İkinci Aşama Sonuçları	55
4.1.3. Üçüncü Aşama Sonuçları	55
4.1.4. Dördüncü Aşama Sonuçları	57
4.1.5. Beşinci Aşama Sonuçları	57
4.2. NÜMERİK MODELLERİN ANALİZİ BULGULAR.....	62
4.2.1. Birinci Aşama Sonuçları	63
4.2.2. İkinci Aşama Sonuçları	63
4.2.3. Üçüncü Aşama Sonuçları	63
4.2.4. Dördüncü Aşama Sonuçları	64
4.2.5. Beşinci Aşama Sonuçları	65
4.2.6. Örnek Modelin Betonarme Hesap Sonuçları	67
5. TARTIŞMA.....	88
5.1. BİR VAKANIN YENİDEN ANALİZİ	88

5.2. NÜMERİK MODELLERİN ANALİZİ.....	89
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	92
KAYNAKLAR.....	93
EKLER	97
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	114
ETİK KURUL İZİN YAZISI	115
KURUM İZNİ YAZILARI.....	116
ÖZGEÇMİŞ	117



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Fore kazık dizilimleri; (a) Bağımsız kazık, (b) ve (c) Teğet kazık, (d) Kesişen kazık, (e) Karışık dizilim [10].	6
Şekil 2.2: Zemin ankrajı şematik gösterimi.	8
Şekil 2.3: Kalıcı ankraj parçaları [12].	10
Şekil 2.4: Zemin ankrajında korozyon koruma sistemleri [7].	11
Şekil 2.5: İlk zemin çivili iksa sistemi uygulaması [14].	12
Şekil 2.6: Çelik Boru Destekleme Elemanı (Strut).	14
Şekil 2.7: Diyafram duvar yapım aşamaları [17].	15
Şekil 2.8: Kuyu temel; yapım sırasında (a), son hali (b).	16
Şekil 2.9: Ankrajlı kazı destek sistemleri için yatay toprak basıncı diyagramları.	21
Şekil 2.10: Zemin ankrajı ve potansiyel göçme dairesi.	23
Şekil 3.1: Vakanın mevcut proje vaziyet planı ve kesitleri.	28
Şekil 3.2: Vaka analizinde kullanılan zemin diyagramı ve ankraj kesiti.	30
Şekil 3.3: Vakanın mevcut projesinde elde edilen maksimum yatay deplasman: 7,1 cm.	32
Şekil 3.4: Vakanın mevcut projesinde elde edilen toptan göçme dairesi ve sayısı: 1,514.	32
Şekil 3.5: PI ile Efektif Kayma Açısı arasındaki İlişki [23].	33
Şekil 3.6: Statik-dinamik elastisite modülü dönüşümü [25].	35
Şekil 3.7: Proje yeniden tasarım ivme değerleri [26].	37
Şekil 3.8: Nümerik modellerin analizi, H=5 m için konsol-ankrajlı sistem ve zemin diyagramı.	42
Şekil 3.9: Nümerik modellerin analizi, H=6 m için konsol-ankrajlı sistem ve zemin diyagramı.	43
Şekil 3.10: Nümerik modellerin analizi, H=7 m için konsol-ankrajlı sistem ve zemin diyagramı.	44

Şekil 3.11: Nümerik modellerin analizi bölümü deprem ivme değerleri [26].	46
Şekil 3.12: Plaxis 2D düğüm ve gerilme noktaları [33].	51
Şekil 3.13: Morgenstern-Price metodunda kuvvet kabulleri [38].	53
Şekil 4.1: Vaka analizi yeniden tasarım drenajlı LEM analiz sonucu: 1,016.	54
Şekil 4.2: Kazı derinliğinin (H) etki yüksekliği olarak değiştirilmesi [7].	55
Şekil 4.3: Vakanın yeniden analizinde elde edilen maksimum yatay deplasman: 7,09 cm.	56
Şekil 4.4: Vakanın yeniden analizinde dinamik durum LEM analiz sonucu: 1,239.	57
Şekil 4.5: Örnek model statik yükleme durumu LEM analiz sonucu: 2,02.	63
Şekil 4.6: Örnek model statik yükleme durumu yatay deplasmanları ve maksimum deplasman değeri.	64
Şekil 4.7: Örnek model dinamik yükleme durumu LEM analiz sonucu: 1,77.	64
Şekil 4.8: Örnek modelin statik yükleme durumu ankraj kök kuvveti.	65
Şekil 4.9: Örnek modelin dinamik yükleme durumu ankraj kök kuvveti.	66
Şekil 4.10: Örnek modelin statik durum eksenel kuvvet diyagramı ve maksimum-minimum eksenel kuvvet değerleri.	67
Şekil 4.11: Örnek modelin statik durum kesme kuvveti diyagramı ve maksimum-minimum kesme kuvveti değerleri.	68
Şekil 4.12: Örnek modelin statik durum eğilme momenti diyagramı ve maksimum-minimum eğilme momenti değerleri.	68
Şekil 4.13: Örnek modelin dinamik durum eksenel kuvvet diyagramı ve maksimum-minimum eksenel kuvvet değerleri.	69
Şekil 4.14: Örnek modelin dinamik durum kesme diyagramı ve maksimum-minimum kesme kuvveti değerleri.	69
Şekil 4.15: Örnek modelin dinamik durum eğilme moment diyagramı ve maksimum-minimum eğilme momenti değerleri.	70
Şekil 4.16: Kazı derinliği 5 m olan sistem için konsol modellerin deplasman-güvenlik sayısı-maliyet grafiği.	75
Şekil 4.17: Kazı derinliği 5 m olan sistem için ankrajlı modellerin deplasman-güvenlik sayısı-maliyet grafiği.	77
Şekil 4.18: Kazı derinliği 6 m olan sistem için konsol modellerin deplasman-güvenlik sayısı-maliyet grafiği.	80

Şekil 4.19: Kazı derinliği 6 m olan sistem için ankrajlı modellerin deplasman-güvenlik sayısı-maliyet grafiği.	82
Şekil 4.20: Kazı derinliği 7 m olan sistem için konsol modellerin deplasman-güvenlik sayısı-maliyet grafiği.	85
Şekil 4.21: Kazı derinliği 7 m olan sistem için ankrajlı modellerin deplasman-güvenlik sayısı-maliyet grafiği.	87



TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Kısmi katsayılar tablosu [7].	22
Tablo 2.2: ASTM A416 Grade 270 öngerme halat özellikleri [22].	24
Tablo 2.3: Kohezyonlu zeminlerdeki ankraj kök nihai çeper sürtünmesi [7].	24
Tablo 2.4: Kohezyonsuz zeminlerdeki ankraj kök nihai çeper sürtünmesi [7].	25
Tablo 3.1: Mevcut projedeki plastisite indisi, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri.	28
Tablo 3.2: Dinamik parametreler hesap tablosu.	29
Tablo 3.3: Vakanın mevcut projesinde kullanılan zemin özellikleri girdileri.	30
Tablo 3.4: Vakanın mevcut projesindeki ankraj kotları, uzunlukları ve dayanımları.	31
Tablo 3.5: Plastisite indisine göre seçilen ϕ' değerleri [23].	34
Tablo 3.6: İnce daneli zeminler için a^* değerleri [24].	34
Tablo 3.7: Seçilen a^* değerleri.	34
Tablo 3.8: Vakanın yeniden analizinde kullanılan statik durum zemin parametreleri.	35
Tablo 3.9: Vakanın yeniden analizinde kullanılan dinamik yükleme durumu parametreleri.	36
Tablo 3.10: Kazı derinliği ve sistem türüne göre model sayıları.	40
Tablo 3.11: Kazı yüksekliği 5 m olan sistem için oluşturulan ankrajlı modeller.	40
Tablo 3.12: Kazı yüksekliği 6 m olan sistem için oluşturulan ankrajlı modeller.	41
Tablo 3.13: Kazı yüksekliği 7 m olan sistem için oluşturulan ankrajlı modeller.	41
Tablo 3.14: Nümerik modellerin analizi bölümünde kullanılan zemin parametreleri.	43
Tablo 3.15: Maliyet analizinde kullanılan birimler [30,31].	49
Tablo 4.1: Vakanın yeniden analizinde FEM statik yükleme durumu halat kuvvetleri.	58
Tablo 4.2: Vakanın yeniden analizinde FEM dinamik yükleme durumu halat kuvvetleri.	58
Tablo 4.3: Vakanın yeniden analizinde statik yükleme durumu ankraj halat kuvvetleri.	59

Tablo 4.4: Vaka analizinde dinamik yükleme durumu ankraj halat kuvvetleri.....	59
Tablo 4.5: Vakanın yeniden analizinde ankraj halat kontrolü.....	60
Tablo 4.6: Vaka analizinde statik yükleme durumu ankraj kök kuvvetleri.....	60
Tablo 4.7: Vaka analizinde dinamik yükleme durumu ankraj kök kuvvetleri.	61
Tablo 4.8: Vakanın yeniden analizinde ankraj kök kontrolü.....	61
Tablo 4.9: Örnek modelin statik yükleme durumu ankraj halat kuvveti.	65
Tablo 4.10: Örnek modelin dinamik yükleme durumu ankraj halat kuvveti.....	65
Tablo 4.11: Örnek modelin elde edilen ve hesaplanan ankraj halat kuvvetleri.....	66
Tablo 4.12: Örnek modelin elde edilen ve hesaplanan ankraj kök kuvvetleri.	66
Tablo 4.13: Örnek modelin statik durumdaki kesit tesirleri.	69
Tablo 4.14: Örnek modelin dinamik durumdaki kesit tesirleri.	70
Tablo 4.15: Örnek modelin fore kazık tasarım kesit tesirleri.	70
Tablo 4.16: Maliyet analizinde kullanılan iksa elemanı özellikleri.....	71
Tablo 4.17: Örnek modelin fore kazık düşey donatılandırılması.	71
Tablo 4.18: Örnek modelin fore kazık kayma donatısı.	72
Tablo 4.19: Örnek modelin kuşak kirişi kayma ve eğilme donatısı.	72
Tablo 4.20: Kazı derinliği 5 m için oluşturulan $D=0,65$ m ve $s=0,9$ m konsol modelin stabilite analiz sonuçları.	73
Tablo 4.21: Kazı derinliği 5 m için oluşturulan $D=0,65$ m ve $s=0,9$ m konsol modelin maliyet sonuçları.	73
Tablo 4.22: Kazı derinliği 5 m için oluşturulan $D=0,8$ m ve $s=1$ m konsol sistem stabilite analiz sonuçları.	74
Tablo 4.23: Kazı derinliği 5 m için oluşturulan $D=0,8$ m ve $s=1$ m konsol modelin maliyet sonuçları.	74
Tablo 4.24: Kazı derinliği 5 m için oluşturulan $D=1$ m ve $s=1,2$ m konsol sistem stabilite analiz sonuçları.	74
Tablo 4.25: Kazı derinliği 5 m için oluşturulan $D=1$ m ve $s=1,2$ m konsol modelin maliyet sonuçları.	75
Tablo 4.26: Kazı derinliği 5 m olan sistem için ankrajlı modellerin güvenlik sayıları ve kesit tesirleri.	76

Tablo 4.27: Kazı derinliği 5 m olan sistem için ankrajlı modellerin maliyeti.....	77
Tablo 4.28: Kazı derinliği 6 m için oluşturulan $D=0,65$ m ve $s=0,9$ m konsol sistem stabilite analiz sonuçları.....	78
Tablo 4.29: Kazı derinliği 6 m için oluşturulan $D=0,65$ m ve $s=0,9$ m konsol modelin maliyet sonuçları.....	78
Tablo 4.30: Kazı derinliği 6 m için oluşturulan $D=0,8$ m ve $s=1$ m konsol sistem stabilite analiz sonuçları.....	78
Tablo 4.31: Kazı derinliği 6 m için oluşturulan $D=0,8$ m ve $s=1$ m konsol modelin maliyet sonuçları.....	79
Tablo 4.32: Kazı derinliği 6 m için oluşturulan $D=1$ m ve $s=1,2$ m konsol sistem stabilite analiz sonuçları.....	79
Tablo 4.33: Kazı derinliği 6 m için oluşturulan $D=1$ m ve $s=1,2$ m konsol modelin maliyet sonuçları.....	79
Tablo 4.34: Kazı derinliği 6 m olan sistem için ankrajlı modellerin güvenlik sayıları ve kesit tesirleri.....	81
Tablo 4.35: Kazı derinliği 6 m olan sistem için ankrajlı modellerin maliyeti.....	82
Tablo 4.36: Kazı derinliği 7 m için oluşturulan $D=0,65$ m ve $s=0,9$ m konsol sistem stabilite analiz sonuçları.....	83
Tablo 4.37: Kazı derinliği 7 m için oluşturulan $D=0,65$ m ve $s=0,9$ m konsol modelin maliyet sonuçları.....	83
Tablo 4.38: Kazı derinliği 7 m için oluşturulan $D=0,8$ m ve $s=1$ m konsol sistem stabilite analiz sonuçları.....	83
Tablo 4.39: Kazı derinliği 7 m için oluşturulan $D=0,8$ m ve $s=1$ m konsol modelin maliyet sonuçları.....	84
Tablo 4.40: Kazı derinliği 7 m için oluşturulan $D=1$ m ve $s=1,2$ m konsol sistem stabilite analiz sonuçları.....	84
Tablo 4.41: Kazı derinliği 7 m için oluşturulan $D=1$ m ve $s=1,2$ m konsol modelin maliyet sonuçları.....	84
Tablo 4.42: Kazı derinliği 7 m olan sistem için ankrajlı modellerin güvenlik sayıları ve kesit tesirleri.....	86
Tablo 4.43: Kazı derinliği 7 m olan sistem için ankrajlı modellerin maliyeti.....	87

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
H	: Kazı derinliği
D	: Kazık-ankraj delgi çapı
s	: Merkezden merkeze ara mesafe
φ'	: Efektif kayma direnci açısı
c'	: Efektif kohezyon
c_u	: Drenajsız kayma mukavemeti
k_h	: Yatay eşdeğer ivme katsayısı
E_s	: Statik elastisite modülü
E_d	: Dinamik elastisite modülü
E_{50}	: Sekant elastisite modülü
E_{ur}^{ref}	: Yükleme-boşaltma rijitliği
E_{50}^{ref}	: Drenajlı sekant elastisite modülü
E_{oed}^{ref}	: Başlangıç ödometre yüklemesi için tanjant rijitliği
p^{ref}	: Referans Gerilme
ν_{ur}	: Yükleme-boşaltma Poisson oranı
R_{inter}	: Arayüzey yük azaltma faktörü
S_{ds}	: Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz)
PI	: Plastisite indeksi
k_h	: Yatay eşdeğer ivme katsayısı
γ	: Birim hacim ağırlığı
γ_{sat}	: Doygun birim hacim ağırlığı
EA	: Eksenel rijitlik
EI	: Eğilme rijitliği
k	: Permeabilite katsayısı
ξ	: Karakteristik çeper sürtünmesi için güvenlik sayısı
δh	: Yatay deplasman
A_{ps}	: ASTM ankraj halat alanı
f_{pu}	: ASTM ankraj halat nihai dayanımı

Kısaltmalar	Açıklama
KDYY	: Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği
FHWA	: Federal Highway Administration
ASTM	: American Society for Testing and Materials
LEM	: Limit denge yöntemi
FEM	: Sonlu elemanlar yöntemi
ULS	: Göçme Sınır Durumu (Ultimate Limit State)
SLS	: Hizmet Görebilirlik Sınır Durumu (Serviceability Limit State)
UPL	: Hidrostatik etkiler nedeniyle oluşan kaldırma
GEO	: Zemin birimdeki göçme veya aşırı şekil değiştirme
HYD	: Borulanma, sızıntı vb.
GS	: Güvenlik Sayısı
DD-2	: Deprem yer hareketi düzeyi-2
DD-2a	: Deprem yer hareketi düzeyi-2a
DD-4	: Deprem yer hareketi düzeyi-4
KK-1	: Kazı Destek Yapısı Kategorisi-1
KK-2	: Kazı Destek Yapısı Kategorisi-2
KK-3	: Kazı Destek Yapısı Kategorisi-3
M-C	: Mohr-Coloumb zemin modeli
H-S	: Pekleşen zemin (Hardening soil) modeli

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YATAY DESTEKLİ KALICI İKSA YAPILARININ KAZI DESTEK YAPILARI YÖNETMELİĞİNE UYGUN TASARIMI

Turhan KARA

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman : Doç. Dr. Cihan ÖSER

Derin kazılarla alakalı uluslararası yönetmeliklerden yaklaşık yirmi yıl sonra ülkemizdeki zemin profili, makine-ekipman ve teknik personel durumları göz önüne alınarak Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği (KDYY) yürürlüğe girmiştir. Bu tezin ilk bölümünde KDYY’i alanında benzer diğer kaynaklarla kıyaslamak adına yönetmelik yayımlanmadan önce tasarımı ve uygulaması yapılmış bir derin kazı projesinin KDYY’e uygun olarak yeniden analizi yapılmıştır. Mevcut tasarımın KDYY’e uygun olarak tekrar analizi sonuçları incelendiğinde projede beklenemedik deplasman vb. durumlarla karşılaşılmasına rağmen yeni yönetmeliği esas alan değerlendirmede sistemin, hem Hizmet Görebilirlik Sınır Durumu (SLS), hem de Göçme Sınır Durumu (ULS) analizlerinde izin verilebilir sınırların aşıldığı ve sistem güvenliğinin sağlanmadığı görülmüştür. İki bölümden oluşan tezin birinci kısmında, mevcut uygulanmış bir iksa projesinin yeniden analizi sonrası elde edilen sonuçlara göre KDYY’nin muhafazakâr sonuçlar verdiği ve uluslararası yönetmeliklere göre yapılan tasarımlara kıyasla daha maliyetli tasarımlara yol açtığı görülmüştür. Tezin ikinci kısmında 5, 6 ve 7 m yüksekliğe sahip, iri daneli zeminde inşa edilen kalıcı iksa sistemlerinin konsol ve yatay destekli olma durumlarının deplasman-güvenlik-maliyet açısından değerlendirmesi yapılmıştır. Konsol sistemlerde her yükseklik için üç farklı çapa sahip fore kazıkların, altı farklı soket boyu için on sekiz model tasarlanmış olup toplamda elli dört farklı konsol sistem analizi yapılmıştır. Yatay destek olarak zemin ankrajı kullanılan sistemlerde her derinlikte üç farklı çapa sahip fore kazık, iki farklı soket boyu, iki farklı ankraj yatay aralığına sahip on iki farklı model, toplamda ise otuz altı yatay destekli sistem analizi yapılmıştır. 6 ve 7 metre yüksekliğe sahip kazılarda güvenliği sağlayan sistemler arasında en düşük maliyetli sistemin zemin ankrajlı sistem olduğu,

5 m yüksekliğe sahip kazılarda ise konsol fore kazıklı iksa sisteminin uygun olduğu sonucuna varılmıştır. |

Kasım 2024 , |138| sayfa.

Anahtar kelimeler: | Derin kazılar, Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği, kalıcı iksa sistemleri, konsol fore kazıklar, zemin ankrajları |



ABSTRACT

M.Sc. THESIS

DESING OF HORIZONTAL SUPPORTED PERMANENT RETAINING STRUCTURES IN ACCORDANCE WITH THE EXCAVATION SUPPORT STRUCTURES CODE

Turhan KARA

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Civil Engineering Programme

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Cihan ÖSER

Approximately twenty years after the international reulations on deep excavations, the Excavation Support Structures Regulation (KDYY) came into forceby considering the soil profile, machinery-equipment and technical personnel in Türkiye. In the first part of this thesis, a deep excavation project, which was designed and implemented before the regulation was published, was re-analysed in accordance with the KDYY in order to compare the KDYY with other similar codes. When the results of the re-analysis of the existing design in accordance with the KDYY were evaluated, it was seen that the designed system exceeded the allowable limits in both the Serviceability Limit State (SLS) and the Collapse Limit State (ULS) analyses and the system safety was not ensured in the evaluation based on the new regulation, although no unexpected displacement etc. situations were encountered in the project. In the first part of the thesis, which consists of two parts, the results obtained after the re-analysis of an existing project show that the KDYY gives conservative results and leads to more costly designs compared to the designs made according to international regulations. In the second part of the thesis, the displacement-safety-cost evaluation of cantilever and horizontally supported permanent supporting systems with heights of 5, 6 and 7 m in coarse-grained soil profiles was carried out. For cantilever systems, eighteen models were designed for six different socket lengths of bored piles with three different diameters for each height and a total of fifty-four different cantilever systems were analyzed. In the systems where ground anchors were used as horizontal support, twelve different models with three different diameters of bored piles, two different socket lengths, two different anchor horizontal spacing were designed for each depth,

and a total of thirty-six horizontally supported systems were analyzed. For the 6 and 7 meters high excavations, the lowest cost system was found to be the ground anchored system, while for the 5 meter high excavations, the cantilever bored pile support system was found to be suitable.

November 2024, 138 pages.

Keywords: Deep excavations, Excavation Support Structures Code, permanent retaining structures, cantilever bored piles, ground anchors



1. GİRİŞ

Gün geçtikçe hızla artan nüfus, insanlığın en temel ihtiyaçlarından birisi olan barınmanın, karşılanması adına beraberinde konut sorununu getirmektedir. Yükselen konut ihtiyacı, bina yapmaya uygun alanların azalması ve şehirlerin bazı merkezler etrafında yoğunlaşması müteahhit, mühendis ve mimarları her inşa alanını değerlendirmeye itmektedir. Arsa fiyatlarının artması, kişisel araç sayısının, buna bağlı olarak kişisel otopark yeri ihtiyacının yaygınlaşması ve sığınak benzeri ortak kullanım alan gereksiniminin artması nedeniyle yapı inşaat alanlarının optimum kullanımı oldukça önemli olmaya başlamıştır. Aynı parselde daha fazla yapım alanı elde etmek için dikey mimarilere sıkça başvurulmaya başlanmıştır. Dikey mimarilerin artmasıyla yerleşim alanının artırılmasının dışında binada ikamet edenlerin otopark, sığınak vb. ihtiyaçları bodrum katlarla karşılanmaya başlanmıştır. Ortak kullanım alanlarının getirdiği faydaların yanında bodrum kata sahip olan yapıların temelleri daha derinde bulunduğu için genellikle daha sağlam zemine inşa edilmiş olurlar ve temeldeki oturma, taşıma gücü sorunları da ortadan kalkmış olur.

Temeli derinde olan binaların yanı sıra metro girişleri, yeraltı tünelleri vb. yeraltı yapılarının inşası için gerekli çalışma ortamını sağlayabilmek adına zemini kazmak gerekir. Yapılacak olan kazı ile oluşan boşluğun etrafındaki zemin kendini tutabilecek özellikte olmadığında, yeraltı suyu, çevre yapılar ve altyapı sistemleri vb. durumlar sorun çıkarabilir. Bu sorunlara çözüm bulmak, değişen ve gelişen teknolojik yazılımlar, makine ekipmanlar ve teknik personellerle daha kolay olmaktadır. Problemin çözümüne uygun dayanma sistemini inşa ederek meydana gelebilecek yanıl, düşey deplasmanların veya göçmelerin önüne geçilir.

Kazıları desteklemek için geçmişten günümüze kazı derinliği, yeraltı suyu, parsel genişliği, civar yapı vb. durumları dikkate alan birçok farklı kazı destek sistemi kullanılmıştır. İksa sistemleri, doğrultularına göre düşey ve yatay olarak ikiye ayrılmaktadır. Fore kazık, Palplanş, Diyafram duvar, Berlin duvarı gibi yapılar düşey destekleme elemanlarına örnek olarak gösterilirken; Zemin ankrajı, Çelik boru destek ve Zemin çivileri de yatay destek elemanlarına örnektir. Zeminin zayıf mukavemet parametrelerine sahip olması, çok yüksek kazı derinliği vb. gerekli durumlarda hem düşey hem de yatay destekleme sistemleri bir arada kullanılabilir.

Zemin etüdü ile başlayan kazı destek sistemi yapım aşamaları geoteknik proje hazırlanması, sonrasında bu projenin uygulanması ile devam eder. Aletsel gözlem ve ölçümlerle performansı takip edilir, son olarak kazı kapanacaksa dolgu yapılması ile sona erer. Zemin etüdü, projelendirme, uygulama üçlüsünden en az birisinde hata olması sonucu kazı destek sisteminde beklenmedik deplasmanlar veya yenilmeler/göçmeler ve bunları sonucu olarak da can kayıpları meydana gelebilir. Bu tür olaylar yüklenicilere hem zaman kaybı hem de maddi kayıp olarak yansımaktadır. Kazılar sırasında meydana gelebilecek göçmeler, neden olduğu büyük maddi zarara ilaveten o parsellerin bir daha kullanılamamasına yol açabilir. Çünkü yıkılan sistemin molozları kaldırılrsa bile oradaki zemin mukavemetini kaybetmiştir ve sadece rezidüel (kalıcı) dayanımı kalmıştır, bu da çok düşük bir dayanımdır. O parselin tekrar kullanımı için rezidüel dayanım üzerinden tekrar çok detaylı analizler gerekir.

Ülkemize ve dünyada medyada yer bulan/bulmayan sayısız iksa sistemi yenilmesi mevcuttur. Bu tarz hadiselerin meydana gelmemesi için yetkili kurumlar, edinilen tecrübe ve gelişen teknoloji sayesinde yayımladıkları yönetmeliklerle mühendislere yol gösterici, kural koyucu rolünü üstlenirler. Bu kapsamda Federal Highway Administration (FHWA), Eurocode 7, British Standard gibi dünya çapında ve ülkemizde yaygın olarak kullanılan yayımlardan yaklaşık 15 yıl sonra Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler Genelgesi 2018 yayımlanmıştır. Bu genelgeyle birlikte 1,75 m'den daha derin kazılar için iksa sistemi yapılması zorunlu tutulmuş ve gerekli analiz yöntemleri, kriterleri ifade edilmiştir [1]. İksa göçmelerinin önüne geçmek için geçici bir çözüm olarak sunulan bu genelge, ankrajların kapasitesini sınırlamak gibi birçok kısıtlayıcı maddeye sahiptir. 2022 yılında tekrar yayımlanan Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler Genelgesi'nde iksa sistemlerinin tasarımını içeren projelerin hesapları ve çizimleri geoteknik alanında sorumlu inşaat mühendisi tarafından yapılması gerektiği vurgulanmıştır [2]. Bu maddeyle inşaat mühendisliğinde uzmanlaşmaya dikkat çekilmiş ve yetkin projelendirmenin önemi üzerinde durulmuştur. 18 Aralık 2022 tarihinde yayımlanan ve 1 yıl sonrasında yürürlüğe giren Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği (KDYY), ülkemizde kendinden önce yayımlanan genelgelere ve yönetmeliklere kıyasla derin kazılar konusunda daha detaylıdır. Destek elemanlarının kapasitelerine dair kısıtlama bulunmayan bu yayım, projelendirme aşamasında mühendislerin deneyim ve yorumlarına daha fazla açık kapı bırakmıştır.

Bu tez “Bir Vakanın Yeniden Analizi” ve “Nümerik Modellerin Analizi” olmak üzere iki ayrı bölümden oluşmaktadır. Yönetmelikler yürürlüğe girmeden önce tasarım, uygulama ve

kontrol yapan mühendisler alıştırma ve öğrenme aşamalarını tamamlamaları için süre tanınır. Tezin birinci kısmı olan “Bir Vakanın Yeniden Analizi” bölümünün amacı yönetmeliğe uygun örnek proje çözümünü göstermek ve uluslararası yönetmeliklerle kıyasını yaparak mühendisler yorum yapma olanağı sağlamaktır. Bu kapsamda birinci bölümde KDYY yayımlanmadan önce uluslararası yönetmeliklerden olan FHWA’ya göre projelendirilmesi ve imalatı yapılmış bir dayanma sisteminin KDYY’e göre yeniden analizi ve değerlendirmesi yapılmıştır.

Tezin ikinci kısmı olan “Nümerik Modellerin Analizi” bölümü kapsamında 5, 6 ve 7 m derinliğe sahip kalıcı kazılar için konsol sistemlerde kazık çapı ve soket boyu değiştirilerek, ankrajlı sistemlerde ise kazık çapı, soket boyu ve yatay ankraj aralıkları değiştirilerek sistemlerin stabilite analizleri yapılmıştır. Tezin ikinci kısmındaki güvenlik kriterlerini sağlayan sistemlerin betonarme hesapları yapılarak maliyetleri hesaplanmıştır ve deplasman-güvenlik sayısı-maliyet üçlüsü açısından değerlendirilmiştir. Tezin her iki bölümünde stabilite analizleri yapılırken limit denge yöntemi (LEM) kullanan Slope/W ve sonlu elemanlar yöntemini kullanan Plaxis 2D mühendislik yazılımlarından yararlanılmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Kazılar derinlik ve genişliklerine göre farklı isimler almaktadır. Literatüre göre genişliği 1 m'den az veya eşit olan kazılara dar, fazla olan kazılara ise geniş kazı ismi verilmektedir. Terzaghi ve Peck [3] tarafından yapılan kabulde 6 m'den daha fazla derinliğe sahip kazılar, derin kazı olarak tanımlanmıştır. Akboğa Kale ve Eskişar [4] tarafından yapılan araştırmada Amerika'da 1984-2013 yılları arasında kazı çalışmalarında çoğunluğu gevşek ve düşük dayanımlı zeminlerde gerçekleşen 92 iş kazası meydana geldiği ve bunların %60,9'unda ölümle sonuçlandığını ortaya çıkarmıştır. Vuku bulan kazaların %40,2'sinde kazı destek sistemi bulunmadığı ya da herhangi bir şevli kazı yapılmadığı belirtilmiştir. Düşük bütçe ve eksik iş sağlığı ve güvenliği koşullarının kazalarda önemli rol oynadığına dikkat çekilmiştir. Buna benzer çukur-kazı göçme olaylarının yaşanmaması için gerekli kazı sistemleri inşa edilmeli ve yetkililer tarafından kontrolü sağlanmalıdır.

Yapılacak olan destekleme sistemlerinin kontrolleri yerel veya ulusal idareler tarafından yapılmaktadır. Öncülük etme, yönlendirme ve gerekli kontrolleri sağlayabilmek için yetkili kurumlar çeşitli alanlarda yönetmelikler yayımlamaktadır ve bunları güncel tutmaktadır. Bazı ülkelerin kendilerine has yönetmelikleri bulunmaktadır, diğer ülkeler ise bunlardan yararlanarak kazı destek yapılarını tasarlar. Örnek olarak Amerika'nın otoyollarında Federal Highway Administration [5] tarafından hazırlanan yönetmelik, Avrupa birliği ülkelerinde Eurocode 7 [6], Birleşik Krallık ülkelerinde BSI tarafından hazırlanan yönetmelik kullanılır. Bu yönetmelikler sadece yayımlandığı ülkelerde değil birçok ülkedeki tasarımlara kaynak olma niteliğini taşırlar. Günümüze kadar ülkemizde de farklı geoteknik problemler için çeşitli yönetmeliklerden ve yaklaşımlardan yararlanılmıştır, 18 Aralık 2022 yayım tarihli Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği (KDYY) [7] ile ülkemize özel bir kaynak da bulunmaktadır.

Yeraltı su seviyesi, kazı derinliği, sızdırmazlık vb. değişkenlere ve zorluklara uygun olabilecek birçok kazı iksa sistemi mevcuttur. Farklı zemin koşullarına göre sıklıkla kullanılan kazı destekleme sistemlerinin çeşitleri aşağıdaki bölümde anlatılmıştır.

2.1. KAZI DESTEKLEME SİSTEMLERİ

İksa sistemleri kullanım ömrü, imalat doğrultusu vb. kıstaslara göre farklı sınıflara ayrılır. İksalar yapı ömürlerine göre geçici ve kalıcı olarak ikiye ayrılırlar. Açılan kazı çukurunu tutacak kazı destek sistemi, inşaat tamamlandıktan sonra yapı ile arası doldurulup görevini tamamlayacaksa geçici olarak isimlendirilir. Bazı durumlarda kazı çukuru uzun süre açık kalabilir, iki yıldan uzun süre zemini desteklemeye devam edecek kazı destek sistemi kalıcı olarak isimlendirilir. Kalıcı kazı destek sistemlerinin tasarım ve uygulamasında deprem, korozyon vb. etkiler dikkate alınmalıdır.

Sürücü [8] yapmış olduğu çalışmada sadece proje başlamadan önceki aşamada değil aynı zamanda kazı destekleme sistemlerinin imalat aşamasında deplasman vb. sorunlarla karşılaşıldığında da çözüm olarak kullanılabilecek birçok kazı destekleme sistemi olduğunu göstermiştir. Bu bölümde birçok kazı destek sisteminden ve bu sistemlerin avantaj, dezavantaj ve imalat metodolojisinden bahsedilmiştir.

2.1.1. Kazıklı Duvar

Geoteknik alanda önemli yeri olan kazıklar, binadan gelen yükleri sağlam zeminlere aktarmak, oturmaları azaltmak vb. görevler için temel altlarına yerleştirilebileceği gibi yanal yükleri tutmak amacıyla kazı destekleme elemanı olarak da kullanılır. Kazıklar yerinde dökme ve prefabrik (çakma) kazıklar olarak yapım bakımından ikiye ayrılırlar. Kazı veya delgi yapılarak zeminde açılan oyuga donatılı veya donatısız olacak şekilde koruma borulu veya koruma borusuz beton dökülmesiyle oluşturulan yapıya fore kazık denir [9]. Kazığın zemin içinde gömülü kalan kısmına soket boyu denir, bu kısmın sağladığı pasif direnç sayesinde yanal yüklere karşı direnir. Kazık yapılacak kısmın delgisini açmak için zemin özelliklerine uygun olarak tercih edilen rotary, auger, karotiyer tipi makine uçlarından birisi kullanılır. Kendini tutabilen yani koruma borusuna gerek duyulmadan delgi açılabilen zeminlerde yeraltı suyu bulunmaması durumunda kazık aralıkları merkezden merkez kazık çapının üç katına kadar artırabilir. Kendini tutamayan zeminlerde muhafaza borusu veya bentonit sıvısı kullanılarak zemin stabilitesi sağlanır. Fore kazıklar dizilim şekillerine göre dört farklı isim almaktadır [10].

2.1.1.1. Bağımsız (Aralıklı) Kazıklar

Kazık aralıkları arkadaki zeminin akmayacağı şekilde seçilir, göreceli olarak dayanımı yüksek zeminlerde inşası yapılmaktadır. Daha ekonomik ve hızlı uygulanabilir bir dizilim

olmasına rağmen su geçirimsizliği konusunda başarısızdır. **Şekil 2.1 (a)**'da bağımsız kazık görseli verilmiştir.

2.1.1.2. Teğet Kazıklar

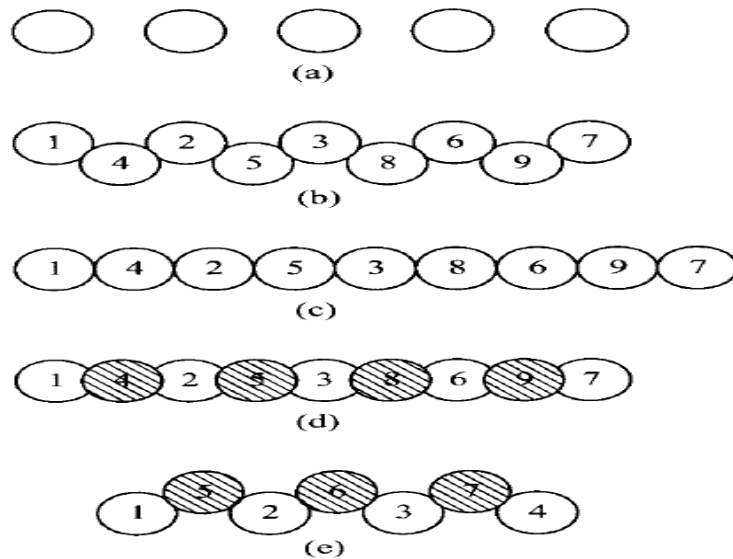
İlk olarak bir sıra atlayarak imal edilen kazıkların arasına teğet olacak şekilde sonradan kazık yapılan dizilim teğet kazık olarak adlandırılmaktadır. Yeraltı suyu bulunduğu durumlarda tam olarak sızdırmazlığı sağlamasa da noktasal zemin akma larını da önlediği için tercih edilmektedir. **Şekil 2.1 (b) ve (c)**'de teğet kazık dizilimleri gösterilmiştir.

2.1.1.3. Kesişen Kazıklar

Düşük mühendislik parametrelerine sahip ve/veya yeraltı suyu bulunan zeminlerde tercih edilir. Birer sıra atlayarak inşa edilen donatısız kazıklar mukavemetini tam olarak kazanmadan bu kazıkların bir kısmını tahrip edecek şekilde kazılıp donatılı kazıklar yapılmasıyla oluşturulur. Hem rijitlik hem de su geçirimsizliği konusunda diğer dizilimlerden üstündür. **Şekil 2.1 (d)**'de kesişen kazıkların yapım sırasına göre isimlendirilmesi verilmiştir, taralı daireler (4, 5, 8, 9) donatılı kazıkları göstermektedir.

2.1.1.4. Karışık Dizilimli Kazıklar

Bağımsız dizilime sahip imal edilen kazıkların arka tarafına sızdırmazlığı sağlamak amacıyla jet grout kolonları imal edilir. Yapılan jet grout imalatının kalitesi sızdırmazlık konusunda önemli rol oynamaktadır. **Şekil 2.1 (e)**'de karışık dizilime sahip kazıkların görseli verilmiştir, 5-6-7 numaraya sahip daireler sonradan yapılan jet grout kolonlarını ifade etmektedir.



Şekil 2.1: Fore kazık dizilimleri; (a) Bağımsız kazık, (b) ve (c) Teğet kazık, (d) Kesişen kazık, (e) Karışık dizilim [10].

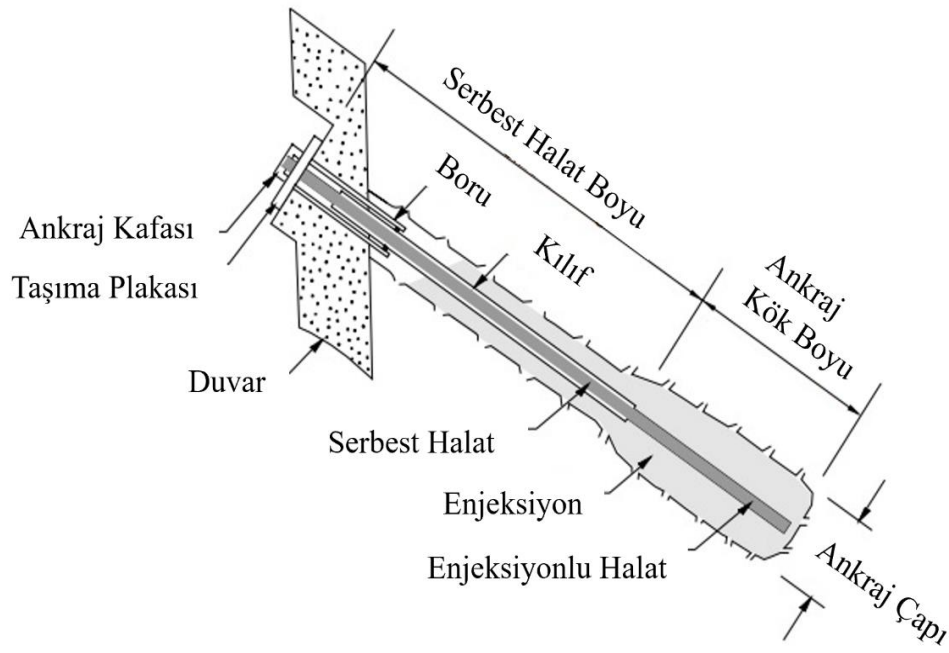
Fore kazıklı kazı destek sistemlerinin avantajları ve dezavantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir [10].

Fore kazıklı kazı destek sistemlerinin avantajları;

- Kazıkların imalatı sırasında düşük vibrasyon ve gürültü olduğu için çevre rahatsızlığı daha azdır,
- İstenilen derinlikte kazık imalatı yapılabilir,
- Sert zeminlerde (kaya vb.) uygun ekipman kullanılarak delgi ve imalat mümkündür,
- Palplanş perdelere kıyasla daha rijittir.
- Fore kazıklı kazı destek sistemlerinin dezavantajları;
- Kazı derinliği arttıkça yeraltı su seviyesi yüksek zeminlerde sızdırmazlık sorunu oluşur,
- Diyafram duvarlara kıyasla rijitlik azdır,
- İmalatın performansında işçiliğin önemi büyüktür.

2.1.2. Zemin Ankraji

Ankrajlar serbest ve kök bölgesinden oluşan yatay destek elemanlarıdır, tek başlarına kullanılamazlar. Genellikle 13 cm çapında ve 15 derece açıyla açılan kuyunun içine halat demeti sokulur ve kök bölgesi uzunluğunca çimento enjeksiyonu verilir. Açılı yapılmasının sebepleri arasında; derine indikçe ankraj kök bölgesi üstündeki zemin yükü artışından kaynaklı düşey yükün ve buna bağlı olarak sürtünme kuvvetinin artması, ankraja gelen kuvvetin bir kısmının düşey elemana eksenel yük olarak aktarılması bulunmaktadır. Derindeki sağlam zemine ulaşmak, yan parseldeki yanının temeline zarar vermemek için daha yüksek açılarda da uygulanabilir. Fore kazıkla birlikte uygulanırsa kuşak kirişi yapılır, diyafram duvar veya perde duvar varsa direkt olarak projede belirtilen kuvvet miktarınca öngerme uygulanır. Sadece eksenel kuvvet taşırlar. Fore kazıklı sistemlerde ankrajdan gelen kuvveti, kazıklara düzgün dağıtmak için kuşak kirişleri yapılır. **Şekil 2.2**'de standart bir zemin ankrajını oluşturan elemanlar gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Zemin ankrajı şematik gösterimi.

Ankrajlı bir sistemin yapım aşamasının ilk sırasında düşey eleman imalatı yer almaktadır. Sonra bu eleman için gerekliyse başlık kirişi yapılır. Başlık kirişi sistem elemanlarının birlikte çalışmasını sağlayan hayati bir yapıdır. Sonrasında birinci kademe kazı yapılır ve ankraj yerleştirilir. Gerekliyse kuşak kirişi yapılır ve germe makinesi ile ankraj halatına öngerme uygulanır, ankraj aktif hale getirilir. Bu döngü nihai kazı kotuna ulaşana kadar devam eder.

Ankrajlı sistemler kullanım süreleri açısından geçici ve kalıcı olmak üzere ikiye ayrılır. 2 yıl ve daha kısa süre içerisinde ankrajlı sistemin tuttuğu kazı çukuru kapatılacaksa sistem geçici olarak tanımlanır. Kazı asla kapanmayacaksa veya ankrajların ömrü en az kazı çukurundaki yapının ömrü kadarsa kalıcı ankraj olarak kabul edilir. Geçici ve kalıcı ankrajların hem tasarım hem de uygulama safhalarında farklılıklar mevcuttur. Bunlardan bazıları şunlardır: kalıcı sistemler için deprem hesabı yapılması gerekmektedir (15 m'den yüksek geçici sistemlerde de deprem hesabı gerekir), korozyona karşı ankrajın hem zemin içinde hem de zemin dışında kalan kısmına koruyucu tedbirler alınması gerekir. Ankrajların servis ömrü boyunca projedeki kuvvetleri taşıyıp taşımadığının periyodik olarak kontrolü gerekmektedir. Ankrajlara ilk öngerme uygulanırken krikonun girmesi için dışarıda bırakılan ankraj halatları, kalıcı kazı destek yapılarında daha sonraki kontrollerde tekrar kullanılabilmesi için düzgün bir şekilde muhafaza edilmelidir.

2.1.2.1. Ankraj Elemanları

Öngerme sırasında gerilen halatlardan gelen yükler, kamaların yataklarına oturması sonrası üzerindeki yükleri ankraj kafasına iletir. Ankraj kafası ise yükleri taşıma plakasına iletir.

Kuşak kirişi yapılmasının gerekli olduğu (fore kazık vb. düşey elemanlar) sistemlerde ankraj kafası ve kuşak kirişi arasında taşıma plakası bulunur. Taşıma plakası, ankraj kafasından gelen kuvveti düşey elemana aktarma görevini üstlenir. Kuşak kirişi veya dayanacağını düşey eleman ile arasında herhangi bir boşluk bırakmamak için yüzey, yüksek dayanımlı tamir harcı ile sıvanmalıdır. Ankrajın yatayla yaptığı açının sağlanması kuşak kirişi veya ankraj plakası ile yapılmalıdır, ankraj kafası açma verme işlemlerinde kullanılmamalıdır.

2.1.2.2. Ankraj Türleri

FHWA'da yapım şekillerine bağlı olarak 4 farklı ankraj tanımlanmıştır. KDYY'de ise sadece “düşük basınçlı enjeksiyonlanmış” ve “basınçlı enjeksiyonlanmış” olarak iki farklı ankraj türünün çeper sürtünme değeri aralığı verilmiştir. Çimento şerbetindeki su/çimento oranı genellikle ağırlık olarak 0,40-0,50 oranında seçilir. Büyük delgi çapına sahip ankrajlarda veya zeminde enjeksiyon kaçağı olma durumlarında çimento şerbeti içinde kum ilavesi de yapılabilir. Kum ilave edilen enjeksiyonlarda su/çimento oranı 0,60'a kadar yükseltilebilir. Genellikle çimento enjeksiyonuna katkı malzemesi kullanılmamasına rağmen gevşek veya yumuşak zeminlerde delgi çeperinin genişlemesini ve buna bağlı olarak daha fazla kök kuvveti sağlayan katkılar kullanılabilir.

Düşük basınçlı enjeksiyonlanmış zemin ankrajları genellikle çok sıkı ve katı zeminlerde uygulanır. Çimento şerbetinin kendi cazibesıyla ya da düşük basınçla, kazılan ankraj kuyusunun içine dolmasıyla kök bölgesi oluşturulur. Kök ve çevresindeki zemin arasında oluşan sürtünme kuvveti ankrajın nihai çeper sürtünmesini belirler.

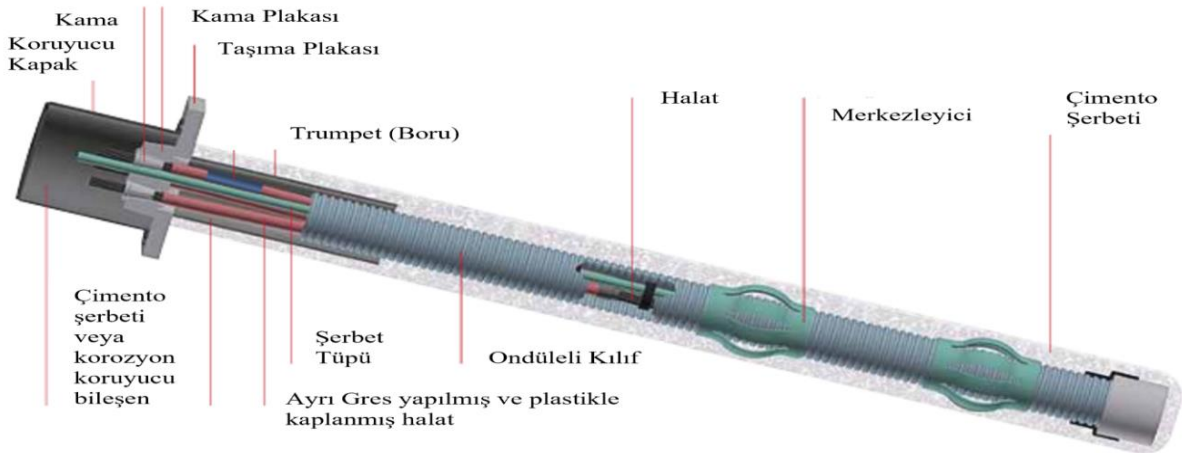
Basınçlı enjeksiyonlanmış zemin ankrajlarının uygulama yönteminde basınçlı bir şekilde ankraj kuyusuna doldurulan çimento enjeksiyonu, basıncın etkisiyle kök bölgesi etrafındaki zemini sıkıştırır ve açılan kuyu çapının büyütür. Düşük basınçlı enjeksiyonlanmış sisteme kıyasla daha büyük çaplı kök bölgesi ve zeminin sıkışmasıyla daha yüksek zemin mukavemet değerleri elde edilmesi neticesinde basınçlı enjeksiyonlanmış sistemde ankraj nihai çeper sürtünmesi daha yüksektir.

2.1.2.3. Zemin Ankrajlarında Korozyona Karşı Koruma Metotları

Metal parçalar içeren zemin ankrajları, iksa sisteminin yüzeyinden ankraj kafasına gelecek sulara maruz kalabileceği gibi zemin içerisinde bulunan su ve/veya kimyasal maddelerin ankraj serbest ve kök bölgesine temasına da maruz kalabilir. Bu tür zararlı durumlar zaman geçtikçe zemin ankrajının parçalarının korozyon bölgelerinde dayanım kaybına sebep olabilir. Zararlı durumları tanımlamak adına TS EN 206+A2 [11] tarafından XA-3 sınıfı olarak belirtilen koşullar aşağıda belirtilmiştir:

- Ph değeri (zeminde veya yeraltı suyunda) < 4,5
- Yeraltı suyunun Sülfat (SO_4^{2-}) içeriği > 3000 mg/l
- Zeminin Sülfat (SO_4^{2-}) içeriği > 12000 mg/kg
- Zeminin Amonyum (NH_4^+) içeriği: > 60 mg/l
- Zeminin Magnezyum (Mg^{++}) içeriği: > 3000 mg/l
- Zeminin Klorid (Cl^-) içeriği > %0,05
- Yeraltı suyunun kireç çözücü Karbondioksit (CO_2) içeriği > 100 mg/l

Korozyonu önlemek için sistemin maruz kalacağı agresif zemin koşullarının yanı sıra yapı ömrü vb. durumlar değerlendirilerek gerekli tedbirler alınmalıdır. Koruma işlemi ankrajın tüm bölümlerine (ankraj kafası, serbest ve kök bölgesi) uygulanmalıdır, kısmi koruma yapılmamalıdır. Dywidag tarafından oluşturulan alıcı ankraj parçaları Şekil 2.3'te verilmiştir [12].



Şekil 2.3: Kalıcı ankraj parçaları [12].

Koruyucu kapak, öngerme için dışarıda bırakılan ankraj halatını ve ankraj kafasını dış etkilere koruyan çelik veya plastik kapaktır.

Trumpet (boru), destekleme sisteminin kazı yüzeyinden akan ve içeriye girebilecek su vb. malzemelerin ankraj serbest bölgesindeki halat ile temasını engeller.

Çimento şerbeti veya korozyon önleyici bileşen, ankraj kafasının içinde hava kalmaması veya herhangi bir malzemenin içeri girmemesi için kullanılan katkı elemanıdır.

Ondüleli kılıf, ankraj serbest ve kök bölgesindeki halatları koruyan plastik kılıftır.

Merkezleyicilerin görevi ankraj halatını delgi içinde sabit ve merkezde tutmaktır. Her 3 m’de en az 1 adet merkezleyici kullanılması gerekmektedir. Ayırıcıların amacı halat ile enjeksiyonun daha fazla etkileşime girerek aderansını artırmaktır. Ayırıcılar her 1,5 m’de en az 1 adet kullanılmalıdır.

Korumalar tek ve çift bariyerli olmak üzere iki ayrılır. KDYY’e göre ankraj sistemleri kalıcı olarak tasarlanacaksa çift bariyerli koruma yapılması zorunlu tutulmuştur. Ankraj sistemi geçici olarak tasarlanacaksa ve zemin koşulları agresif değilse korozyon korumasına gerek yoktur. Agresif zemin koşulları altında tasarlanacak geçici ankrajlı sistemlerde tek bariyerli koruma zorunlu tutulmuştur. KDYY tarafından korozyona karşı korumada uygun sistem seçimi **Şekil 2.4**’te verilmiştir [7].

Korozyon Koruma Sistemi	Öngermeli Halat ve Çubuk Ankraj	
	Tek Bariyer	Çift Bariyer
Plastik Kılıf	Uygun	Uygun
Galvaniz Kaplama	Uygun	Uygun
Çimento Şerbeti	Uygun	Uygun Değil
Katodik Koruma	Uygun	Uygun

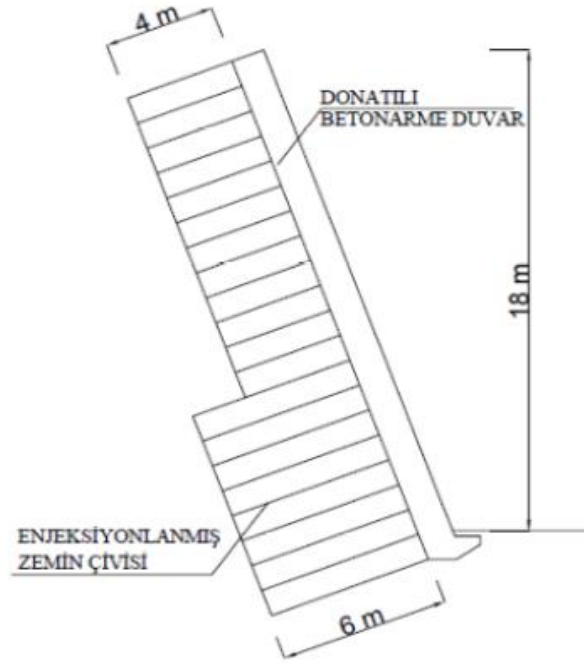
Şekil 2.4: Zemin ankrajında korozyon koruma sistemleri [7].

Korozyon koruma metotlarının detayları ve uygulama kriterleri için KDYY’e göz atılabilir.

2.1.3. Zemin Çivisi

Birçok alanda olduğu gibi zemin inşaatlarında uygulanan yöntemler birbirinden türemiş veya bir diğerini geliştirme yoluyla ortaya çıkmıştır. Kaya bulonu, çok sıra ankraj ve donatılı zemin sistemleri, zemin çivisinin atası sayılabilecek yöntemlerdir. Bu yöntemlerin değişmesi ve/veya gelişmesinden kısa bir süre sonra zemin çivisi kullanılmaya başlanmıştır [13].

Zemin çivisi olarak adlandırabilecek sistemin ilk uygulaması 1972-1973 yıllarında, Versailles'te Bouyhues ve Soletanche şirketleri tarafından demir yolu genişletme projesinde yapılmıştır. 18 m yüksekliğe sahip şevli kazıya yaklaşık 70 derece eğim verilerek 4-6 m uzunluğa sahip zemin çivileri ve betonarme duvarı inşa ederek stabilitesi sağlanmıştır [14]. Fransa'da ilk kez uygulanan zemin çivili sistemin şematik gösterimi **Şekil 2.5**'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5: İlk zemin çivili iksa sistemi uygulaması [14].

Yatay olarak delinen zemin, içerisine yerleştirilen donatının çevresi çimento şerbeti ile doldurulur ve yardımcı sistem olarak görev alır. Pasif sistem sınıfında olan zemin çivilerinin aktif olarak kuvvet taşıyıp destekleme sağlaması için çivi enjeksiyonu ile zemin arasında sürtünme kuvveti oluşmalıdır. Sürtünme kuvveti için hareket gerekir, bu da zemin çivisini pasif sistem sınıfına sokar. Genellikle göreceli olarak kendini tutabilen zeminlerde şevli olarak uygulanır.

Zemin çivili ve zemin ankrajlı sistemler kıyaslandığında birbirlerine göre artıları olduğu gibi eksikleri de vardır. FHWA [15] tarafından Amerika'daki zemin çivili sistemlerin tasarım yönetmeliği hazırlanmıştır. Buna göre zemin çivili sistemlerin ankrajlı sistemlere kıyasla avantajlarından bazıları şunlardır:

- Zemin çivisi geleneksel yöntemlere göre uygulandığında daha ekonomiktir;
- Komşu parselde işgal edilen mesafe daha kısadır;
- Düşey iksa sisteminde soketleme yapılmasına gerek yoktur;
- Deprem durumunda daha iyi performans gösterirler.

Yukarıdan-aşağı inme yöntemiyle inşa edilen çivili sistemlerin uygulanabilmesi için 1-2 m kazı yapıldığında zeminin sahip olduğu doğal kohezyon veya içsel enjeksiyonuyla kendisini tutması gerekir [13].

2.1.4. Çelik Boru Destekleme Elemanı (Strut)

İçleri boş olan çelik boru elemanları, iksa sistemlerinde yatay destek olarak kullanılırlar. Düşey olarak konumlanan diyafram duvar, fore kazık vb. bir iksa sistemleri ile kullanılır. Genellikle kısa parsel açıklığı olan, metro girişleri, tünel kazıları girişleri vb. alanlarda kullanılırlar. Yan parselde ankrajların uygulanamadığı, yeraltı su seviyesinin bulunduğu ya da stabil delgi yapmanın mümkün olmadığı zeminlerde diğer yatay destek sistemlerine kıyasla öne çıkarlar. Yanal toprak basıncından dolayı üzerlerinde eksenel kuvvet ve kendi ağırlıklarından dolayı eğilme momentine maruz kalırlar. Hesaplarında eksenel kuvvet, eğilme momenti ve sıcaklık etkisi de dikkate alınır.

Kazı ebatlarına göre kaynak veya bulon birleşimi yapılarak kolay şekilde gerekli boyaya göre imal edilebilirler [16]. Kazı görevini bitirip subasman seviyesine ulaşılırken sökülürler. Kaynak işçiliğinin kolay olması ve tekrar başka bir yerde kullanılabilir olması önemli avantajları arasındadır. Kazı içerisinde çalışan iş makinelerinin yüksekliğinden dolayı ya çelik elemanlar alt kotlara yerleştirilemez ya da uzun kollu kazıcılar kullanılması gerekmektedir. Bu da kazma işleminin hem süresini hem de maliyetini artırır. **Şekil 2.6'**da çelik boru destek elemanı görseli verilmiştir.

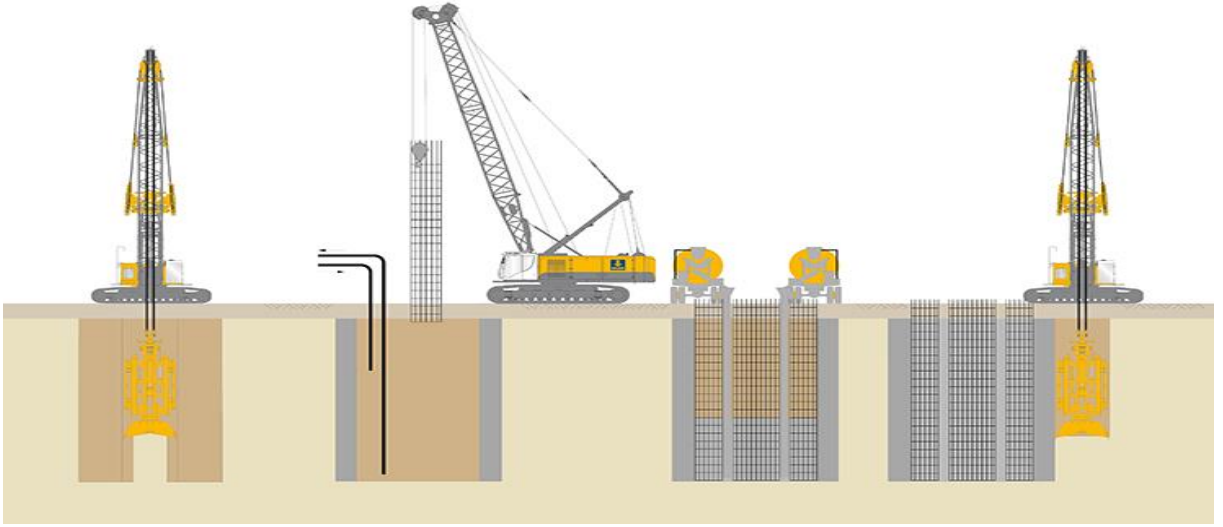


Şekil 2.6: Çelik Boru Destekleme Elemanı (Strut).

Çelik boru destek elemanlarındaki gerilmeleri ve deformasyonları ölçmek için üstlerine gerilim ölçer (strain gauge) ve deformasyon ölçerler yerleştirilir. Aletsel ölçüm ve gözlemler ile sistem performansı değerlendirilir ve gerekliyse tedbirler alınır.

2.1.5. Diyafram Duvar

Diyafram duvarlar betonarme yapılardır ve su geçirimsizliği konusunda iyi performans gösterdiği için yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu zeminlerde tercih edilen düşey iksa sistemlerinden birisidir. Kazının derinliği ve mevcut zemin koşulları değerlendirilerek hidrolik-mekanik kaşık veya hidrolik freze (cutter) ekipmanlı makinelerden birisi tercih edilir. Diyafram duvarlarda derine indikçe sapma olmaması ve yukarı kotlarda zemin akmalarını önlemek için ilk önce kılavuz duvarlar inşa edilir. Sonrasında kazma işlemi gerçekleştirilir. Kuyu stabilitesinin sağlanması amacıyla kuyu için bentonit ve/veya polimer sıvısıyla doldurulur. Stabilitesi sağlanan bir kuyuda kullanılan destek sıvı hacmi ile çıkarılan zemin hacmi eşit olmalıdır. Önceden hazırlanmış donatı kafesleri kuyu içine yerleştirilir. Segregasyonu önlemek için boru ucu hep beton içinde kalacak şekilde tremi borusu kullanarak beton dökümü işlemi gerçekleştirilir. Diyafram duvar yapım aşamalarını gösteren, Bauer [17] tarafından oluşturulan şematik görsel **Şekil 2.7**'te verilmiştir.



Şekil 2.7: Diyafram duvar yapım aşamaları [17].

Diyafram duvarlı destekleme sistemlerinin avantajları ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

Diyafram duvarlı destekleme sistemlerinin avantajları;

- Projelendirilmesi uygun yapılırsa yapı elemanı olarak da kullanılabilir,
- Daha derin imalat gerektiren yerlerde kesişen kazıklara kıyasla daha uygundur,
- Kaya vb. zemin koşullarında imalatı mümkündür,
- İmalatı sırasında az gürültü ve titreşim meydana gelmektedir,
- Kalıcı iksa sistemi olarak kullanımı uygundur,
- Deplasman konusunda yüksek performans gösterir, düşük yatay deplasman hedeflendiği durumlarda tercih edilebilir.

Diyafram duvarlı destekleme sistemlerinin dezavantajları;

- Kuyu stabilitesi için gerekli olan bentonit/polimer gibi sıvıların tedarik ve kullanımı için tesis kurulması gerekmektedir,
- Kullanılan destek sıvısının atık olarak çevreden uzaklaştırılması titiz çalışma ister ve maliyet oluşturur,
- Beton dökümünde segregasyon ve soğuk derz oluşumuna dikkat edilmelidir,
- Kazı derinliğinin nispeten düşük olduğu yerlerde maliyeti yüksektir,
- Makine-ekipman ve gerekli tesislerden ötürü dar parsellerde uygulanması zordur.

2.1.6. Kuyu Temel

Kuyu temel nitelikli elemanlar tarafından elle kazılan (havalı kırıcı, kazma kürek vb.) ve kalaslarla desteklenen kuyunun, tek taraflı kalıp kullanarak aşağıdan yukarıya doğru imal yönüyle betonarme perdeye verilen isimdir. Diyafram duvar, fore kazık vb. büyük makine-ekipmanların çalışamayacağı küçüklükteki alanlarda, bitişik nizam veya parsellerin değerli olduğu ve herhangi bir alan kaybı istenmeyen inşaat alanlarında tercih edilir. Girintili çıkıntılı olan farklı geometrilere uygulanabilir. Uygun projelendirme yapılırsa bina taşıyıcı perdesi olarak da kullanılır. Yüksekliği 20 m'ye ulaşabilen perdelerin kalınlıkları genellikle 30-80 cm arasında seçilmektedir. Derinlik arttıkça yatay itkinin artmasından dolayı perde kalınlığı artırılabilir. Pasif direnci ve güvenliği artırmak için nihai kazı kotu altına soket kısmı yapılabilir. Gerekliyse ankraj, çelik boru destek gibi yatay elemanlarla birlikte kullanılabilir. Kuyuların plan boyutları genelde 1,5 m * 3,0 m olarak seçilmektedir, zeminin kendini tutma durumuna göre bu ölçüler değişebilmektedir. **Şekil 2.8 (a)**'da kazılmış ve tahtalarla tutulmuş bir kuyu perde imalat görseli bulunmaktadır. Yeraltı suyu bulunan zeminlerde sağlıklı çalışma ortamı oluşturmak amacıyla kuyu içerisinde su çukuru bulundurulmalıdır ve devamlı olarak çalışma alanından derin tutulmalıdır. **Şekil 2.8 (b)**'de kuyu temellerin ve beton içinde kalmış kalıpların görseli bulunmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 2.8: Kuyu temel; yapım sırasında (a), son hali (b).

Kuyu temellerin avantajları ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

Kuyu temel avantajları;

- Makine-ekipman çalışmayacak kadar dar olan alanlarda imalat mümkündür,
- Uygun projelendirilirse yapıya dahil betonarme perde olarak kullanılabilir,
- Daha az yer kapladığı için parselden kayıp azdır.

Kuyu temel dezavantajları;

- Geçici sistemlerde kalıp için kullanılan kalaslar betonarme yapı içinde kalır, tekrar kullanılamaz,
- Su seviyesi altında imalatı mümkün değildir,
- Kısıtlı çalışma alanı ve makine kullanılmamasından ötürü imalat süreci yavaştır.

2.2. TÜRKİYE’de KDYY ÖNCESİ KULLANILAN YÖNETMELİKLER ve GENELGELER

Bu bölümde Türkiye’de ve dünya çapında destek yapılarının tasarım ve kontrolü için kullanılan yönetmelik, genelge ve yayımlardan bahsedilmiştir.

Türkiye Deprem Yönetmeliği (TDY) 2007’de [18] dayanma ve iksa sistemlerine ‘Depremde Toprak Basıncı ve Zemin Dayanma (İstinat) Yapıları’ başlığı altında dört sayfa boyunca değinilmiştir. Statik ve dinamik yükleme koşullardaki aktif ve pasif toprak basıncı katsayılarının hesaplanması için formüller bulunmaktadır. Depremlili durumda sisteme etki edecek toprak basıncının hesabında kullanılan yatay ve düşey eşdeğer deprem katsayıları verilmiştir.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018’in [19] dayanma yapıları tasarımı içeren kısmında limit denge (göçme) ve servis durumlarına dikkat edilmesi vurgulanmıştır. Konsol kazık, ankraj, zemin çivisi vb. iksa sistemleri kullanılan şevlerde zemin-yapı etkileşim hesaplarını zorunlu tutmuştur. Kazı destek yapıları ve şevlerin tasarımında zemin özelliklerinden olan kohezyon ve içsel sürtünme açısına dayanım katsayıları uygulanarak değerleri düşürme metodunu önermiştir.

2.2.1. Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler Genelgesi

Türkiye’de geoteknik mühendisliğinin alanına giren, 2018 yılına kadar yayımlanan resmi dokümanlarda, kazı destekleme sistemleri için temel ifadeler yer almakta olup diğer alanlara kıyasla daha az değinilmiştir. 2018 yılında yayımlanan ve geoteknik tasarım esasları, geoteknik proje çizimleri, uygulama teknik şartnamesi, performans ölçümleri ve kriterleri, uygulama kontrol esasları, şevli kazılar, iksa sistemi ile desteklenen kazılar, iş güvenliği ve çevre tedbirleri kısımlarını içeren 11 sayfalık Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler Genelgesinde 1,75 m’den daha derin herhangi bir kazıda şevli kazı ya da iksa sistemi ile önlem alınması zorunlu tutulmuştur [1]. Genelgeden ‘Zemin ve Temel Etüdü’ ile ilgili madde çıkarılıp

‘derin kazı – iksa vb. konulardaki tasarım hesap raporları ve çizimlerin geoteknik mühendisi tarafından hazırlanması gerektiğini’ söyleyen madde eklenip [2] tekrar 2022 yılında yayımlanmıştır. Yayımlanan bu iki genelgede birçok uluslararası yönetmeliğe atıflar yapılmıştır.

Kazının açık kaldığı süre boyunca hem kazı içindeki malzeme, işçi vb. inşaat unsurlarının hem de yan parsellerdeki bina, yol vb. tesislerin güvenliği sağlanmaya çalışılmıştır. Açık kazının etki alanını belirlemede maksimum kazı derinliği H_{max} olmak üzere etki mesafesi $2*H_{max}$ olarak kabul edilmiştir ve bu alandaki tüm yapıların güvenliği ve konforlu kullanımı analizlerle güvence altına alınmıştır. İlave gerilmeleri önlemek adına kazının, şevin üst başlangıcından 2 m mesafede malzeme depolanması, yol ve yapı benzeri yük durumları engellenmiştir. Kohezyonlu zeminlerdeki maksimum ankraj servisi yükü, kök boyu vb. kıstasları göz önüne alınmadan 35 ton olarak sınırlanmıştır. Geçici iksa sınıfında bulunan yapılar 2 yıldan uzun süre açık kalacaksa deprem kuvveti hesabı yapılmalıdır.

2.2.2. KDYY Yönetmeliği İçeriği ve Önemi

FHWA’da [5] belirtildiği üzere resmî kurumlar tarafından hazırlanan yönetmeliklerdeki tasarım kriterleri ve esasları genellikle o ülkedeki problemlere ışık tutma, standardı sağlama vb. amaçlarla yayımlanır. Türkiye’deki farklı zemin tipleri, şirketlerin sahip olduğu makine-ekipman, eleman tecrübesi, projelendirme ihtiyacı da ülke özelinde bir genelgeye ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Uluslararası geçerliliği olan FHWA, Eurocode 7 vb. yönetmeliklerden yaklaşık 20 yıl sonra bu ihtiyacı karşılayacak olan yönetmelik yayımlanmıştır. İstinat tipi (yerinde dökme/taş ağırlık, gabion duvar vb.) yani inşasından sonra arkası dolgu yapılarak, desteklenecek zemin ile arası doldurulan dayanma yapıları yönetmelik kapsamı dışında tutulmuştur. Palplanş, diyafram duvar, kuyu perde vb. birçok iksa sisteminin yapım metodolojisi, tasarımda ve uygulamada dikkat edilecek hususlara değinilmiştir. Bunun yanında zemin ankrajı ve zemin çivisinin tasarım esaslarıyla birlikte imalat sonrası değerlendirme testleri, aletsel ölçüm ve gözlemlere değinilmiştir.

İnşaat alanında bazen çeşitli sebeplerden ötürü projelerde aksamalar meydana gelebilir. Geçici olarak projelendirilen bir kazıda gecikmelerden ötürü herhangi bir cephe iki yıldan uzun süre açık kalacaksa kazının kategorisi değişir. Sahada görsel incelemeler, gerekli analizler yapılarak ve aletsel ölçüm sonuçları incelenerek söz konusu kazı çukuru için alınacak ilave

tedbirler belirlenir. Herhangi bir geçici iksa sistemi en fazla dört yıl süreyle açık kalabilir, bu süre aşılsa kazı çukuru subasman seviyesine kadar doldurulur.

KDYY'e göre geoteknik işlerde doğru tasarımı artırmak, inşaat mühendisliğinde uzmanlaşmayı teşvik etmek vb. sebeplerden ötürü kazı destek yapılarının tasarımcılarının bazı kriterleri sağlaması gerekmektedir. Kazının karmaşıklığı ve tasarlama zorluğu arttıkça tecrübe, öğrenim seviyesi, yapılan proje sayısı gibi kriterler devreye girmekte ve projeyi yapacak kişide aranan uzmanlık seviyesi artmaktadır. KDYY bu konuda düzenleme getirerek, eğitim ve tecrübenin önemini ortaya koymuştur.

2.2.2.1. KDYY Tasarım El Kitabı

Temmuz 2023'te KDYY'e göre proje hazırlanmasına örnek olması açısından birçok farklı zemin türü ve sistem çeşidini kapsayan, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği, Geoteknik Anabilim Dalı öğretim üyeleri tarafından Tasarım El Kitabı [20] yayımlanmıştır.

2.3. KDYY'E GÖRE ZEMİN ANKRAJLARININ TASARIM ESASLARI

Zemin ankrajlarının tasarımında dikkate alınacak hususlar bu bölümde anlatılmıştır.

2.3.1. Sınır Durumları

Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği'ne göre tasarımlarda iki farklı durum için analizler yapılmalıdır, bunlar: Göçme Sınır Durumu (ULS) ve Hizmet Görebilirlik Sınır Durumu (SLS) olarak belirtilmiştir. Göçme sınır durumları aşağıda sıralanmıştır:

- Sistem dengesinin kaybolması,
- Yapısal elemanda göçme veya aşırı şekil değiştirme,
- Zeminde oluşan göçme veya aşırı şekil değiştirme,
- Malzeme yorulması veya zamana bağlı etkilerle oluşan göçme,
- Hidrostatik etkiler nedeniyle oluşan kaldırma, sızıntı, borulanma ve erozyon.

Hizmet Görebilirlik Sınır durumu ise sistemin servis ömrü boyunca kullanımının konforlu şekilde sağlanmasıdır. Kullanım konforunu etkileyen unsurlar olarak deplasman, açısal dönme, birim şekil değiştirme vb. konular sıralanabilir.

2.3.2. Kazı Kategorileri

KDYY, iksa sistemlerini bazı kriterlere göre Kategori-1 (KK-1), Kategori-2 (KK-2), Kategori-3 (KK-3) olarak üç kategoriye ayırmıştır. Bu kriterler şöyle sıralanabilir:

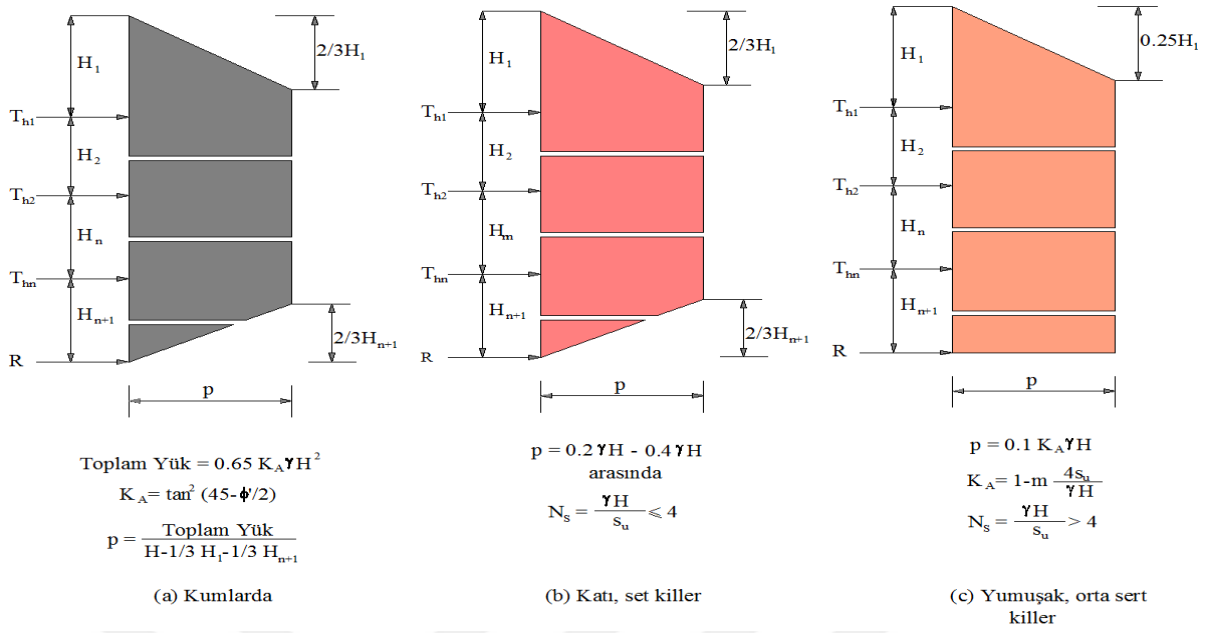
- Kazı derinliği (H),
- Kazı taban seviyesi üzerindeki yeraltı suyu varlığı,
- Zemin cinsi,
- Komşu yapı uzaklığı (d),
- Toplam cephe plan uzunluğu,
- Yapı ömrü (geçici/kalıcı),
- Yatay eleman kullanımı (ankraj, zemin çivisi vb.).

Kazı derinliğinin artması, yeraltı suyunun varlığı, yatay destek elemanı kullanımı vb. iksa sistemini daha karmaşık hale getiren durumlar sistemin kategorisi yükselir. Kategori yükseldikçe sistem analiz sayısı ve/veya analiz derinliği artabilir, dinamik yükleme etkisinin incelenmesi gerekebilir veya deprem yer hareketi düzeyi sınıfı değişebilir. Kategori seçiminde dikkat edilen hususlar ve seçilen kategorinin etkilediği analiz adımları için KDYY'e başvurulabilir.

KDYY'e göre KK-1 sistemlerde SLS analizlerinin yapılmasına gerek yoktur. Sistemin Göçme Sınır Durumu kontrolleri yapılır. Eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti, hesaplanır ve sistem analizi tamamlanır.

2.3.3. Yatay Toprak Basıncı Dağılımı

Kazının yapılması ile yerinden çıkarılan zemin, gerilme boşalmalarına sebep olur. Azalan gerilmeler sonucu hem taban hem de yan taraftaki zeminde hareketler meydana gelir. Meydana gelen hareketin uygulayacağı kuvveti tahmin etmek için birçok araştırmacı farklı metot öne sürmüştür. Zemin cinsi, iksa sisteminin konsol veya yatay destekleme elemanları ile tutulu olması, en üst yatay desteğin konumu vb. durumlar dikkate alınarak yatay toprak basıncı diyagram şekilleri ve büyüklükleri değiştirmektedir. Zemin ankrajlı sistemlerin tasarımında kullanılmak üzere yatay toprak basıncı dağılım diyagramları KDYY tarafından paylaşılmıştır. Kum, katı-sert kil ve yumuşak-orta sert kil zemin türleri için üç farklı diyagram **Şekil 2.9**'da verilmiştir.



Şekil 2.9: Ankrajlı kazı destek sistemleri için yatay toprak basıncı diyagramları.

Zeminde oluşacak deplasmanlardan dolayı meydana gelecek yatay toprak kuvvetleri Alan, Mafsal, Hiperbolik vb. uygun yöntemlerden birisi kullanılarak hesaplanabilir. Arslan ve Öztoprak [21] yaptığı çalışmada Alan (Tributary) Yöntemi kullanarak yapılan tasarımda Mafsal (Hinge) ve Hiperstatik Yönteme kıyasla daha düşük yatay toprak kuvvetleri hesaplandığı ve bunun sonucunda daha ekonomik tasarımların oluşturulduğunu ortaya koymuştur.

2.3.4. Kısmi Katsayılar Metodu

Proje aşamasında zeminin kohezyon, içsel sürtünme açısı, birim hacim ağırlığı gibi parametrelerin doğru şekilde belirlenmesi hayati önem arz etmektedir. Bunun yanında yeraltı suyu derinliğinin yanlış kullanılması da birçok iksa sisteminin göçme sebepleri arasındadır. Yeraltı suyu sadece ağırlığının değil aynı zamanda drenajlı ve drenajsız zemin parametrelerine etkisi de oldukça önemlidir. İksa elemanlarının kesme dayanımı, elastisite modülü, sürtünme direnci, taşıma gücü vb. özelliklerini doğru tayin etmek gerekir. Etki mesafesindeki yapıların ağırlığı ve kazının bu yapılara etkisi irdelenmelidir. Bu hususlar Etki (A), Malzeme (M) ve Tepki (R) olarak üç sınıfa ayrılır. Etkiler kendi içinde önce sabit ve değişken etkiler diye ayrılır sonrasında ise “güvenliği azaltıcı veya artırıcı” olarak sınıflandırılır. Örnek olarak iksa sisteminin arkasındaki yapı, ağırlığından ötürü “güvenliği azaltıcı” etkiler sınıfında bulunmaktadır. İksa sisteminde kullanılan yapı malzemelerin yanı sıra zemin parametreleri de ‘Malzemeler’ kümesinde yer alır. Tepkiler sınıfında ise sistemin göçmesini önlemeye çalışan “pasif zemin direnci, toptan göçmedeki zemin direnci ve ankraj kuvvetleri” yer alır.

Bu uygulama esaslarında kısmi katsayılar yöntemi kullanılır. Bu yöntem Eurocode 7 Tasarım Yaklaşımı 2'dir, birçok ülkede uygulanmaktadır. Tabloda gösterildiği üzere ULS hesaplarında etkiler (A), malzemeler (M) katsayılarla çarpılır. Tepkiler (R) ise katsayıya bölünür. KDYY'de belirtilen ve Eurocode 7 DA2 (Tasarım Yaklaşımı-2) ile aynı olan kısmi katsayılar **Tablo 2.1**'de verilmiştir.

Tablo 2.1: Kısmi katsayılar tablosu [7].

Kısmi Katsayı Seti			A	M	R
Sabit Etki (G)	Güvenliği azaltıcı	$\gamma_{G,dst}$	1.35		
	Güvenliği artırıcı	$\gamma_{G,stab}$	1.00		
Değişken Etkiler (Q)	Güvenliği azaltıcı	$\gamma_{Q,dst}$	1.50		
	Güvenliği artırıcı	$\gamma_{Q,stab}$	0.00		
Kayma Mukavemeti Katsayısı ($\tan \phi$)		γ_ϕ		1.00	
Efektif Kohezyon (c')		$\gamma_{c'}$		1.00	
Drenajsız Kayma Mukavemeti (s_u)		γ_{s_u}		1.00	
Serbest Basınç Dayanımı (q_u)		γ_{q_u}		1.00	
Birim Hacim Ağırlık (γ)		γ_γ		1.00	
Pasif Zemin Direnci (Dayanma Yapıları)*		γ_{Re*}			1.40
Zemin Direnci (Toptan Göçme)*		γ_{Re}			1.10
Öngermeli ankrajlar (geçici - kalıcı)		γ_a			1.10
*Zemin direnci, dayanma yapıları ve toptan göçme analizlerinde farklı değerler almakta olup, yukarıda her iki koşul için de kısmi katsayılar verilmiştir.					

Yapılan analizlerde tasarım direnci, tasarım etkilerinden büyükse sınır durumu şartı sağlandığı kabul edilir. Yani katsayılar kullanıldığı takdirde güvenlik sayısının 1 (bir) olması yeterlidir. Kullanılmadığı takdirde geçici sistemlerde $GS \geq 1,35$, kalıcı kazı destek yapılarında ise $GS \geq 1,5$ olmalıdır. SLS hesaplarında tüm katsayılar 1 (bir) olarak alınır.

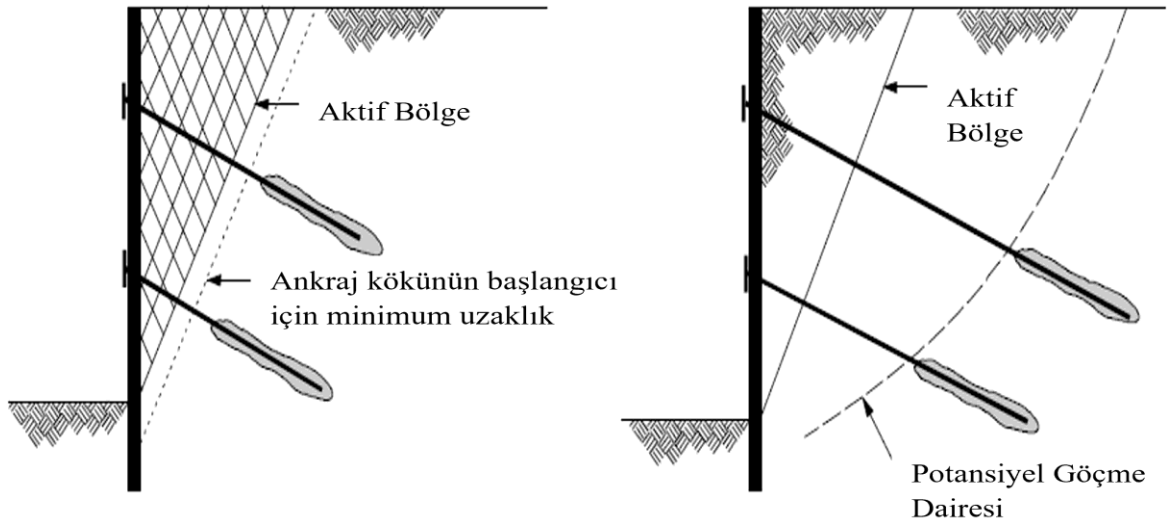
2.3.5. Toptan Göçmeye Karşı güvenlik

Stabilite analizleri yaparken, imalat aşamasında karşılaşılabileceğimiz olumsuz durumları da göz ardı etmemek için en fazla 50 cm olmak üzere beklenmedik kazı aşamasını da hesaplara dahil edilmelidir. Yan parsel işgal mesafesi, uygulanabilir ankraj kök boyu ve açısı vb. kriterler göz önüne alınarak gerekli yatay destek arası merkezden merkeze mesafe ve ankraj kök uzunluğu hesaplanır. Bu kuvvete uygun olarak ankraj demet sayısı belirlenir. Yapılan ULS

hesaplarından elde edilen göçme dairesine uygun olarak serbest boy tasarımı yapılır. Analizler neticesinde elde edilen tasarım direncinin tasarım etkisinden büyük olma durumu irdelenir. Bu durum güvenlik sayısının (GS) ≥ 1 olduğu anlamına gelir. SLS analizlerinde iksa sisteminde oluşacak en büyük yanal ve düşey gerilmelerin belirlenen sınırlar içinde kalıp kalmadığı kontrol edilir. Etki mesafesi içinde kalan komşu yapı vb. tesislerde meydana gelen yanal, düşey oturma ve açısal dönmelerin olabilecekleri en büyük değerden küçük olma durumu incelenir.

2.3.6. Ankraj Serbest Bölgesi

Şekil 2.10’da karelay ile gösterilen alan göçmeye çalışan zemin kısmıdır ve aktif bölge olarak adlandırılır. KDYY’de [7] belirtildiği üzere güvenli tarafta kalmak için serbest boy, potansiyel göçme dairesinin $0,2H$ ya da 2 m arkasında kalacak şekilde uzun olmalıdır. Bu bölgenin arkasındaki zemin ile ankraj kökü arasında oluşan sürtünme kuvveti, ankrajımızın çeper dayanımını oluşturur. Bu kuvvet sayesinde ankrajlar sisteme yatay olarak yardımcı olur.



Şekil 2.10: Zemin ankrajı ve potansiyel göçme dairesi.

Ankraj halatı olarak fabrikada üretilip birçok kontrolden öngerme halatı kullanılmaktadır. American Society for Testing and Materials tarafından 0,6 inç çapa sahip bir Grade 270 çeliğinin kesit alanı, nihai dayanımı ve öngerme kuvveti hesaplanmıştır [22]. Öngerme çeliğinin özellikleri **Tablo 2.2**'de verilmiştir.

Tablo 2.2: ASTM A416 Grade 270 öngerme halat özellikleri [22].

Halat Sayısı (15 mm çapa sahip)	Kesit Alanı (A_{ps})		Nihai Dayanım (f_{pu})		Öngerme Kuvveti					
					$0,8*f_{pu}*A_{ps}$		$0,7*f_{pu}*A_{ps}$		$0,6*f_{pu}*A_{ps}$	
	(in. ²)	(mm ²)	(kips)	(kN)	(kips)	(kN)	(kips)	(kN)	(kips)	(kN)
1	0.217	140	58.6	260.7	46.9	209	41.0	182	35.2	156
3	0.651	420	175.8	782.1	140.6	626	123.1	547	105.5	469
4	0.868	560	234.4	1043	187.5	834	164.1	730	140.6	626
5	1.085	700	293.0	1304	234.4	1043	205.1	912	175.8	782

Tez kapsamında kullanılan öngerme halatının nihai dayanımı **Tablo 2.2**'de 260 kN olarak verilmiştir. KDYY'de en yüksek ankraj kitleme yükü, ankraj halatının nihai dayanımının %60 olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Hesaplarda ankraj halatının dayanımının %60'ını kullanmak için halat nihai dayanımı '1,67' kat sayısına bölünmüş ve $780 \text{ kN} / 1,67 = 467 \text{ kN}$ olarak kullanılmıştır.

2.3.7. Ankraj Kök Bölgesi

Ankraj kökü ile çevresindeki zemin arasında oluşacak sürtünme kuvveti, zemin türüne göre drenajsız kayma mukavemeti veya içsel sürtünme açısı içeren formülasyonlardan hesaplanabileceği gibi önceki tecrübelerden ve literatürden elde edilen tablolardan da elde edilebilir. **Tablo 2.3**'te kohezyona sahip zemin birimleri için KDYY tarafından önerilen nihai kök çeper sürtünme değerleri bulunmaktadır.

Tablo 2.3: Kohezyonlu zeminlerdeki ankraj kök nihai çeper sürtünmesi [7].

Ankraj Tipi	Zemin/Enjeksiyon Arayüzeyi İçin Ortalama Nihai Çeper Sürtünme Değerleri- τ_f [MPa]
Düşük Basıncılı Enjeksiyonlanmış Ankrajlar	0.03 – 0.07
Basıncılı Enjeksiyonlanmış Ankrajlar	
Yumuşak Siltli Kil	0.03 – 0.07
Siltli Kil	0.03 – 0.07
Orta-Yüksek Plastisiteli Katı Kil	0.03 – 0.10
Orta-Yüksek Plastisiteli Çok Katı Kil	0.07 – 0.17
Orta Plastisiteli Katı Kil	0.10 – 0.25
Orta Plastisiteli Çok Katı Kil	0.14 – 0.35
Orta Plastisiteli Çok Katı Kumlu Silt	0.28 – 0.38

Kök bölgesi kohezyonsuz zeminler içinde kalan ankrajların kök nihai çeper sürtünmesi için KDYY tarafından **Tablo 2.4**'teki değer aralıkları önerilmiştir.

Tablo 2.4: Kohezyonsuz zeminlerdeki ankraj kök nihai çeper sürtünmesi [7].

Ankraj Tipi	Zemin/Enjeksiyon Arayüzeyi İçin Ortalama Nihai Çeper Sürtünme Değerleri- τ_f [MPa]
Düşük Basıncılı Enjeksiyonlanmış Ankrajlar	0.07 – 0.14
Basıncılı Enjeksiyonlanmış Ankrajlar	
Orta Sıkı – Sıkı, İnce- Orta Kum	0.08 – 0.38
Orta Sıkı, Orta – İri, Çakıllı Kum	0.11 – 0.66
Sıkı – Çok Sıkı, Orta İri ,Çakıllı Kum	0.25 – 0.97
Siltli Kum	0.17 – 0.41
Sıkı Buzul Birikintisi	0.30 – 0.52
Orta Sıkı – Sıkı Kumlu Çakıl	0.21 – 1.38
Sıkı -Çok Sıkı Kumlu Çakıl	0.28 – 1.38

Ankraj nihai ve karakteristik çeper sürtünmesinde kullanılacak denklemler olan **Denklem (2.1)** ve **Denklem (2.2)** aşağıda verilmiştir. Zemin cinsine göre **Tablo 2.3** ve **Tablo 2.4** kullanılarak tercih edilen nihai çeper sürtünme değerleri, **Denklem (2.1)**'de kullanılarak ankraj kökünün dayanımı elde edilir. Ankraj kökü karakteristik taşıma kapasitesinin elde edilmesi için KDYY'de önerilen güvenlik sayısı (GS) 2,5-4 tür. Bu aralıkta kalacak şekilde tasarımcı tarafından tercih edilen güvenlik sayısı (GS), **Denklem 2.2**'de kullanılarak ankraj kök karakteristik dayanımı elde edilir.

$$T_f = \pi \cdot D \cdot L_{tb} \cdot \tau_f \quad (2.1)$$

$$T_k = T_f / \xi \quad (2.2)$$

T_f : Ankraj kökü nihai taşıma kapasitesi

T_k : Ankraj kökü karakteristik taşıma kapasitesi

D : Kök bölgesi etkin çap değeri

L_{tb} : Halat kök boyu

τ_f : Ankraj kökü nihai çeper sürtünmesi

ξ : Karakteristik çeper sürtünmesi için güvenlik sayısı

2.3.8. Analiz Aşamaları

KDYY'e göre kazı destekleme sistemlerinin değerlendirilmesinde beş aşamalı analiz bulunmaktadır [7]. Bu bölümde analiz aşamalarına değinilmiştir.

Birinci aşama analizi (ULS-GEO), kazı destek sisteminin inşa edildiği zeminin statik yükleme altında göçme sınır durumu analizlerini içermektedir. LEM yazılımına, **Tablo 2.1**'de bulunan kısmı katsayılar seti girilerek sistemin toptan göçme analizleri yapılır. Yapılan analiz neticesinde elde edilen güvenlik sayısı (GS) ≥ 1 ise sistemin birinci aşama analizlerini geçtiği kabul edilir.

İkinci aşama analizi (ULS-HYD, ULS-UPL vb.), zeminde bulunan yeraltı suyu kaynaklı borulanma ve kaldırmaya karşı göçme sınır durumlarının incelendiği kısımdır.

Üçüncü aşama analizi (SLS-GEO), kazı destek sistemi ve inşa edildiği zeminin hizmet görebilirlik sınır durumunun değerlendirildiği kısımdır. Gerilme deformasyon analizi yapabilen bir yazılım ile **Tablo 2.1**'de bulunan sadece "Değişken etkiler-Güvenliği azaltıcı" etkiler 1.11 katsayısı ile çarpılır ve yatay-düşey deplasmanlar elde edilir. Kazı destek sistemi türüne göre verilen deplasman kriterleri aşılmamışsa sistem üçüncü aşama analizlerini geçmiştir.

Dördüncü aşama analizi (ULS-DEPREM), dinamik yükleme altında LEM yazılımında göçme sınır durumu analizlerini içermektedir. Kazı destek sisteminde deprem etkisi incelenmesi gerekiyorsa **Tablo 2.1**'de bulunan kısmı katsayılar seti kullanılmadan sistemin toptan göçmeye karşı güvenlik analizi yapılır. Güvenlik sayısı (GS) ≥ 1 durumu ise sistemin dördüncü aşama analizlerini geçtiği kabul edilir.

Beşinci aşama analizi (ULS-STR), sistemin betonarme kesit tesirlerinin elde edildiği kısımdır. Statik yükleme durumundaki tüm ara kazı ve beklenmedik kazı durumlarından elde edilen kesit tesirleri (eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti) $\gamma_{G,dst} = 1,35$ katsayısı ile çarpılır. Dinamik yükleme durumunda elde edilen kesit tesirleri $\gamma_{EQ} = 1$ katsayısı ile çarpılır. Her iki yükleme durumundan elde edilen kesit tesirlerinden büyük olanı tasarım kesit tesiri olarak kabul edilir. Tasarım kesit tesiri ile tasarım dayanımı karşılaştırılarak sistem güvenliği analiz edilir. Beşinci aşama analizlerinde güvenlik sayısı (GS) ≥ 1 olduğu takdirde sistem analizleri geçmiş sayılmaktadır.

3. YÖNTEM

Yönetmelikler farklı teoriler ve yaklaşımlar üzerinden yapılan tasarımlara izin verebildiği gibi bazı kısımlarda ise belirli metotları kabul edebilmektedir. KDYY, FHWA ve Eurocode 7 gibi bilindik yönetmeliklerle benzerlik gösterse de karakteristik olarak farklılıklar da içermektedir.

Türkiye'deki derin kazıların tasarım esaslarını içeren KDYY'nin uluslararası yönetmelikler ve ülkemizde mevcut olan genelgeler ve yönetmeliklerle yöntem, kriter vb. açılardan kıyası Bir Vakanın Yeniden Analizi bölümünde yapılmıştır.

Nümerik modellerin analizi bölümünde kalıcı destek yapılarının konsol fore kazık ve zemin ankrajlı fore kazık sistemleri üzerinden güvenlik-deplasman-maliyet değerlendirmesi yapılmıştır.

Tüm bu analizleri gerçekleştirirken limit denge ve sonlu elemanlar metotları kullanan iki farklı yazılımdan yardım alınmıştır.

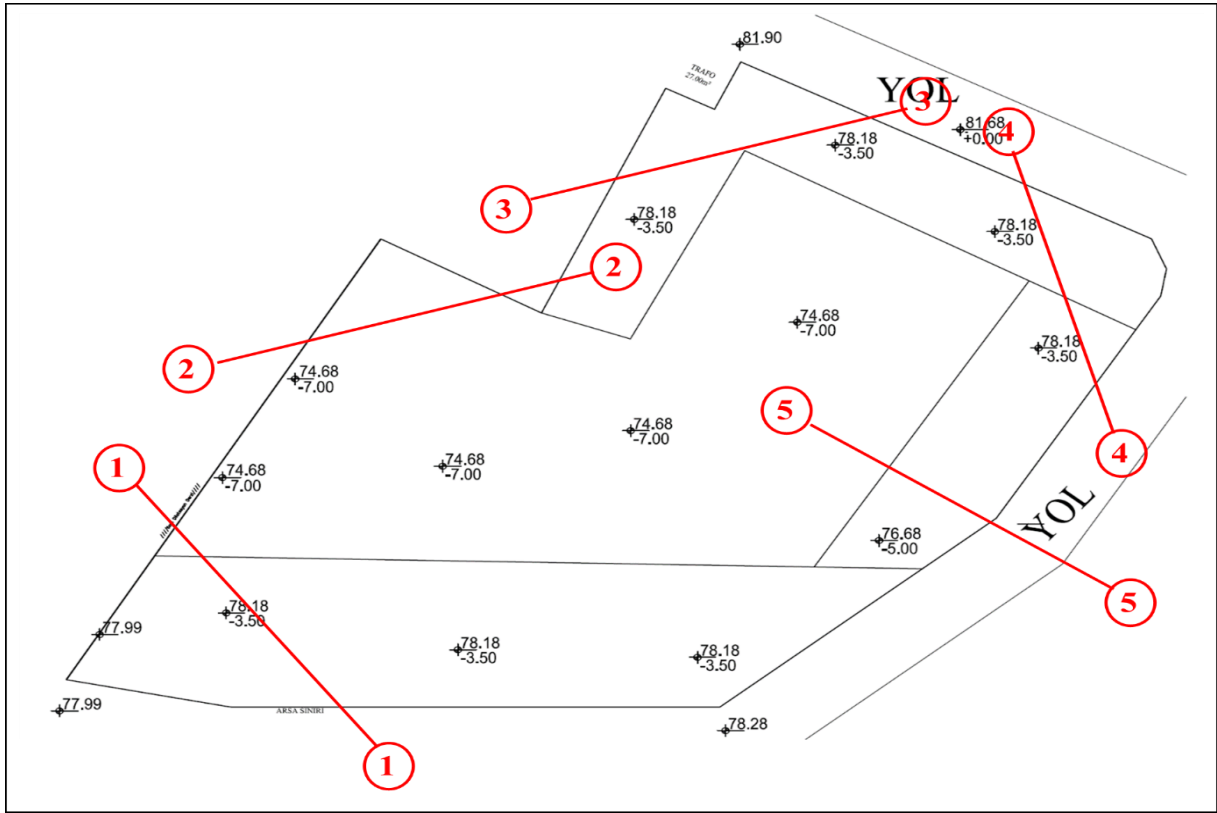
3.1. BİR VAKANIN YENİDEN ANALİZİ

Bu bölümde, Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler Genelgesi (2018-2022) ve Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği yayımlanmadan önce, FHWA tarafından zemin ankrajları tasarım metotları ve kriterleri üzerine yayımlanan dokümana uygun olarak tasarımı ve imalatı yapılmış bir derin kazı projesinin Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği'ne göre yeniden analizi yapılmış ve proje sonuçlarının KDYY kriterlerine göre uygunluğu değerlendirilmiştir.

3.1.1. Mevcut Proje Bilgileri

Tezin vaka analizi kısmında İstanbul İli, Esenyurt İlçesi'nde yapılan bir iksa sisteminin KDYY'ne göre uygunluğu tartışılmıştır. Tasarım raporu Mart 2017 tarihinde hazırlanmış olup inşası tamamlanan derin kazı sisteminin yapımında, beklemedik deplasman vb. problemlerle karşılaşılmamıştır. Tasarım raporu ise o tarihte -ve halen- uluslararası geçerliliği olan ve yaygın şekilde kullanılan FHWA'ı esas alarak yapılmıştır. Mevcut projenin vaziyet planı ve kesit numaralandırılması **Şekil 3.1**'de verilmiştir. Vaka analizi kapsamında aşağıda zemin profili ile iksa sistemi durumu verilen '5-5' kesitin çözümü yapılmıştır.

Söz konusu projedeki yapı 6 bodrum kat + 1 zemin kat + 40 normal kata sahip olmakla birlikte, bu çalışmada ele alınan kesitte temel alt kotu (+58,6 m) ile yol kotu (+80 m) arasında fark yaklaşık olarak 21,4 m dir. Kazık üst kotu +78,18 m’dir. Projede kazı derinliği +78,18 m kotu ile +58,6 m kotu arası kabul edilmiştir ve $H=19,6$ m olarak hesaplanmıştır. Yol, kazık üst kotundan itibaren yatayda 5 m’lik düzlükten sonra + 2 m yukarıdadır ve 15 m uzunluğundadır. Yol yükü analiz yazılımlarına 10 kN/m^2 sürsaj yükü olarak tanımlanmıştır. Yeraltı suyu +74,00 m kotundan itibaren aşağıda bulunmaktadır. Mevcut projede FHWA baz alınarak tasarlanmış olan kazı destek sistemi, geçici olarak hizmet vereceği için deprem analizi yapılmamıştır.



Şekil 3.1: Vakanın mevcut proje vaziyet planı ve kesitleri.

Zemin etüdünden elde edilen likit limit (LL), plastisite indisi (IP), ince dane oranı, zemin sınıfı, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri **Tablo 3.1**'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Mevcut projedeki plastisite indisi, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri.

Zemin	LL (%)	IP (%)	İnce Dane Oranı %	Zemin Sınıfı	C (kg/cm ²)	ϕ (°)
Alüvyon	40,9	15,7	69,4	CL	0,409	9
Siltli kil	39,6	19,9	62,45	CL	0,64	8
Kumlu kil	30,6	10,4	58,91	CL	0,579	13

Zemin parametrelerinin belirlenmesi için 39 m serim uzunluğuna sahip MASW deneyleri yapılmıştır. Deneyden elde edilen veriler ile zemin tabakalanması 3 katmana ayrılmıştır. Yapılan MASW deneyler neticesinde birinci katman yüzeyden itibaren 1,5 m derinliğe sahip ve S dalga hızı 151 m/sn ölçülmüştür. İkinci katman 13 m derinliğe sahiptir ve S dalga hızı 339 m/sn olarak belirlenmiştir. Zemin sınıfını belirlemek için 30 m derinliğe sahip deney verisinin yeterli olacağı kabul edilmiştir ve üçüncü katman derinliği bu kriteri sağlamaktadır. Üçüncü katman S dalga hızı 339 m/sn olarak belirlenmiştir. MASW deneylerinden elde edilen veriler ışığında TBDY'e göre zemin sınıfı ZD olarak belirlenmiştir. MASW deneyinden elde edilen veriler **Tablo 3.2**'de verilmiştir

Tablo 3.2: Dinamik parametreler hesap tablosu.

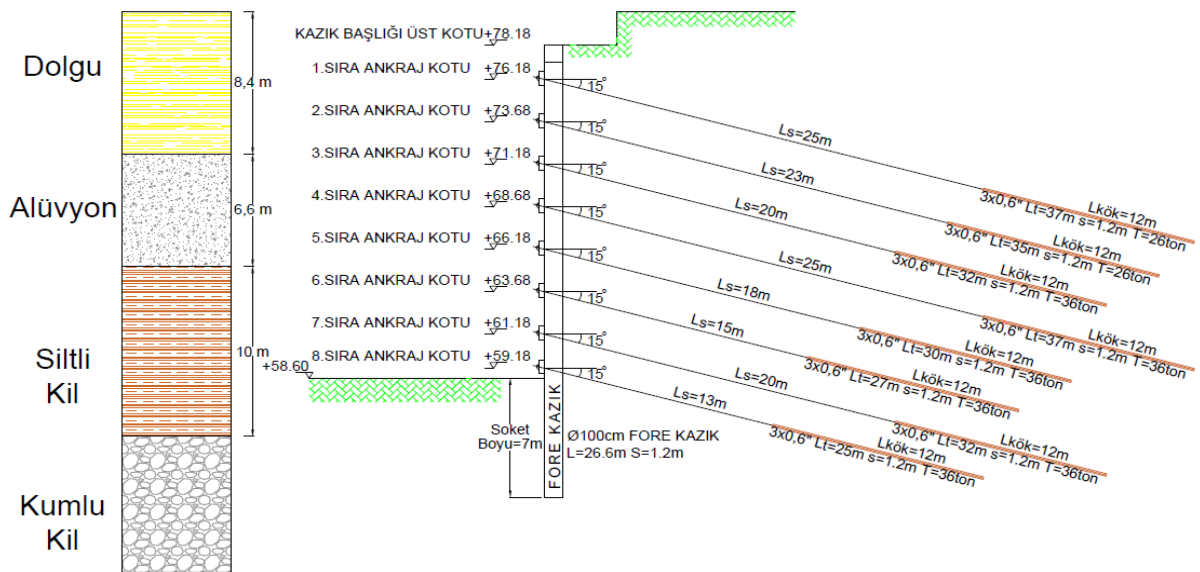
Katman No	Vp (m/sn)	Vs (m/sn)	Katman Kalınlığı (m)	İnceleme Derinliği (m)	Yoğunluk (g/cm ³)	Poisson Oranı	Kayma Modülü (kg/cm ²)	Elastisite Modülü (kg/cm ²)	Bulk Modülü (kg/cm ²)	V _{S30} (m/sn)
1	775	151	1,5	-1,5	1,64	0,477	440	1299	9237	359
2	1089	339	9,7	-11,2	1,78	0,442	2194	6328	18194	
3	1483	442	-	-	1,92	0,442	4377	12626	36473	

Mevcut projede kullanılan zemin profili beş farklı birimden oluşmaktadır. Zemin yüzeyinden itibaren 8,4 m kalınlığında dolgu tabaka bulunmaktadır. Dolgu tabakasının altında 6,6 m kalınlığında alüvyon zemin bulunmaktadır. Alüvyonun tabakasının altında 10 m kalınlığında siltli kil bulunmaktadır. Siltli kil tabakasının altında 30 m kalınlığa sahip kumlu kil bulunmaktadır. En alt tabaka olan ince kum birim için analizi etkilemeyecek yeterli derinliğe sahip kabulü yapılmıştır. Dolgu zeminini tanımlamakta M-C (Mohr-Coloumb), diğer dört birimi tanımlamak için H-S (Hardening Soil) zemin modelleri tercih edilmiştir. Zemin modellerinin tanımlarına ve birbirlerine göre avantaj-dezavantajlarına aşağıdaki bölümlerde değinilmiştir. Mevcut proje analizinde yeraltı suyunun dolgu ve ince kum birimlerinden hızlı bir şekilde tahliye olacağı düşünülmüş ve bu zeminler için drenajlı parametreler tercih edilmiştir. Alüvyon, siltli kil ve kumlu kil birimler kohezyona sahip olduğu için suyun drenajının zaman alacağı düşünülmüş ve bu zeminler için drenajsız parametreler kullanılmıştır. Projede bulunan beş farklı tabakaya sahip zemin parametreleri **Tablo 3.3**'te verilmiştir.

Tablo 3.3: Vakanın mevcut projesinde kullanılan zemin özellikleri girdileri.

ZEMİN PARAMETRELERİ					
Parametre	Dolgu	Alüvyon	Siltli kil	Kumlu kil	İnce kum
Bünye modeli	M-C	H-S	H-S	H-S	H-S
Malzeme tipi	Drenajlı	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız	Drenajlı
Birim hacim ağırlık, γ (kN/m ³)	16,0	17,0	18,0	18,0	19,0
Doygun B.H.A, γ_{sat} (kN/m ³)	17,0	18,0	19,0	19,0	20,0
Permeabilite katsayısı, m/gün	0,60	0,25	0,12	0,25	0,60
Deviatorik referans modülü, E_{50}^{ref} (kPa)	-	25.000	60.000	80.000	80.000
Sıkışma referans modülü, E_{oed}^{ref} (kPa)	-	25.000	60.000	80.000	80.000
Yükleme-boşaltma modülü, E_{ur}^{ref} (kPa)	-	75.000	180.000	240.000	240.000
Elastisite modülü, E (kPa)	10.000	-	-	-	-
Yükleme-boşaltma Poiss.oranı, ν_{ur}	0,35	0,30	0,30	0,30	0,25
Interface, R_{inter}	0,75	0,80	0,85	0,90	0,90
Efektif kohezyon, c' (kPa)	7	-	-	-	35
Kayma mukavemeti açısı, ϕ' (°)	20	-	-	-	25
*Drenajsız kayma mukavemeti, c_u (kPa)	-	80	115	135	-

Derin kazıyı tutabilmek için düşey eleman olarak 26,6 m boyunda, 100 cm çapında, merkezden merkeze 1,2 m mesafeye sahip fore kazıklar tercih edilmiştir. Yatay destek elemanı olarak yatayda 1,2 m aralıklarla, 12 m kök uzunluğuna sahip, farklı serbest boy uzunluklarına sahip 8 sıra zemin ankrajı kullanılmıştır. **Şekil 3.2'**de zemin diyagramı ve ankrajların konum, uzunluk, tasarım kuvveti bilgileri verilmiştir.

**Şekil 3.2:** Vaka analizinde kullanılan zemin diyagramı ve ankraj kesiti.

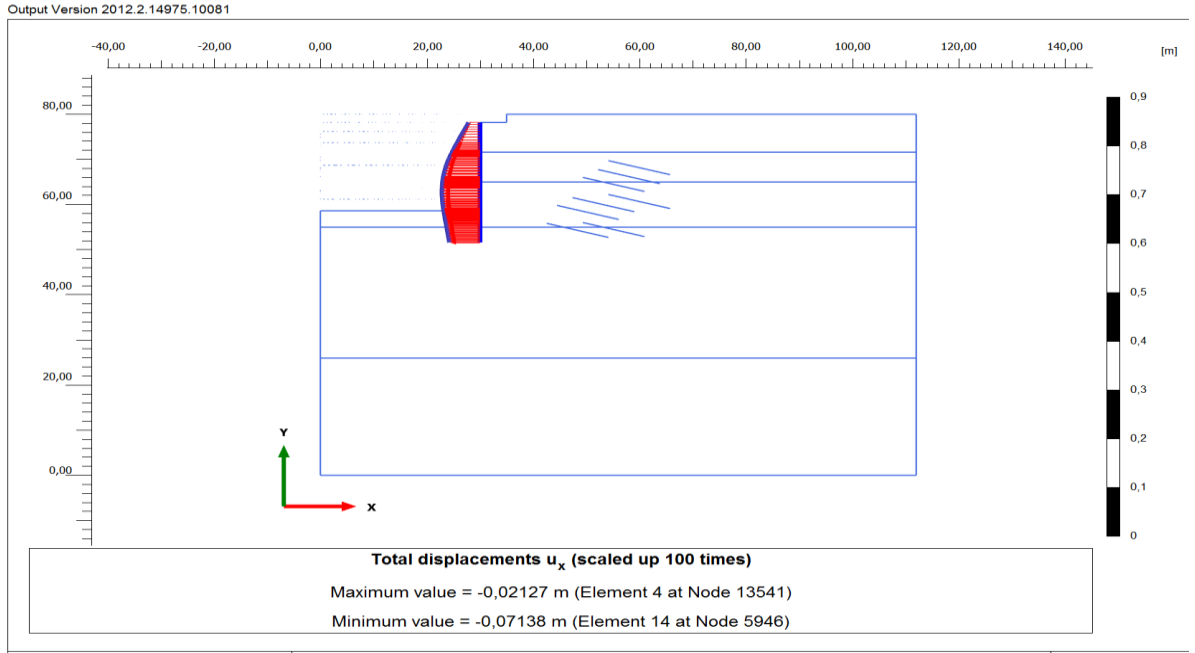
Ele alınan kesitteki düşey 8 sıra ankrajın tamamının birim çeper sürtünme kuvveti, FHWA'in kohezyonlu zeminler için verilen tablodan 0,15 MPa seçildiği görülmüştür. Ankraj kök çapı 13 cm olarak tasarlanmıştır. **Denklem (2.1)** kullanılarak hesaplanan ankraj kökü nihai taşıma kapasitesi, FHWA'de önerilen karakteristik çeper sürtünmesi için güvenlik sayısı olan 2'ye bölünüp karakteristik çeper dayanımı 367 kN elde edilmiştir. Ankrajların öngerme kuvvetlerinin, nihai çeper dayanımından düşük olması gerektiği için tüm ankrajlara 360 kN öngerme kuvveti kullanılmıştır. Kullanılan ankraj halatı 0,6 inç olup **Tablo 2.2'**de verilen çekme dayanımı 260 kN olan 3 halattan oluşmaktadır [22]. Serbest boydaki halatların nihai çekme dayanımı $3 \times 260 \text{ kN} = 780 \text{ kN}$ olarak kabul edilmiştir. Mevcut projede, derinlere indikçe zemin cinsi ve sağlayacağı sürtünme direnci artmasına rağmen güvenli bir tasarım yapmak amacıyla tüm ankrajların sürtünme direnci ve germe kuvveti aynı kabul edilmiştir. Projelendirmedeki ankraj kotları, serbest boyları ve kök boyları **Tablo 3.4'**te verilmiştir.

Tablo 3.4: Vakanın mevcut projesindeki ankraj kotları, uzunlukları ve dayanımları.

Ankraj Sırası	Ankraj kotu (m)	Serbest Boy (m)	Kök Boyu (m)	Ankraj Halatı Dayanımı (kN)	Ankraj Kök Dayanımı (kN)
1.sıra	+76,18	25	12	780	360
2.sıra	+73,68	23	12	780	360
3.sıra	+71,18	20	12	780	360
4.sıra	+68,68	25	12	780	360
5.sıra	+66,18	18	12	780	360
6.sıra	+63,68	15	12	780	360
7.sıra	+61,18	20	12	780	360
8.sıra	+59,18	13	12	780	360

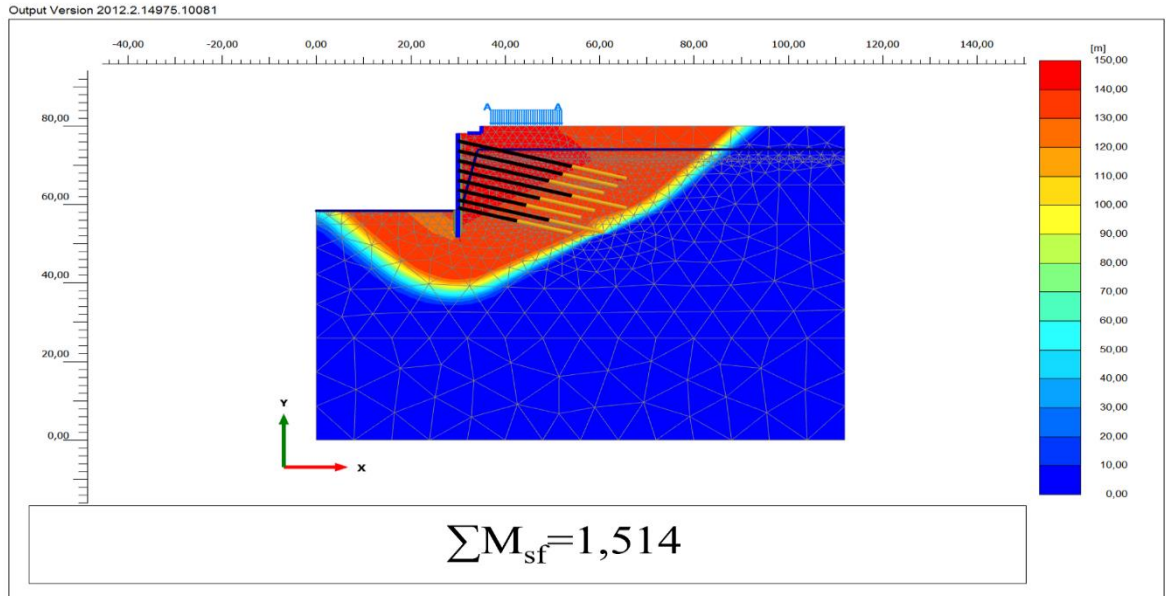
3.1.2. Proje Çıktıları

FHWA ankrajlı sistemler için maksimum yatay deplasman sınırı $\delta h = 0,003H$ olarak belirtilmiştir. Yapılan tasarımda kazının son kademesinde kazıklardaki yatay deplasman 7,1 cm mertebesinde hesaplanmıştır ve maksimum deplasman sınırını sağlamaktadır. Proje kapsamında yapılan FEM analizleri sonucu fore kazıklarda hesaplanan yatay deplasmanın şekli ve maksimum yatay deplasman değeri **Şekil 3.3'**te verilmiştir.



Şekil 3.3: Vakanın mevcut projesinde elde edilen maksimum yatay deplasman: 7,1 cm.

FHWA’de geçici sistemlerde toptan göçmeye karşı güvenlik sayısı (GS) $\geq 1,35$ ’tir. FEM hesaplardan elde edilen toptan göçmeye karşı güvenlik sayısı 1,514 bulunmuştur, güvenliği sağlamaktadır ve sistem dengesinin FHWA şartlarına göre sağlandığı görülmüştür. Toptan göçme dairesi ve güvenlik sayısı Şekil 3.4’te verilmiştir.



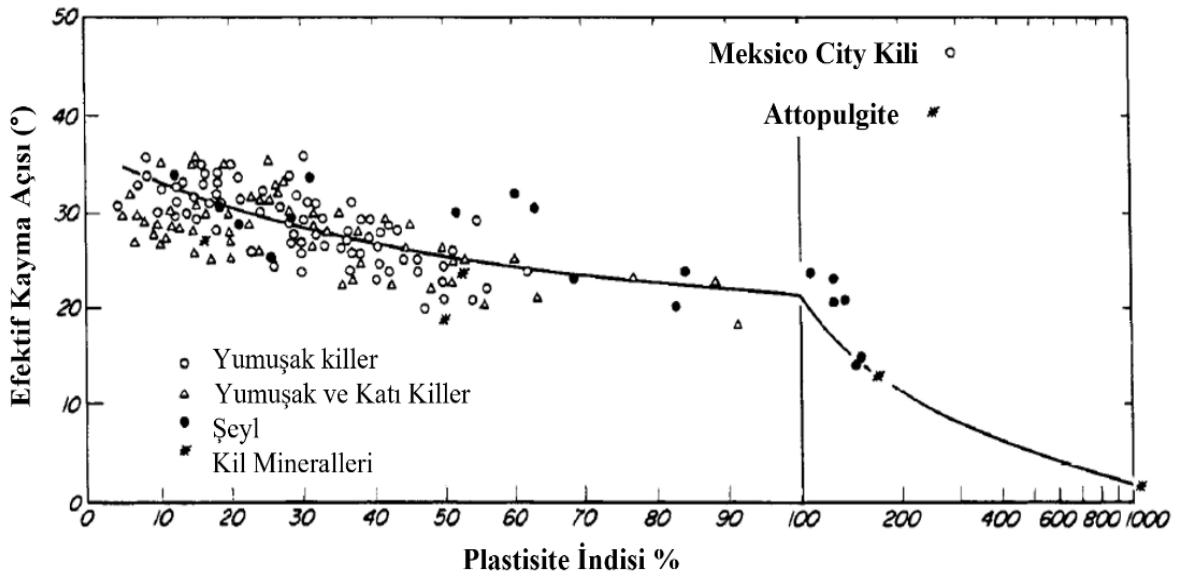
Şekil 3.4: Vakanın mevcut projesinde elde edilen toptan göçme dairesi ve sayısı: 1,514.

FEM analizleri neticesinde hesaplanan ankraj kök ve halat kuvvetleri, **Tablo 3.4**'teki dayanım değerlerinden düşük çıkmıştır ve ankraj güvenliğinin sağlandığı görülmüştür.

3.1.3. Vakanın Yeniden Tasarım Bilgileri

Mevcut tasarım kriterlerinin, KDYY'e uygun olarak yeniden analiz edilmesi sırasında tasarımda kullanılacak olan zemin parametreleri mevcut tasarım raporundan alınmıştır. Bu verilere ek olarak tekrar modelleme aşamasında iksa sisteminin uzun dönem analizlerinde kullanılmak üzere kohezyonlu zeminlerin drenajlı parametreleri, çeşitli korelasyonlara başvurularak elde edilmiştir. Elde edilen drenajlı parametreler, tüm zeminlerin MASW değerleri göz önüne alınarak kohezyonsuz zeminlerin drenajsız parametreleri ile optimize edilmiştir.

Kohezyonlu zeminlerin drenajlı parametrelerinden olan efektif kayma açısının elde edilmesinde **Şekil 3.5**'te verilen Terzaghi ve diğ. [23] tarafından oluşturulan Plastisite İndisi (IP) – Efektif Kayma Açısı (ϕ') grafiği kullanılmıştır.



Şekil 3.5: PI ile Efektif Kayma Açısı arasındaki ilişki [23].

Şekil 3.5 kullanılarak uygun zemin türü ve **Tablo 3.1**'de verilen plastisite indisleri için elde edilen efektif kayma açısı değerleri **Tablo 3.5**'te verilmiştir.

Tablo 3.5: Plastisite indisine göre seçilen ϕ' değerleri [23].

Zemin Türü	Plastisite İndisi (%)	ϕ' (°)
Alüvyon	15	32
Siltli Kil	20	31
Kumlu Kil	10	34

Kohezyonlu zeminlerin efektif kayma dayanım parametrelerini elde etmek için Look [24] tarafından önerilen efektif içsel sürtünme açısını kullanan formülünden yararlanılmıştır. Look [24] formülü **Denklem (3.1)**'de verilmiştir.

$$c' = a * x \tan(\phi') \quad (3.1)$$

Efektif kayma parametresini hesaplamak için gerekli olan a^* değerinin zemin sınıfı dikkate alınarak seçilebilecek aralıkları **Tablo 3.6**'da verilmiştir. Alüvyon, siltli kil ve kumlu kil için seçilen a^* değerleri **Tablo 3.7**'de verilmiştir.

Tablo 3.6: İnce daneli zeminler için a^* değerleri [24].

Zemin Türü	a^*	Zemin Türü	a^*
Yumuşak silt	0-5	Yumuşak kil	5-10
Orta katı silt	5-15	Orta katı kil	10-20
Katı silt	15-30	Katı kil	20-50

Tablo 3.7: Seçilen a^* değerleri.

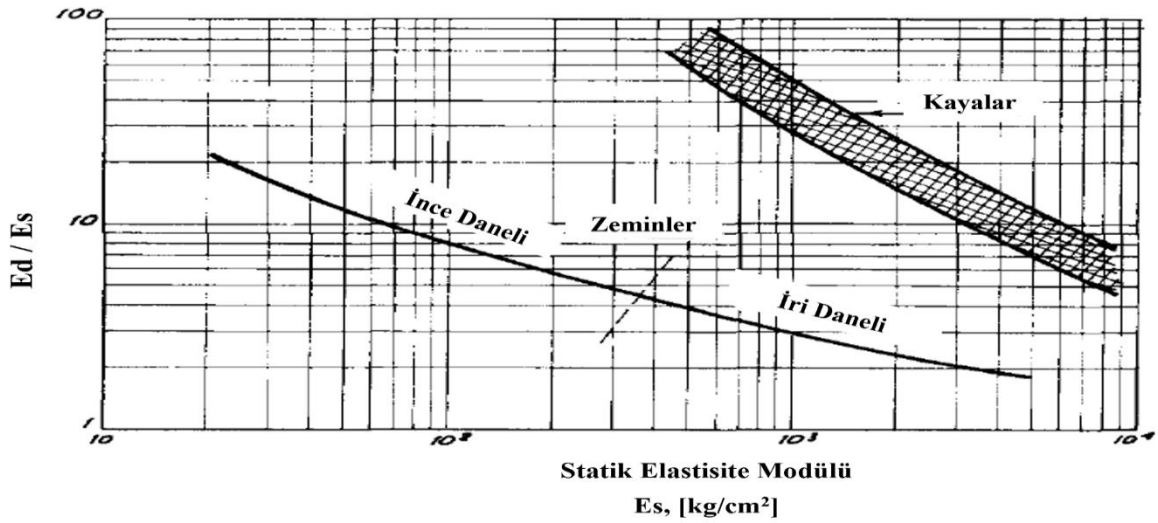
Zemin Türü	a^*
Alüvyon	40
Siltli Kil	45
Kumlu Kil	50

Statik durumu temsil eden analizlerde kullanılacak zemin parametreleri **Tablo 3.8**'de verilmiştir.

Tablo 3.8: Vakanın yeniden analizinde kullanılan statik durum zemin parametreleri.

ZEMİN PARAMETRELERİ					
Parametre	Dolgu	Alüvyon	Siltli kil	Kumlu kil	İnce kum
Bünye modeli	M-C	H-S	H-S	H-S	H-S
Birim hacim ağırlık, γ (kN/m ³)	16,0	17,0	18,0	18,0	19,0
Doygun B.H.A, γ_{sat} (kN/m ³)	17,0	18,0	19,0	19,0	20,0
Permeabilite katsayısı, m/gün	0,60	0,25	0,12	0,25	0,60
Pref	100	100	100	100	100
Deviatorik ref. modülü, E_{50}^{ref} (kPa)	-	25.000	60.000	80.000	80.000
Sıkışma ref. modülü, E_{oed}^{ref} (kPa)	-	25.000	60.000	80.000	80.000
Yük.-boş. modülü, E_{ur}^{ref} (kPa)	-	75.000	180.000	240.000	240.000
Elastisite modülü, E (kPa)	10.000	-	-	-	-
Yük.-boş. için Poiss. oranı, ν_{ur}	0,35	0,30	0,30	0,30	0,25
Interface, R_{inetr}	0,75	0,80	0,85	0,90	0,90
Kayma mukavemeti açısı, ϕ (°)	20	-	-	-	25
Drenajlı kayma mukavemeti açısı, ϕ' (°)	20	20	25	25	25
Drenajsız kayma muk., c_u (kPa)	7	80	115	135	35
Efektif kohezyon, c' (kPa)	7	25	27	30	35

Depremli durumda zeminlerin drenajsız davranış gösterdiği kabul edilmektedir. Depremli durum için yapılacak analizlerde zeminlerin dinamik parametreleri kullanılmalıdır. Zeminlerin rijitlik parametrelerden birisi olan Elastisite Modülü, dinamik ve statik durumda farklı değerler almaktadır. Statik Elastisite Modülü' nü, Dinamik Elastisite Modülü' ne dönüştürmede Alpan [25] tarafından geliştirilen grafik kullanılmıştır. Logaritmik cinsten gösterilen statik-dinamik elastisite dönüşümü **Şekil 3.6'**da verilmiştir.

**Şekil 3.6:** Statik-dinamik elastisite modülü dönüşümü [25].

Beş farklı zemin türü için seçilen statik-dinamik elastisite modülü dönüşüm katsayıları ve dinamik durumda kullanılmak üzere hesaplanan zemin parametreleri **Tablo 3.9**'da verilmiştir.

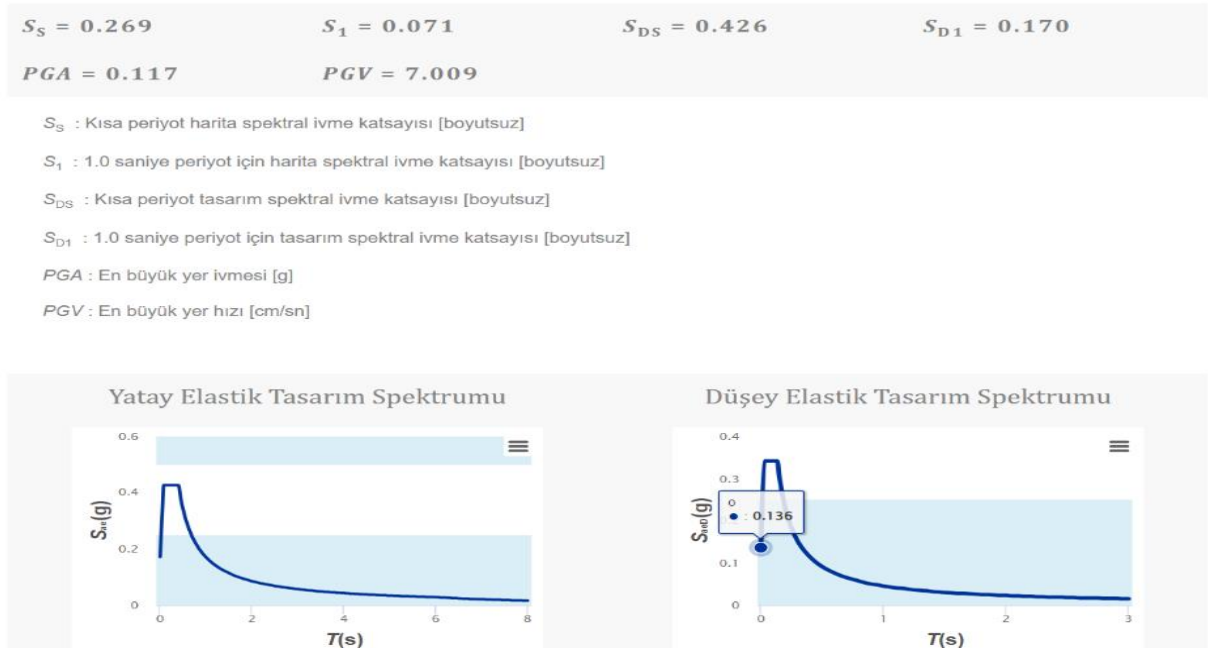
Tablo 3.9: Vakanın yeniden analizinde kullanılan dinamik yükleme durumu parametreleri.

ZEMİN PARAMETRELERİ					
Parametre	Dolgu	Alüvyon	Siltli kil	Kumlu kil	İnce kum
Bünye modeli	M-C	H-S	H-S	H-S	H-S
Birim hacim ağırlık, γ (kN/m ³)	16,0	17,0	18,0	18,0	19,0
Doygun B.H.A, γ_{sat} (kN/m ³)	17,0	18,0	19,0	19,0	20,0
Permeabilite katsayısı, m/gün	0,60	0,25	0,12	0,25	0,60
Alpan Katsayısı	8	5,2	3,6	3,1	3,1
Pref	100	100	100	100	100
Deviatorik ref. modülü, E_{50}^{ref} (kPa)	-	130.000	216.000	248.000	248.000
Sıkışma ref. modülü, E_{oed}^{ref} (kPa)	-	130.000	216.000	248.000	248.000
Yük.-boş. modülü, E_{ur}^{ref} (kPa)	-	390.000	648.000	744.000	744.000
Elastisite modülü, E (kPa)	80.000	-	-	-	-
Yük.-boş. için Poiss.oranı, ν_{ur}	0,35	0,30	0,30	0,30	0,25
Interface, R_{inetr}	0,75	0,80	0,85	0,90	0,90
Kayma mukavemeti açısı, ϕ (°)	20	-	-	-	25
Drenajsız kayma muk., c_u (kPa)	7	80	115	135	35

İncelenen mevcut tasarımda sistemin en çok zorlanacağı, kritik durum olan drenajlı durum için analiz yapılmıştır. Sistem geçici iksa sınıfına girdiği için mevcut tasarımda deprem kuvvetleri göz önüne alınmamıştır. Lakin FHWA'dan farklı olarak KDYY'ne göre Kategori-2 olan ve 15 m'den fazla derinliğe sahip geçici iksalar için DD-4'e göre statik eşdeğer hesap yapılması gerekmektedir. Yapılan statik eşdeğer hesap neticesinde sistem stabilitesi sağlanmıyorsa yine DD-4'e göre Zaman Tanım Alanında hesap yapılmalıdır. Bu tez kapsamında SLS analizlerinde göçme gerçekleşen modellerde "zaman tanım alanında hesap" yapılmamıştır.

Yeraltı su varlığı, depremleri durum vb. etkenlerden kaynaklı olarak sistem hem drenajlı hem de drenajsız durum için ayrı ayrı analiz edilmelidir. Deprem durumunda drenajsız, uzun dönem yapı davranışı için drenajlı parametreler kullanılarak analiz yapılmıştır.

İksanın yapılacağı konum bilgileri girilerek AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritasından [26] ZD zemin sınıfı ve DD-4 deprem yer hareketi düzeyi için deprem ivmesi elde edilmiştir. Elde edilen deprem ivme katsayıları **Şekil 3.7**'de verilmiştir. FHWA'e göre şev stabilite analizlerinde düşey deprem ivmesi dikkate alınmaz. Aynı şekilde FHWA'e göre düşey deprem kuvvetinin ankraja etkisinin önemsiz olduğu vurgulanmıştır. KDYY'de sadece yatay deprem ivmesi üzerinde durulduğu için depremlili durumlarda düşey deprem etkisi dikkate alınmamıştır.



Şekil 3.7: Proje yeniden tasarım ivme değerleri [26].

KDYY Tablo 2.8'de kazı destek yapısı sistemleri için 'r' deprem kuvveti azaltma katsayısı verilmiştir. Bu katsayı sadece statik eşdeğer hesap yönteminde geçerlidir. Azaltma katsayısı iksa sistemi ve yapabileceği en fazla gerilmeye bağlı olarak seçilmektedir. TBDY 2018'de ankrajlı duvarlar için 'r' katsayısı 1 olarak verilmiş olmasına rağmen KDYY Tablo 2.8'de bulunan deplasman kriteri göz önünde bulundurularak izin verilen deplasman $80 S_{DS}$ 'den küçük olduğu için 'r' katsayısı 1,5 seçilmiştir. Yatay deprem ivmesi, tasarım spektral ivme katsayısı ve azaltma katsayısı kullanılarak **Denklem 3.2**'de hesaplanmıştır.

$$k_h = \frac{0,4 S_{DS}}{r} = \frac{0,4 * 0,426}{1,5} = 0,114 \quad (3.2)$$

3.1.3.1. Deplasman Kriteri

Projenin tasarımı referans olarak aldığı FHWA’ya göre kum ve/veya katı kil zeminlerde inşa edilen ankrajlı destek yapıların maksimum yatay deplasman değeri $\delta_h = 0,002H-0,005H$ aralığında kısıtlanmıştır. Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler (2018-2022) Genelgesinde yatay destekli iksa sistemlerinin yapabileceği deplasmanlar $\delta_h 0,0025H-0,005H$ olarak sınırlandırılmıştır. İncelenen mevcut proje tasarımı Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler Genelgesi’nden önce yapıldığı için FHWA deplasman kriterine uygun olarak yapılmış. Tez kapsamında yeniden kurulan model için yapılan analizlerde ise KDYY Madde 2.12.7’ye uygun olarak maksimum yatay deplasman sınırı $0,003H$ olarak kabul edilmiştir ve deplasman kontrolleri bu kritere göre yapılmıştır.

KDYY tarafından önerilen ve yukarıdaki bölümlerde değinilen beş aşamalı analiz metodu uygulanarak proje sonuçları, yönetmelik kriterlerine göre irdelenmiştir.

Yapılan yeniden modellemenin ve tasarımın ilk aşamasında Limit Denge Yöntemleri (LEM) ile ULS (GEO) kontrolü yapılmıştır. Limit denge analizinde GeoStudio yazılımı kullanılmıştır ve analiz metodu olarak Morgenstern-Price seçilmiştir. ULS hesaplarında kritik durumun drenajlı parametreler ile olacağı belirlenmiş ve **Tablo 2.1**’de yer alan katsayılar kullanılarak analiz yapılmıştır.

3.1.3.2. Ankraj Halat ve Kök Nihai Dayanımı

Yapılan yeniden tasarımı birim çeper sürtünmesi **Tablo 2.3**’ten en üst sıradaki 2 ankraj için 0,15 MPa ve kalan 6 sıra ankraj için 0,2 MPa değeri seçilmiştir. Yapılan yeni tasarımı karakteristik çeper sürtünmesi için güvenlik sayısı KDYY Madde 3.2.2.3e’ye göre uygun olarak 2,5 seçilmiştir. **Denklem (2.1)** ve **Denklem (2.2)** kullanarak en üst 2 sıra ankraj çeper sürtünmesi $\phi * D * L * 150 / 2,5 = 294$ kN, Alt sıra 6 ankraj çeper sürtünmesi $\phi * D * L * 200 / 2,5 = 392$ kN olarak hesaplanmıştır. Tasarımlarda ankraj kök bölgesi kuvveti, hesaplanan karakteristik değerlerden daha düşük seçilmiştir. En üst 2 sıra ankraj için 260 kN, alt 6 sıra ankraj için 360 kN kabul edilmiştir. Ankraj halatı olarak 3 adet 0,6 inç çapa sahip öngerme çeliği kullanılmıştır. Tez kapsamında kullanılan öngerme halatının nihai dayanımı **Tablo 2.2**’de 260 kN olarak verilmiştir. Ankraj serbest bölgesindeki 3 halatın toplam çekme dayanımı $3 * 260$ kN = 780 kN olarak hesaplanmıştır. LEM analizlerinde ankraj halatının dayanımının %60’ını kullanmak için halat nihai dayanımı ‘1,67’ kat sayısına bölünmüş ve 780 kN / 1,67 = 467 kN olarak kullanılmıştır. Sonuçlar detaylı olarak “Bulgular” bölümünde verilmiştir.

3.1.3.3. Betonarme Kesitlerin Kesme Kuvveti Dayanımı

LEM analizlerinde istenen girdiler arasında kazık kesme dayanımı bulunmaktadır. Vakanın yeniden analizinde ve nümerik modellerin analizinde kullanılacak kesme dayanımı için TS-500 tarafından önerilen denklemler kullanılmıştır [27]. Analizlerde kullanılan kesme kuvveti denklemleri aşağıda verilmiştir [27].

$$V_r = V_c + V_w \quad (3.3)$$

$$V_{cr} = 0,65 * f_{ctd} * b_w * d \quad (3.4)$$

$$V_c = 0,8 * V_{cr} \quad (3.5)$$

$$V_w = \left[\left(\frac{A_{sw}}{s} \right) * f_{ywd} * d \right] \quad (3.6)$$

V_r : Kesmede dayanımı

V_{cr} : Kesitin kesmede çatlama dayanımı

V_w : Kesme dayanımına kesme donatısı katkısı

V_c : Kesme dayanımına beton katkısı

Tezin Bir Vakanın Yeniden Analizi bölümünün sonuçları detaylı olarak bulgular bölümünde verilmiştir.

3.2. NÜMERİK MODELLERİN ANALİZİ

İksa sistemleri genellikle geçici olarak tasarlanırsa da probleme göre kalıcı olarak kullanımı da sağlanabilir. Ankrajlı sistemlerin periyodik kontrolü, korozyona karşı önlem alınması vb. gerekçelerden dolayı uygulamada kalıcı olarak kullanımı konsol fore kazık vb. destekleme yapılarına kıyasla daha azdır. Zemin çivileri kalıcı iksa imalatında avantajlı olmasına rağmen tezin nümerik model analizleri bölümünde ele alınan zemin çok gevşek olduğu ve kazı alanının etki mesafesinde yapı olmamasına rağmen şehir merkezinde yüksek deplasmanlar istenmediği için sistem olarak zemin ankrajı tercih edilmiştir. Nümerik modellerin analizi bölümü kapsamında kalıcı ankrajlı sistemin, konsol fore kazığa göre deplasman-güvenlik sayısı-maliyet açısından karşılaştırması ve değerlendirmesi yapılmıştır.

3.2.1. Genel Bilgiler

Tezin ikinci bölümünde 0,5 m yüksekliğe sahip beklenmedik kazı aşaması dahil toplam yüksekliği 5, 6 ve 7 m olan 3 farklı derinlik için kalıcı derin kazı sisteminin konsol ve ankrajlı olarak güvenlik-maliyet ve güvenlik-deplasman analizi yapılmıştır. Bu üç farklı kazı derinliği için soket boyları, fore kazık çapları değiştirilerek 54 farklı konsol model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modellerde 0,65 m, 0,8 m ve 1 m çaplara sahip konsol fore kazık sistemler için soket boyları 2, 3, 4, 5, 6, 7 m alınarak analizler yapılmıştır. Ankrajlı sistem çözümü için H=5 m için düşeyde tek sıra, 6 ve 7 m için düşeyde çift sıra ankrajlı çözümler yapılmıştır. Her yükseklik kademesi için 2 farklı soket boyu, 2 farklı ankraj aralığı, 3 farklı kazık çapı seçilerek 12 farklı ankrajlı sistem çözümü yapılmıştır. Toplamda 36 farklı ankrajlı sistemin çözümü yapılmıştır. H: kazı derinliği, D: kazık çapı, s: kazık aralığı olmak üzere, kazı derinliğine ve sistem türüne göre oluşturulan modellerin sayısı **Tablo 3.10**'da verilmiştir.

Tablo 3.10: Kazı derinliği ve sistem türüne göre model sayıları.

		Konsol Sistemler			Zemin Ankrajlı Sistemler		
		D=0,65 m, s=0,9 m	D=0,8 m, s=1 m	D=1 m, s=1,2 m	D=0,65 m, s=0,9 m	D=0,8 m, s=1 m	D=1 m, s=1,2 m
Kazı Derinliği	H = 5 m	6	6	6	4	4	4
	H = 6 m	6	6	6	4	4	4
	H = 7 m	6	6	6	4	4	4

5 m yüksekliğe sahip kazı için oluşturulan zemin ankrajlı modellerin geometrik özellikleri, 50 m cephe uzunluğu için düşey ve toplam ankraj sayıları **Tablo 3.11**'de verilmiştir.

Tablo 3.11: Kazı yüksekliği 5 m olan sistem için oluşturulan ankrajlı modeller.

Kazık Çapı (m)	Kazık Aralığı (m)	Soket Boy (m)	Ankraj Aralığı (m)	Düşey Ankraj Sayısı	Toplam Ankraj Sayısı
0,65	0,9	2	1,8	1	28
0,65	0,9	2	2,7	1	19
0,65	0,9	3	1,8	1	28
0,65	0,9	3	2,7	1	19
0,8	1	2	2	1	25
0,8	1	2	3	1	17
0,8	1	3	2	1	25
0,8	1	3	3	1	17
1	1,2	2	2,4	1	21
1	1,2	2	3,6	1	14
1	1,2	3	2,4	1	21
1	1,2	3	3,6	1	14

6 m yüksekliğe sahip kazı için oluşturulan zemin ankrajlı modellerin geometrik özellikleri ve 50 m cephe uzunluğu için düşey ve toplam ankraj sayıları **Tablo 3.12**'de verilmiştir.

Tablo 3.12: Kazı yüksekliği 6 m olan sistem için oluşturulan ankrajlı modeller.

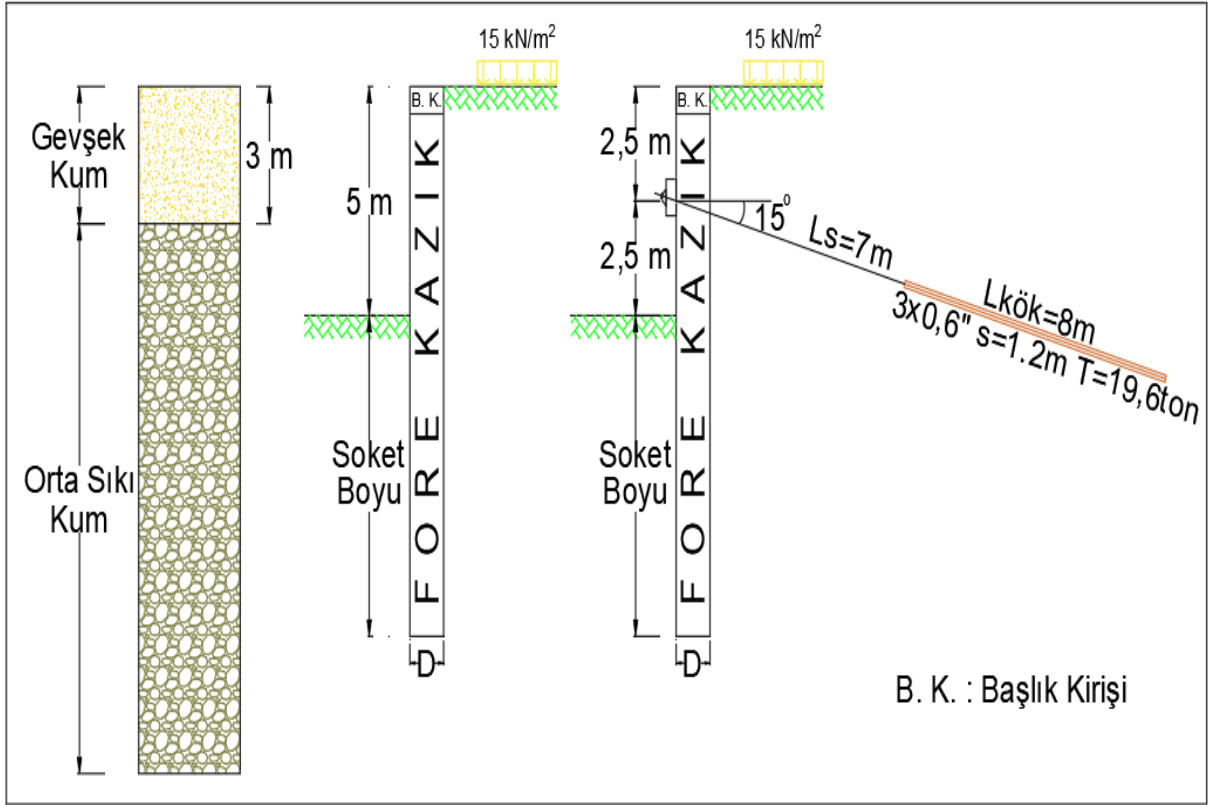
Kazık Çapı (m)	Kazık Aralığı (m)	Soket Boyu (m)	Ankraj Aralığı (m)	Düşey Ankraj Sırası	Toplam Ankraj Sayısı
0,65	0,9	2	1,8	2	56
0,65	0,9	2	2,7	2	38
0,65	0,9	3	1,8	2	56
0,65	0,9	3	2,7	2	38
0,8	1	2	2	2	50
0,8	1	2	3	2	34
0,8	1	3	2	2	50
0,8	1	3	3	2	34
1	1,2	2	3,6	2	28
1	1,2	2	2,4	2	42
1	1,2	3	3,6	2	28
1	1,2	3	2,4	2	42

7 m yüksekliğe sahip kazı için oluşturulan zemin ankrajlı modellerin geometrik özellikleri ve 50 m cephe uzunluğu için düşey ve toplam ankraj sayıları **Tablo 3.13**'te verilmiştir.

Tablo 3.13: Kazı yüksekliği 7 m olan sistem için oluşturulan ankrajlı modeller.

Kazık Çapı (m)	Kazık Aralığı (m)	Soket Boyu (m)	Ankraj Aralığı (m)	Düşey Ankraj Sırası	Toplam Ankraj Sayısı
0,65	0,9	3	0,9	2	112
0,65	0,9	3	1,35	2	75
0,65	0,9	2	0,9	2	112
0,65	0,9	2	1,35	2	75
0,8	1	2	1,5	2	67
0,8	1	2	1	2	100
0,8	1	3	1,5	2	67
0,8	1	3	1	2	100
1	1,2	3	1,2	2	84
1	1,2	3	1,8	2	56
1	1,2	2	1,2	2	84
1	1,2	2	1,8	2	56

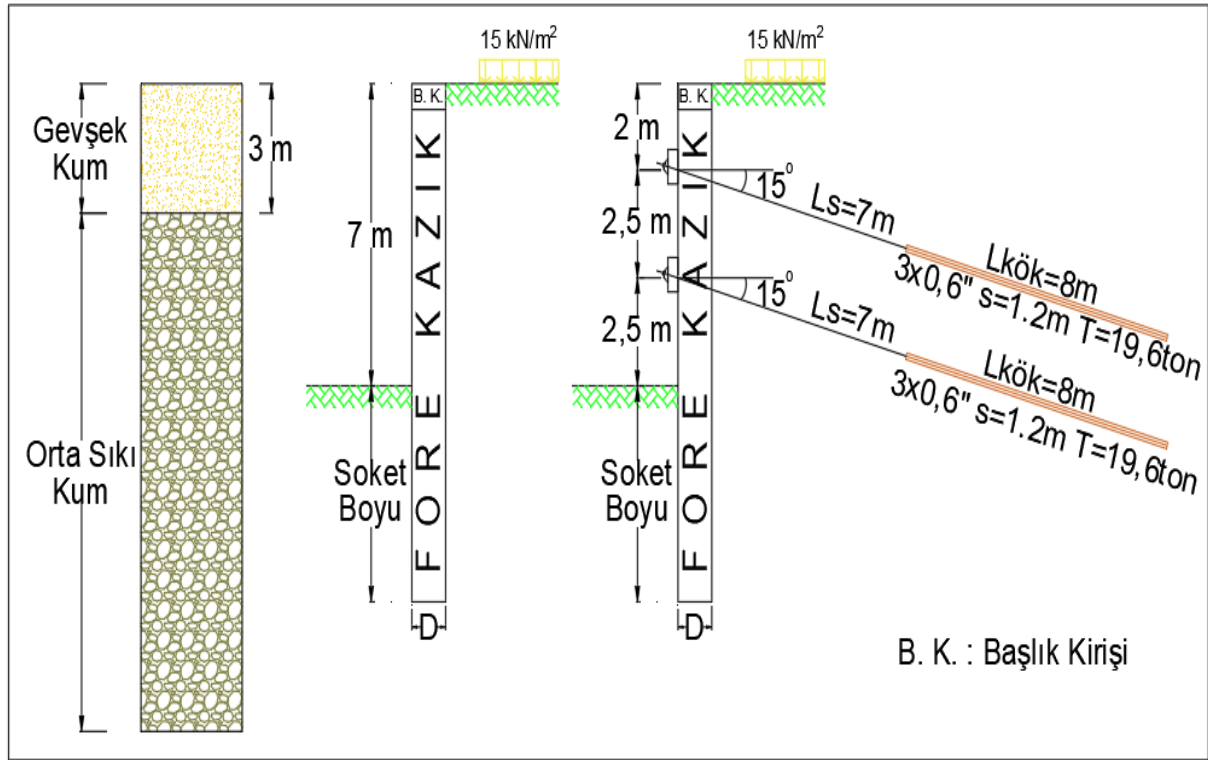
Başlık kirişinin dolgu tarafından 1 m uzaktan başlayacak şekilde trafik, malzeme indirme alanı vb. durumları karşılayan 10 m uzunluğunda, 15 kN/m^2 sürsaj yükü etki etkiltilmiştir. $H=5 \text{ m}$ derinliğe sahip kazı için sistemdeki değişkenlerden olan kazı derinliği, soket boyu, kazık çapı, ankraj konumu ve özellikleri ile zemin tabakalarının şematik durumu **Şekil 3.8**'te gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Nümerik modellerin analizi, $H=5 \text{ m}$ için konsol-ankrajlı sistem ve zemin diyagramı.

Nümerik modellerin analizi bölümü kapsamında kullanmak üzere KDYY Tasarım El Kitabı'nda bulunan Örnek 4'teki gevşek kum ve orta sıkı kum statik zemin parametreleri kullanılmıştır [20]. Dinamik elastisite parametrelerinin elde edilmesi için Alpan [25] katsayıları kullanılmıştır. **Şekil 3.8**'de gösterildiği üzere gevşek kum birimler kazık üst kotundan aşağıya doğru 3 m derinliğe sahiptir. Orta sıkı kum birimlerin iksa sistemini etkilemeyecek derinliğe kadar indiği kabul edilmiştir. Yeraltı suyu bulunmamaktadır. Statik-dinamik elastisite parametreleri dönüştürme katsayısı ve analizlerde kullanılan tüm zemin parametreleri **Tablo 3.14**'te verilmiştir.

H=7 m derinliğe sahip kazıda üst sıra ankrajların kotu, kazık üst kotundan 2 m aşağıdadır, alt sıra ankrajların kotu ise üst sıra ankrajlardan 2,5 m aşağıdadır. H=7 m derinliğe sahip kazı için konsol sistem uzunlukları, ankrajlı sistem uzunlukları ile zemin tabakalarının durumu **Şekil 3.10**'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Nümerik modellerin analizi, H=7 m için konsol-ankrajlı sistem ve zemin diyagramı.

Yeraltı suyu bulunmadığı için statik drenajsız durum analizleri ve kabarma, kaldırma vb. durumların analizleri yapılmamıştır.

KDYY Madde 3.1.1.1. gereğince KK-1 sistemler için Hizmet Görebilirlik Sınır Durumu (SLS) analizlerinin yapılmasına gerek bulunmamaktadır. Soket boyu hesabından sonra Göçme Sınır Durumu (ULS) analizi yapılır. Son aşama olarak eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti hesabı için sistemin zemin kısmı yatak katsayıları ile yay olarak tanımlanır, kazık üzerine gelen kuvvetler ise yayılı yük olarak tanımlanır ve analizler yapılabilir. Lakin bu tez kapsamında tüm sistemler için hem ULS hem SLS hesaplamaları yapılmıştır.

Limit Denge Yöntemleri (LEM) ile ULS (GEO) kontrolü yapılmıştır. Limit denge analizinde GeoStudio yazılımı kullanılmıştır. Analiz metodu olarak Morgenstern-Price tercih

edilmiştir. ULS hesaplarında kritik durumun drenajlı parametreler ile olacağı belirlenmiş ve **Tablo 2.1**'de yer alan kısmi katsayılar kullanılarak analiz yapılmıştır.

Ankraj kökleri aynı zemin içerisinde kaldığı ve aralarındaki (çift sıra ankrajlı sistemlerde) düşey mesafe fazla olmadığı için nihai çeper sürtünme değerleri aynı seçilmiştir. Kohezyonsuz zeminlerdeki çeper sürtünmesi değerlerini veren **Tablo 2.4**'ten zemin profiline uygun olarak, birim çeper sürtünmesi 0,15 MPa olarak seçilmiştir. Ankrajların karakteristik çeper sürtünmesi **Denklem (2.1)** kullanarak $\phi \cdot D \cdot L \cdot 150/2,5 = 196$ kN olarak hesaplanmıştır. Kullanılan ankraj halatı 0,6 inç olup çekme dayanımı 260 kN olan 3 halattan oluşmaktadır [22]. Serbest kısımdaki halatların çekme dayanımı $3 \cdot 260 = 780$ kN olarak kabul edilmiştir.

Fore kazık, başlık kirişi ve kuşak kirişlerinde C30/37 beton sınıfı tercih edilmiştir. TS-500 Madde 8.1.4'e uygun olarak 0,65 m çapa sahip kazık için $1250 \cdot 0,8 \cdot 0,65 \cdot 0,55 = 233$ kN, 0,8 m çapa sahip fore kazık için 390 kN ve 1 m çapa sahip fore kazık için 617 kN hesaplanmıştır [27]. Minimum donatılandırma kabulü yapılarak LEM analizinde kullanılacak kazık kesme dayanımına kesme donatısının etkisi de katılabilirliğin lakin sadece beton etkisi göz önüne alınarak yazılıma girdi sağlanmıştır.

3.2.2. Deplasman Kriteri

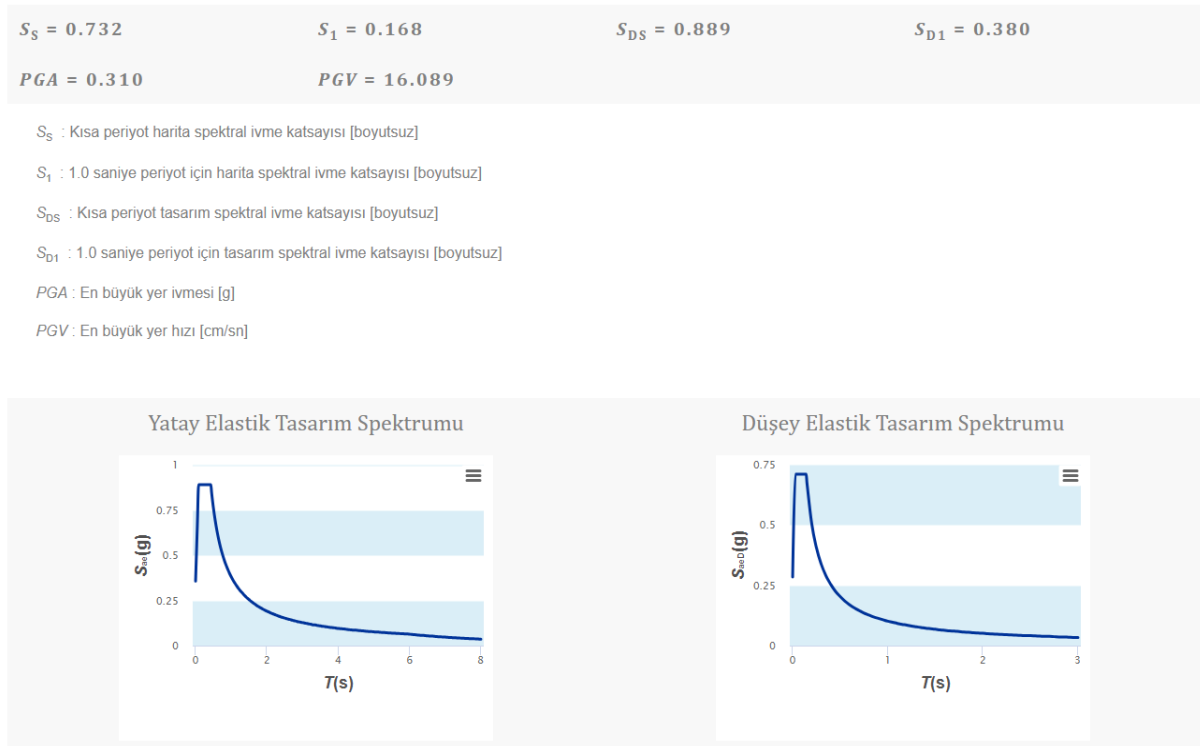
Bu tez kapsamında konsol sistemlerin yapabileceği maksimum yatay deplasman değerinin KDYY'de verilen $\delta h = 0.010H$ kriterine uygun olup olmadığını da kontrol etmek için Hizmet Görebilirlik Sınırı Durumu (SLS) analizleri yapılmıştır. Ankrajlı sistemler için izin verilebilir yatay deplasman sınırı ise KDYY'de verilen $\delta h = 0.003H$ kabul edilmiştir.

3.2.3. Deprem Etkisi

Nümerik modellerin analizi bölümü kapsamında çözümü yapılan konsol sistemler KDYY Tablo 2.6'ya göre KK-1 kapsamına girmesine rağmen kalıcı bir yapı olacağı için deprem etkisi dikkate alınmıştır. İksa sisteminin yanında KDYY Tablo 2.5'e göre "Normal Yapılar" sınıfına giren bir yol bulunduğu için DD-2 deprem yer hareketi düzeyi göz önüne alınarak Yöntem 1'e göre analiz yapılmalı, eğer sistem stabilitesi sağlanmaz ise Yöntem 2'e göre önce DD-2a sonra da DD-2 ye göre analiz yapılmalıdır. Nümerik modellerin analizi bölümü kapsamında analizleri yapılan ankrajlı sistemler KK-3 sınıfına girmektedir.

Depremli durum vb. etkenlerden kaynaklı olarak sistem hem drenajlı hem de drenajsız durum için ayrı ayrı analiz edilmelidir. Deprem durumunda drenajsız, uzun dönem yapı davranışı için drenajlı parametreler kullanılarak analiz yapılmıştır.

İksanın yapılacağı konumu için Isparta ili Merkez ilçe Yayla mahallesinde bir alan seçilmiştir. Bu konum girilerek AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritasından ZD zemin sınıfı ve DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için deprem ivmesi elde edilmiştir. FHWA’ye göre şev stabilite analizlerinde düşey deprem ivmesi dikkate alınmaz. Aynı şekilde FHWA’ye göre dikey deprem kuvvetinin ankraja etkisinin önemsiz olduğu vurgulanmıştır. KDYY’de sadece yatay deprem ivmesi üzerinde durulduğu için depremli durumlarda düşey deprem etkisi dikkate alınmamıştır. Gerekli veriler girilerek AFAD veri tabanından elde edilen deprem parametreleri **Şekil 3.11**’de verilmiştir.



Şekil 3.11: Nümerik modellerin analizi bölümü deprem ivme değerleri [26].

3.2.4. Betonarme Kesitlerin Donatı Hesabı

Donatıların ve kesit boyutlarının maliyete ve dolayısıyla deplasman-güvenlik sayısı-maliyet analizine etkisi olduğu için nümerik modellerin analizi kapsamında oluşturulan modellerin betonarme hesapları yapılmıştır.

Betonarme elemanlarda ortaya çıkan kesit tesirleri **Tablo 2.1**'de verilen katsayılarla çarpılır. Statik durumda kesit tesiri büyütme katsayısı 1,35 iken depremlı durumda ortaya çıkan kuvvet ve momentlerin katsayılar ile çarpılmasına gerek yoktur.

Düşey donatılendirma hesabında ρ_{min} oranı TS-500 [27] ve TBDY [19] tarafından tavsiye edilen minimum donatı oranı olan 0,01 kabul edilmiştir.

Minimum şekilde donatı yerleştirilen kesitler, katsayılarla çarpılmış elde edilen kesit tesirleri ile kıyaslanmıştır. Dairesel kesite sahip fore kazıkların, dikdörtgen kesite sahip başlık ve kuşak kirişlerinin kesme kuvveti ve eğilme momenti altında düşey donatı ve etriye hesabı için ERSOY ve diğ [28] tarafından önerilen dikdörtgen ve dairesel kesit abakları kullanılmıştır. Düşey donatı, etriye ve fret hesabı yapılan kesitlerde bindirme boyları ihmal edilmiştir.

Betonarme kesitlerde meydana gelen kesme kuvvetlerini karşılamak üzere **Denklem (3.3)**, **Denklem (3.4)**, **Denklem (3.5)** ve **Denklem (3.6)** kullanarak beton ve etriye tarafından sağlanan kesme dayanımı ile kıyaslanmıştır.

3.2.5. Maliyet Analizi

Geoteknik işlerde uygulama ve projelendirme aşamasında maliyeti etkileyen birçok etken vardır. Bunlardan bazıları; zemin parametreleri tayini, yeraltı suyu, kullanılan hesap yöntemleri vb. nümerik modellerin analizi bölümü kapsamında sabit zemin parametreleri üzerinden, farklı yüksekliklere sahip konsol ve ankrajlı sistemlerin maliyet analizi yapılmıştır.

Arslan ve Öztoprak [21] geçici dayanma yapıları üzerine yaptığı çalışmada kumlu zeminlerde inşa edilen iksa sistemlerinde kazı derinliği 8 m'den az ise konsol fore kazık, fazla ise çok sıra ankrajlı sistemler ekonomik olduğunu göstermiştir. Killi zeminlerde ise 9 m'den daha az derinliğe sahip kazılarda konsol fore kazık, daha fazla derinliğe sahip kazılarda çok sıra ankrajlı sistemler daha ekonomik olduğunu göstermiştir.

Nümerik modellerin analizi bölümünde kullanılan zemin profili kohezyonsuz birimlerden oluşmaktadır ve yeraltı suyu bulunmamaktadır. Alkaya ve Yeşil [29] nümerik modellerin analizi bölümü kapsamında ele alınan zemin ile benzer bir zemin profili üzerinde yaptıkları çalışmada 9 m'den daha derin kazılarda çok sıra ankrajlı sistemin, konsol ve tek sıra ankrajlı sisteme kıyasla daha ekonomik olduğunu öne sürmüştür. 9 m'den daha az yüksekliğe sahip kazılarda ise konsol sistemlerin daha ekonomik olduğu iddia etmiştir.

Bu çalışmada literatürde yapılmış çalışmalardan farklı olarak kalıcı destekleme sistemleri deplasman-güvenlik sayısı-maliyet açısından incelenmiştir.

Ankrajlara öngerme uygulanabilmesi için fazladan bırakılan 1 m öngerme halatı uzunluğu ankraj maliyet hesaplarına dahil edilmiştir. Konsol sistemlerin maliyet analizinde başlık kirişi yapımı (ettriye dahil), fore kazık betonu, fret ve boyuna donatılar hesaba katılmıştır. Ankrajlı sistemlerin maliyet analizinde başlık kirişi maliyeti (beton, boyuna donatı, ettriye ve yapımı) + kuşak kirişi (yapımı, beton, boyuna donatı, ettriye) + ankraj halatı (taşınma, yerleştirme vb. işlemler dahil) + ankraj kök bölgesi enjeksiyonu (malzeme, malzeme taşınması ve şerbet hazırlanması) hesaba katılmıştır. Ankrajların periyodik bakımı, ankraj kafası, ankraj kaması vb. maliyetlerin poz numaraları bulunmadığı için bu tez kapsamında hesaplanmamıştır. Fore kazık, başlık kirişi, kuşak kirişi hesaplarında kesit tesirleri küçük olduğu için minimum donatının yeterli olacağı öngörülmüştür. Hesaplarda 50 m cephe uzunluğu için işlem yapılmıştır. H=5 m kazıda düşeyde tek sıra ankraj kullanıldığı için 1 adet kuşak kirişi, H=6 m ve H=7 m yüksekliğindeki kazılar için düşeyde çift sıra ankraj kullanıldığı için 2 adet kuşak kirişi bulunmaktadır.

Maliyet analizlerinde T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2024 Yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları [30] ve T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı 2024 Yılı Yol, Köprü, Tünel, Bitümlü Kaplamalar, Bakım ve Trafik İşlerine Ait Birim Fiyat Listesi [31] kullanılmıştır.

Nümerik modellerin analizi bölümü kapsamında kullanılan tüm birim fiyatlar tek listede toparlanmış olup **Tablo 3.15**'te verilmiştir.

Tablo 3.15: Maliyet analizinde kullanılan birimler [30,31].

Poz No	İş Tanımı	Ölçü Birimi	Birim Fiyat (₺)
15.140.1203	Ø 65 cm çapında, C 30/37 basınç dayanımında yerinde dökme betonarme fore kazık yapılması (0,00-18,00 m arası, 18,00 m dahil)	m	2313,35
15.140.1205	Ø 80 cm çapında, C 30/37 basınç dayanımında yerinde dökme betonarme fore kazık yapılması (0,00-18,00 m arası, 18,00 m dahil)	m	3092,74
15.140.1207	Ø 100 cm çapında, C 30/37 basınç dayanımında yerinde dökme betonarme fore kazık yapılması (0,00-18,00 m arası, 18,00 m dahil)	m	4656,41
15.150.1106	Beton santralinde üretilen veya satın alınan ve beton pompasıyla basılan, C 30/37 basınç dayanım sınıfında, beyaz renkte, normal hazır beton dökülmesi (beton nakli dahil)	m ³	3342,80
15.160.1003	Ø 8 - Ø 12 mm nervürlü beton çelik çubuğu, çubukların kesilmesi, bükülmesi ve yerine konulması	Ton	33511,95
15.160.1004	Ø 14 - Ø 28 mm nervürlü beton çelik çubuğu, çubukların kesilmesi, bükülmesi ve yerine konulması.	Ton	32514,45
KGM/9000	Delgi makinesiyle her türlü zeminde/kayada, her uzunlukta, her çapta ve açıda ankraj, zemin çivisi, bulon ve barbakan deliği delinmesi	m	445,05
04.008	Portland çimentosu (Torbali) (TS EN 197-1 CEM I 32.5 N)	Ton	2023,00
KGM/9004	Çimento enjeksiyonu yapılması	m ³	1541,08
KGM/3792/2	Yüksek dayanımlı öngerme çeliği temini (0,6 inç halat) (Tip 270 K)	Ton	36250,00
KGM/23.002/K-6	Boyuna ve enine önçekim, öngerme çeliğinin (Tel, demet, çubuk) yerlerine konulması, gerilmesi, gevşetilmesi ve kesilmesi işçiliği	Ton	113125,10

Tezin Nümerik Modellerin Analizi bölümünün detaylı sonuçlarına bulgular kısmında değinilmiştir.

3.3. HESAPLARDA KULLANILAN YAZILIMLAR

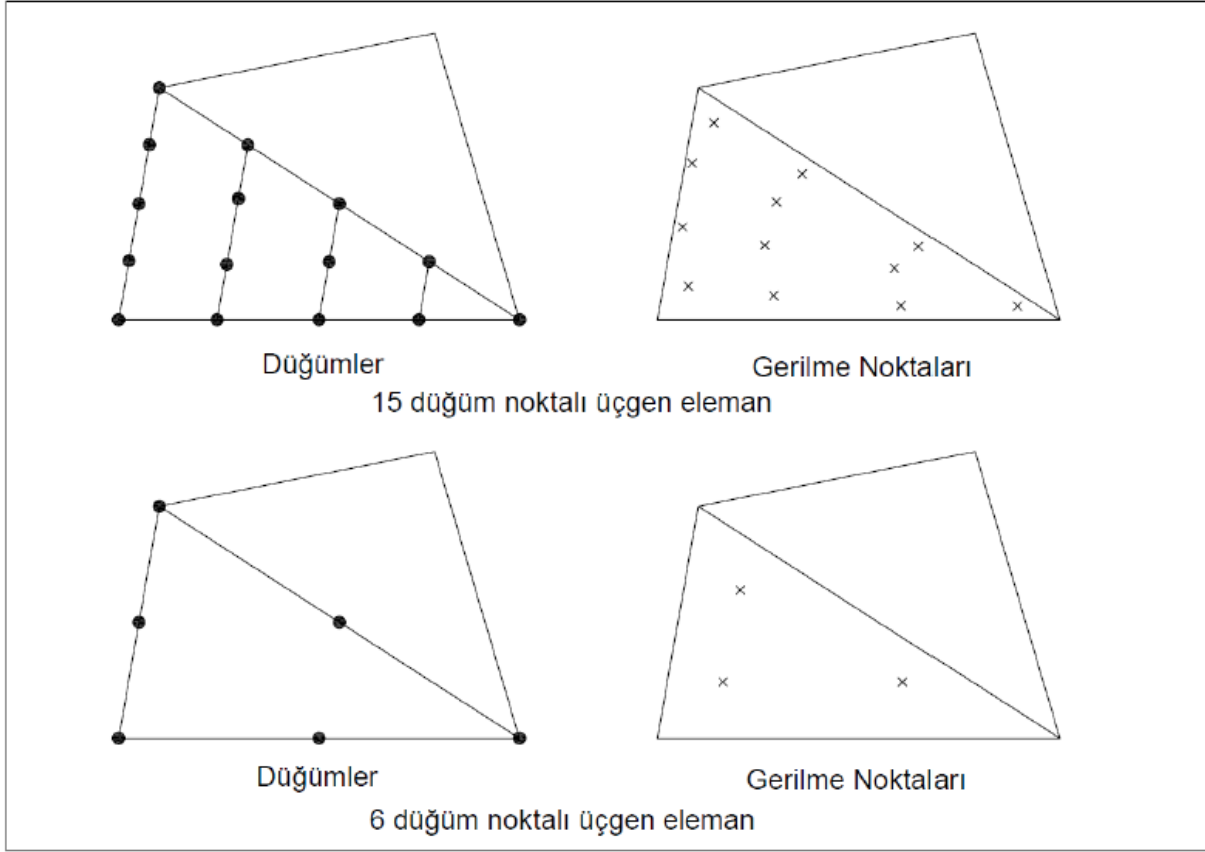
Deplasman hesabı, depremlı durum analizi vb. karmaşıık problemleri çözmek için bilgisayar yazılımlarını kullanmaya ihtiyaç duyulmuştur. Tez kapsamında Göçme Sınır Durumu (ULS) ve Hizmet Görebilirlik Sınır Durumu (SLS) analizlerini gerçekleştirmek için sonlu elemanlar ve limit denge metotları kullanan iki farklı yazılım tercih edilmiştir.

3.3.1. Sonlu Elemanlar Yazılımı

Mühendislik problemleri büyüdükçe ve değıştikçe bunları çözmek için kullanılan araç gereçler de gelişmiştir. Göçme Sınır Durumu ve Hizmet Görebilirlik Sınır Durumu (SLS) analizlerini gerçekleştirmek için bu alanda dünya çapında yaygın olarak kullanılan Plaxis 2D yazılımı tercih edilmiştir.

Plaxis yazılımı, Hollanda'nın yumuşak zemine sahip ovalarına inşa edilecek nehir dolgularını analiz etmek için Delft üniversitesi tarafından 1987 yılında geliştirilmeye başlanmıştır. Zemin, yük, malzeme sınıflandırılması ve tasarımı bakımından birçok yaklaşım sunmaktadır. Dünya çapında yaygınlaşması ve devamlı olarak geliştirilmesiyle birlikte 1993 yılında şirket haline gelmiştir [32].

Plaxis oluşturulan geometriyi üçgen ağlara ayırır ve gerilme-rijitlik matrisi-deformasyon arasındaki bağıntıdan sistemi analiz eder. Gerilme ve şekil değıştirmeler, gerilme noktalarında hesaplanırken deplasmanlar düğüm noktalarında hesaplanır. Yazılımın kurduğı ağ sayısı arttıkça problem çözme süresi uzar ve daha gerçekçi sonuçlar elde edilir. Tezde kullanılan Plaxis 2D V23 2.1 her üçgen elemanı 6 veya 15 düğüm noktası oluşturacak şekilde analiz yapma seçeneğı sunar. Vaka analizi yapılırken 15 düğüm noktalı analiz, nümerik modellerin analizi bölümünde ise 6 düğüm noktalı analiz tercih edilmiştir. Yazılımda fore kazıklar 'plate', ankraj serbest halatı 'node to node anchor' ve ankraj kökü 'geogrid' eleman olarak tercih edilmiştir. 6 ve 15 düğüm noktasına sahip üçgenlerin gerilme noktaları **Şekil 3.12**'de verilmiştir [33].



Şekil 3.12: Plaxis 2D düğüm ve gerilme noktaları [33].

Sheth ve Raghavani [34] geleneksel metotlar ile sonlu elemanlar yazılımının kıyası için yaptıkları analizlerde, Plaxis kullanıldığı taktirde sistem için yeterli güvenliği sağlayarak hem daha kısa soket boyu hem de daha az eğilme momenti elde etmiştir. Ayrıca kazıda oluşan deformasyonların da hesaplanabilmesi hem maliyet açısından hem de daha gerçekçi kazı davranışı bakımından sonlu elemanlar yazılımını, geleneksel yöntemlere üstün kılmaktadır.

3.3.1.1. Zemin Davranışı Belirleme

Derin kazı tasarımında güvenlik, ekonomiklik ve zaman kullanımı oldukça önemlidir. Geoteknik projeyi etkileyen ilk aşama olan zemin etüdünden, uygulamadaki son kademe kazısına tüm işler bu üç maddeyi etkilemektedir. Zemin etüdünden elde edilen ve geoteknik arazi karakterizasyonu ile belirlenen zemin özelliklerinin uygun tasarım yaklaşımları ile kullanılması projelendirme aşamasında avantajlar sağlamaktadır. Nümerik modellerin analizi bölümü kapsamında deplasman-güvenlik sayısı-maliyet analizlerinde gerçekçi sonuçlar elde etmek adına uygun zemin modeli önemli rol oynamaktadır.

Zemin davranışlarını tanımlamada farklı araştırmacıların ortaya attığı, geliştirdiği birçok yaklaşım bulunmaktadır. Józsa [35] yapmış olduğu çalışmada tasarım yaklaşımlarının birbirlerine göre hızlı hesaplama, gerçeğe daha yakın sonuçlar verme vb. bakımlardan üstünlüklerini belirlemiştir. Mohr-Coulomb yöntemi deplasman hesaplarında gerçekçi sonuçlar vermemesine rağmen zemin rijitliklerini sabit tuttuğu için hızlı analizlere olanak vermektedir. Bu durum Mohr-Coulomb yöntemini ön model oluşturmada avantajlı kılarken, doğru zemin etüdü ve zemin parametreleri elde edilirse daha fazla veri girişi isteyen Hardening Soil model deplasman ve yapısal eleman kesit tesirleri hesaplama vb. konularda daha etkilidir.

Gaur ve Sahay [36] tarafından öne sürülen çalışmada iksa projelendirmesinde zemin özellikleri ve tasarım yaklaşımının, sistemin sadece arkasındaki zemin için değil aynı zamanda önündeki zemin için de önemli olduğunu belirtmiştir. Yük boşaltma durumunun önemli olduğu zeminlerde HS model ile elde edilen aksel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri Mohr-Coloumb ile elde edilen değerlerden daha yüksektir. Kazı tabanında bulunan zemin yüksek kabarma gösterdiği taktirde analiz yazılımı bunu sisteme yardımcı bir etki olarak kabul etmektedir.

3.3.2. Limit Denge Analiz Yazılımı

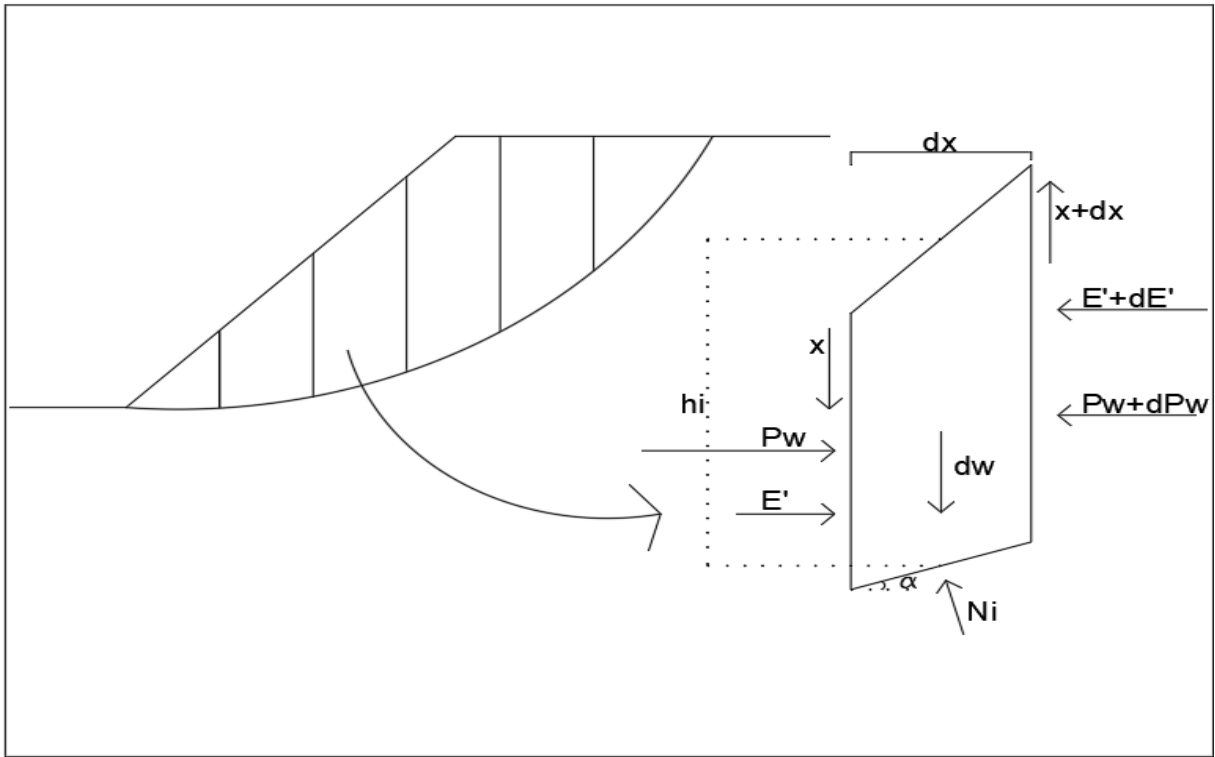
Geoteknik alanında el ile yapıldığında uzun vakit alan hesaplar, bilgisayarların hayatımıza girmesi ile başta basit yazılımlar hazırlayarak dünya çapında kolay şekilde çözülebilir hale geldi. Vaka analizi ve nümerik modellerin analizi bölümünde toptan göçme analizleri için limit denge metoduyla çözüm yapan GeoStudio yazılımı 2012 versiyonu kullanılmıştır. Yöntem olarak Morgenstern-Price tercih edilmiştir.

1977'de piyasaya sürülen Slope/W, sev stabilite analizleri alanında ticari olarak dağıtılan ilk geoteknik yazılım olmuştur. Yazılım geliştirildikçe düzensiz boşluk suyu basıncı, lineer ve lineer olmayan zemin davranış modelleri ile karmaşık geometriye sahip şevlerin analizlerini yapabilir hale gelmiştir. Limit denge metodunu kullanarak zemin ankrajı, zemin çivisi vb. iksa sistemlerinin dahil olduğu şev, derin kazı gibi sistemlerin toptan göçme analizleri gerçekleştirmektedir [37].

Limit denge yöntemlerinde herhangi bir göçme düzlemi için şev dilimlere veya kamalara ayrılır. Seçilen metoda göre her parçaya etki eden kuvvet tesirleri ve/veya moment dengesi dikkate alınır. Zeminin sahip olduğu kohezyon ve içsel sürtünme açısı parametrelerinin,

dilimin serbest durumda stabil kalabilmesi için hesaplanan zemin parametresine oranı göçme dairesindeki güvenlik sayısını ifade etmektedir.

Limit denge yönteminin temelleri 1927 yılında İsveç'teki demiryolu şev problemlerinin araştırmasında Fellenius tarafından atılmıştır. Sonrasında birçok araştırmacı, farklı zemin türleri ve şev özellikleri için yöntemler geliştirmiştir. Herhangi bir geometriye sahip göçme düzlemi için hesap yapabilen Morgenstern-Price yönteminde yatay ve düşey kuvvet dengesinin yanı sıra rastgele bir noktaya göre moment dengesi de dikkate alınır. Kabul edilen kuvvet tesirleri ve momentleri **Şekil 3.13**'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13: Morgenstern-Price metodunda kuvvet kabulleri [38].

Bilinmeyen girdi sayısının bilinen girdi sayısından fazla olduğu yöntemler arasında olan LEM, bilgisayar yazılımları yardımıyla çözülebilmektedir. KDYY'de kullanılan yaklaşım olan 'Tasarım Yaklaşımı 2' kat sayıları uygulanan Morgenstern-Price yöntemi diğer limit denge yöntemlerine göre daha yüksek güvenlik sayıları vermektedir. Sonlu elemanlar yazılımı ile tasdik edilen sonuçlardan anlaşıldığı üzere Morgenstern-Price yöntemi ile daha gerçekçi sonuçlar elde edilmektedir [39].

4. BULGULAR

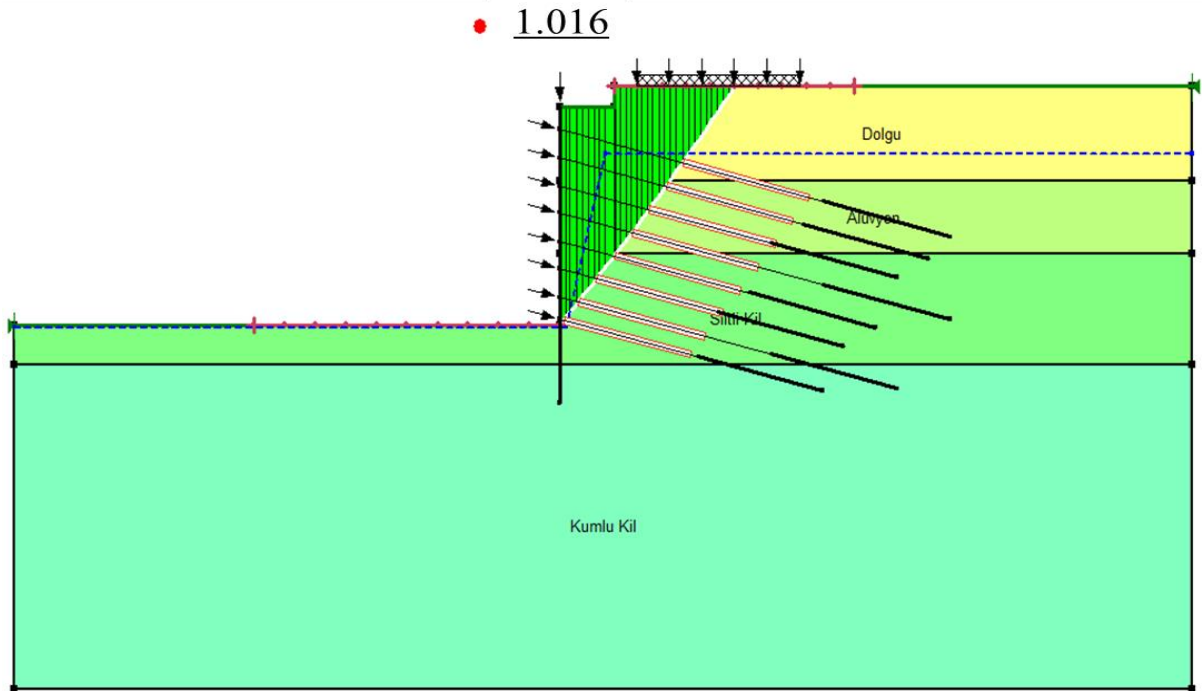
Bir vakanın yeniden analizi ve nümerik modellerin analizi bölümleri için elde edilen bulgular bu bölümde ayrı ayrı verilmiştir.

4.1. BİR VAKANIN YENİDEN ANALİZİ BULGULAR

Tezin, bir vakanın yeniden analizi bölümü için gerçekleştirilen ve beş aşamadan oluşan kazı destek elemanı analiz sonuçları bu kısımda verilmiştir.

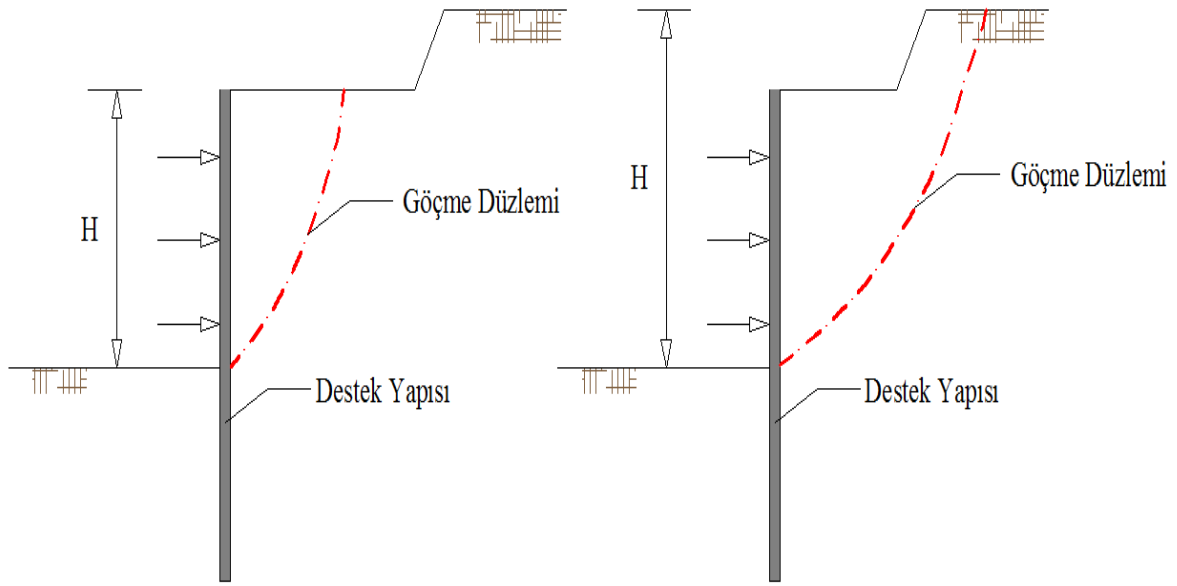
4.1.1. Birinci Aşama Sonuçları

Birinci aşama analizlerinde GeoStudio yazılımında Morgenstern-Price metodu kullanılarak sistemin toptan göçmeye karşı güvenliği araştırılmıştır. Statik drenajlı durumdaki güvenlik sayısını temsil eden analizde **Tablo 2.1**'de verilen kısmi katsayılar seti kullanılmıştır. Yapılan analiz neticesinde tasarımın toptan göçmeye karşı $GS = 1,016$ bulunmuştur. KDYY 3.2.2.2. ye göre ankraj serbest boyu kontrolünde ankraj kök bölgesi, olası göçme dairesinden 2 m veya $0.2H$ kadar uzakta olmalıdır. LEM kontrollerinde bu kriterin sağlandığı belirlenmiş olup, ankraj serbest halat boyları yeterli uzunluğa sahiptir. Limit denge yazılımı kullanılarak yapılan toptan göçme analiz sonucu **Şekil 4.1**'de verilmiştir.



Şekil 4.1: Vaka analizi yeniden tasarım drenajlı LEM analiz sonucu: 1,016.

Kazı derinliği ‘H’, beklenmedik kazı da dikkate alınarak 19,6 m olarak kabul edilmiştir. Fakat LEM analizinde görüldüğü üzere toptan göçme dairesi sürşarj yükü olarak tanımlanan yol yapısını kesmektedir. KDYY’de ‘H’ için 2 durum gösterilmiştir ve bunlar **Şekil 4.2**’de verilmiştir. Eğer toptan göçme dairesi, palyeli yapılan şevli kazıyı da içine alıyorsa kazı derinliği ‘H’, palyeli yapılan şevli kazının yüksekliğini içine alacak şekilde yükseltilmelidir. Sonuç olarak 19,6 m olan kazı derinliği, yaklaşık 1,8 m yüksekliğe sahip şev de dahil edilerek 21,4 m olarak değiştirilmiştir. Kazı derinliğinin (H) kullanılacağı hesaplarda 21,4 m olarak kabul değiştirilmiştir.



Şekil 4.2: Kazı derinliğinin (H) etki yüksekliği olarak değiştirilmesi [7].

4.1.2. İkinci Aşama Sonuçları

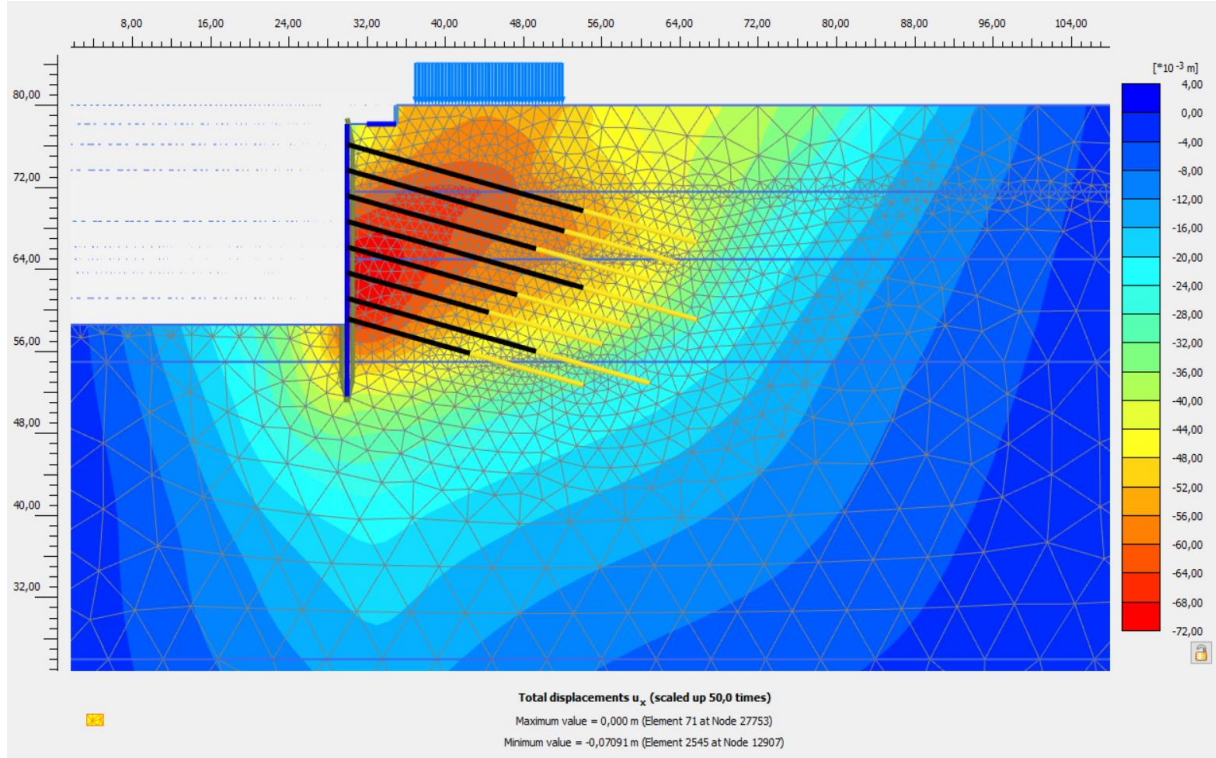
ULS-HYD, ULS-UPL vb. kontroller yapılmıştır. İksa sistemi arkasındaki ve önündeki kot farkından dolayı zemin suyundaki basınç değişimleri dikkate alınmıştır. Basınç artması halinde suyun fore kazıklar arasındaki boşluktan tahliye olacağı düşünülerek borulanma, kaldırma vb. durumların söz konusu olmadığına karar verilmiştir.

4.1.3. Üçüncü Aşama Sonuçları

Üçüncü aşamada SLS (GEO) kontrolü yapılmıştır. Bu kontrol aşaması için sonlu elemanlar yazılımı olan Plaxis2D kullanılmıştır. Parsel sınırında bulunan ve geçici yük statüsünde olan yol yükü, güvenliği azaltıcı etkiler sınıfına girdiği için **Tablo 2.1**’deki kısmi katsayılar setinden $1,5/1,35 = '1,11'$ katsayısı ile yükseltilmiştir, diğer etki-malzeme-tepki

durumları için kısmi katsayılar kullanılmamıştır. Yazılımın inşaat aşamaları kısmında her kazı ve ankraj öngerme aşaması için 2 ayrı faz tanımlanmıştır.

SLS analizleri sonucunda maksimum yatay deplasman, kazının orta seviyelerinde, $\delta_h=7,09$ cm olarak bulunmuştur. Zeminde oluşan yatay deplasmanların büyüklüğü, konumu ve maksimum yatay deplasman değeri **Şekil 4.3**'te verilmiştir.

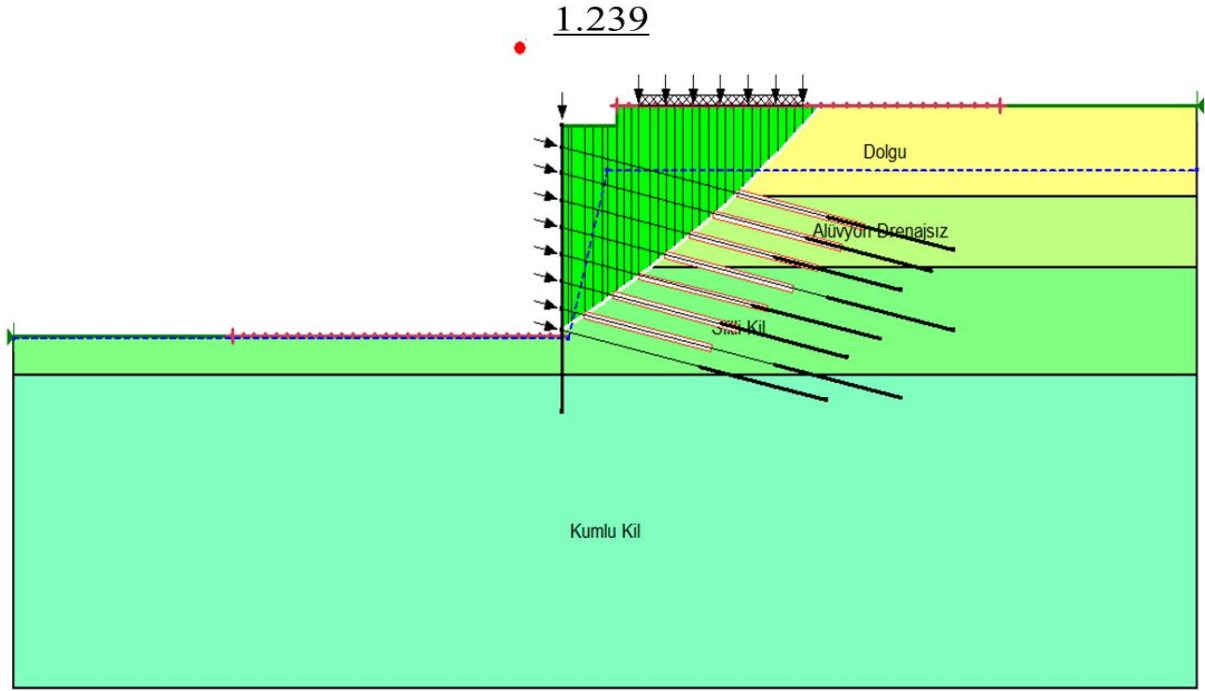


Şekil 4.3: Vakanın yeniden analizinde elde edilen maksimum yatay deplasman: 7,09 cm.

UÇAR [40] tarafından yapılan araştırmada inşaat mühendisliğinin her alanında olduğu gibi kazı destekleme sistemlerinde de inşa sırasında ve sonrasında yapılacak kontroller hayati önem arz ettiği vurgulanmıştır. Düzenli yapılan inklinometre ölçümleri ile iksa sistemde oluşan yanal hareketler kontrol edilir. Sistemde meydana gelen deformasyonlar projede verilen uyarı sınırını geçtiği takdirde ilave ankraj ekleme, inklinometre ölçüm periyodunu artırma vb. çözümler ile sistem güvenliği sağlanabilir ve olası büyük kayıpların önüne basit çözümler ile geçilebilir. Tezin birinci bölümdeki amacı doğrultusunda tasarımın hangi aşamalarının yönetmelik kriterlerini sağladığını ve/veya sağlamadığını görmek için sistem deplasman sınırını aşmasına rağmen ilave zemin ankrajı vb. çözümler uygulanmadan analiz adımlarına devam edilmiştir.

4.1.4. Dördüncü Aşama Sonuçları

ULS Deprem kontrolünde KDYY’de belirtildiği üzere malzeme ve yük kısmı katsayıları “1” olarak alınmıştır. Drenajsız zemin parametreleri kullanılarak yatay deprem ivmesi (k_h) verilen tasarımın LEM ile toptan göçmeye karşı güvenlik sayısı 1,239 olarak hesaplanmıştır. Toptan göçme dairesinin konumu **Şekil 4.4**’te gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Vakanın yeniden analizinde dinamik durum LEM analizi sonucu: 1,239.

4.1.5. Beşinci Aşama Sonuçları

Yapısal elemanlardaki göçme sınır durumu (ULS) analizi için **Tablo 2.1**’de verilen kısmı katsayılar kullanmadan FEM analizlerinden halat ve kök bölgesi kuvvetleri elde edilmiştir. Kuvvetler seçilirken statik yükleme durumunda sistemin en çok zorlandığı ve en büyük kuvvet tesirleri elde edilen beklenmedik kazı aşaması ile dinamik yükleme durumunda elde edilen kuvvetler ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Statik yükleme durumunda ankraj serbest halat bölgesinde ortaya çıkan kuvvetler **Tablo 4.1**’de verilmiştir. Dinamik yükleme durumunda ankraj serbest halat bölgesinde ortaya çıkan kuvvetler **Tablo 4.2**’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Vakanın yeniden analizinde FEM statik yükleme durumu halat kuvvetleri.

Structural element ▲	Node ▲	Local number ▲	X ▲ [m]	Y ▲ [m]	N ▲ [kN]	N _{min} ▲ [kN]	N _{max} ▲ [kN]
NodeToNodeAnchor_8_1	10336	1	54,148	69,710	241,830	0,000	272,225
Element 1-1 (Node-to-node anchor)	322	2	30,000	76,180	241,830	0,000	272,225
NodeToNodeAnchor_7_1	9552	1	52,216	67,727	263,251	0,000	269,341
Element 2-2 (Node-to-node anchor)	1954	2	30,000	73,680	263,251	0,000	269,341
NodeToNodeAnchor_6_1	9442	1	49,319	66,004	380,256	0,000	380,256
Element 3-3 (Node-to-node anchor)	4946	2	30,000	71,180	380,256	0,000	380,256
NodeToNodeAnchor_5_1	16946	1	54,148	62,210	407,810	0,000	407,810
Element 4-4 (Node-to-node anchor)	8234	2	30,000	68,680	407,810	0,000	407,810
NodeToNodeAnchor_4_1	12142	1	47,387	61,521	412,156	0,000	412,156
Element 5-5 (Node-to-node anchor)	10120	2	30,000	66,180	412,156	0,000	412,156
NodeToNodeAnchor_3_1	12440	1	44,489	59,798	416,761	0,000	416,761
Element 6-6 (Node-to-node anchor)	11894	2	30,000	63,680	416,761	0,000	416,761
NodeToNodeAnchor_2_1	18080	1	49,319	56,004	393,970	0,000	393,970
Element 7-7 (Node-to-node anchor)	13900	2	30,000	61,180	393,970	0,000	393,970
NodeToNodeAnchor_1_1	18036	1	42,557	55,815	369,956	0,000	369,956
Element 8-8 (Node-to-node anchor)	16048	2	30,000	59,180	369,956	0,000	369,956

Tablo 4.2: Vakanın yeniden analizinde FEM dinamik yükleme durumu halat kuvvetleri.

Structural element ▲	Node ▲	Local number ▲	X ▲ [m]	Y ▲ [m]	N ▲ [kN]	N _{min} ▲ [kN]	N _{max} ▲ [kN]
NodeToNodeAnchor_8_1	10336	1	54,148	69,710	257,157	0,000	272,225
Element 1-1 (Node-to-node anchor)	322	2	30,000	76,180	257,157	0,000	272,225
NodeToNodeAnchor_7_1	9552	1	52,216	67,727	274,642	0,000	274,642
Element 2-2 (Node-to-node anchor)	1954	2	30,000	73,680	274,642	0,000	274,642
NodeToNodeAnchor_6_1	9442	1	49,319	66,004	388,370	0,000	388,370
Element 3-3 (Node-to-node anchor)	4946	2	30,000	71,180	388,370	0,000	388,370
NodeToNodeAnchor_5_1	16946	1	54,148	62,210	415,036	0,000	415,036
Element 4-4 (Node-to-node anchor)	8234	2	30,000	68,680	415,036	0,000	415,036
NodeToNodeAnchor_4_1	12142	1	47,387	61,521	416,776	0,000	416,776
Element 5-5 (Node-to-node anchor)	10120	2	30,000	66,180	416,776	0,000	416,776
NodeToNodeAnchor_3_1	12440	1	44,489	59,798	419,888	0,000	419,888
Element 6-6 (Node-to-node anchor)	11894	2	30,000	63,680	419,888	0,000	419,888
NodeToNodeAnchor_2_1	18080	1	49,319	56,004	395,916	0,000	395,916
Element 7-7 (Node-to-node anchor)	13900	2	30,000	61,180	395,916	0,000	395,916
NodeToNodeAnchor_1_1	18036	1	42,557	55,815	369,566	0,000	369,956
Element 8-8 (Node-to-node anchor)	16048	2	30,000	59,180	369,566	0,000	369,956

Tablo 2.1'de verildiği üzere statik yükleme durumunda meydana gelen en büyük ankraj kök kuvveti '1,35', dinamik yükleme durumunda meydana gelen en büyük ankraj kök kuvveti '1' katsayısı ile çarpılır. Elde edilen iki değerden büyük olan değer, ankraj tasarım dayanımı ile karşılaştırılır. Tasarım kuvveti büyükse ankraj kökü ile zemin arasında oluşan sürtünme kuvvetinin güvenliği sağladığı kabul edilir. Statik ve dinamik yükleme durumlarında birim boy

için elde edilen maksimum ankraj halat kuvvetleri, yatay ankraj aralıkları ve **Tablo 2.1** kısmı katsayıları kullanarak hesaplanan değerler **Tablo 4.3** ve **Tablo 4.4**'te verilmiştir.

Tablo 4.3: Vakanın yeniden analizinde statik yükleme durumu ankraj halat kuvvetleri.

Halat ismi	Ankrajlar Arası Yatay Mesafe (m)	Beklenmedik kazı kotu Halat Kuvveti (kN)	Kısmi Katsayı (Tablo 2.1)	Hesaplanan Halat Kuvveti (kN)
1.Sıra ankraj	1,2	272,23	1,35	441,00
2.Sıra Ankraj	1,2	269,34	1,35	436,33
3.Sıra Ankraj	1,2	380,26	1,35	616,01
4.Sıra Ankraj	1,2	407,81	1,35	660,65
5.Sıra Ankraj	1,2	412,16	1,35	667,69
6.Sıra Ankraj	1,2	416,76	1,35	675,15
7.Sıra Ankraj	1,2	393,97	1,35	638,23
8.Sıra Ankraj	1,2	369,96	1,35	599,33

Tablo 4.4: Vaka analizinde dinamik yükleme durumu ankraj halat kuvvetleri.

Halat ismi	Ankrajlar Arası Yatay Mesafe (m)	Depremlili durum halat kuvveti (kN)	Kısmi Katsayı (Tablo 2.1)	Hesaplanan Halat Kuvveti (kN)
1.Sıra ankraj	1,2	272,23	1	326,676
2.Sıra Ankraj	1,2	274,64	1	329,568
3.Sıra Ankraj	1,2	388,37	1	466,044
4.Sıra Ankraj	1,2	415,04	1	498,048
5.Sıra Ankraj	1,2	416,78	1	500,136
6.Sıra Ankraj	1,2	419,89	1	503,868
7.Sıra Ankraj	1,2	395,92	1	475,104
8.Sıra Ankraj	1,2	369,96	1	443,952

Sekiz sıra ankraj için statik ve dinamik yükleme durumlarını temsil eden analizlerden elde edilen en büyük ankraj halat kuvvetleri ile tasarım kuvvetleri **Tablo 4.5**'te verilmiştir. Tüm ankraj halatları güvenliği sağlamıştır.

Tablo 4.5: Vakanın yeniden analizinde ankraj halat kontrolü.

Seçilen Kuvvet (maks) (kN)	Tasarım Kuvveti (kN)	Ankraj Halat Kontrolü
441,0045	780	Yeterli
436,33242	780	Yeterli
616,01472	780	Yeterli
660,6522	780	Yeterli
667,69272	780	Yeterli
675,15282	780	Yeterli
638,2314	780	Yeterli
599,32872	780	Yeterli

Statik yükleme durumunda tüm fazlar içerisinde ankraj köklerinde meydana gelen maksimum eksenel kuvvetleri **Tablo 4.6**'da verilmiştir. Dinamik yükleme durumunu temsil eden analizlerde meydana gelen maksimum ankraj kök eksenel kuvvetleri **Tablo 4.7**'de verilmiştir.

Tablo 4.6: Vaka analizinde statik yükleme durumu ankraj kök kuvvetleri.

Çeper ismi	Anraj Kökü Yatay Mesafe (m)	Ankraj Kök Kuvveti (kN)	Kısmi Katsayı (Tablo 2.1)	Hesaplanan Kök Kuvveti (kN)
1.Sıra ankraj	1,2	192,5	1,35	311,85
2.Sıra Ankraj	1,2	204,3	1,35	330,966
3.Sıra Ankraj	1,2	280,9	1,35	455,058
4.Sıra Ankraj	1,2	282,3	1,35	457,326
5.Sıra Ankraj	1,2	275,1	1,35	445,662
6.Sıra Ankraj	1,2	263,4	1,35	426,708
7.Sıra Ankraj	1,2	252,8	1,35	409,536
8.Sıra Ankraj	1,2	225,1	1,35	364,662

Tablo 4.7: Vaka analizinde dinamik yükleme durumu ankraj kök kuvvetleri.

Çeper ismi	Ankraj Kökü Yatay Mesafe (m)	Ankraj Kök Kuvveti (kN)	Kısmi Katsayı (Tablo 2.1)	Hesaplanan Kök Kuvveti (kN)
1.Sıra ankraj	1,2	205,91	1	247,092
2.Sıra Ankraj	1,2	267,2	1	320,64
3.Sıra Ankraj	1,2	291,8	1	350,16
4.Sıra Ankraj	1,2	290,67	1	348,804
5.Sıra Ankraj	1,2	280,34	1	336,408
6.Sıra Ankraj	1,2	267,95	1	321,54
7.Sıra Ankraj	1,2	259,36	1	311,232
8.Sıra Ankraj	1,2	233,19	1	279,828

Sekiz sıra ankraj için yatay aralık ve kısmi katsayılarla çarpılmış statik-dinamik yükleme durumlarından elde kuvvetlerden büyük olanı (Seçilen Kök Kuvveti (maks)) ankraj tasarım kuvveti olarak seçilmiştir. Sekiz sıra ankrajın tümünde Seçilen Kök Kuvveti (maks), ankraj tasarım kuvvetini aşmıştır ve güvenliği sağlamamaktadır. Seçilen kök kuvvetleri (maks) ve ankraj kök tasarım kuvvetleri **Tablo 4.8**'de verilmiştir. Vaka, beşinci aşama analizlerini geçememiştir.

Tablo 4.8: Vakanın yeniden analizinde ankraj kök kontrolü.

Çeper ismi	Seçilen Kök Kuvveti (maks) (kN)	Ankraj Kök Dayanımı (kN)	Ankraj Kök Kontrolü
1.Sıra ankraj	311,85	260	Yetersiz
2.Sıra Ankraj	330,966	260	Yetersiz
3.Sıra Ankraj	455,058	360	Yetersiz
4.Sıra Ankraj	457,326	360	Yetersiz
5.Sıra Ankraj	445,662	360	Yetersiz
6.Sıra Ankraj	426,708	360	Yetersiz
7.Sıra Ankraj	409,536	360	Yetersiz
8.Sıra Ankraj	364,662	360	Yetersiz

Yapılan birinci aşama analizleri neticesinde tasarımın $GS \geq 1$ kriterini sağladığı tespit edilmiştir ve toptan göçme analizini geçmiştir. Yeraltı suyu kaynaklı herhangi bir kaldırma vb. durumla karşılaşılmayacağı için ikinci aşamayı başarıyla geçmiştir. Birinci aşamanın sonuç bölümünde bahsedildiği üzere $H=21,4$ m olarak kabul edilmiştir. Maksimum yatay deplasman sınırı olan $0,0003H=6,42$ cm kriterine uymadığı görülmüştür. İksa sistemindeki maksimum yanal yer değiştirme, yönetmelikteki deplasman kriterini aşmıştır ve üçüncü aşamada başarısız olmuştur. Buna rağmen sistemdeki tüm durumların analizinin değerlendirilmesi için diğer aşamalara devam edilmiştir. Dördüncü aşama sonucunda depremli durumdaki toptan göçmeye karşı $GS \geq 1$ kriterini sağlandığı görülmüştür. Beşinci aşama neticesinde **Tablo 4.5**'te görüldüğü üzere ULS-STR analizlerinde bulunan, kısmi katsayılar ile hesaplanan halat kuvvetleri güvenliği sağlasa dahi tüm ankraj kök eksenel kuvvetleri, tasarım kuvvetlerini aşmıştır. Çeper sürtünme kuvveti yetersizliğinden dolayı iksa sistemi beşinci aşama kontrollerini geçememiştir.

Vaka analizinde incelenen mevcut projedeki maksimum yatay deplasman ile yapılan yeniden analizden elde edilen maksimum yatay deplasman neredeyse aynı çıkmıştır. Hem mevcut projede hem de yeniden analizde ankraj halatları güvenliği sağlamıştır. Mevcut projede güvenliği sağlayan ankraj kökleri, alt 6 sıra ankrajın kök kapasitesi artırılmasına rağmen tasarım dayanımını aşmıştır. Yapılan nümerik analizler neticesinde tasarımı FHWA'ya uygun olarak projelendirilen ve imalatı yapılan bir proje, KDYY'e göre tekrar modellendiğinde nümerik tasarım güvensiz olarak nitelendirilmiştir.

4.2. NÜMERİK MODELLERİN ANALİZİ BULGULAR

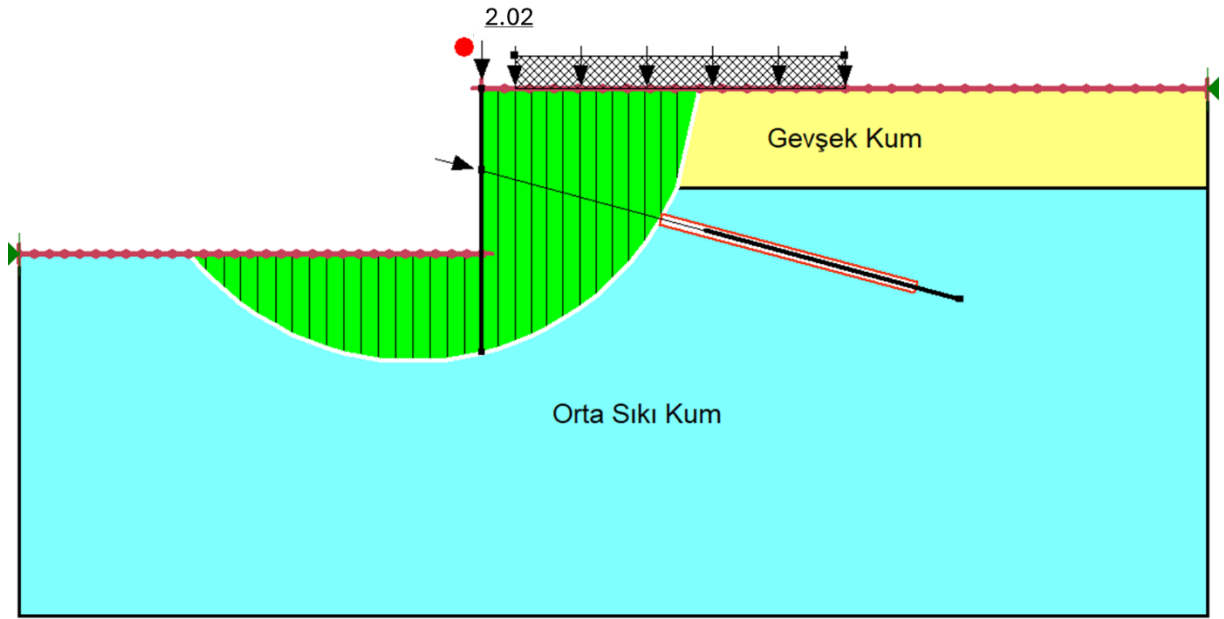
Tezin nümerik model analizleri kapsamında konsol fore kazık ve zemin ankrajlı fore kazık olmak üzere iki farklı sistem için oluşturulan 90 modelden bir tanesinin sonuçları örnek teşkil etmesi açısından bu bölümde verilmiştir. Çözümü verilen örnek modelin özellikleri: $H=5$ m, $D=0,8$ m, $s=1$ m, soket boyu=3 m, ankraj yatay aralığı=2 m, düşey ankraj sırası=1, serbest boy 7 m, kök boyu 8 m.

Yapılan analizlerde bazı modellerde göçmenin gerçekleştiği, sistem stabilitesinin sağlanmadığı görülmüştür. Yenilme meydana gelen modellerin yanında "Göçme Gerçekleşti" ifadesi bulunmaktadır. Göçme gerçekleşen modellerde sistem stabilitesi sağlanmadığı için

maliyet hesapları yapılmamıştır ve deplasman-güvenlik sayısı-maliyet analizlerinde değerlendirmeye katılmamıştır.

4.2.1. Birinci Aşama Sonuçları

Statik yükleme durumunu temsil eden durum için yapılan, LEM yazılımı kullanarak toptan göçmeye karşı güvenliğin araştırıldığı bu aşamada güvenlik sayısı 2,02 bulunmuştur ve $GS \geq 1$ olduğu için model birinci aşama analizlerini geçmiştir. Örnek modelin statik yükleme durumunda oluşan toptan göçme dairesi **Şekil 4.5**'te verilmiştir.



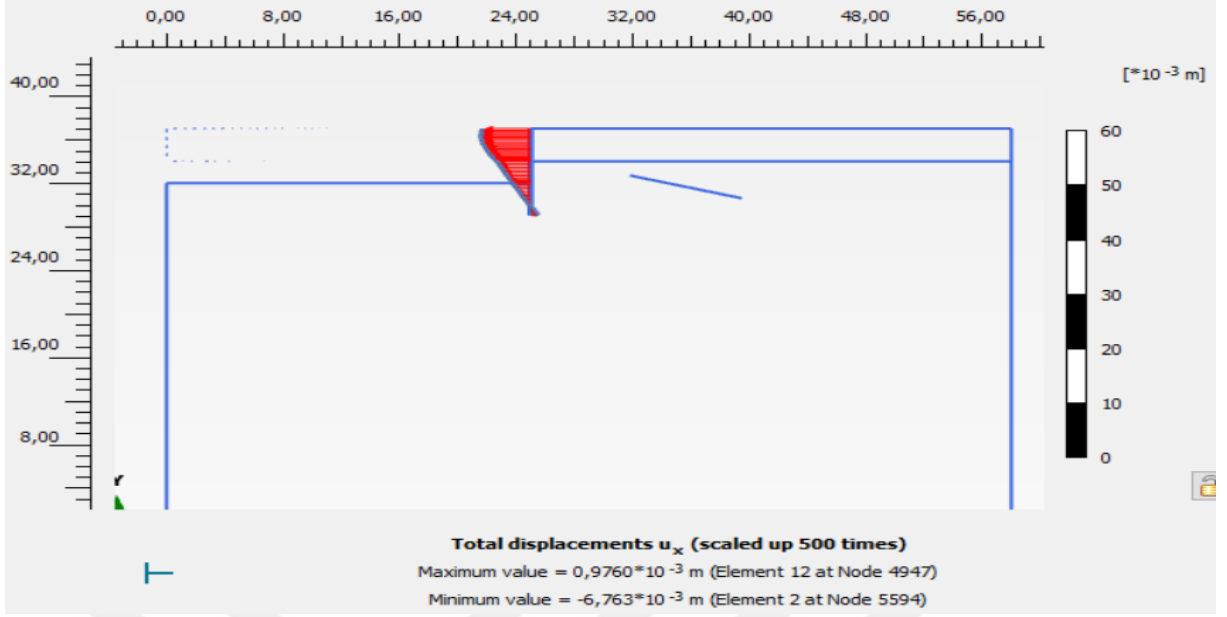
Şekil 4.5: Örnek model statik yükleme durumu LEM analiz sonucu: 2,02.

4.2.2. İkinci Aşama Sonuçları

Zeminde yeraltı suyu bulunmadığı ve fore kazıklar aralıklı olduğu için ULS-HYD, ULS-UPL vb. kontrollerin yapılmasına gerek duyulmamıştır. Örnek model ikinci aşama analizini geçmiştir.

4.2.3. Üçüncü Aşama Sonuçları

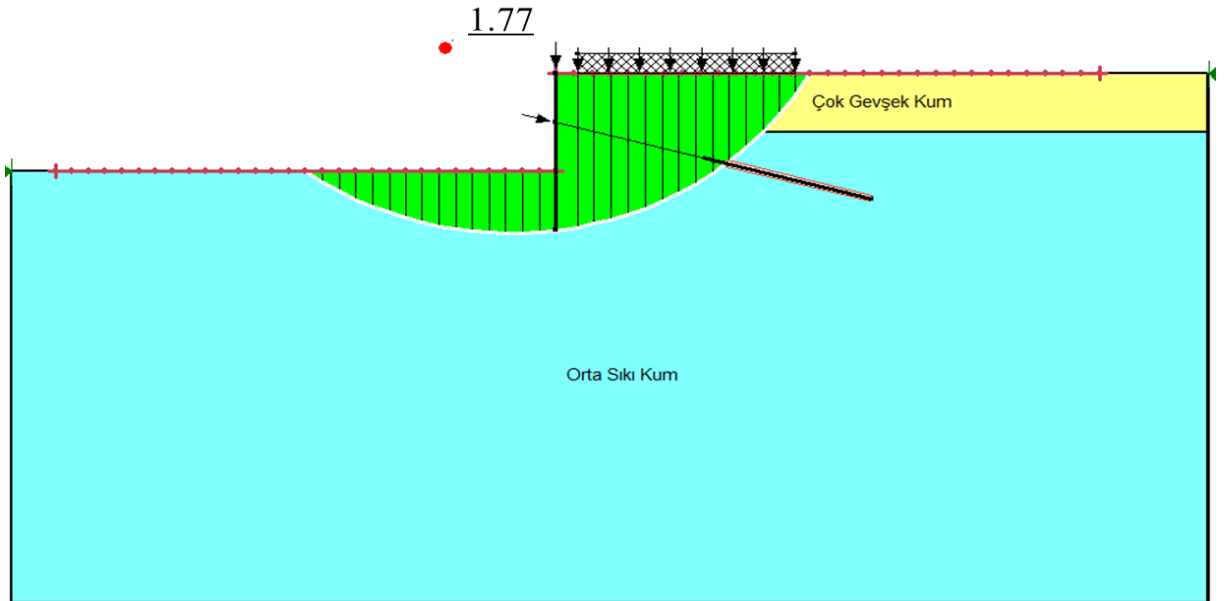
Tablo 2.1'de bulunan kısmi katsayılar seti kullanılmadan FEM yazılımında maksimum fore kazık yatay deplasmanı 0,68 cm olarak elde edilmiştir. Meydana gelen yatay deplasmanların yeri ve maksimum yatay deplasman miktarı **Şekil 4.6**'da verilmiştir. 5 m yüksekliğe sahip kazı için oluşturulan model ankrajlı olduğu için izin verilebilir maksimum deplasman sınırı $\delta h = 0,003H = 1,5 \text{ cm}$ 'den olmalıdır. Deplasman sınırının aşılmadığı görülmüştür ve örnek model üçüncü aşama analizlerini geçmiştir.



Şekil 4.6: Örnek model statik yükleme durumu yatay deplasmanları ve maksimum deplasman değeri.

4.2.4. Dördüncü Aşama Sonuçları

Dinamik yükleme durumundaki toptan göçmeye karşı güvenlik analizi bu bölümde yapılmıştır. Drenajsız zemin parametreleri kullanılarak yatay deprem ivmesi (k_h) verilen tasarımın LEM yazılımı ile toptan göçmeye karşı güvenlik sayısı 1,77 olarak hesaplanmıştır ve $GS \geq 1$ koşulu sağlandığı için model dördüncü aşama analizlerini geçmiştir. Toptan göçme dairesinin konumu Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7: Örnek model dinamik yükleme durumu LEM analiz sonucu: 1,77.

4.2.5. Beşinci Aşama Sonuçları

Tablo 2.1'de verilen kısmi katsayılar kullanmadan FEM yazılımı kullanarak ankraj halat ve kök bölge kuvvetleri ile fore kazık kesit tesirleri elde edilmiştir. Kuvvetler seçilirken beklenmedik kazı aşaması (statik yükleme) ve dinamik yükleme durumu ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Örnek modelin statik yükleme durumundaki birim boy maksimum halat kuvveti 136,658 kN olarak elde edilmiştir ve **Tablo 4.9'**da verilmiştir. Örnek modelin dinamik yükleme durumundaki birim boy maksimum halat kuvveti 147,402 kN olarak elde edilmiştir ve **Tablo 4.10'**da verilmiştir.

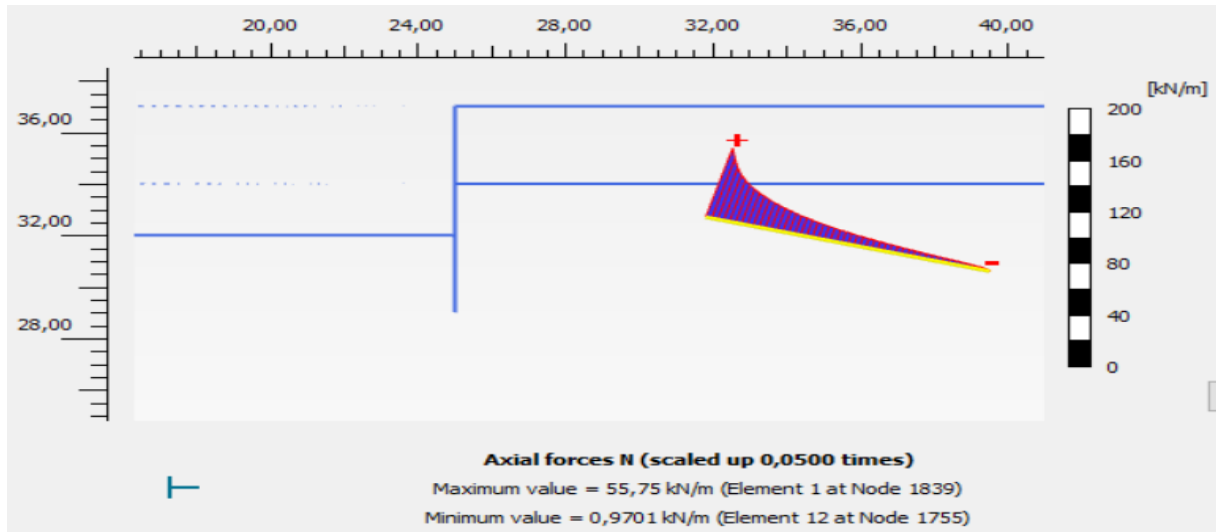
Tablo 4.9: Örnek modelin statik yükleme durumu ankraj halat kuvveti.

Structural element	Node	Local number	X [m]	Y [m]	N [kN]	N _{min} [kN]	N _{max} [kN]
NodeToNodeAnchor_1_1	5479	1	25,000	34,500	136,658	0,000	136,658
Element 1-1 (Node-to-node anchor)	1839	2	31,800	32,700	136,658	0,000	136,658

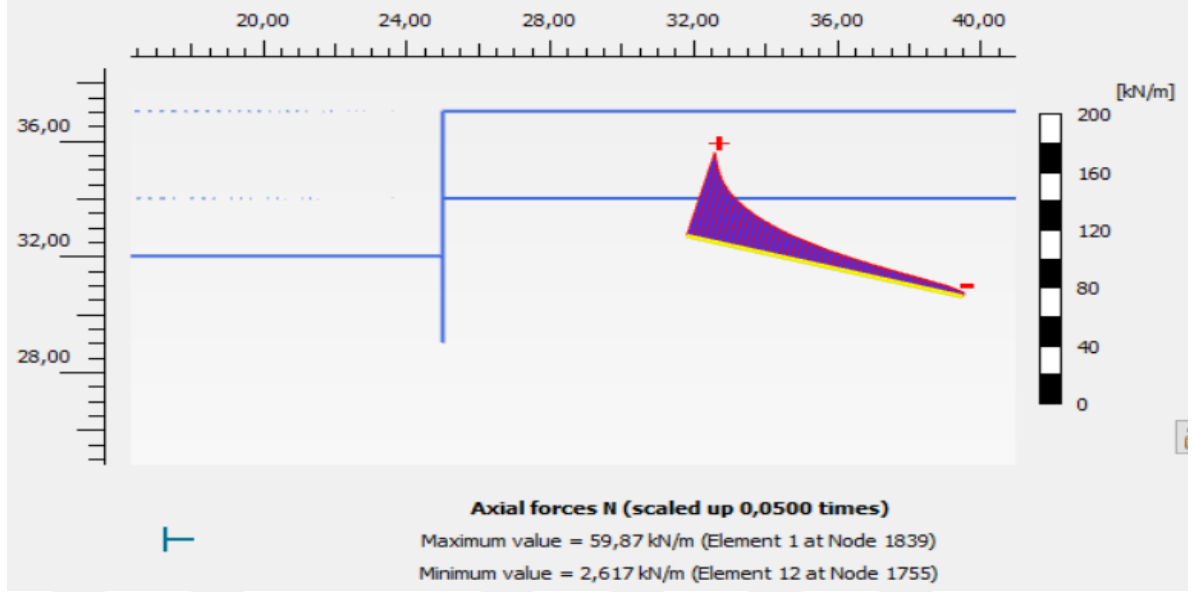
Tablo 4.10: Örnek modelin dinamik yükleme durumu ankraj halat kuvveti.

Structural element	Node	Local number	X [m]	Y [m]	N [kN]	N _{min} [kN]	N _{max} [kN]
NodeToNodeAnchor_1_1	5479	1	25,000	34,500	147,402	0,000	147,402
Element 1-1 (Node-to-node anchor)	1839	2	31,800	32,700	147,402	0,000	147,402

Statik yükleme durumunu temsil eden analizlerden elde edilen birim boy için maksimum ankraj kök kuvveti 55,75 kN/m olarak elde edilmiştir ve **Şekil 4.8'**de verilmiştir. Dinamik yükleme durumunu temsil eden analizlerden elde edilen birim boy için maksimum ankraj kök kuvveti 59,87 kN/m olarak elde edilmiştir ve **Şekil 4.9'**da verilmiştir.



Şekil 4.8: Örnek modelin statik yükleme durumu ankraj kök kuvveti.



Şekil 4.9: Örnek modelin dinamik yükleme durumu ankraj kök kuvveti.

FEM analizleri gerçekleştirirken analiz sırasında **Tablo 2.1**'de verilen kısmi sayılar seti kullanılmadığı için sonuçları elde ettikten sonra kısmi katsayılar ve yatay mesafeler kullanılarak nihai halat ve kök kuvvetleri elde edilmiştir. Ankraj halatı için elde edilen ve hesaplanan kuvvetler **Tablo 4.11**'de verilmiştir. Nihai halat kuvveti, ankraj halat dayanımından az olduğu halatlar yeterlidir. Ankraj kökü için elde edilen ve hesaplanan kuvvetler **Tablo 4.12**'de verilmiştir. Nihai kök kuvveti, ankraj kök dayanımından az olduğu ankraj kökü yeterlidir ve sistem beşinci aşama analizlerini tamamlamıştır.

Tablo 4.11: Örnek modelin elde edilen ve hesaplanan ankraj halat kuvvetleri.

Kazı Derinliği (m)	Kazık Çapı ve Aralığı (m)	Yükleme Durumu	FEM Halat Kuvveti (kN)	Ankraj Yatay Aralığı (m)	Tablo 2.1 Kısmi Katsayısı	Nihai Halat Kuvveti (kN)	Ankraj Halat Dayanımı (kN)	Sonuç
5	D=0,8 m ve s=1 m	Statik	136,658	2	1,35	368,977	780	Yeterli
		Dinamik	147,402	2	1	294,804	780	Yeterli

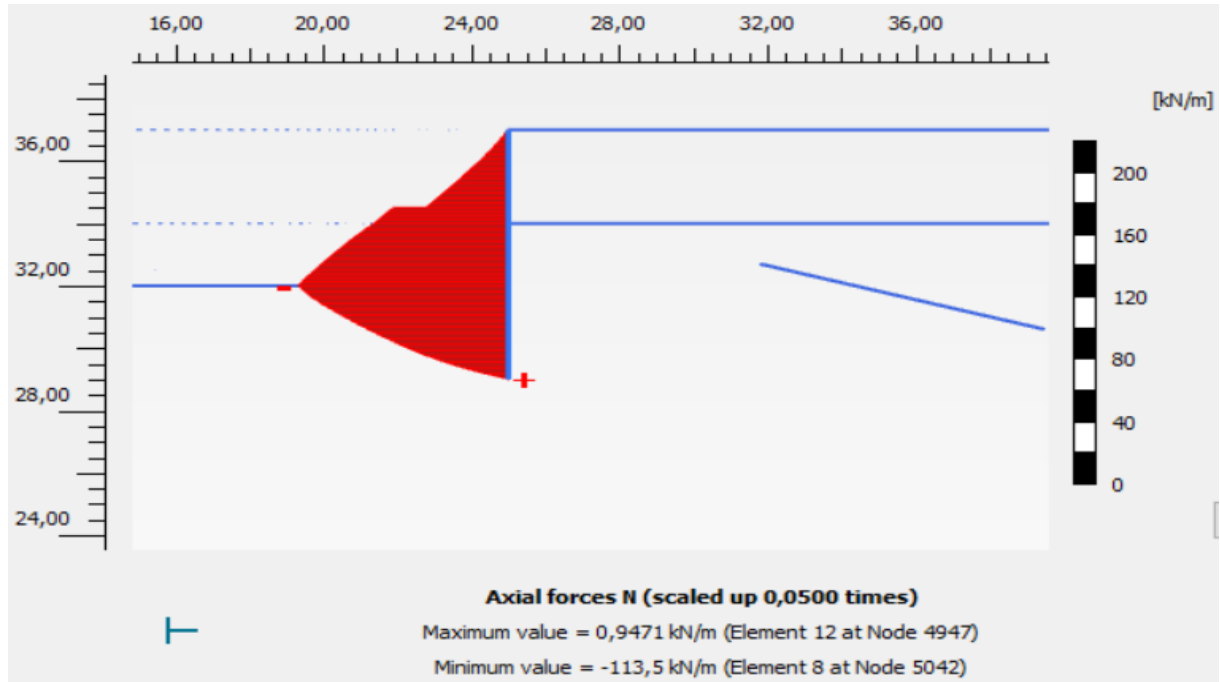
Tablo 4.12: Örnek modelin elde edilen ve hesaplanan ankraj kök kuvvetleri.

Kazı Derinliği (m)	Kazık Çapı ve Aralığı (m)	Yükleme Durumu	FEM Kök Kuvveti (kN)	Ankraj Yatay Aralığı (m)	Tablo 2.1 Kısmi Katsayısı	Nihai Kök Kuvveti (kN)	Ankraj Kök Dayanımı (kN)	Sonuç
5	D=0,8 m ve s=1 m	Statik	55,75	2	1,35	150,525	190	Yeterli
		Dinamik	59,87	2	1	119,740	190	Yeterli

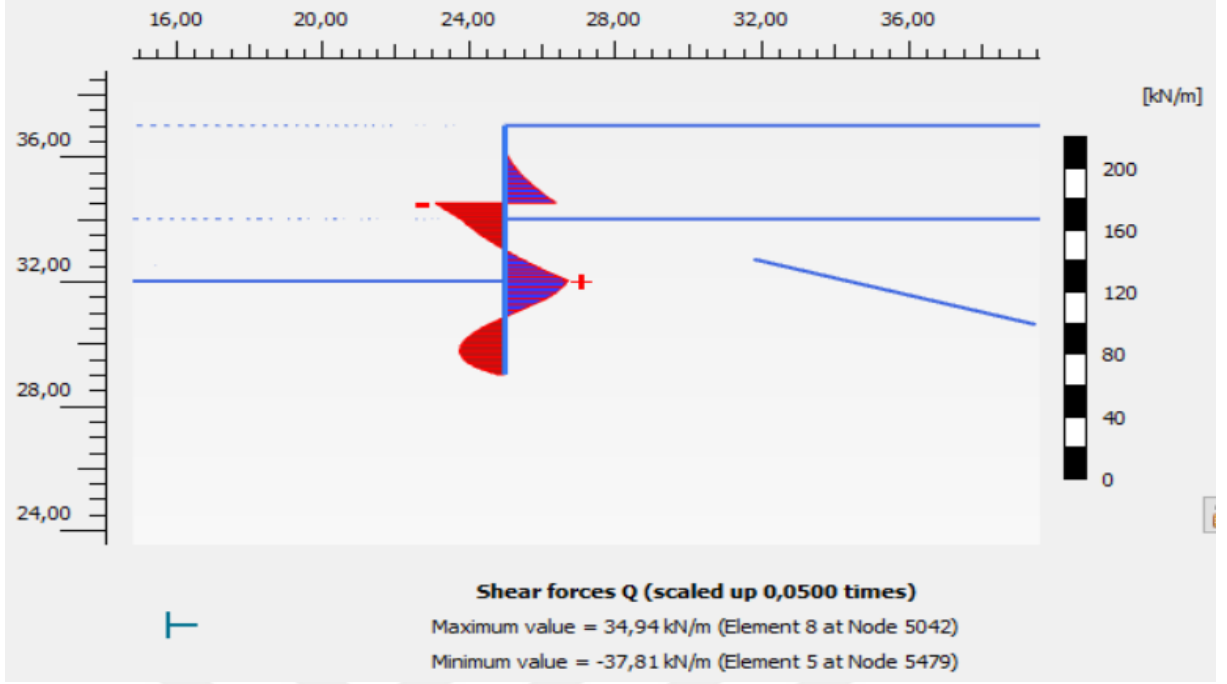
Nümerik modellerin analizi bölümü kapsamında verilen örnek model, yapılan birinci aşama analizleri neticesinde $GS \geq 1$ kriterini sağladığı tespit edilmiştir ve toptan göçme analizini geçmiştir. Yeraltı suyu bulunmadığından herhangi bir kaldırma vb. durumla karşılaşmayacağı için ikinci aşama analizlerini başarıyla tamamlamıştır. Maksimum yatay deplasman sınırı olan $0,0003H=1,5$ cm kriterini aşmadığı için üçüncü aşama analizlerini geçmiştir. Dördüncü aşama analizleri sonucunda dinamik yükleme durumunda, toptan göçmeye karşı $GS \geq 1$ kriterini sağlandığı görülmüştür. Beşinci aşamada neticesinde **Tablo 4.11** ve **Tablo 4.12**'de görüldüğü üzere ULS-STR analizlerinde bulunan, kısmi katsayılar ile hesaplanan halat ve kök kuvvetleri nihai dayanımlar düşük çıkmıştır ve güvenlik sağlanmıştır.

4.2.6. Örnek Modelin Betonarme Hesap Sonuçları

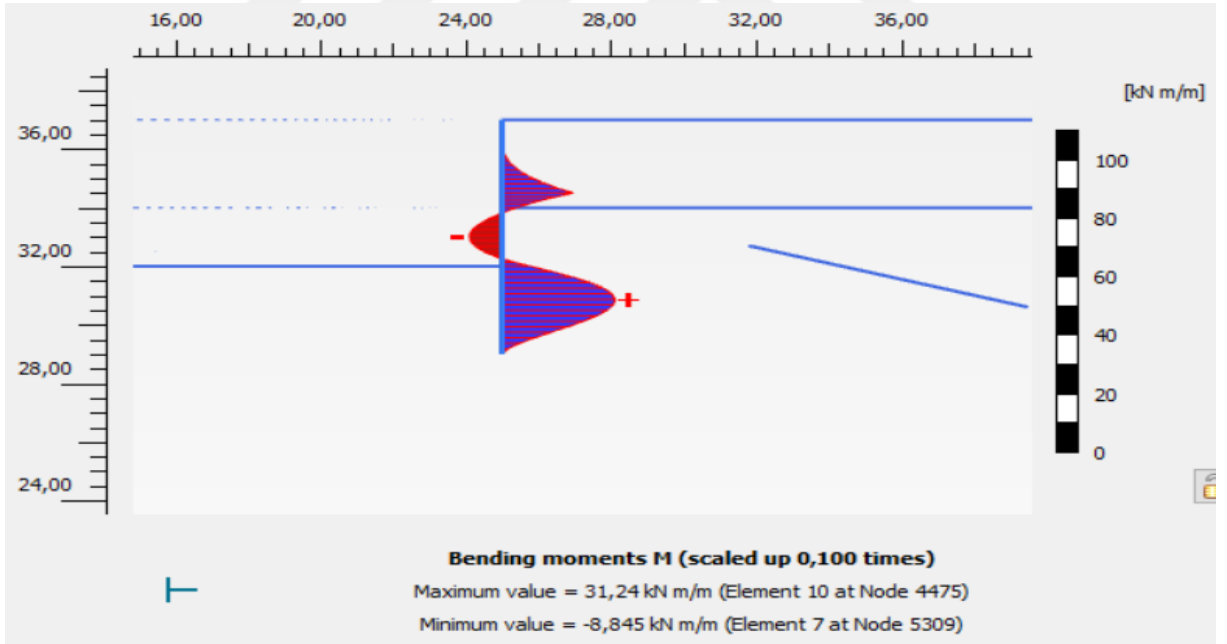
Beş aşamalı geoteknik tasarımı geçen kazı destek sisteminin betonarme hesap değerlendirmesi bu bölümde yapılmıştır. FEM analizlerinde birim boy için elde edilen statik ve dinamik yükleme durumlarındaki eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri **Tablo 2.1**'deki kısmi katsayılar seti kullanılarak hesaplanıp büyük olan kesit tesiri, tasarım kesit tesiri olarak kabul edilmiştir. Statik yükleme durumunda fore kazıkta meydana gelen eksenel kuvvet diyagramı **Şekil 4.10**'da kesme kuvveti diyagramı **Şekil 4.11**'de ve eğilme momenti diyagramı **Şekil 4.12**'de verilmiştir.



Şekil 4.10: Örnek modelin statik durum eksenel kuvvet diyagramı ve maksimum-minimum eksenel kuvvet değerleri.



Şekil 4.11: Örnek modelin statik durum kesme kuvveti diyagramı ve maksimum-minimum kesme kuvveti değerleri.



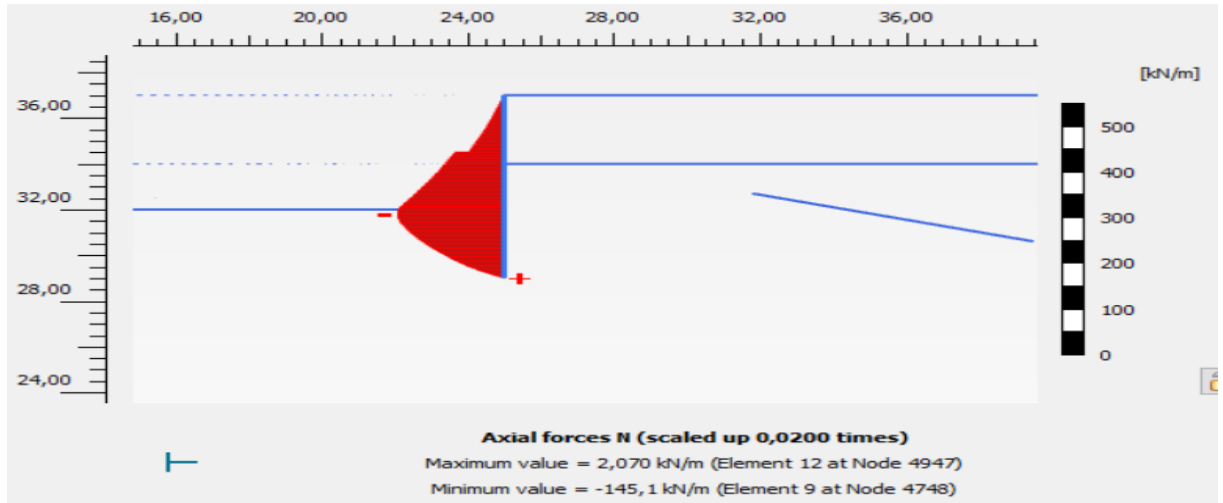
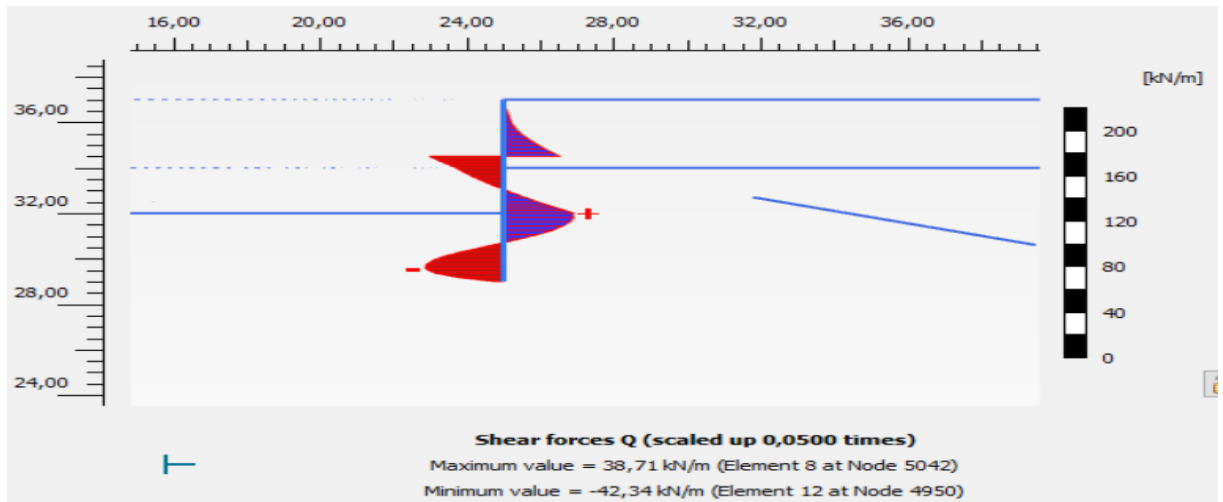
Şekil 4.12: Örnek modelin statik durum eğilme momenti diyagramı ve maksimum-minimum eğilme momenti değerleri.

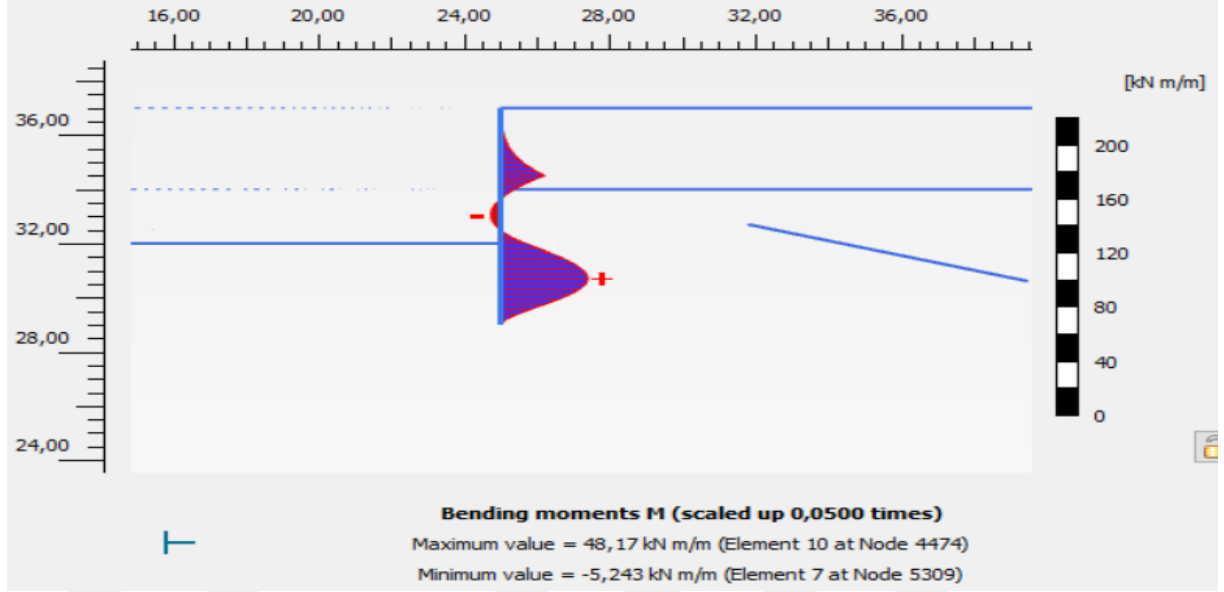
Kazı derinliği 5 m olan sistem için oluşturulan ve $D=0,8$ m fore kazık çapına sahip örnek modelin FEM analizlerinde elde edilen statik yükleme durumundaki kesit tesirleri, yatay mesafeler ve **Tablo 2.1**'deki kısmi katsayılar kullanarak hesaplanmıştır ve **Tablo 4.13**'te verilmiştir.

Tablo 4.13: Örnek modelin statik durumdaki kesit tesirleri.

Statik Yükleme Durumu	FEM Kesit Tesiri (kN/m)-(kNm/m)	Kazık Aralığı (m)	Kısmi Katsayı (Tablo 2.1)	Hesaplanan Kesit Tesiri (kN)-(kNm)
Eksenel Kuvvet (kN)	113,5	1	1,35	153,225
Kesme Kuvveti (kN)	37,81	1	1,35	51,0435
Eğilme Momenti (kNm)	31,24	1	1,35	42,174

Dinamik yükleme durumunda fore kazıkta meydana gelen eksenel kuvvet diyagramı Şekil 4.13'te, kesme kuvveti diyagramı Şekil 4.14'te ve eğilme momenti diyagramı Şekil 4.15'te verilmiştir.

**Şekil 4.13:** Örnek modelin dinamik durum eksenel kuvvet diyagramı ve maksimum-minimum eksenel kuvvet değerleri.**Şekil 4.14:** Örnek modelin dinamik durum kesme kuvveti diyagramı ve maksimum-minimum kesme kuvveti değerleri.



Şekil 4.15: Örnek modelin dinamik durum eğilme moment diyagramı ve maksimum-minimum eğilme momenti değerleri.

Kazı derinliği 5 m olan sistem için oluşturulan ve $D=0,8$ m fore kazık çapına sahip örnek modelin fore kazık kesit tesirleri, FEM analizlerinde elde edilen dinamik yükleme durumundaki kesit tesirleri, yatay mesafeler ve **Tablo 2.1**'deki kısmi katsayılar kullanarak hesaplanmıştır ve **Tablo 4.14**'te verilmiştir.

Tablo 4.14: Örnek modelin dinamik durumdaki kesit tesirleri.

Dinamik Yükleme Durumu	FEM Kesit Tesiri (kN/m)-(kNm/m)	Kazık Aralığı (m)	Kısmi Katsayı (Tablo 2.1)	Hesaplanan Kesit Tesiri (kN)-(kNm)
Eksenel Kuvvet (kN)	145,1	1	1	145,1
Kesme Kuvveti (kN)	42,34	1	1	42,34
Eğilme Momenti (kNm)	48,17	1	1	48,17

Örnek modelin betonarme tasarımında kullanılmak üzere statik ve dinamik yükleme durumlarından hesaplanan kesit tesirlerinden büyük olanlar tasarım kesit tesiri olarak kabul edilmiştir ve **Tablo 4.15**'te verilmiştir.

Tablo 4.15: Örnek modelin fore kazık tasarım kesit tesirleri.

	Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
Tasarım Kesit Tesiri (kN)-(kNm)	153,225	51,044	48,17

Örnek modelin betonarme elemanların tasarım kesit tesirlerini karşılamak üzere ön tasarımında kullanılan minimum donatı oranı $\rho = 0,01$ için yapılan analizlerde bulunan donatı adetleri **Tablo 4.16**'da verilmiştir. Kazı derinliği 5, 6 ve 7 m için kesit büyüklükleri ve donatı oranları sabit kalmıştır, sadece sistem özelliklerine göre betonarme kesitler ve donatı sayıları değişmiştir. Yapılan betonarme hesaplarında **Tablo 4.16**'da verilen kesit büyüklükleri ve donatı oranları kriterleri sağlamıştır ve sistemler betonarme analiz aşamasını geçmiştir.

Tablo 4.16: Maliyet analizinde kullanılan iksa elemanı özellikleri.

<i>Fore Kazık</i>			<i>Başlık Kirişi</i>			<i>Kuşak Kirişi</i>		
Çap	Boyuna Donatı	Etriye	Ebatlar (m ³)	Boyuna donatı	Etriye	Ebatlar (m ³)	Boyuna Donatı	Etriye
φ65	9φ22	φ12/15	0,6x0,65x50	8φ20	φ12/20	0,3x0,7x50	8φ20	φ12/20
φ80	14φ22	φ12/15	0,6x0,8x50	10φ20	φ12/20	0,3x0,7x50	8φ20	φ12/20
φ100	21φ22	φ12/15	0,6x1x50	12φ20	φ12/20	0,3x0,7x50	8φ20	φ12/20

Kazık ve kuşak kirişinin eğilme ve kesme donatıları için yapılan hesapları sırayla **Tablo 4.17**, **Tablo 4.18** ve **Tablo 4.19**'da verilmiştir.

Tablo 4.17: Örnek modelin fore kazık düşey donatılandırılması.

FORE KAZIK EĞİLME DONATISI	
Kazık Çapı, b (cm)	80
Kazık Kesit Alanı, A _c (m ²)	0,503
Eksenel Kuvvet, N _d (kN)	153,23
Eğilme Momenti, M _d (kNm)	48,17
nd, (N _d / (A _c * f' _{cd}))	0,018
md, (M _d / (A _c * f' _{cd} * b))	0,0056
Donatı Oranı, ρ _m	0,1
Donatı Alanı, A _s (m ²)	0,0023
A _s = (ρ _m * A _c) / (f _{yd} / f' _{cd})	
Donatı Alanı, A _s (cm ²)	23
A _{Smin} = (%1 * A _c) (cm ²)	50,3
Seçilen Donatı	14φ22
Seçilen Donatı Alanı, A _S tasarım (cm ²)	53,2
Kullanılan donatı miktarı yeterli	

Tablo 4.18: Örnek modelin fore kazık kayma donatısı.

FORE KAZIK KAYMA DONATISI	
Kazık Çapı, b (cm)	80
Pas Payı (cm)	2,5
Faydalı Genişlik, d (cm)	75
Kesme Kuvveti, Vd (kN)	51,044
Beton Kesiti Kesme Dayanımı, Vc $V_c = 0,8 * 0,65 * f_{ctd} * b * d$	390
Vc > Vd Kesme kuvveti beton tarafından karşılanıyor. İlave kayma donatısına ihtiyaç yok	
Seçilen Kayma Donatısı	φ12/15 cm

Tablo 4.19: Örnek modelin kuşak kirişi kayma ve eğilme donatısı.

KUŞAK KİRİŞİ KAYMA DONATISI		KUŞAK KİRİŞİ EĞİLME DONATISI	
Kuşak kirişi yükseklik, h (cm)	70	Kuşak kirişi yükseklik, h (cm)	70
Kuşak kirişi genişlik, b (cm)	30	Kuşak kirişi genişlik, b (cm)	30
Pas Payı, (cm)	5	Kuşak Kirişi Kesit Alanı, Ac (m ²)	0,21
Ankraj Tasarım Kuvveti * cos (15°), Nd (kN)	183,53	Ankraj Tasarım Kuvveti * cos (15°), Nd (kN)	183,53
Ankraj Aralığı, s (m)	2	Ankraj Aralığı, s (m)	2
Kesme Kuvveti, Vd (kN)	183,53	nd, (Nd / (b * h * f _{cd}))	0,04
Vd = Nd * s / 2		Moment, Md = Nd * s / 10 (kNm)	36,71
Beton kesme dayanımı, Vc (kN)	117	Moment, Md (kNm)	
Vc = 0,8 * 0,65 * f _{ctd} * b * d		md, (Md / (f _{cd} * b * h ²))	0,01
Etriye kesme dayanımı, Vw (kN)		Donatı Oranı, ρm	0,1
Seçilen kesme donatısı	φ12/20	As _{min} = (%1*Ac) (cm ²)	21
Vw = (Asw * f _{ywd} * d) / s	123	Seçilen Donatı	8φ20
Kesitin kesme dayanımı, Vc + Vw (kN)	240	Seçilen Donatı Alanı, As _{tasarım} (cm ²)	25,1
Vc + Vw > Vd Kullanılan donatı miktarı yeterli		Kullanılan donatı miktarı yeterli	

Minimum donatı oranı kullanılan örnek modelin betonarme elemanları kesme, eğilme vb. kesit tesirleri altında gerekli güvenlik kriterlerini sağlamıştır.

5 m derinliğindeki kazı için oluşturulan 18 farklı konsol fore kazıklı modelin güvenlik sayısı- deplasman-kesit tesirlerini içeren tablolar ile bu modellerin maliyet tabloları aşağıda, LEM ve FEM analizleri-maliyet analizi sıralama şekliyle verilmiştir.

Tablo 4.20: Kazı derinliği 5 m için oluşturulan D=0,65 m ve s=0,9 m konsol modelin stabilite analiz sonuçları.

Soket Boyu (m)	Drenajlı LEM GS	Drenajsız LEM GS	FEM deplasman (cm)	Statik Durum Kesit Tesirleri			Dinamik Durum Kesit Tesirleri		
				Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)	Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
2	1,629	1,467	Göçme Gerçekleşti						
3	1,895	1,649	Göçme Gerçekleşti						
4	2,158	1,805	2,95	86,4	72,6	137,1	100,8	180,2	256,7
5	2,4	1,94	2,3	87,8	61,2	151,5	99,7	110,8	257
6	2,611	2,056	2,07	88,6	62,5	157,1	100,3	91,8	258
7	2,896	2,151	1,97	88,7	62,9	159,1	101,3	91,5	261,2

Tablo 4.21: Kazı derinliği 5 m için oluşturulan D=0,65 m ve s=0,9 m konsol modelin maliyet sonuçları.

Soket Boyu (m)	Kazık Boyu (m)	Kazık Sayısı	Kazık Maliyeti (₺)	Başlık Kirişi Maliyeti (₺)	Toplam Maliyet (₺)
4	9	56	1.747.890,04	112.880,12	1.860.770,16
5	10	56	1.942.888,18	112.880,12	2.055.768,30
6	11	56	2.137.886,32	112.880,12	2.250.766,45
7	12	56	2.330.520,05	112.880,12	2.443.400,18

Tablo 4.22: Kazı derinliği 5 m için oluşturulan D=0,8 m ve s=1 m konsol sistem stabilite analiz sonuçları.

Soket Boyu (m)	Drenajlı LEM GS	Drenajsız LEM GS	FEM deplasman (cm)	Statik Durum Kesit Tesirleri			Dinamik Durum Kesit Tesirleri		
				Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)	Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
2	1,629	1,467	Göçme Gerçekleşti						
3	1,895	1,649	Göçme Gerçekleşti						
4	2,158	1,805	2,56	113,1	88	162,2	128,9	216,9	301,2
5	2,4	1,94	1,73	116,1	77,2	188,2	126,6	123	288,6
6	2,611	2,056	1,36	117,1	77,6	206,4	124,9	103,3	289,9
7	2,896	2,151	1,18	117,4	79,6	217,3	124,9	101,4	295,9

Tablo 4.23: Kazı derinliği 5 m için oluşturulan D=0,8 m ve s=1 m konsol modelin maliyet sonuçları.

Soket Boyu (m)	Kazık Boyu (m)	Kazık Sayısı	Kazık Maliyeti (₺)	Başlık Kirişi Maliyet (tl)	Toplam Maliyet (tl)
4	9	50	2.158.874,00	138.172,68	2.297.046,69
5	10	50	2.399.614,98	138.172,68	2.537.787,66
6	11	50	2.640.355,95	138.172,68	2.778.528,63
7	12	50	2.878.498,67	138.172,68	3.016.671,35

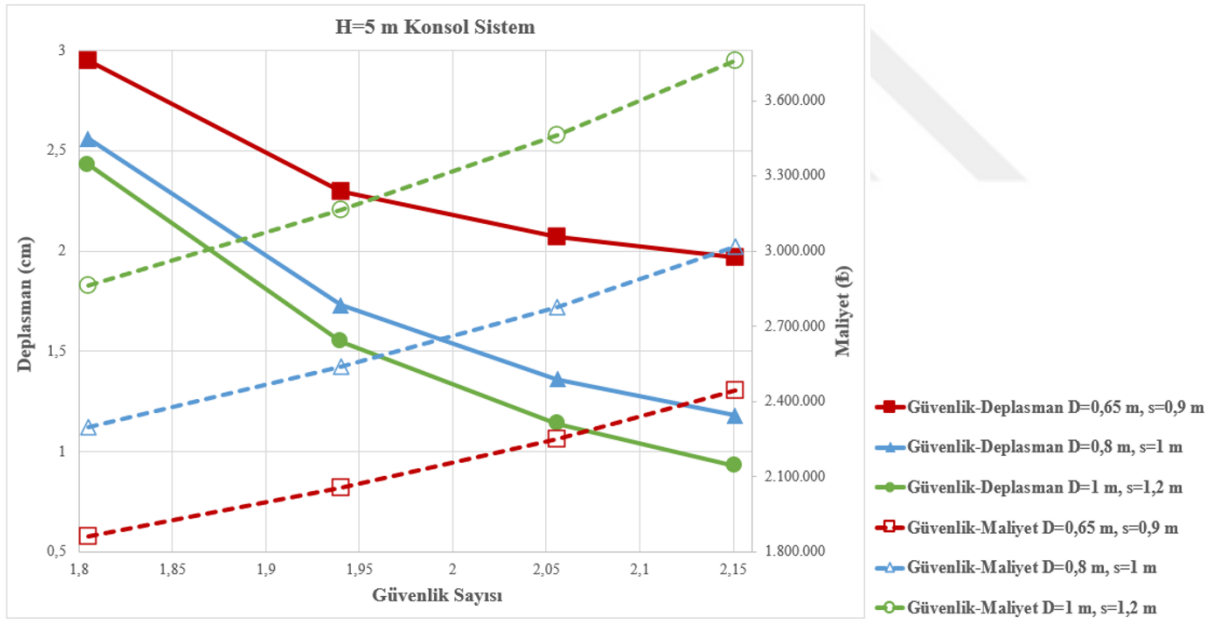
Tablo 4.24: Kazı derinliği 5 m için oluşturulan D=1 m ve s=1,2 m konsol sistem stabilite analiz sonuçları.

Soket Boyu (m)	Drenajlı LEM GS	Drenajsız LEM GS	FEM deplasman (cm)	Statik Durum Kesit Tesirleri			Dinamik Durum Kesit Tesirleri		
				Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)	Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
2	1,629	1,467	Göçme Gerçekleşti						
3	1,895	1,649	Göçme Gerçekleşti						
4	2,158	1,805	2,43	136,2	107,5	197,5	156,6	261,2	361
5	2,4	1,94	1,55	139,9	97,8	235,1	149,3	151,3	341,4
6	2,611	2,056	1,14	141	97,1	264,4	150,4	127,8	363,5
7	2,896	2,151	0,93	141,2	101,2	284,3	152,5	127,1	385

Tablo 4.25: Kazı derinliği 5 m için oluşturulan D=1 m ve s=1,2 m konsol modelin maliyet sonuçları.

Soket Boyu (m)	Kazık Boyu (m)	Kazık Sayısı	Kazık Maliyeti (₺)	Başlık Kirişi Maliyeti (₺)	Toplam Maliyet (₺)
4	9	42	2.693.982,62	169.223,41	2.863.206,03
5	10	42	2.994.223,41	169.223,41	3.163.446,82
6	11	42	3.294.464,20	169.223,41	3.463.687,61
7	12	42	3.591.976,82	169.223,41	3.761.200,23

5 m derinliğindeki kazının konsol fore kazık ile çözümünde oluşturulan üç farklı çap ve yatay aralığa sahip modellerin herbirinde 2 ve 3 m soket boyları için göçme gerçekleşmiştir. Kazı derinliği 5 m olan sistemde stabilite analizlerini geçen 12 farklı konsol sistemin deplasman-güvenlik sayısı- maliyet kıyaslaması **Şekil 4.16**'da verilmiştir.

**Şekil 4.16:** Kazı derinliği 5 m olan sistem için konsol modellerin deplasman-güvenlik sayısı-maliyet grafiği.

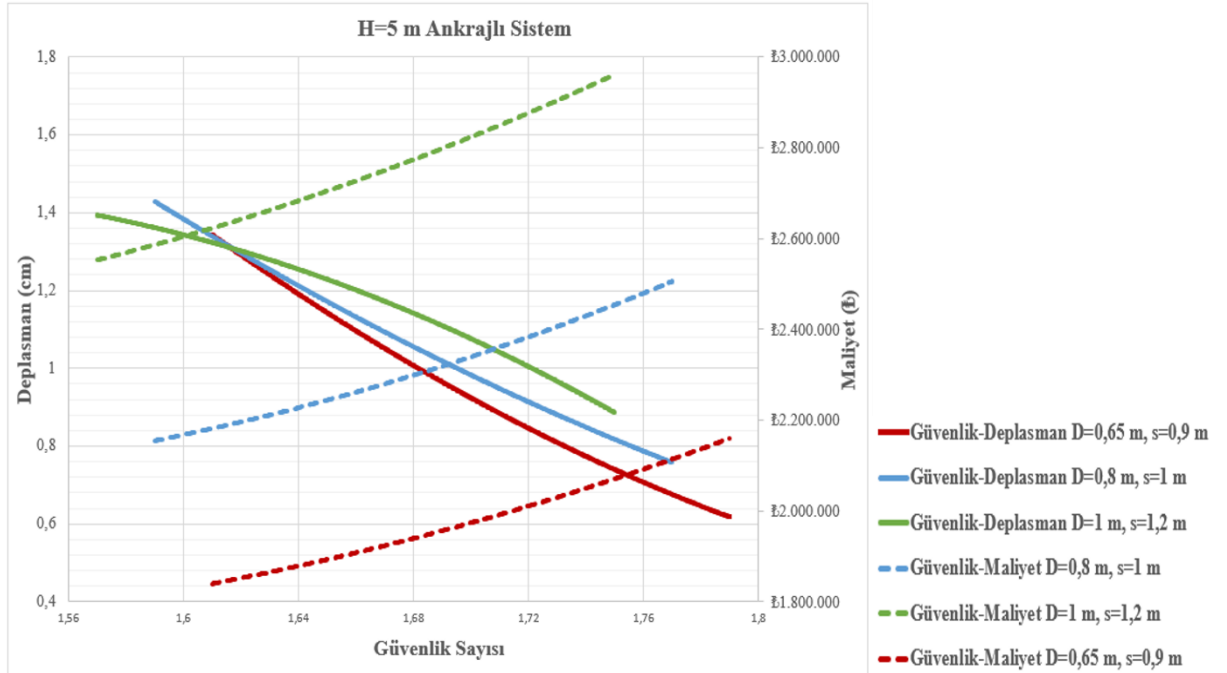
5 m derinliğindeki kazının ankralı fore kazık ile çözümünde oluşturulan modellerin hepsi güvenlik sayısı, deplasman, ankraj kök kuvveti vb. stabilite kriterlerini sağlamıştır. Derinliği 5 m olan kazı için oluşturulan 12 farklı ankrajlı modelin analizler sonucu elde edilen güvenlik sayısı, deplasman, kesit tesirleri değerleri **Tablo 4.26**'da, modellerin maliyetleri **Tablo 4.27**'de ve deplasman-güvenlik sayısı-maliyet analiz grafiği **Şekil 4.17**'de verilmiştir.

Tablo 4.26: Kazı derinliği 5 m olan sistem için ankrajlı modellerin güvenlik sayıları ve kesit tesirleri.

Kazık Çapı (m)	Soket Boyu (m)	Ankraj Aralığı (m)	Statik Durum LEM GS	Dinamik Durum LEM GS	FEM deplasman (cm)	Statik Durum Kesit Tesirleri				Dinamik Durum Kesit Tesirleri			
						Kazık Eksenel Kuvveti (kN)	Kazık Kesme Kuvveti (kN)	Kazık Eğilme Momenti (kNm)	Ankraj Kök Kuvveti (kN)	Kazık Eksenel Kuvveti (kN)	Kazık Kesme Kuvveti (kN)	Kazık Eğilme Momenti (kNm)	Ankraj Kök Kuvveti (kN)
0,65	2	1,8	1,81	1,69	0,7	85,14	38,43	16,56	105,6	111,9	43,11	20,3	114,1
0,65	2	2,7	1,75	1,61	1,4	91,8	37,2	55,1	111	113,4	45,7	30,3	133,4
0,65	3	1,8	2,04	1,79	0,5	90,8	35,4	24	104,5	118,1	38,6	35,7	111,7
0,65	3	2,7	2	1,74	1,1	95,5	39,2	61,1	104,2	109,9	50,7	62,5	116,4
0,8	2	2	1,79	1,66	0,9	106,8	41,9	18,5	113,3	138,9	46,8	37,9	125,9
0,8	2	3	1,75	1,59	1,5	114	43,1	64,8	131,1	143,5	50,4	32,1	157,2
0,8	3	2	2,02	1,77	0,6	113,5	37,8	31,2	111,6	145,1	42,3	48,2	119,7
0,8	3	3	2	1,73	1,2	119,4	46,1	75,1	111,6	138,6	69,9	86,2	125,4
1	2	2,4	1,76	1,63	1	131,8	47	21,6	123,8	168,2	52,8	28	139,3
1	2	3,6	1,72	1,57	1,5	137,6	52,5	79,9	143,6	172,7	58,6	36,5	181,8
1	3	2,4	2	1,75	0,7	138,2	44,5	45,7	116,6	171	62,5	73,4	125,8
1	3	3,6	1,98	1,71	1,4	144	56,4	94	121,7	165,1	98,5	119,6	136,1

Tablo 4.27: Kazı derinliği 5 m olan sistem için ankrajlı modellerin maliyeti.

Kazık Çapı (m)	Soket Boyu (m)	Ankraj Aralığı (m)	Kazık Sayısı	Ankraj Sayısı	Kazık Maliyeti (₺)	Ankraj Maliyeti (₺)	Kuşak Kirişi Maliyeti (₺)	Başlık Kirişi Maliyeti (₺)	Sistem Toplam Maliyeti (₺)
0,65	2	1,8	56	28	1.360.258,17	419.556,15	79.075,10	112.880,12	1.971.769,54
0,65	2	2,7	56	19	1.360.258,17	284.698,82	79.075,10	112.880,12	1.836.912,21
0,65	3	1,8	56	28	1.555.256,31	419.556,15	79.075,10	112.880,12	2.166.767,68
0,65	3	2,7	56	19	1.555.256,31	284.698,82	79.075,10	112.880,12	2.031.910,35
0,8	2	2	50	25	1.679.990,31	374.603,70	79.075,10	138.172,68	2.271.841,80
0,8	2	3	50	17	1.679.990,31	254.730,52	79.075,10	138.172,68	2.151.968,61
0,8	3	2	50	25	1.920.731,28	374.603,70	79.075,10	138.172,68	2.512.582,77
0,8	3	3	50	17	1.920.731,28	254.730,52	79.075,10	138.172,68	2.392.709,59
1	2	2,4	42	21	2.096.229,20	314.667,11	79.075,10	169.223,41	2.659.194,82
1	2	3,6	42	14	2.096.229,20	209.778,07	79.075,10	169.223,41	2.554.305,79
1	3	2,4	42	21	2.396.469,99	314.667,11	79.075,10	169.223,41	2.959.435,61
1	3	3,6	42	14	2.396.469,99	209.778,07	79.075,10	169.223,41	2.854.546,58

**Şekil 4.17:** Kazı derinliği 5 m olan sistem için ankrajlı modellerin deplasman-güvenlik sayısı-maliyet grafiği.

6 m derinliğindeki kazı için oluşturulan 18 farklı konsol fore kazıklı modelin güvenlik sayısı- deplasman-kesit tesirlerini içeren tablolar ile bu modellerin maliyet tabloları aşağıda, LEM ve FEM analizleri-maliyet analizi sıralama şekliyle verilmiştir.

Tablo 4.28: Kazı derinliği 6 m için oluşturulan D=0,65 m ve s=0,9 m konsol sistem stabilite analiz sonuçları.

Soket Boyu (m)	Drenajlı LEM GS	Drenajsız LEM GS	FEM deplasman (cm)	Statik Durum Kesit Tesirleri			Dinamik Durum Kesit Tesirleri		
				Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)	Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
2	1,532	1,393	Göçme Gerçekleşti						
3	1,677	1,551	Göçme Gerçekleşti						
4	1,677	1,698	Göçme Gerçekleşti						
5	1,677	1,824	4,52	110,7	94,5	227,7	133	238,1	439,9
6	1,677	1,926	3,99	111,8	81,3	240,5	133	173,9	444,8
7	1,677	2,038	3,83	112,1	82,2	247,1	133,7	157,2	454,9

Tablo 4.29: Kazı derinliği 6 m için oluşturulan D=0,65 m ve s=0,9 m konsol modelin maliyet sonuçları.

Soket Boyu (m)	Kazık Boyu (m)	Kazık Sayısı	Kazık Maliyeti (₺)	Başlık Kirişi Maliyeti (₺)	Toplam Maliyet (tl)
5	11	56	2.137.886,32	112.880,12	2.250.766,45
6	12	56	2.330.520,05	112.880,12	2.443.400,18
7	13	56	2.525.518,19	112.880,12	2.638.398,32

Tablo 4.30: Kazı derinliği 6 m için oluşturulan D=0,8 m ve s=1 m konsol sistem stabilite analiz sonuçları.

Soket Boyu (m)	Drenajlı LEM GS	Drenajsız LEM GS	FEM deplasman (cm)	Statik Durum Kesit Tesirleri			Dinamik Durum Kesit Tesirleri		
				Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)	Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
2	1,532	1,393	Göçme Gerçekleşti						
3	1,774	1,551	Göçme Gerçekleşti						
4	2,006	1,698	Göçme Gerçekleşti						
5	2,194	1,824	3,38	143,9	114,8	269,3	171,7	286,9	518,8
6	2,441	1,926	2, 67	146,1	99,5	295,5	166,1	203	530
7	2,654	2,038	2,32	147,5	98,6	309,8	166,1	158,8	533,8

Tablo 4.31: Kazı derinliği 6 m için oluşturulan D=0,8 m ve s=1 m konsol modelin maliyet sonuçları.

Soket Boyu (m)	Kazık Boyu (m)	Kazık Sayısı	Kazık Maliyeti (₺)	Başlık Kirişi Maliyeti (₺)	Toplam Maliyet (tl)
5	11	50	2.640.355,95	138.172,68	2.778.528,63
6	12	50	2.878.498,67	138.172,68	3.016.671,35
7	13	50	3.119.239,64	138.172,68	3.257.412,33

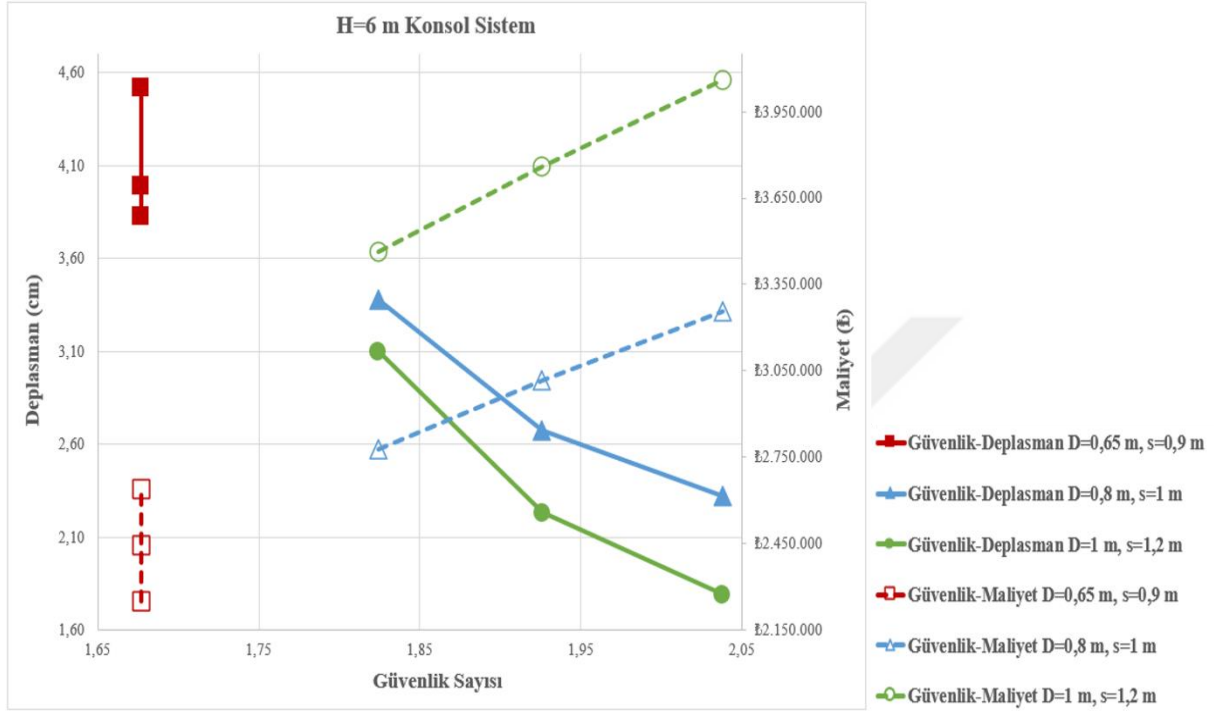
Tablo 4.32: Kazı derinliği 6 m için oluşturulan D=1 m ve s=1,2 m konsol sistem stabilite analiz sonuçları.

				Statik Durum Kesit Tesirleri			Dinamik Durum Kesit Tesirleri		
Soket Boyu (m)	Drenajlı LEM GS	Drenajsız LEM GS	FEM deplasman (cm)	Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)	Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
2	1,532	1,393	Göçme Gerçekleşti						
3	1,774	1,551	Göçme Gerçekleşti						
4	2,006	1,698	Göçme Gerçekleşti						
5	2,194	1,824	3,1	173,64	144,84	335,4	202,9	345,4	621,8
6	2,441	1,926	2,23	177,7	129,12	376	209,6	250,3	658,6
7	2,654	2,038	1,79	179,9	125,5	404,5	199,7	177,5	605

Tablo 4.33: Kazı derinliği 6 m için oluşturulan D=1 m ve s=1,2 m konsol modelin maliyet sonuçları.

Soket Boyu (m)	Kazık Boyu (m)	Kazık Sayısı	Kazık Maliyeti (₺)	Başlık Kirişi Maliyeti (₺)	Toplam Maliyet (tl)
5	11	42	3.294.464,20	169.223,41	3.463.687,61
6	12	42	3.591.976,82	169.223,41	3.761.200,23
7	13	42	3.892.217,61	169.223,41	4.061.441,02

6 m derinliğindeki kazının konsol fore kazık ile çözümünde oluşturulan üç farklı çaptaki modellerin herbirinde 2, 3 ve 4 m soket boyları için göçme gerçekleşmiştir. Kazı derinliği 6 m olan sistemde stabilite analizlerini geçen 9 farklı konsol sistemin deplasman-güvenlik sayısı-maliyet analizi **Şekil 4.18**'de verilmiştir.



Şekil 4.18: Kazı derinliği 6 m olan sistem için konsol modellerin deplasman-güvenlik sayısı-maliyet grafiği.

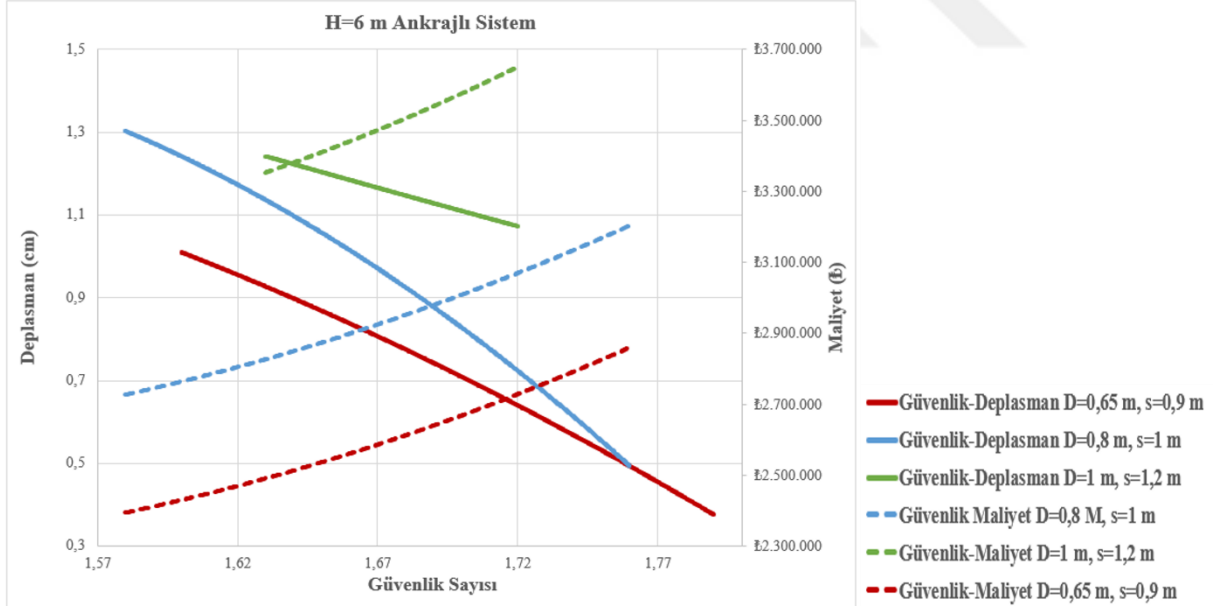
6 m derinliğindeki kazının ankrajlı fore kazık ile çözümünde oluşturulan modellerden $D=1$ m, soket boyu= 2 m, ankraj yatay aralığı=3,6 m olan sistem hariç 11 sistem güvenlik sayısı, deplasman, ankraj kök kuvveti vb. stabilite kriterlerini sağlamıştır. Derinliği 6 m olan kazı için oluşturulan ve stabilite analizlerini geçen 11 farklı ankrajlı modelin analizler sonucu elde edilen güvenlik sayısı, deplasman, kesit tesirleri değerleri **Tablo 4.34**'te, modellerin maliyetleri **Tablo 4.35**'te ve deplasman-güvenlik sayısı-maliyet analiz grafiği **Şekil 4.19**'de verilmiştir.

Tablo 4.34: Kazı derinliği 6 m olan sistem için ankrajlı modellerin güvenlik sayıları ve kesit tesirleri.

Kazık Çapı (m)	Soket Boyu (m)	Ankraj Aralığı (m)	Statik Durum LEM GS	Dinamik Durum LEM GS	FEM δh (cm)	Statik Durumdaki Kesit Tesirleri				Depremli Durumdaki Kesit Tesirleri			
						Kazık Eksenel Kuvveti (kN)	Kazık Kesme Kuvveti (kN)	Kazık Eğilme Momenti (kNm)	Ankraj Kök Kuvveti (kN)	Kazık Eksenel Kuvveti (kN)	Kazık Kesme Kuvveti (kN)	Kazık Eğilme Momenti (kNm)	Ankraj Kök Kuvveti (kN)
0,65	2	1,8	1,84	1,73	0,5	106,3	50,5	60,8	105,1	141,8	47,8	62,6	114,7
0,65	2	2,7	1,73	1,6	1	111,1	42,5	60,8	130,7	145,5	43	53,3	147,7
0,65	3	1,8	2	1,79	0,4	117	47,1	63,5	101,3	160,6	44,5	49,7	110,2
0,65	3	2,7	1,92	1,7	0,8	120	44,6	63,5	122,9	154	41,9	33,8	135,5
0,8	2	2	1,81	1,69	0,8	129,4	56,1	75	116,2	171,1	55,1	78,1	127,8
0,8	2	3	1,71	1,58	1,3	135,2	47	75	145	179,4	50,2	61,7	168,6
0,8	3	2	1,98	1,76	0,5	143,3	52,1	81,2	111	192,7	51,4	59,4	121,6
0,8	3	3	1,91	1,68	1	147,9	51,4	81,2	134,1	188	49,4	42,3	150,9
1	2	3,6	GÖÇME GERÇEKLEŞTİ										
1	2	2,4	1,76	1,63	1,1	158,8	63,6	93,7	130,1	208,6	64,2	90,1	144,2
1	3	3,6	1,88	1,66	1,4	180,7	63,6	103	139,7	228	95,8	97,7	172,8
1	3	2,4	1,94	1,72	1	176,3	62,2	103	113,3	225,2	60,1	49,2	129,8

Tablo 4.35: Kazı derinliği 6 m olan sistem için ankrajlı modellerin maliyeti.

Kazık Çapı (m)	Soket Boyu (m)	Ankraj Aralığı (m)	Kazık Sayısı	Ankraj Sayısı	Kazık Maliyeti (₺)	Ankraj Maliyeti (₺)	Kuşak Kirişi Maliyeti (₺)	Başlık Kirişi Maliyeti (₺)	Sistem Toplam Maliyeti (₺)
0,65	2	1,8	56,00	56	1.555.256,31	839089,64	158.150,20	112.880,12	2.665.376,27
0,65	2	2,7	56,00	38	1.555.256,31	569382,26	158.150,20	112.880,12	2.395.668,89
0,65	3	1,8	56,00	56	1.747.890,04	839089,64	158.150,20	112.880,12	2.858.010,00
0,65	3	2,7	56,00	38	1.747.890,04	569382,26	158.150,20	112.880,12	2.588.302,62
0,8	2	2	50,00	50	1.920.731,28	749187,18	158.150,20	138.172,68	2.966.241,35
0,8	2	3	50,00	50	2.158.874,00	749187,18	158.150,20	138.172,68	2.726.501,45
0,8	3	2	50,00	34	2.158.874,00	509447,28	158.150,20	138.172,68	3.204.384,06
0,8	3	3	50,00	34	1.920.731,28	509447,28	158.150,20	138.172,68	2.964.644,17
1	2	2,4	42,00	42	2.396.469,99	629317,23	158.150,20	169.223,41	3.353.160,83
1	3	3,6	42,00	28	2.693.982,62	419544,82	158.150,20	169.223,41	3.440.901,05
1	3	2,4	42,00	42	2.693.982,62	629317,23	158.150,20	169.223,41	3.650.673,46

**Şekil 4.19:** Kazı derinliği 6 m olan sistem için ankrajlı modellerin deplasman-güvenlik sayısı-maliyet grafiği.

7 m derinliğindeki kazı için oluşturulan 18 farklı konsol fore kazıklı modelin güvenlik sayısı- deplasman-kesit tesirlerini içeren tablolar ile bu modellerin maliyet tabloları aşağıda, LEM ve FEM analizleri-maliyet analizi sıralama şekliyle verilmiştir.

Tablo 4.36: Kazı derinliği 7 m için oluşturulan D=0,65 m ve s=0,9 m konsol sistem stabilite analiz sonuçları.

Soket Boyu (m)	Drenajlı LEM GS	Drenajsız LEM GS	FEM deplasman (cm)	Statik Durum Kesit Tesirleri			Dinamik Durum Kesit Tesirleri		
				Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)	Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
2	1,153	1,322	Göçme Gerçekleşti						
3	1,153	1,341	Göçme Gerçekleşti						
4	1,153	1,341	Göçme Gerçekleşti						
5	1,153	1,341	Göçme Gerçekleşti						
6	1,153	1,341	7,2	134	107,64	324,18	167,85	308,25	719,55
7	1,153	1,341	6,8	134,46	98,82	329,4	168,12	268,65	719,28

Tablo 4.37: Kazı derinliği 7 m için oluşturulan D=0,65 m ve s=0,9 m konsol modelin maliyet sonuçları.

Soket Boyu (m)	Kazık Boyu (m)	Kazık Sayısı	Kazık Maliyeti (₺)	Başlık Kirişi Maliyeti (₺)	Toplam Maliyet (tl)
6	12	56	2.525.518,19	112.880,12	2.638.398,32
7	13	56	2.720.516,33	112.880,12	2.833.396,46

Tablo 4.38: Kazı derinliği 7 m için oluşturulan D=0,8 m ve s=1 m konsol sistem stabilite analiz sonuçları.

Soket Boyu (m)	Drenajlı LEM GS	Drenajsız LEM GS	FEM deplasman (cm)	Statik Durum Kesit Tesirleri			Dinamik Durum Kesit Tesirleri		
				Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)	Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
2	1,459	1,322	Göçme Gerçekleşti						
3	1,671	1,473	Göçme Gerçekleşti						
4	1,86	1,609	Göçme Gerçekleşti						
5	2,078	1,725	Göçme Gerçekleşti						
6	2,088	1,827	4,7	176,1	142,2	407,1	218,1	369,9	840,8
7	2,088	1,929	4,1	177,7	121,3	427,4	217,4	291,2	827,2

Tablo 4.39: Kazı derinliği 7 m için oluşturulan D=0,8 m ve s=1 m konsol modelin maliyet sonuçları.

Soket Boyu (m)	Kazık Boyu (m)	Kazık Sayısı	Kazık Maliyeti (₺)	Başlık Kirişi Maliyeti (₺)	Toplam Maliyet (tl)
6	12	50	3.119.239,64	138.172,68	3.257.412,33
7	13	50	3.359.980,62	138.172,68	3.498.153,30

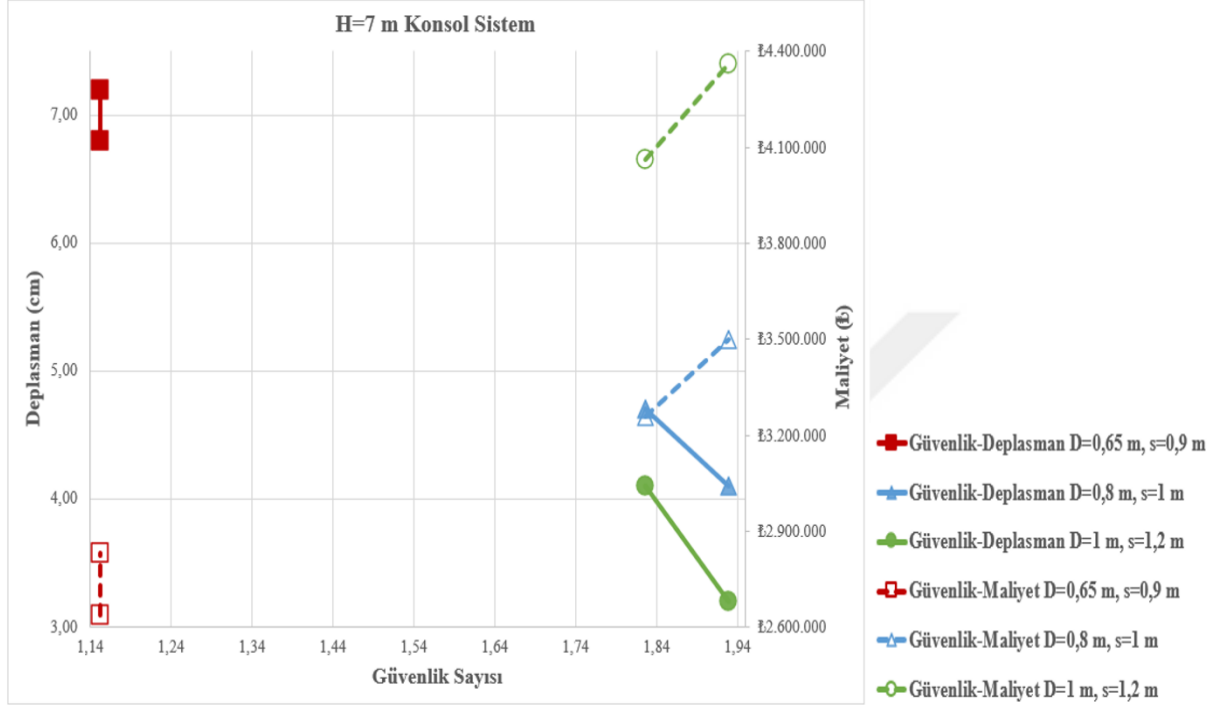
Tablo 4.40: Kazı derinliği 7 m için oluşturulan D=1 m ve s=1,2 m konsol sistem stabilite analiz sonuçları.

				Statik Durum Kesit Tesirleri			Dinamik Durum Kesit Tesirleri		
Soket Boyu (m)	Drenajlı LEM GS	Drenajsız LEM GS	FEM deplasman (cm)	Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)	Eksenel Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
2	1,459	1,322	Göçme Gerçekleşti						
3	1,671	1,473	Göçme Gerçekleşti						
4	1,86	1,609	Göçme Gerçekleşti						
5	2,078	1,725	Göçme Gerçekleşti						
6	2,271	1,827	4,1	245, 28	185,4	431,1	287,9	479,4	1060,92
7	2,462	1,929	3,2	248,88	163,4	557,8	290,04	378,24	1069,8

Tablo 4.41: Kazı derinliği 7 m için oluşturulan D=1 m ve s=1,2 m konsol modelin maliyet sonuçları.

Soket Boyu (m)	Kazık Boyu (m)	Kazık Sayısı	Kazık Maliyeti (₺)	Başlık Kirişi Maliyeti (₺)	Toplam Maliyet (tl)
6	12	42	3.892.217,61	169.223,41	4.061.441,02
7	13	42	4.192.458,41	169.223,41	4.361.681,81

7 m derinliğindeki kazının konsol fore kazık ile çözümünde oluşturulan üç farklı çaptaki modellerin herbirinde 2, 3, 4 ve 5 m soket boyları için göçme gerçekleşmiştir. Kazı derinliği 7 m olan sistemde stabilite analizlerini geçen 6 farklı konsol sistemin deplasman-güvenlik sayısı-maliyet analizi **Şekil 4.20**'de verilmiştir.



Şekil 4.20: Kazı derinliği 7 m olan sistem için konsol modellerin deplasman-güvenlik sayısı-maliyet grafiği.

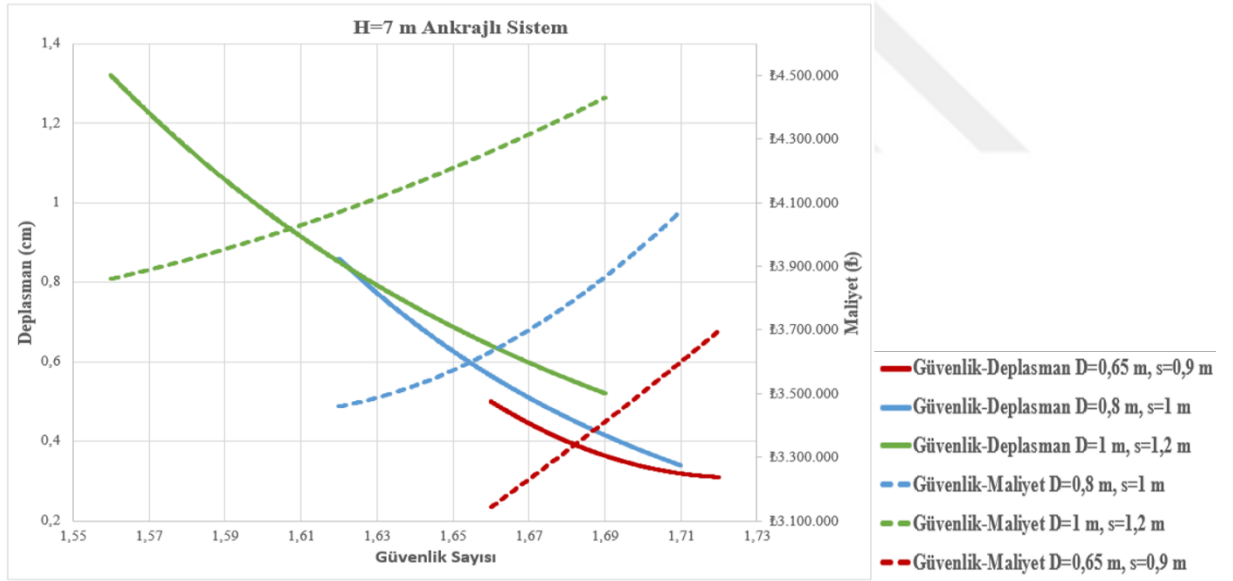
7 m derinliğindeki kazının ankralı fore kazık ile çözümünde oluşturulan modellerin hepsi güvenlik sayısı, deplasman, ankraj kök kuvveti vb. stabilite kriterlerini sağlamıştır. Derinliği 7 m olan kazı için oluşturulan 12 farklı ankrajlı modelin analizler sonucu elde edilen güvenlik sayısı, deplasman, kesit tesirleri değerleri **Tablo 4.42**'de, modellerin maliyetleri **Tablo 4.43**'te ve deplasman-güvenlik sayısı-maliyet analiz grafiği **Şekil 4.21**'de verilmiştir.

Tablo 4.42: Kazı derinliği 7 m olan sistem için ankrajlı modellerin güvenlik sayıları ve kesit tesirleri.

Kazık Çapı (m)	Soket Boyu (m)	Ankraj Aralığı (m)	Statik Durum LEM GS	Dinamik Durum LEM GS	FEM δh (cm)	Statik Durumdaki Kesit Tesirleri				Depremli Durumdaki Kesit Tesirleri			
						Kazık Eksenel Kuvveti (kN)	Kazık Kesme Kuvveti (kN)	Kazık Eğilme Momenti (kNm)	Ankraj Kök Kuvveti (kN)	Kazık Eksenel Kuvveti (kN)	Kazık Kesme Kuvveti (kN)	Kazık Eğilme Momenti (kNm)	Ankraj Kök Kuvveti (kN)
0,65	3	0,9	2,03	1,72	0,3	138,2	82,8	95	93,4	193,1	80,9	103,9	99,7
0,65	3	1,35	1,89	1,68	0,4	142,9	67,1	87,4	108,8	197,9	61,7	99,6	118
0,65	2	1,35	1,74	1,66	0,5	128	70,7	98,3	113,4	165,4	65,5	111,2	123,8
0,65	2	0,9	1,93	1,72	0,32	123,1	84,9	101,4	96,1	158,4	82	108,5	103,1
0,8	2	1,5	1,71	1,62	0,8	154,4	82,2	123,9	125,6	196,8	78,9	146,4	138,9
0,8	2	1	1,87	1,71	0,35	147,5	96	132,5	101,8	187,5	90,7	147,7	110,6
0,8	3	1	1,99	1,71	0,3	167,2	93,1	125,2	98,7	231,5	91,5	147,5	106,5
0,8	3	1,5	1,87	1,67	0,6	173,6	78,1	112	120	237	73,6	136	131,4
1	3	1,2	1,92	1,69	0,4	203,5	107,6	160,8	107,6	284,8	106,2	204	117,5
1	3	1,8	1,83	1,64	1,2	214,7	82,7	119,4	128,2	284	86,4	143,8	148,1
1	2	1,8	1,66	1,56	1,1	188	94,6	147,48	142,7	240,1	95,6	186,2	161,1
1	2	1,2	1,78	1,69	0,5	179,5	111,1	169,9	111	232,2	103,3	199,2	122

Tablo 4.43: Kazı derinliği 7 m olan sistem için ankrajlı modellerin maliyeti.

Kazık Çapı (m)	Soket Boyu (m)	Ankraj Aralığı (m)	Kazık Sayısı	Ankraj Sayısı	Kazık Maliyeti (₺)	Ankraj Maliyeti (₺)	Kuşak Kirişi Maliyeti (₺)	Başlık Kirişi Maliyeti (₺)	Sistem Toplam Maliyeti (₺)
0,65	3	0,9	56,00	112	3.029.821,01	1678179,28	158.150,20	112.880,12	3.892.097,78
0,65	3	1,35	56,00	75	3.584.219,52	1123780,77	158.150,20	112.880,12	3.337.699,27
0,65	2	1,35	56,00	75	3.779.217,66	1123780,77	158.150,20	112.880,12	3.142.701,13
0,65	2	0,9	56,00	112	3.224.819,15	1678179,28	158.150,20	112.880,12	3.697.099,64
0,8	2	1,5	50,00	67	3.320.935,02	1003910,82	158.150,20	138.172,68	3.459.107,70
0,8	2	1	50,00	100	3.815.398,56	1498374,36	158.150,20	138.172,68	3.953.571,24
0,8	3	1	50,00	100	4.056.139,53	1498374,36	158.150,20	138.172,68	4.194.312,22
0,8	3	1,5	50,00	67	3.561.676,00	1003910,82	158.150,20	138.172,68	3.699.848,68
1	3	1,2	42,00	84	3.691.222,46	1258634,46	158.150,20	169.223,41	4.580.231,48
1	3	1,8	42,00	56	4.110.767,28	839089,64	158.150,20	169.223,41	4.160.686,66
1	2	1,8	42,00	56	4.411.008,07	839089,64	158.150,20	169.223,41	3.860.445,87
1	2	1,2	42,00	84	3.991.463,25	1258634,46	158.150,20	169.223,41	4.279.990,69

**Şekil 4.21:** Kazı derinliği 7 m olan sistem için ankrajlı modellerin deplasman-güvenlik sayısı-maliyet grafiği.

Konsol sistemler için yapılan güvenlik-maliyet analizlerinde güvenliği sağlayan en düşük maliyet 0,65 m çapa sahip fore kazıklı sistemlerde elde edilmiştir. Bunun sonucunda ise güvenlik-deplasman analizlerde güvenliği sağlayan en yüksek deplasman 0,65 m çapa sahip konsol sistemlerde meydana gelmiştir. Grafiklerde verilen tüm sistemler deplasman şartını sağladığına göre kohezyonsuz zeminlerde inşa edilen 5, 6, 7 m yüksekliğe sahip modellerde 0,9 m aralıklarla yerleştirilen 0,65 m çapa sahip iksa sistemi ekonomik olarak öne çıkmaktadır.

5. TARTIŞMA

İki bölümden oluşan tezden elde edilen veriler bu bölümde ayrı ayrı tartışılmıştır.

5.1. BİR VAKANIN YENİDEN ANALİZİ

Bir vakanın yeniden analizi kısmında tasarımı ve imalatı bitmiş bir proje yeniden analiz edilirken ankraj nihai çeper sürtünmesi, karakteristik çeper sürtünmesi için güvenlik sayısı, deprem kuvveti etkisi üzerinde KDYY'e uygun olarak değişiklikler yapılmıştır.

Vakanın mevcut tasarımında tüm ankrajlar için nihai birim çeper sürtünmesi 150 kPa kabul edilmiş olup karakteristik çeper sürtünmesi elde edilirken 2 katsayısına bölünmüştür. Netice olarak yeniden analizi yapılan vakanın, mevcut projedeki maksimum yatay deplasman 7,1 cm olarak hesaplanmıştır. Yapılan yeniden tasarımda üst iki sıra ankrajın **Tablo 2.2** ve **Tablo 2.3**'ten seçilen nihai çeper sürtünmeleri 150 kPa seçilirken alt 6 sıra ankrajın önceki tasarıma göre daha yüksek değer olan 200 kPa seçilmiştir. Karakteristik çeper sürtünmesi için güvenlik sayısı ise yönetmelikte verilen minimum değer olan 2,5 tercih edilmiştir. Bu parametreler kullanılarak yeniden tasarımdaki hesaplanan maksimum yatay deplasman 7,09 cm olmuştur. Bu projede ankraj kök kuvvetleri belirleyicidir ve tekrar analiz edilirken kök kapasite artırımına gidilmesine rağmen drenajlı parametrelerin kullanılması ve tasarım çeper sürtünmesi hesabında kullanılan güvenlik sayısı büyümesi sonucu kazı yatay deplasmanları aynı kalmıştır.

Toptan göçme analizindeki göçme dairesi göz önünde bulundurularak 19,6 m olan kazı derinliği (H), 21,4 m olarak yenilenmiştir. FHWA'ya göre ankrajlı iksaların maksimum yatay deplasman sınırı $\delta h = 0,005H$ iken KDYY'de bu sınır $\delta h = 0,003H$ mertebesinde dir. FHWA'a göre yapılan tasarımda maksimum yatay deplasman limiti $\delta h = 0,005 \cdot 1960 = 9,8$ cm iken KDYY'e göre $\delta h = 0,3 \cdot 2140 = 6,4$ cm olmaktadır. Örnek tasarımdaki kazı derinliğinin artması ile deplasman sınırı yükselmesine rağmen kazı derinliğinin (H) çarpıldığı katsayı küçüldüğü için sistemin deplasman toleransı azalmıştır. Örnek tasarım ve yeniden tasarımdaki deplasmanlar hemen hemen aynı olmasına rağmen deplasman sınırının düşmesinden dolayı sistem bu kriteri sağlayamamıştır. Hizmet Görebilirlik Sınır Durumu (SLS) analizlerinde yatay deplasman kriterlerinin aşıldığı görülmüştür.

Kısmi katsayılar kullanılarak hesaplanan ankrajlar üzerindeki eksenel kuvvetler, ankrajların kök dayanımlarından fazla çıkmıştır. Bir vakanın yeniden analiz edilmesi

sonucunda iksa sistemi Göçme Sınır Durumu (ULS) analizlerini geçememiş bulunmaktadır. Sonuç itibarıyla çeper sürtünmesini 2,5 katsayısına bölüp, çepere gelen eksenel kuvvetleri 1,35 kısmi katsayısı ile çarpmak nümerik modeli güvensiz hale getirmiştir.

FHWA tarafından yayımlanan tasarım kriterlerine uygun projelendirilmesi ve imalatı yapılmış olan mevcut projenin, KDYY kriterlerine uygun olarak yeniden nümerik tasarlanmasında ankraj kök dayanımı ve kazı derinliği (H) artması gibi iyileştirmeler yapılmasına rağmen hem Hizmet Görebilirlik Sınır Durumu (SLS) hem de Göçme Sınır Durumu (ULS) analizlerini geçememiş olması, KDYY'nin FHWA ve buna benzer tasarım kriterleri, tasarım katsayıları olan Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler Genelgesine kıyasla daha muhafazakâr sonuçlar verdiği sonucuna ulaşılmıştır. FHWA ve Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler Genelgesine göre güvenli olarak hesaplanan nümerik modelleri, güvensiz olarak tanımlayabileceği sonucuna varılmıştır.

Bu tezdeki bir vakanın yeniden analizi bölümünden elde edilen bulgular ile farklı yönetmelikleri ve tasarım yaklaşımlarını kıyaslayan çalışmalardan [39,41] elde edilen bilgiler birleştirildiğinde KDYY'e göre güvenli tasarımı yapılan bir kazı destek sisteminin maliyeti diğer yönetmeliklere ve yaklaşımlara göre yapılan kazı destek yapılarına kıyasla daha yüksek olacağı tahmin edilmektedir. Tezin bu kısmından elde edilen bir diğer sonuç ise tasarımda kullanılan birçok yöntem ve yönetmelik bulunmasına rağmen literatürdeki çalışmalardan [40] görüleceği üzere yapılan hesaplamalar ve analizlerin teoriden ibaret olmaması, mühendisin yorum ve tecrübesi ile desteklenmesi gerekliliğidir.

5.2. NÜMERİK MODELLERİN ANALİZİ

Tezin nümerik modellerin analizi bölümünden elde edilen sonuçlarla farklı kazı derinlikleri için konsol fore kazık ve ankrajlı fore kazık sistemlerinin farklı kazık çapı, soket boyu, ankraj yatay aralığı içeren birçok modelin kombinasyonu ile oluşturulan deplasman-güvenlik sayısı-maliyet grafikleri ile ön tasarımda kullanılmak üzere uygun sistem seçiminde kolaylık sağlanması amaçlanmıştır.

Tezin nümerik modellerin analizi bölümü kapsamında ULS hesaplarının yanı sıra KK-1'e dahil olan iksa sistemleri için zorunlu olmamasına rağmen yatay destekli sistemler KK-3 sınıfında bulunduğu için ortak bir kıyaslama yapabilmek adına tüm modellerde SLS hesapları yapılmıştır. SLS analizleri yapılırken sistemlerinin bazılarında statik durumda bazılarında ise

dinamik (depremlı) durumda yenilme meydana gelmiştir. Yenilmenin sebepleri arasında aşırı yatay deplasman, yetersiz düşey eleman kesme dayanımı vb. durumlar mevcuttur. Yenilme meydana gelen sistemlerde “Göçme Gerçekleşti” ifadesi bulunmaktadır.

Güvenliği sağlayan modeller için yapılan deplasman-güvenlik sayısı-maliyet analizlerinde beklenildiği üzere sistemlerdeki güvenlik arttıkça deplasman azalmakta ve maliyet artmaktadır.

5, 6 ve 7 m derinliğe sahip kalıcı kazı için oluşturulan modelde yapılan analizlerde tüm konsol ve yatay destekli sistemler ULS güvenliğini sağlamıştır.

5 m kazı için yapılan SLS analizleri sonucunda 18 konsol fore kazıklı sistem arasından 2-3 m soket boyuna sahip 6 modelde göçme gerçekleşmiştir. Diğer 12 konsol model yatay deplasmanları izin verilebilir sınırlar içerisinde ve hizmet görebilirlik sınır durumu analizlerini başarıyla geçmiştir. 5 m konsol boy için 2-3 m soket boyunun yeterli pasif direnç oluşturamadığı sonucuna varılmıştır. Değişken çap ve aralıktaki konsol sistemlerde soket boyunun artması ile güvenlik sayısı artmasına rağmen aynı soket boyları için drenajlı ve depremlı durum LEM analizlerinde aynı güvenlik sayısı elde edilmiştir. Bu durum güvenlik sayısının hesabında toptan göçme dairesi kazığı kesiyorsa kazığın sağladığı kesme kuvvetinden, kazık alt ucunun altından geçiyorsa soket boyundan etkilendiğini göstermektedir.

H=5 m derinliğe sahip kalıcı kazı için güvenliğini sağlayan en ekonomik konsol model 1.860.770,16 TL ile D=0,65 m, s=0,9 m ve 4 m soket boyuna sahip fore kazıklı modeldir. Güvenliğin sağlandığı tüm soket boyları için maliyet sıralaması en ekonomikten pahalıya göre; 0,65 m çapa sahip kazıklar, sonra D=0,8 m kazıklar, en son 1 m çapa sahip fore kazıklardır. Yatay destek elemanına sahip, güvenliğini sağlayan en ekonomik model ise 1.836.912,21 TL ile D=0,65 m, s=0,9 m ve ankraj yatay aralığı 2,7 m olan sistemdir. Bu derinlik için oluşturulan 18 konsol, 12 yatay destekli toplam 30 model arasında en ekonomik olan model D=0,65 m, s=0,9 m ve ankraj yatay aralığı 2,7 m olan ankrajlı sistemdir.

6 m kazı için yapılan SLS analizleri sonucunda 18 konsol fore kazıklı sistem arasından 2-3-4 m soket boyuna sahip 9 modelde göçme meydana gelmiştir. 2-3-4 m soket boylarının 6 m kazı yüksekliği için yeterli pasif direnç oluşturamadığı görülmüştür. Kalan 9 konsol model yatay deplasmanları izin verilebilir sınırlar içerisinde ve hizmet görebilirlik sınır durumu analizlerini başarıyla tamamlamıştır. Yatay destekli 12 model arasında sadece 3 m soket boyuna

sahip, $D=1$ m, $s=1,2$ m ve $3,6$ m yatay ankraj aralığına sahip sistemde göçme gerçekleşmiştir. Diğer 11 adet ankrajlı model SLS analizlerini başarıyla tamamlamıştır.

$H=6$ m derinliğe sahip kalıcı kazı için güvenliği sağlayan en ekonomik konsol model 2.250.766,45 TL ile $D=0,65$ m, $s=0,9$ m ve 5 m soket boyuna sahip fore kazıklı modeldir. Güvenliğin sağlandığı tüm soket boyları için maliyet sıralaması en ekonomikten pahalıya göre; $0,65$ m çapa sahip kazıklar, sonra $D=0,8$ m kazıklar, en son 1 m çapa sahip fore kazıklardır. Yatay destek elemanına sahip, güvenliği sağlayan en ekonomik model ise 2.395.668,89 TL ile 2 m soket boyuna sahip, $D=0,65$ m, $s=0,9$ m ve ankraj yatay aralığı $2,7$ m olan sistemdir. Bu derinlik için oluşturulan 18 konsol, 12 yatay destekli toplam 30 model arasında en ekonomik olan model 5 m soket boyuna sahip $D=0,65$ m, $s=0,9$ m olan konsol sistemdir.

7 m kazı için yapılan SLS analizleri sonucunda 18 konsol fore kazıklı sistem arasından $2-3-4-5$ m soket boyuna sahip 12 modelde göçme meydana gelmiştir. 7 m yüksekliğe sahip kazının stabilitesi için $2-3-4-5$ m soket boyu yeterli pasif direnç sağlayamamıştır. Kalan 9 konsol model yatay deplasmanları izin verilebilir sınırlar içerisinde ve hizmet görülebilirlik sınır durumu analizlerini geçmiştir. 12 adet ankrajlı model SLS analizlerini sorunsuz geçmiştir.

$H=7$ m derinliğe sahip kalıcı kazı güvenliğini sağlayan en ekonomik konsol model 2.638.398,32 TL ile 6 m soket boyuna sahip, $D=0,65$ m, $s=0,9$ m kazıklı sistemdir. Güvenliğin sağlandığı tüm soket boyları için maliyet sıralaması en ekonomikten pahalıya göre; $0,65$ m çapa sahip kazıklar, sonra $D=0,8$ m kazıklar, en son 1 m çapa sahip fore kazıklardır. Yatay destek elemanına sahip, güvenliği sağlayan en ekonomik model 3.142.701,13 TL ile 2 m soket boyuna sahip, $D=0,65$ m, $s=0,9$ m ve ankraj yatay aralığı $1,35$ m olan sistemdir. Bu derinlik için oluşturulan 18 konsol, 12 yatay destekli toplam 30 model arasında en ekonomik olan model 6 m soket boyuna sahip $D=0,65$ m, $s=0,9$ m olan konsol sistemdir.

6 ve 7 m derinliğe sahip kazılar için oluşturulan modeller arasından konsol modellerin daha düşük maliyetlerde güvenliği sağlaması literatürdeki çalışmaları [21,29] destekler niteliktedir. $H=5$ m derinliğe sahip kazıda ankrajlı bir modelin konsol modele kıyasla daha düşük maliyette güvenliği sağlaması, kazık yatay aralığı ve ankraj yatay aralığı gibi birçok değişkene bağlı sayısız model oluşturulabileceğini ve kazı destek yapısının imalatındaki maliyetlerin yıllar içinde göreceli olarak değişmesinin optimum sistem seçimini değiştirebileceğini göstermektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

FHWA, Eurocode 7 vb. birçok uluslararası yayından ve yönetmelikten parçalar bulunduran ve bunlara atıf yapan KDYY, ülkemizde daha önce iksa ile alakalı yayınlanan Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler (2018-2022) genelgelerine kıyasla detaylı ve kapsamlıdır. FHWA’da bulunan ankraj kök kuvvetini azaltma katsayısı ve Eurocode 7’deki kısmi katsayıların kullanılması ile zemin ankrajı kullanılan destekleme sistemlerinin birçoğunda belirleyici kriter olan tasarım ankraj kök kapasitesi azalmaktadır ve sistem güvenliği artmaktadır. Güvenliğin artmasıyla deplasman düşmesine rağmen maliyet yükselmektedir. Uluslararası yönetmelikler kullanılarak yapılan dünya çapında sayısız başarılı proje bulunmaktadır. KDYY’nin muhafazakâr sonuçlar verdiği ve daha maliyetli tasarımlara yol açtığı sonucuna varılmıştır.

Toptan göçme analizleri yaparken elde edilen güvenlik sayısı dışında yenilme dairesinin konumu ve şekli oldukça önemlidir. Göçme dairesi H yüksekliğini tayin edebildiği gibi sistemi yenilmeye götüren kritik parametreyi de göstermektedir. Nümerik modellerin analizi çalışması sonucunda KK-1 kapsamındaki iksa sistemlerinin tetkik edilmesinde yeterli pasif direnci sağlayacak soket boyu hesabının hayati olabileceği görülmüştür. Yeterli soket boyuna sahip sistemlerin kalıcı olarak kullanımı durumunda etki eden yüksek deprem kuvvetine maruz kalması yenilmelere yol açabilir.

Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada kalıcı yapı niteliğinde bulunan iksa sistemlerinin güvenlik-deplasman ve güvenlik-maliyet analizleri yapılmıştır. Sistemin kalıcı olması deprem kuvvetinin etkisini irdelememizi zorunlu kılmaktadır. $H=6$ m ve $H=7$ m için konsol sistemler, ankrajlı sistemlere kıyasla maliyet bakımından daha uygundur. $H=5$ m’de ise ankrajlı sistem maliyet konusunda çok az da olsa avantajlıdır. Ankrajların periyodik bakımı, ankraj kafası, ankraj kaması vb. maliyetler Karayolları Genel Müdürlüğü ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından paylaşılan birim fiyat listelerinde bulunmadığı için bu tez kapsamında hesaplanmamıştır. Bu maliyetlerle birlikte $H=5$ m’nin uygulamadaki maliyeti konsol sistem maliyetini geçeceği tahmin edilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018, *Kazı güvenliği ve alınacak önlemler*, Ankara, Türkiye: Yapı İşleri Genel Müdürlüğü.
- [2]. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022, *Kazı güvenliği ve alınacak önlemler*, Ankara, Türkiye: Yapı İşleri Genel Müdürlüğü.
- [3]. Terzaghi, K. and Peck, R.B., 1967, *Soil mechanics in engineering practice*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc, New York.
- [4]. Akboğa Kale, Ö., Eskişar T., 2018, İnşaat Sektöründe Kazı İşleri Sebepli İş Kazaları, *Balıkesir üniversitesi fen Bilimleri enstitüsü dergisi*, 20(1), 265-277.
- [5]. FHWA, 1999, *Geotechnical engineering circular No.4: Ground anchors and anchored systems*, U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, Publication No: FHWA-IF-99-015, Washington DC, USA.
- [6]. EN 1997-1, 2004, *Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules*.
- [7]. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022, *Kazı destek yapıları tasarım ve uygulama esasları*, Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği, Ankara.
- [8]. Sürücü, B., 2022, *Gevşek zeminlerden oluşmuş heyelan riski bulunan şevlerin tasarımı ve projelendirilmesi üzerine bir vaka analizi*, Yüksek Lisans, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [9]. TS 3168-EN 1536, 2001, *Özel jeoteknik uygulamalar delme (fore)-kazıklar- (yerinde dökme betonarme kazıklar)*, Türk Standartları Enstitüsü, ICS 93.020, Ankara.
- [10]. Ou, C.Y., 2006, *Deep excavation: theory and practice*, Taylor & Francis Group, London, UK, ISBN: 0-203-96834-4.
- [11]. TS EN 206+A2, 2021, *Beton-özellik, performans, imalat ve uygunluk*, Türk Standartları Enstitüsü, ICS 91.100.30, Ankara.

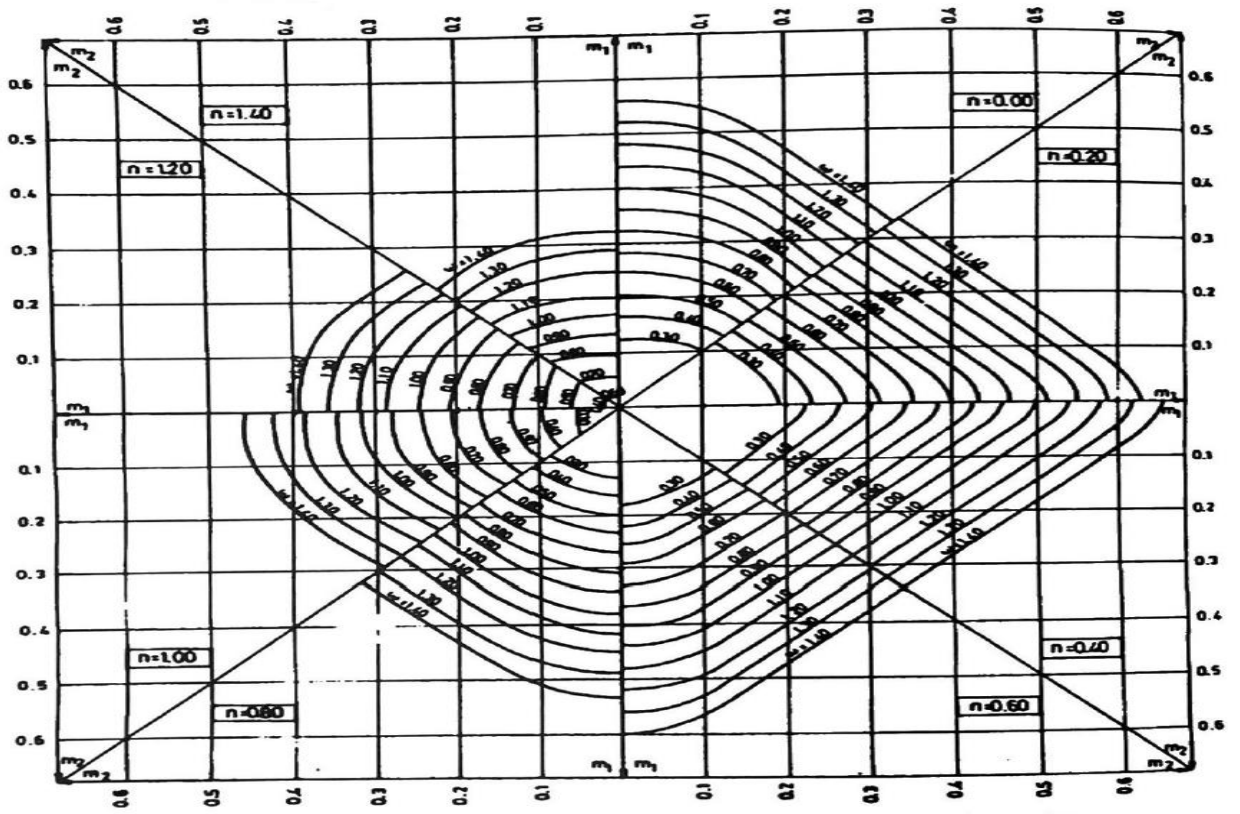
- [12]. Dywidag, 2024, *Anchor systems*, <https://dywidag.com/products/dywidag-gfrp-anchor-system> , [Ziyaret tarihi: 16 Eylül 2024].
- [13]. Clouterre, 1991, *Soil nailing recommendations*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Clauessees, Washington.
- [14]. Rabejac, S. and Toudic, P., 1974, Construction of a Retaining Wall Between Versailles-Chantiers and Versailles-Matelots, *Revue générale des chemins de fer*, Vol. 93, Paris, France, 232-237.
- [15]. FHWA, 2003, *Geotechnical engineering circular No.7: Soil nail walls*, U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, Publication No: FHWA0-IF-03-017, Washington DC, USA.
- [16]. Dayıoğlu, M., 2010, *Derin kazıların incelenmesi ve derin kazı uygulaması üzerine bir örnek: Harbiye Kongre Merkezi temel kazısı*, Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17]. Bauer Technologies, 2024, *Construction methods: Diaphragm walls*, https://bauertech.co.uk/en/construction_method/diaphragmwalls/, [Ziyaret tarihi: 15 Eylül 2024].
- [18]. TDY, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2007, *Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik*, Ankara.
- [19]. Afet ve Acil Durumlar Yönetimi Başkanlığı, 2018, *Deprem etkisi altında binaların tasarımı için esaslar*, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ankara.
- [20]. Keleşoğlu, M.K., Öztoprak, S., Bozbey, İ., Öser, C., Sarğın, S., Çınar Özkan, F.T., Korkmaz, G., Altınok, E., Akbay Arama, Z., 2023, *Kazı destek yapıları yönetmeliği: Tasarım el kitabı*, Ankara, Türkiye: Yapı İşleri Genel Müdürlüğü, ISBN: 978-625-7076-58-6.
- [21]. Arslan, B., Öztoprak, S., 2005, Derin Kazılarda Çok Sıra Ankrajlı İksa Sistemleri ile Ankastre Fore Kazık İksa Sistemlerinin Tasarımı ve Maliyet Karşılaştırması, *İstanbul üniversitesi mühendislik bilimleri genç araştırmacılar II. kongresi*, 17-19 Kasım 2005 İstanbul, İstanbul, 429-440.

- [22]. ASTM A416/A416M-18, 2018, *Standard specification for steel strand, uncoated seven-wire for prestressed concrete*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [23]. Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri G., 1996, *Soil mechanics in engineering practice*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc, USA, ISBN: 0-471-08658-4.
- [24]. Look, B., 2007, *Handbook of geotechnical investigation and design tables*, Taylor & Francis, London, ISBN: 978-0-415-43038-8.
- [25]. Alpan, I., 1970, *The geotechnical properties of soils*, Earth-Science Reviews, 6, 5-49.
- [26]. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2018, *Türkiye deprem tehlike haritası*, Ankara.
- [27]. TS-500, 2000, *Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları*, Türk Standartları Enstitüsü, ICS 91.080.40, Ankara.
- [28]. Ersoy, U., Tankut, T., Aktan, E., Atımtay, E., Erbatur, F., 1980, *Taşıma gücü el kitabı*, ODTÜ-Bayındırlık Bakanlığı, Ankara.
- [29]. Alkaya, D., Yeşil, B., 2010, Excel Vba ile Ankrajlı ve Ankrajsız İksa Yapısı Tasarımı, *Yapı teknolojileri elektronik dergisi*, Cilt:6 (1), 71-82.
- [30]. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024, *2024 yılı inşaat ve tesisat birim fiyatları*, Ankara, Türkiye: Yüksek Fen Kurulu Başkanlığı.
- [31]. T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2024, *2024 yılı yol, köprü, tünel, bitümlü kaplamalar, bakım ve trafik işlerine ait birim fiyat listesi*, Ankara, Türkiye: Karayolları Genel Müdürlüğü.
- [32]. Plaxis, Manual, 2016, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- [33]. Plaxis, Reference Manual, 2019, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- [34]. Steth, A.K. and Raghavani, R., 2019, Comparison of Conventional Method with Finite Element Analysis Using Plaxis 2D for Cantilever and Anchored Sheet Pile Walls, *Lecture notes in civil engineering*, Vol. 137, 19-21 December 2019 Surat, Singapore, Springer, 2366-2557, 557-583.

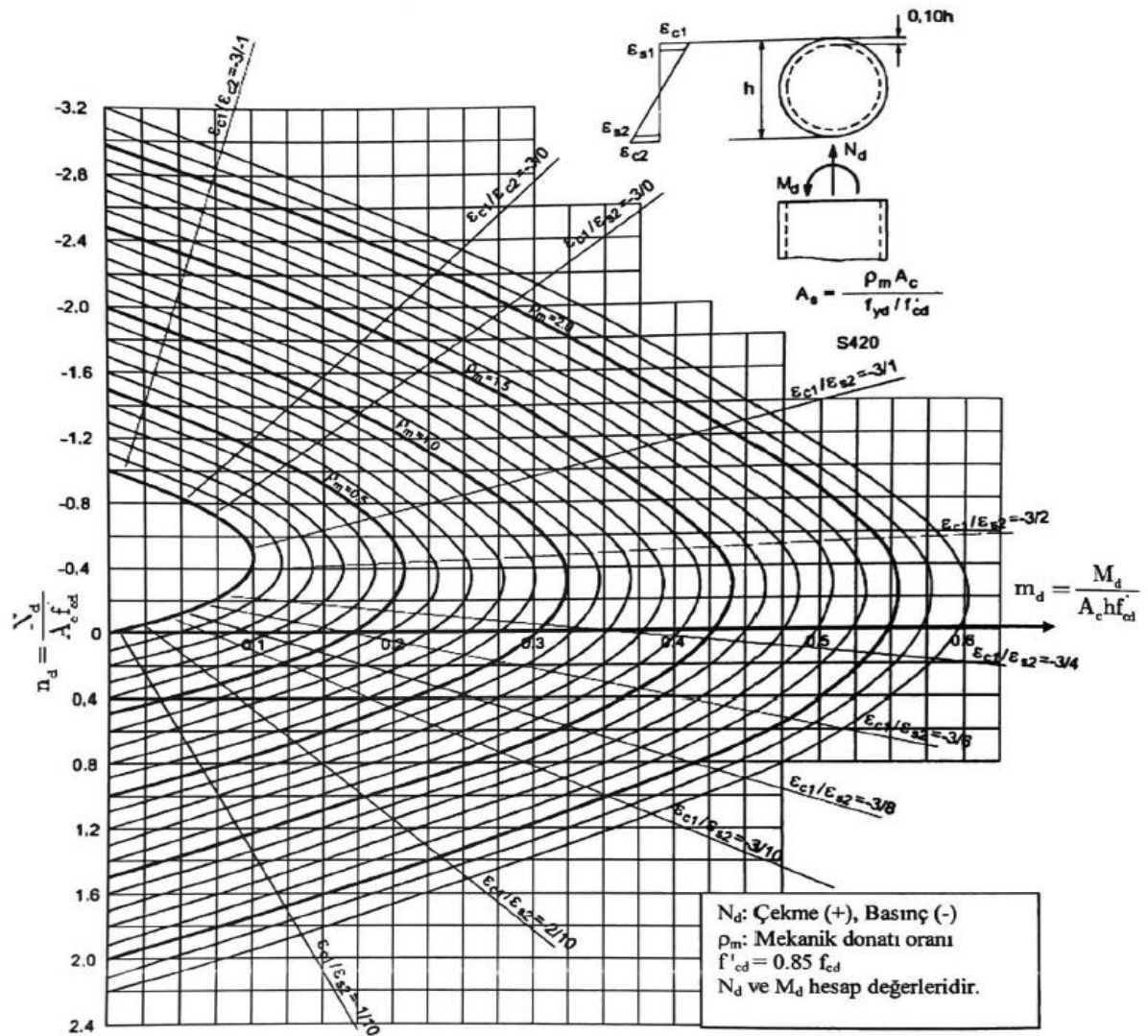
- [35]. Józsa, V., 2011, Effects of rarely analyzed soil parameters for FEM analysis of embedded retaining structures, *Proceedings of the 21st European young geotechnical engineers' conference*, 4-7 September 2011 Rotterdam, Netherlands, IOS Press, 978-1-60750-808-3, 15-20.
- [36]. Gaur, A. and Sahay, A., 2017, Comparison of Different Soil Models for Excavation using Retaining Walls, *SSRG international journal of civil engineering*, Volume 4 Issue 3, 40-45.
- [37]. Slope/W, 2021, Stability Modeling with GeoStudio, Version 8, Geo-Slope International Ltd, Calgary, AB, Canada.
- [38]. Morgenstern, N.R. and Price, V.E., 1965, The Analysis of the Stability of General Slip Surface, *Geotechnique*, Vol 15(1), 79-93.
- [39]. Büyükkağnıcı, C.Z., Işık, N.S., 2019, Şev Duraylılığı Analizlerinde Limit Denge Yöntemleri, Eurocode 7 ve BS8006 Standartlarıyla Hesaplanan Başarı Oranlarının Karşılaştırılması, *TÜBAV bilim dergisi*, 12(2), 18-29.
- [40]. Uçar, G., 2020, *Öngermeli ankrajlı kesişen kazıklı iksa sistemi: bir vaka analizi ve nümerik olarak incelenmesi*, Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [41]. Üstünyer, G., Keleşoğlu, M.K., Öztoprak, S., 2019, Eurocode Tasarım Yaklaşımlarının Dayanma Yapılarının Analizinde Kullanılması, *8. Uluslararası geoteknik sempozyumu*, 13-15 Kasım 2019 İstanbul, İstanbul, 70-79.

EKLER

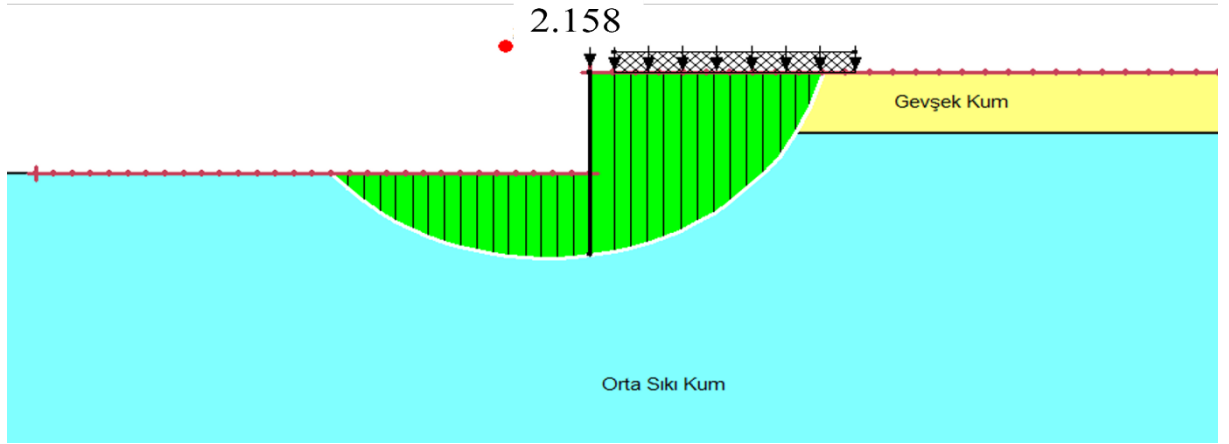
EK 1. Dikdörtgen kesitlerin donatı hesabı için kullanılan abak [28]



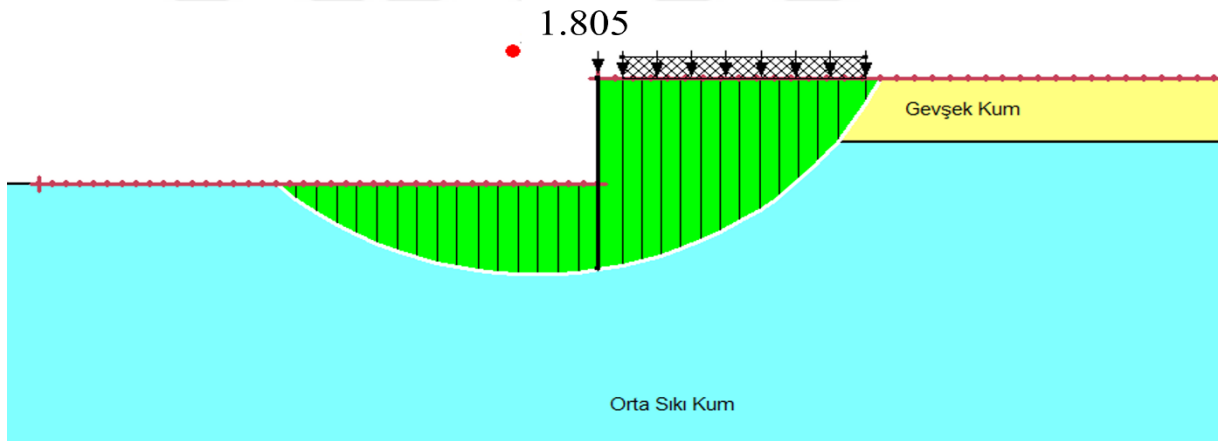
EK 2. Dairesel kesitlerin donatı hesabı için kullanılan abak [28]



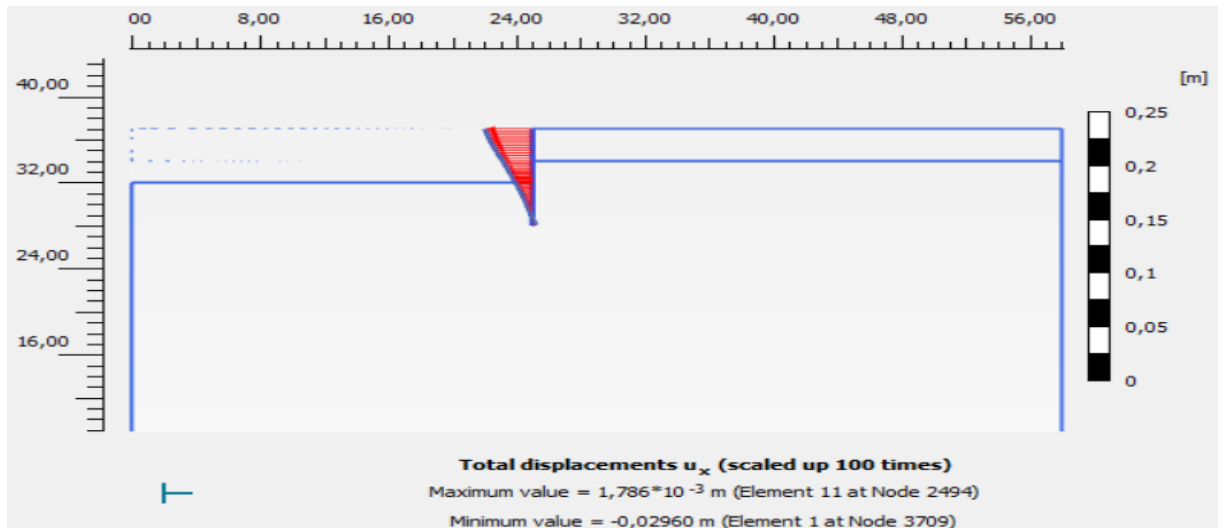
EK 3. Kazı derinliği 5 m olan sistemde $D=0,65$ m, $s=0,8$ m, soket boyu=4 m olan konsol sistem statik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



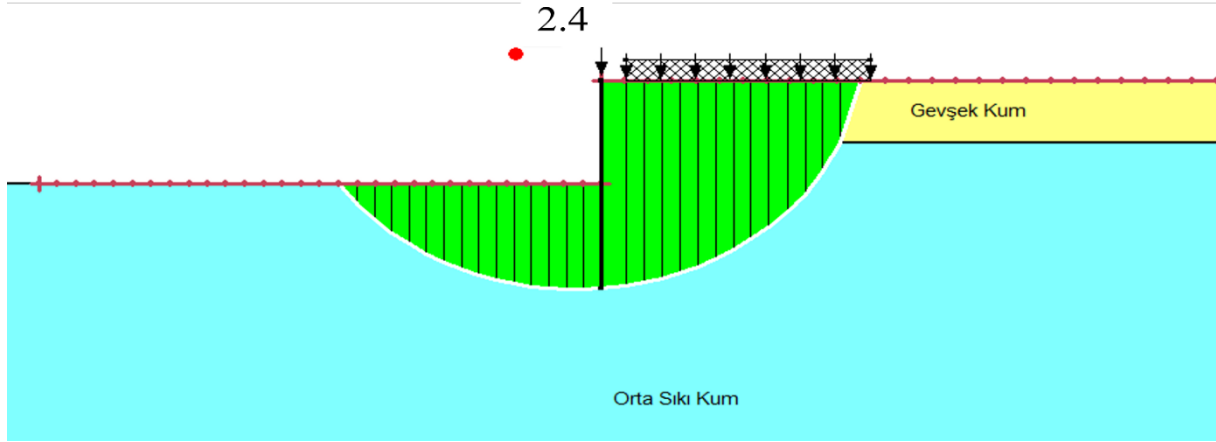
EK 4. Kazı derinliği 5 m olan sistemde $D=0,65$ m, $s=0,8$ m, soket boyu=4 m olan konsol sistem dinamik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



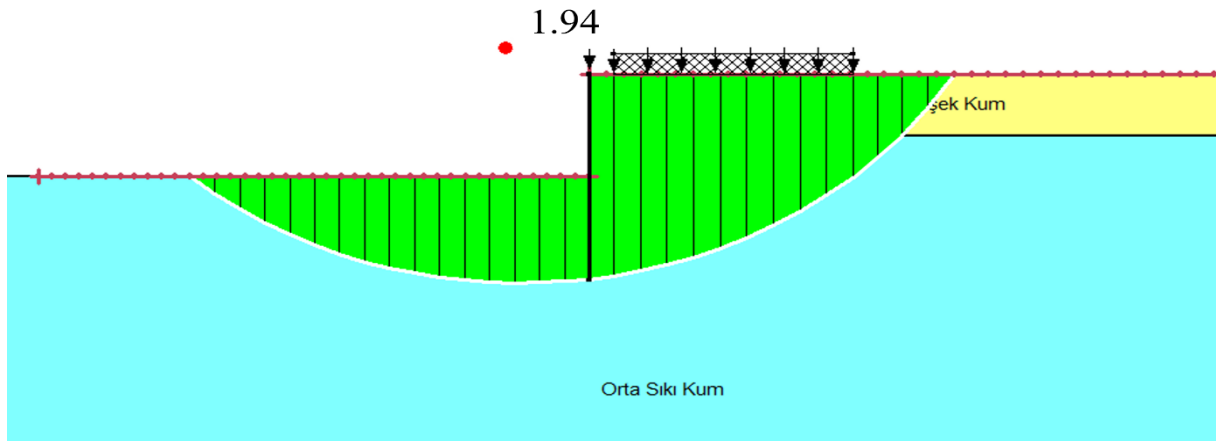
EK 5. Kazı derinliği 5 m olan sistemde $D=0,65$ m, $s=0,8$ m, soket boyu=4 m olan konsol sistem statik yükleme durumu için FEM analizi deplasman sonucu



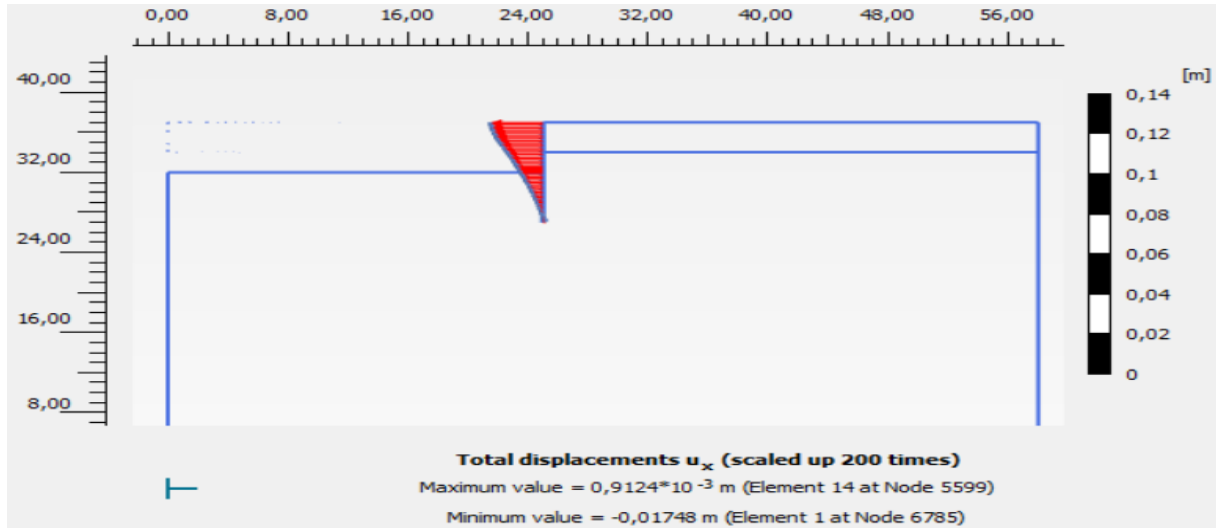
EK 6. Kazı derinliği 5 m olan sistemde $D=0,8$ m, $s=0,1$ m, soket boyu=5 m olan konsol sistem statik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



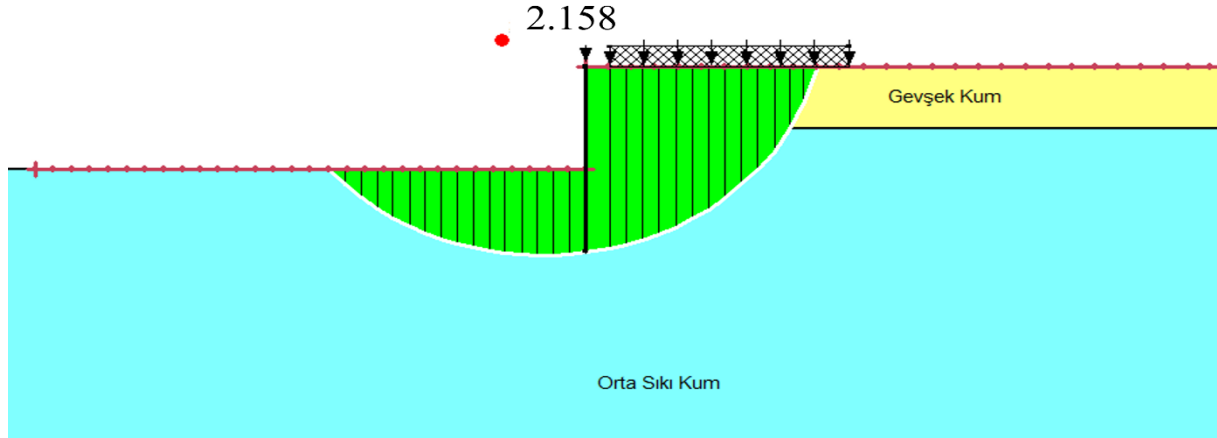
EK 7. Kazı derinliği 5 m olan sistemde $D=0,8$ m, $s=0,1$ m, soket boyu=5 m olan konsol sistem dinamik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



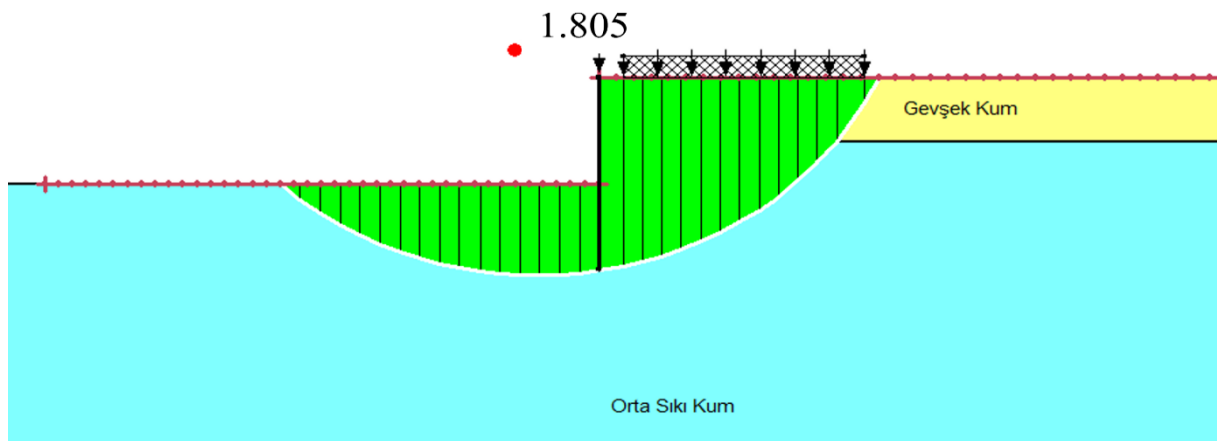
EK 8. Kazı derinliği 5 m olan sistemde $D=0,8$ m, $s=0,1$ m, soket boyu=5 m olan konsol sistem statik yükleme durumu için FEM analizi deplasman miktarı



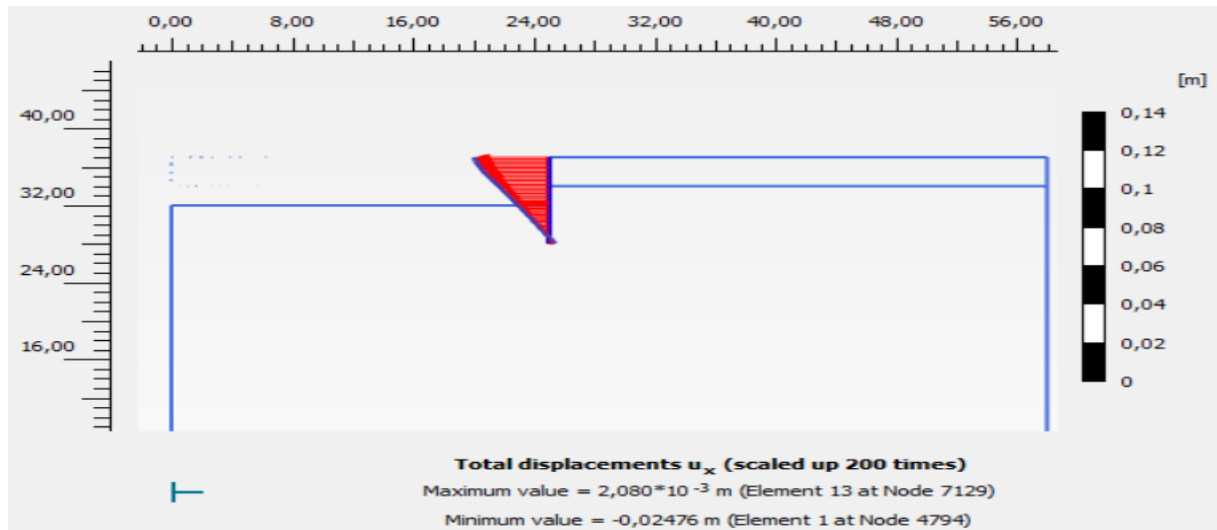
EK 9. Kazı derinliği 5 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=4 m olan konsol sistem statik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



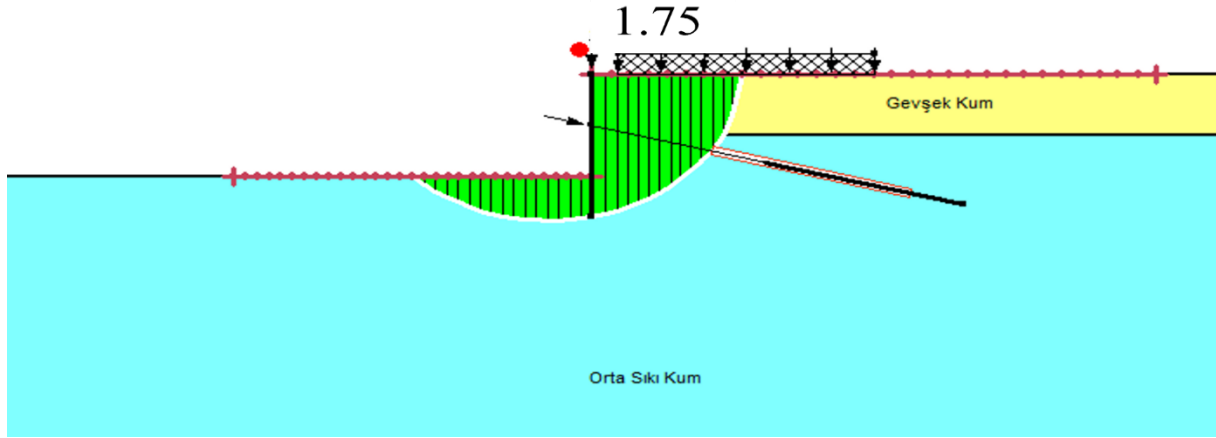
EK 10. Kazı derinliği 5 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=4 m olan konsol sistem dinamik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



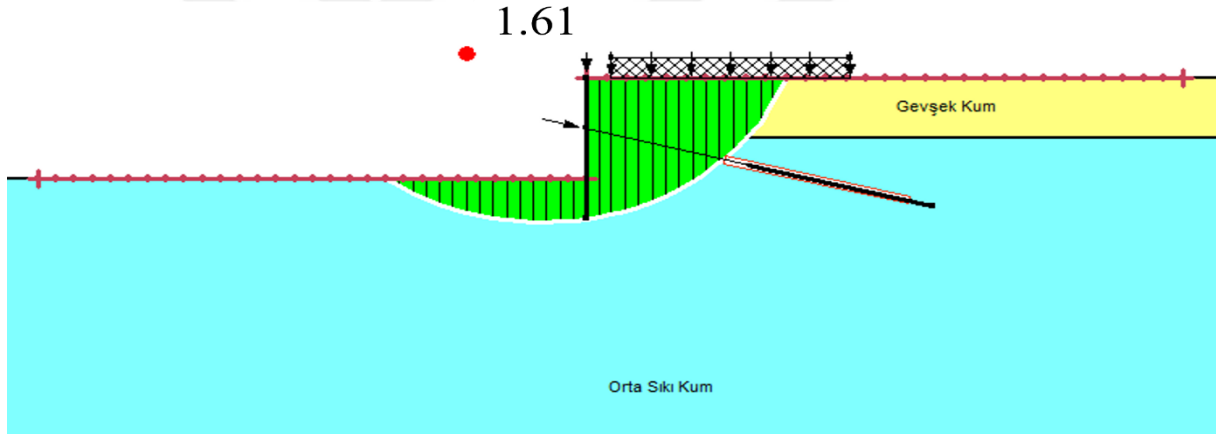
EK 11. Kazı derinliği 5 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=4 m olan konsol sistem statik yükleme durumu için FEM analizi deplasman miktarı



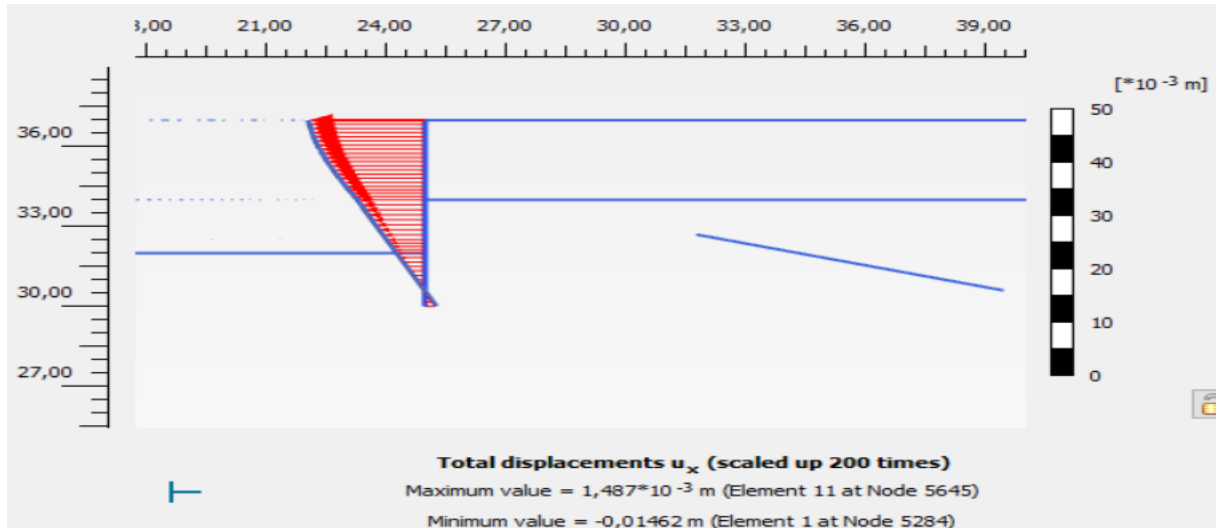
EK 12. Kazı derinliği 5 m olan sistemde $D=0,65$ m, $s=0,9$ m, soket boyu=2 m, yatay ankraj aralığı=2,7 m olan ankrajlı sistem statik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



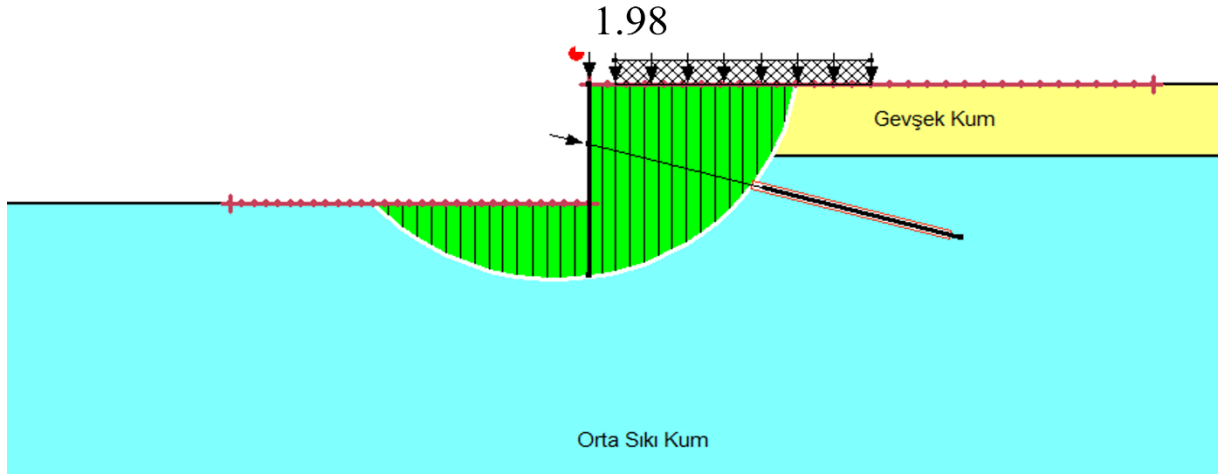
EK 13. Kazı derinliği 5 m olan sistemde $D=0,65$ m, $s=0,9$ m, soket boyu=2 m, yatay ankraj aralığı=2,7 m olan ankrajlı sistem dinamik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



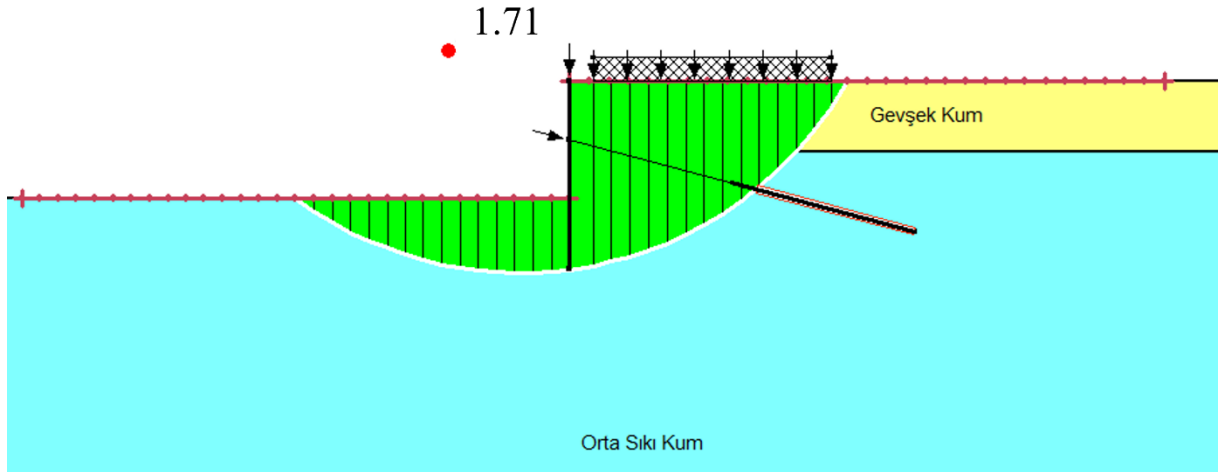
EK 14. Kazı derinliği 5 m olan sistemde $D=0,65$ m, $s=0,9$ m, soket boyu=2 m, yatay ankraj aralığı=2,7 m olan ankrajlı sistem statik yükleme durumu için FEM analizi deplasman miktarı



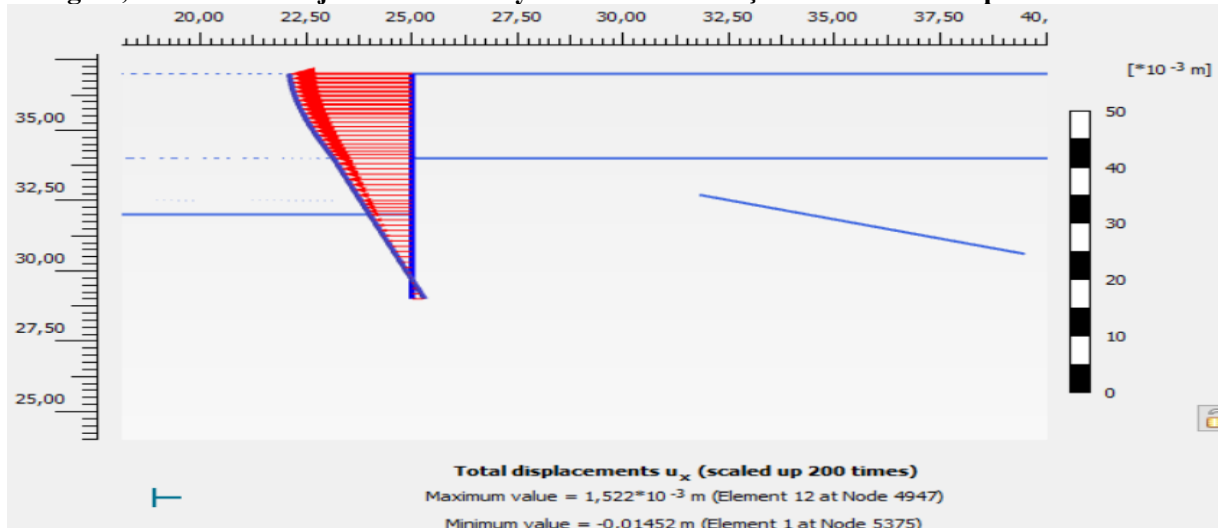
EK 15. Kazı derinliği 5 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=3 m, yatay ankraj aralığı=3,6 m olan ankrajlı sistem statik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



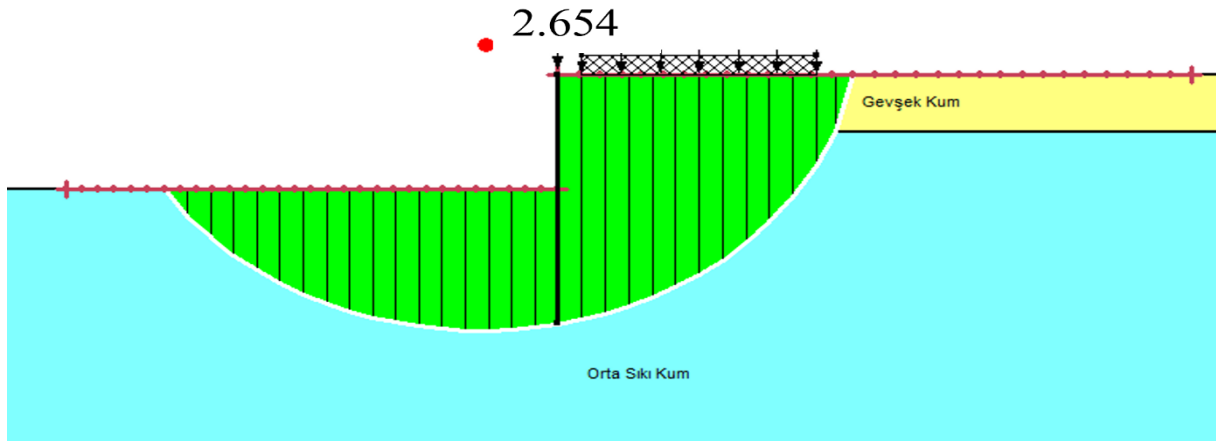
EK 16. Kazı derinliği 5 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=3 m, yatay ankraj aralığı=3,6 m olan ankrajlı sistem dinamik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



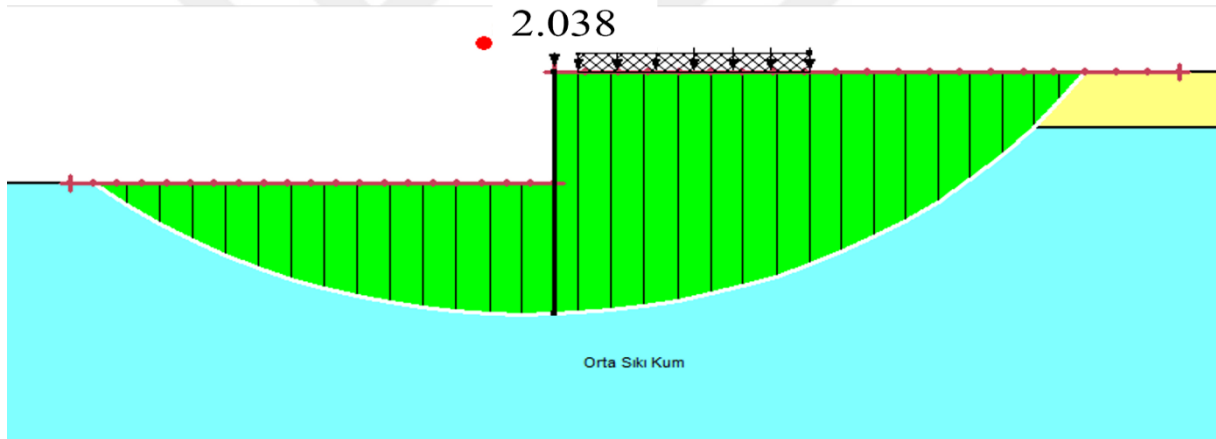
EK 17. Kazı derinliği 5 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=3 m, yatay ankraj aralığı=3,6 m olan ankrajlı sistem statik yükleme durumu için FEM analizi deplasman miktarı



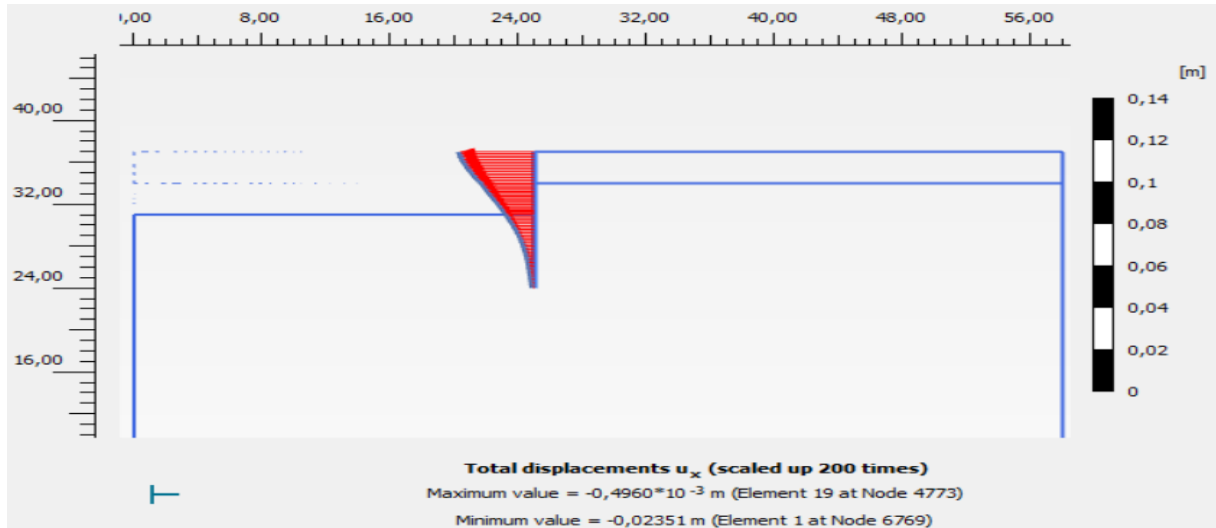
EK 18. Kazı derinliği 6 m olan sistemde $D=0,8$ m, $s=1$ m, soket boyu=6 m olan konsol sistem statik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



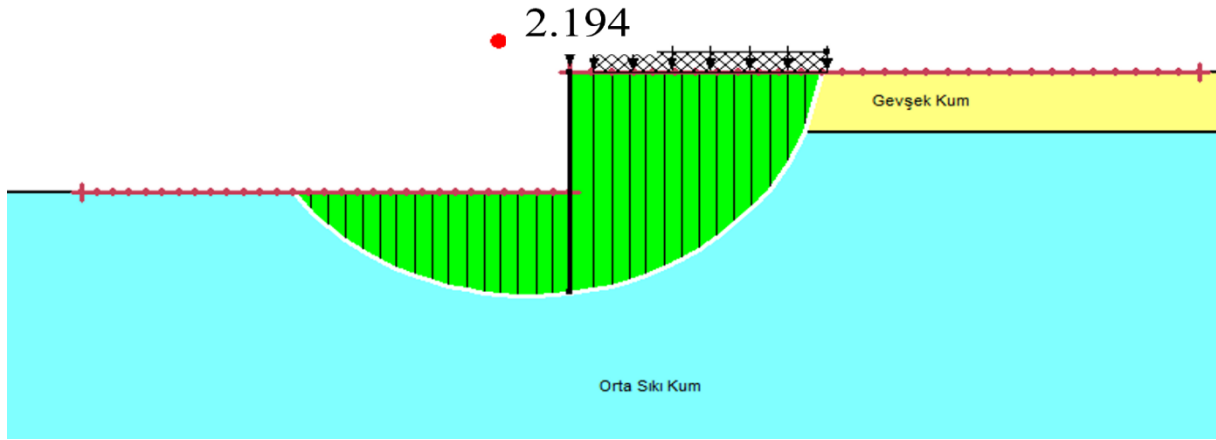
EK 19. Kazı derinliği 6 m olan sistemde $D=0,8$ m, $s=1$ m, soket boyu=6 m olan konsol sistem dinamik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



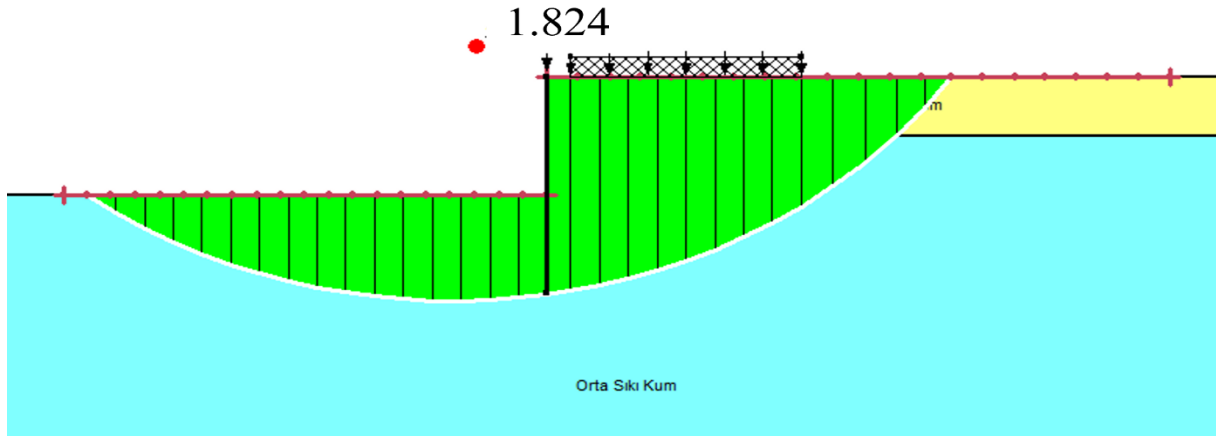
EK 20. Kazı derinliği 6 m olan sistemde $D=0,8$ m, $s=1$ m, soket boyu=6 m olan konsol sistem statik yükleme durumu için FEM analizi deplasman miktarı



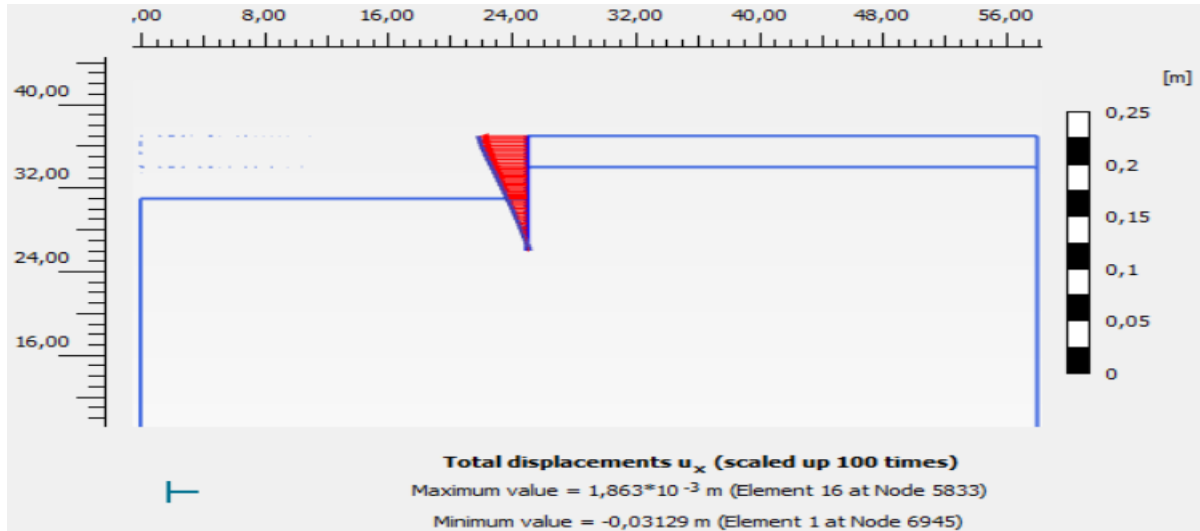
EK 21. Kazı derinliği 6 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=5 m olan konsol sistem statik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



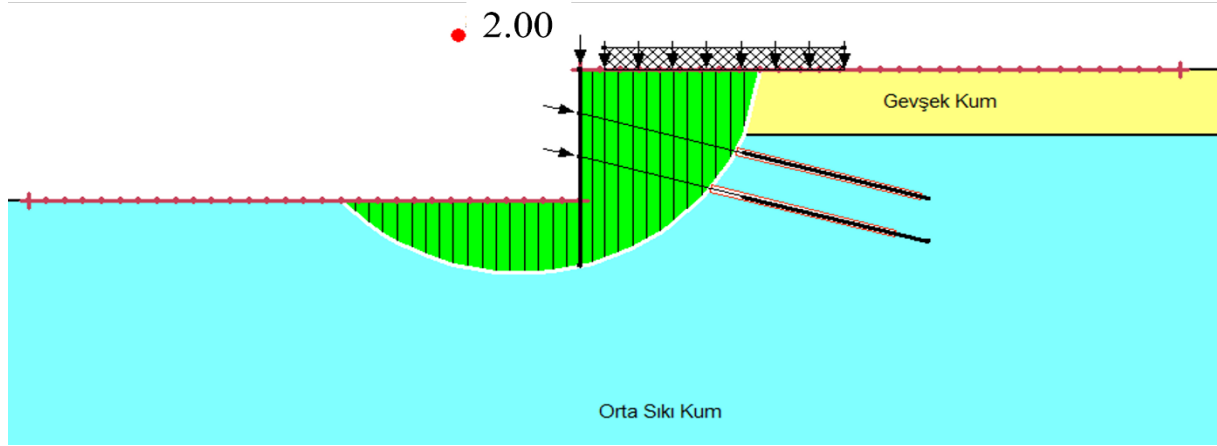
EK 22. Kazı derinliği 6 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=5 m olan konsol sistem dinamik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



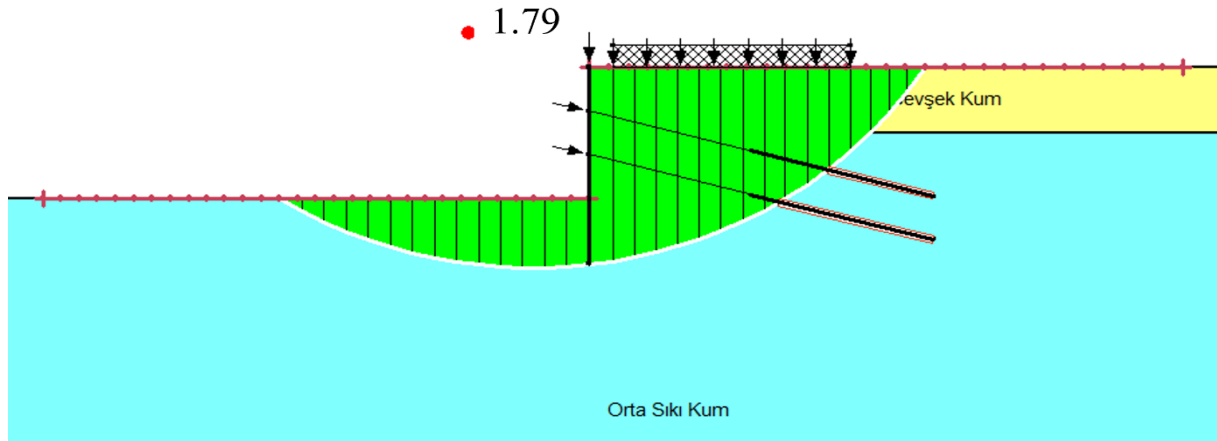
EK 23. Kazı derinliği 6 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=5 m olan konsol sistem statik yükleme durumu için FEM analizi deplasman miktarı



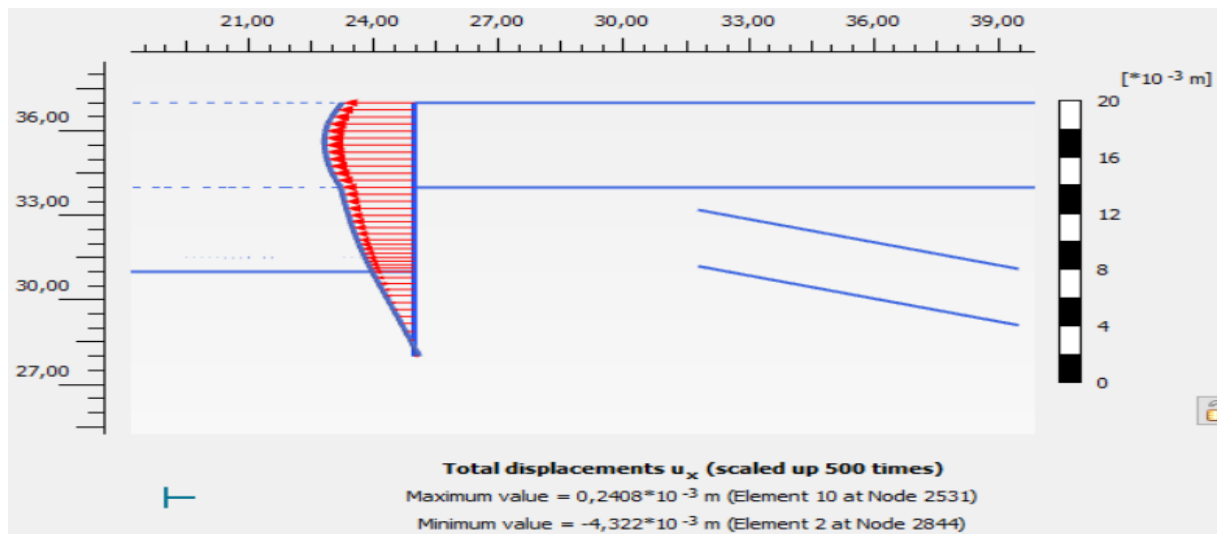
EK 24. Kazı derinliği 6 m olan sistemde $D=0,65$ m, $s=0,9$ m, soket boyu=3 m, yatay ankraj aralığı=1,8 m olan ankrajlı sistem statik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



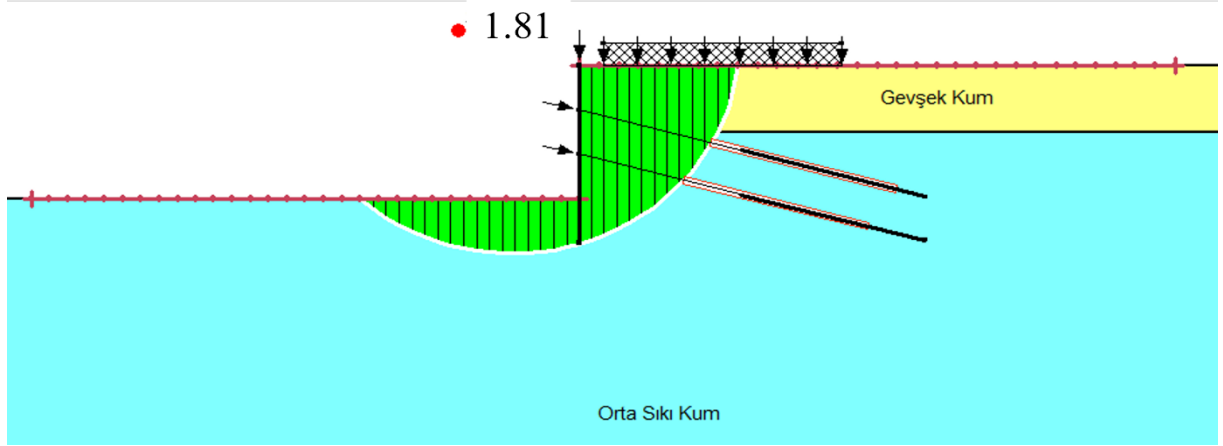
EK 25. Kazı derinliği 6 m olan sistemde $D=0,65$ m, $s=0,9$ m, soket boyu=3 m, yatay ankraj aralığı=1,8 m olan ankrajlı sistem dinamik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



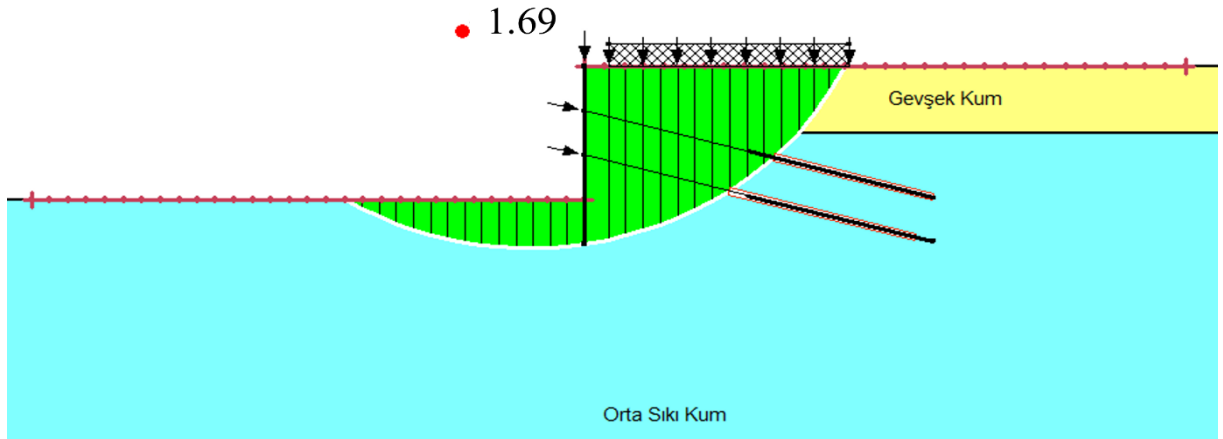
EK 26. Kazı derinliği 6 m olan sistemde $D=0,65$ m, $s=0,9$ m, soket boyu=3 m, yatay ankraj aralığı=1,8 m olan ankrajlı sistem statik yükleme durumu için FEM analizi deplasman miktarı



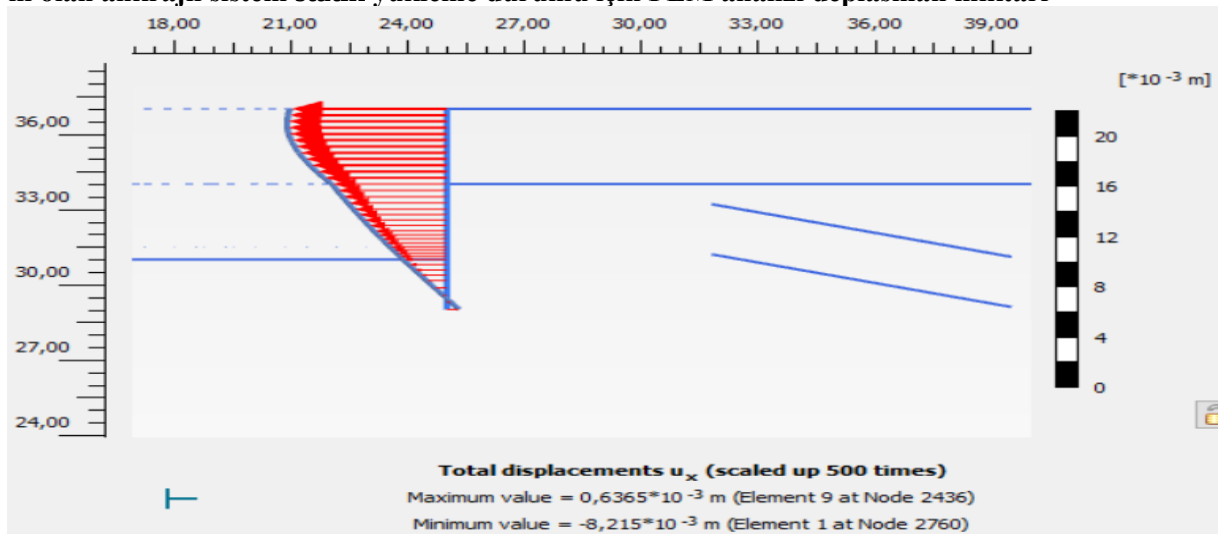
EK 27. Kazı derinliği 6 m olan sistemde $D=0,8$ m, $s=1$ m, soket boyu=2 m, yatay ankraj aralığı=2 m olan ankrajlı sistem statik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



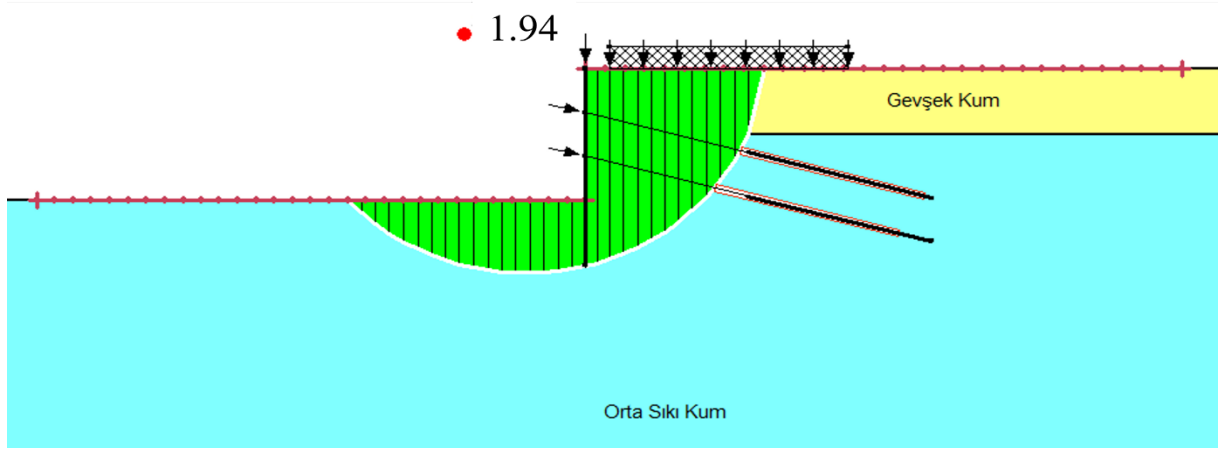
EK 28. Kazı derinliği 6 m olan sistemde $D=0,8$ m, $s=1$ m, soket boyu=2 m, yatay ankraj aralığı=2 m olan ankrajlı sistem dinamik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



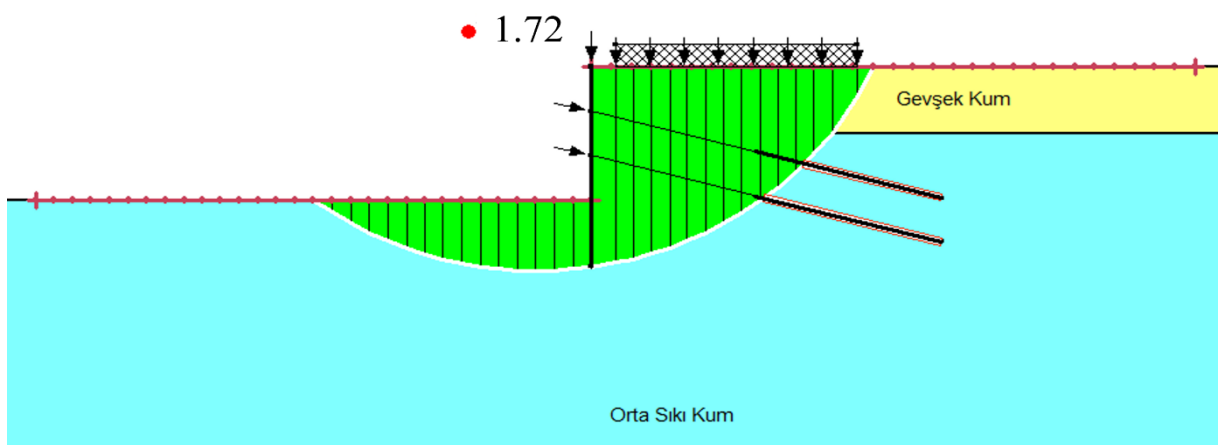
EK 29. Kazı derinliği 6 m olan sistemde $D=0,8$ m, $s=1$ m, soket boyu=2 m, yatay ankraj aralığı=2 m olan ankrajlı sistem statik yükleme durumu için FEM analizi deplasman miktarı



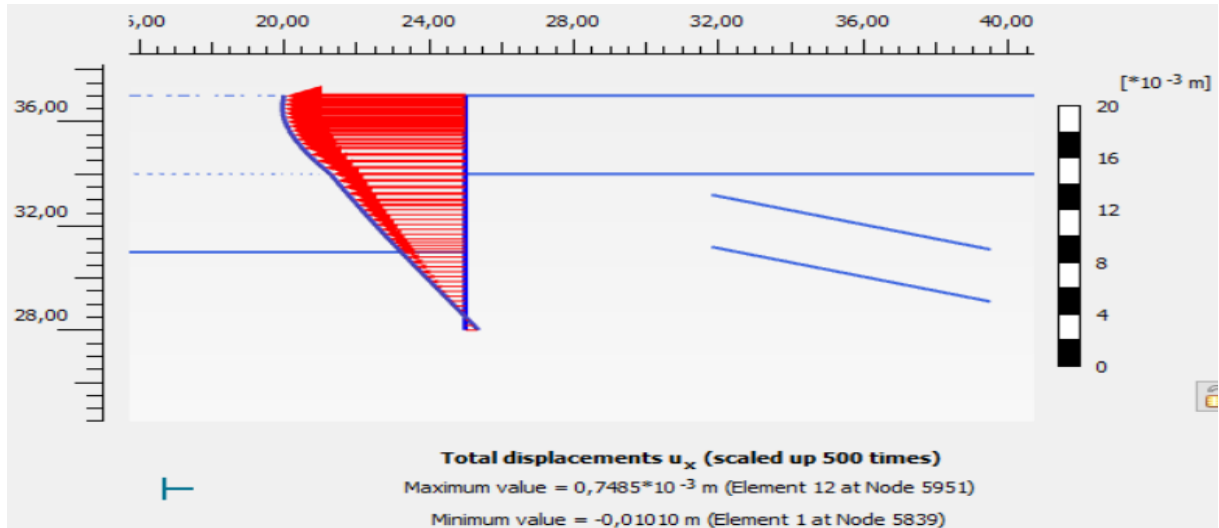
EK 30. Kazı derinliği 6 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=3 m, yatay ankraj aralığı=2,4 m olan ankrajlı sistem statik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



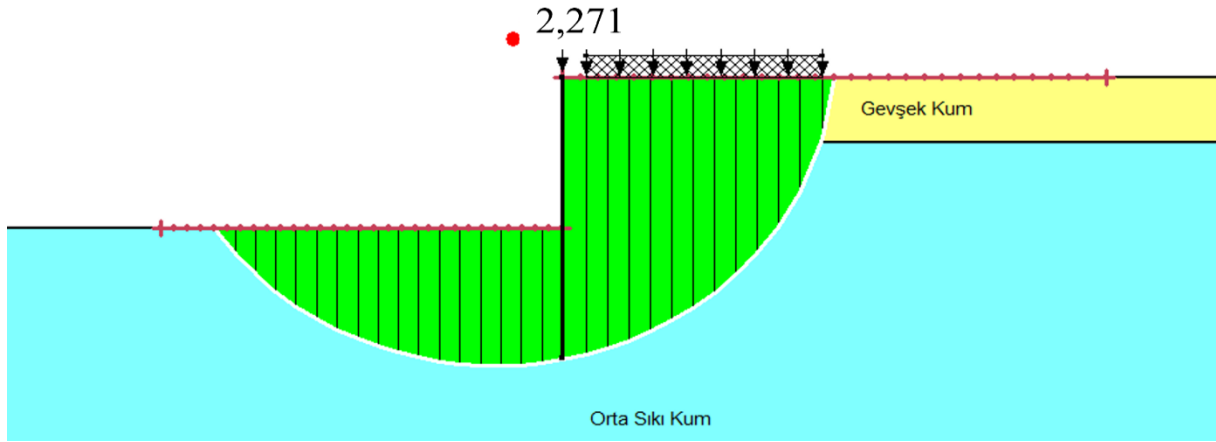
EK 31. Kazı derinliği 6 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=3 m, yatay ankraj aralığı=2,4 m olan ankrajlı sistem dinamik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



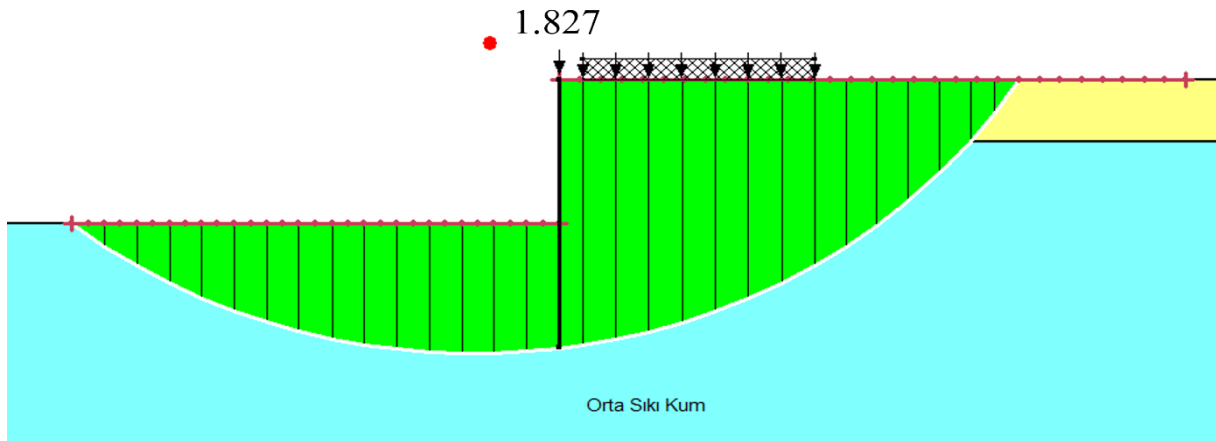
EK 32. Kazı derinliği 6 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=3 m, yatay ankraj aralığı=2,4 m olan ankrajlı sistem statik yükleme durumu için FEM analizi deplasman miktarı



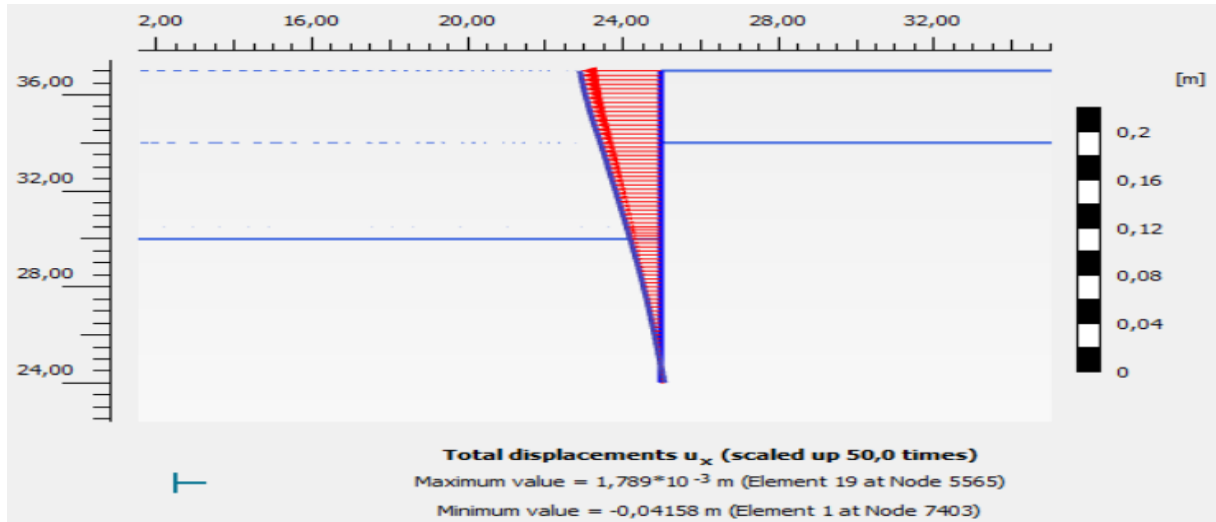
EK 33. Kazı derinliği 7 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=6 m olan konsol sistem statik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



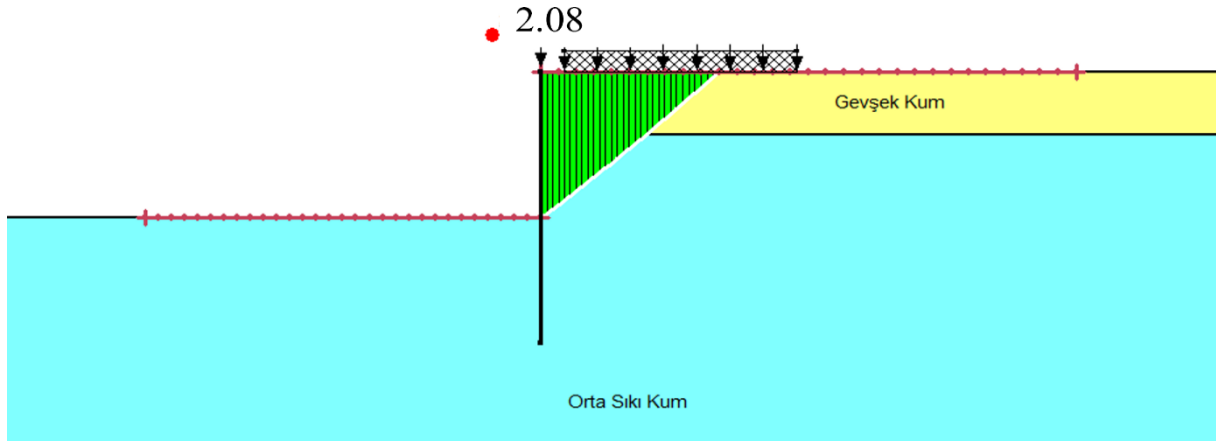
EK 34. Kazı derinliği 7 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=6 m olan konsol sistem dinamik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



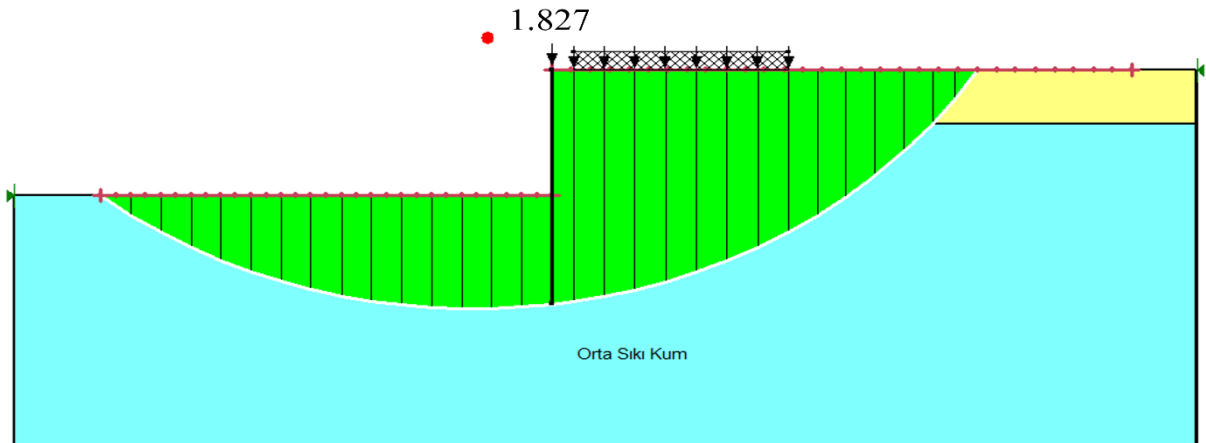
EK 35. Kazı derinliği 7 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=6 m olan konsol sistem statik yükleme durumu için FEM analizi deplasman miktarı



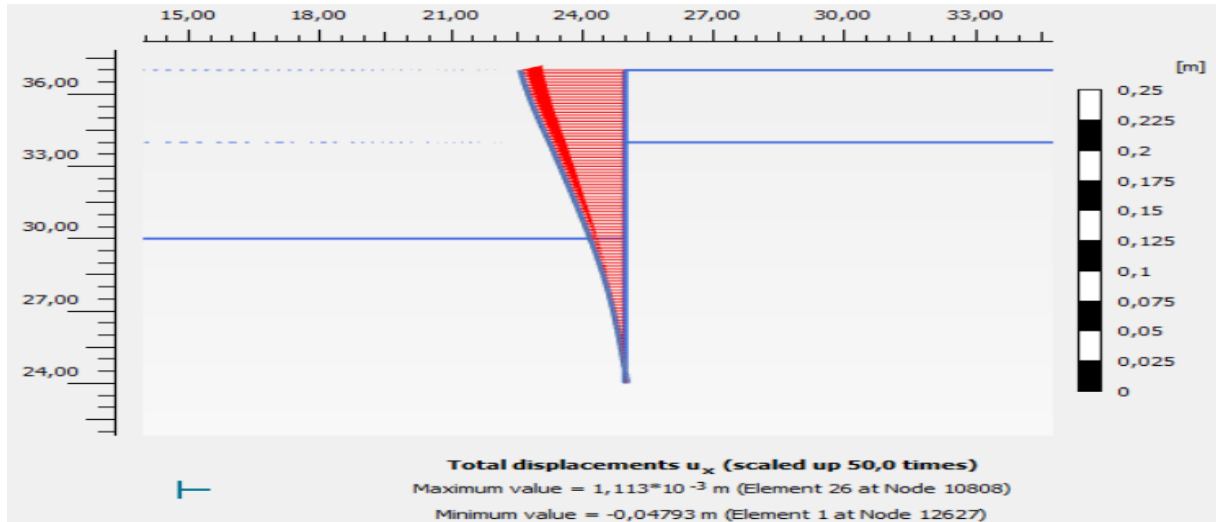
EK 36. Kazı derinliği 7 m olan sistemde $D=0,8$ m, $s=1$ m, soket boyu=6 m olan konsol sistem statik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



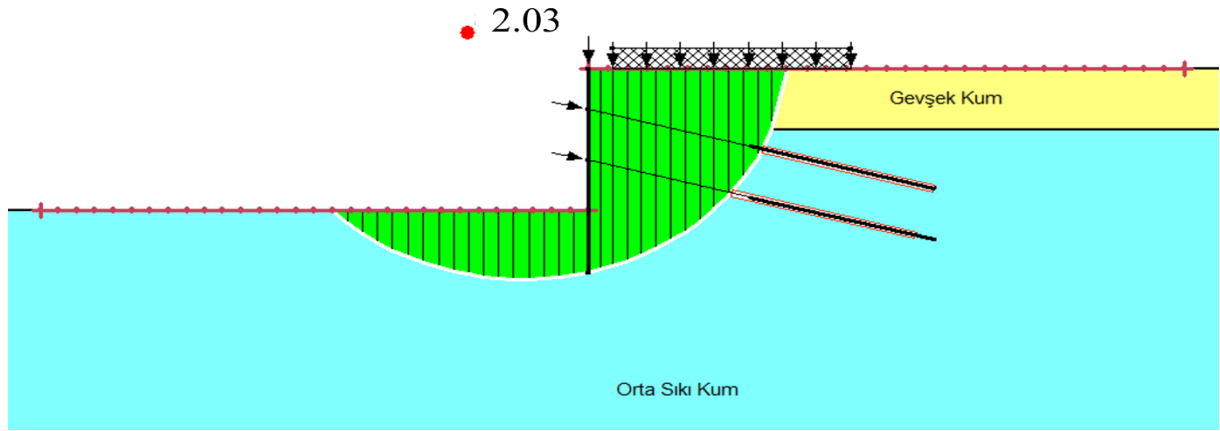
EK 37. Kazı derinliği 7 m olan sistemde $D=0,8$ m, $s=1$ m, soket boyu=6 m olan konsol sistem dinamik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



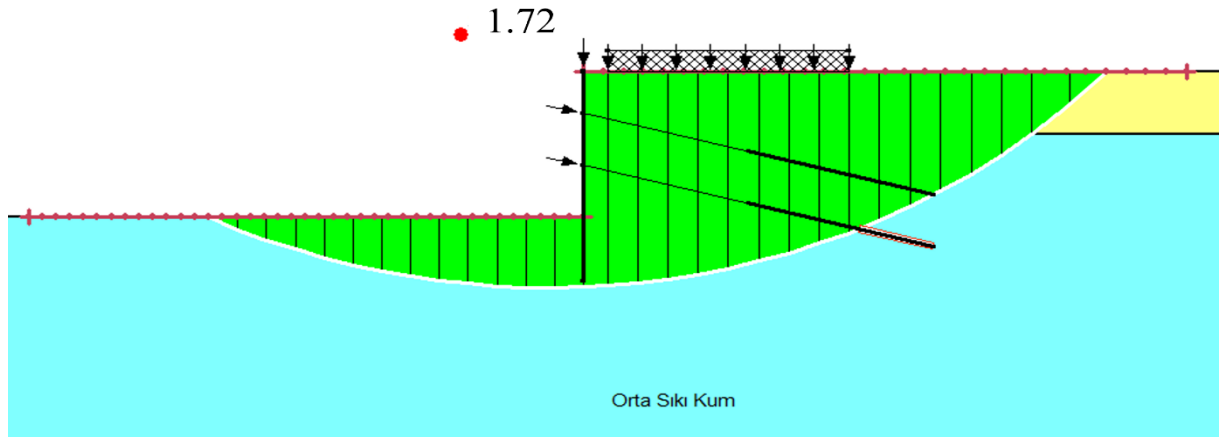
EK 38. Kazı derinliği 7 m olan sistemde $D=0,8$ m, $s=1$ m, soket boyu=6 m olan konsol sistem dinamik yükleme durumu için FEM analizi deplasman miktarı



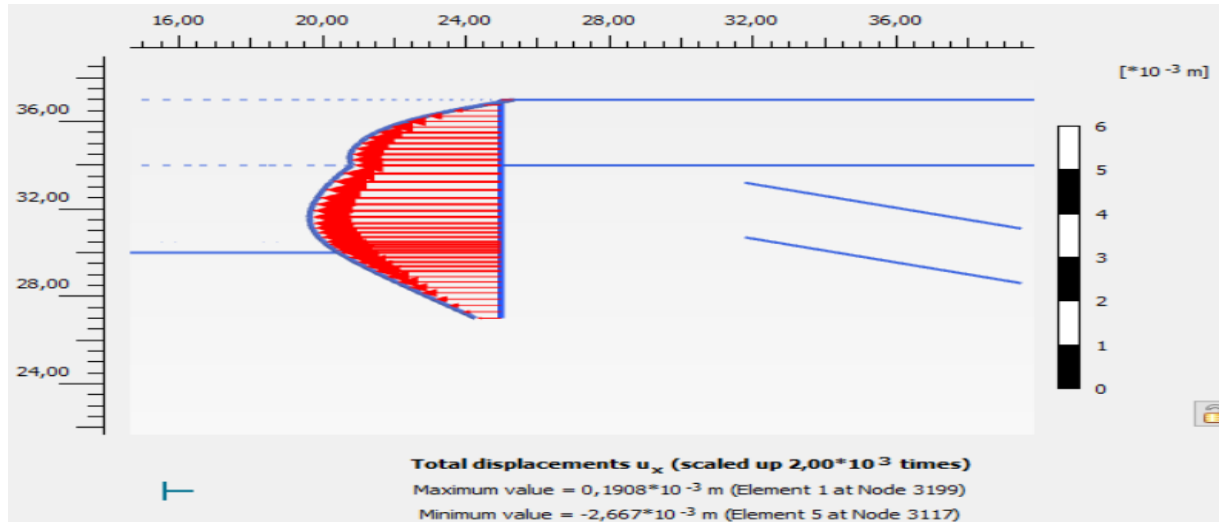
EK 39. Kazı derinliği 7 m olan sistemde $D=0,65$ m, $s=0,9$ m, soket boyu=3 m, yatay ankraj aralığı=0,9 m olan ankrajlı sistem statik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



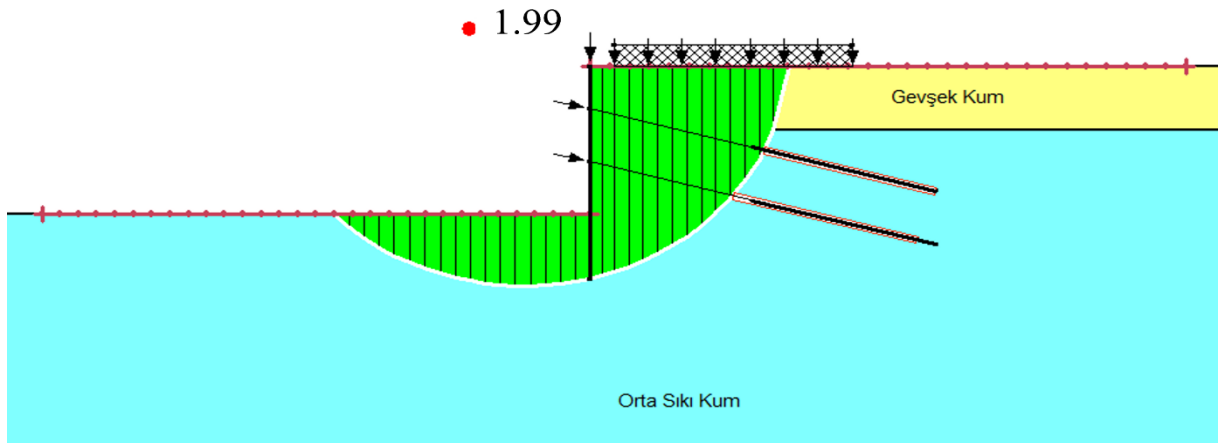
EK 40. Kazı derinliği 7 m olan sistemde $D=0,65$ m, $s=0,9$ m, soket boyu=3 m, yatay ankraj aralığı=0,9 m olan ankrajlı sistem dinamik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



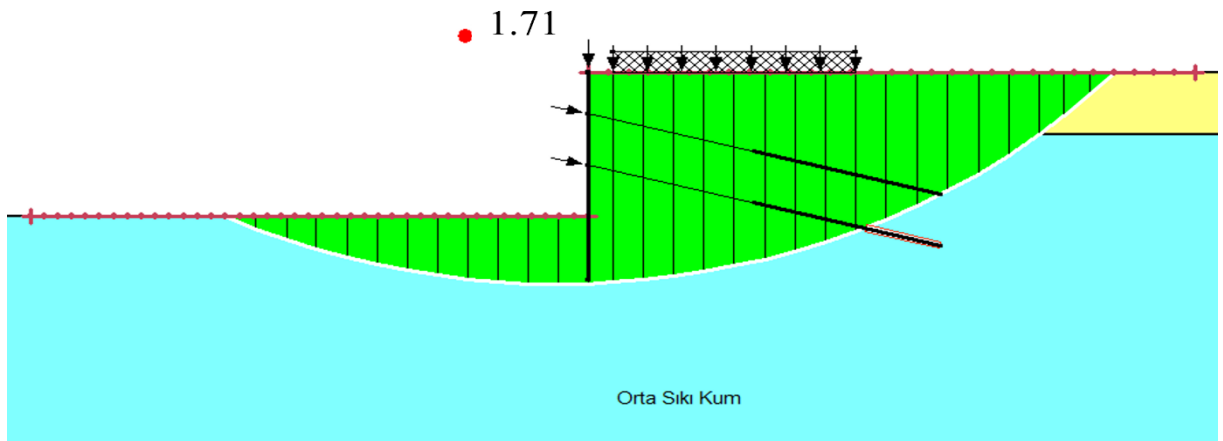
EK 41. Kazı derinliği 7 m olan sistemde $D=0,65$ m, $s=0,9$ m, soket boyu=3 m, yatay ankraj aralığı=0,9 m olan ankrajlı sistem statik yükleme durumu için FEM analizi deplasman miktarı



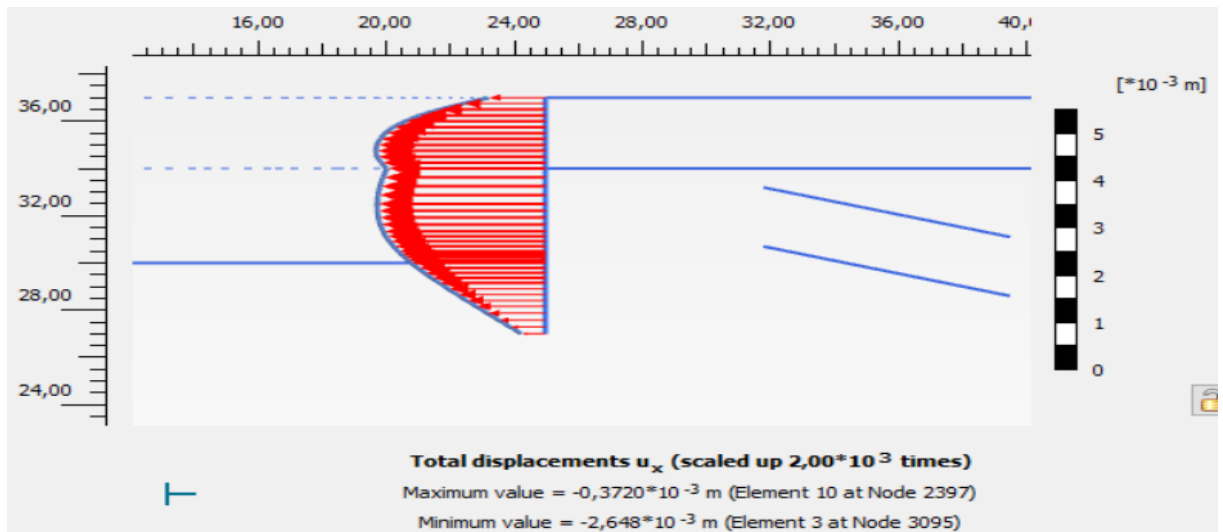
EK 42. Kazı derinliği 7 m olan sistemde $D=0,8$ m, $s=1$ m, soket boyu=3 m, yatay ankraj aralığı=1 m olan ankrajlı sistem statik yüklem durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



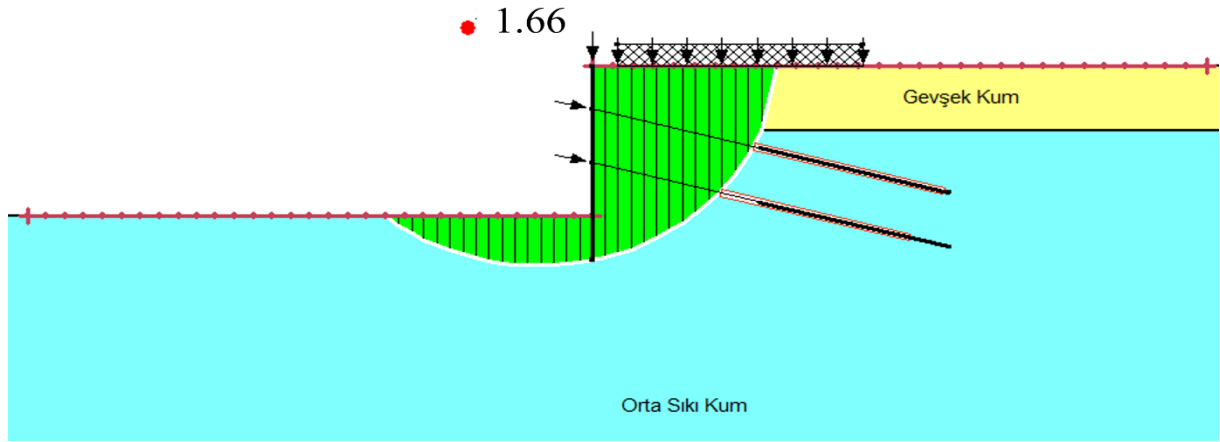
EK 43. Kazı derinliği 7 m olan sistemde $D=0,8$ m, $s=1$ m, soket boyu=3 m, yatay ankraj aralığı=1 m olan ankrajlı sistem dinamik yüklem durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



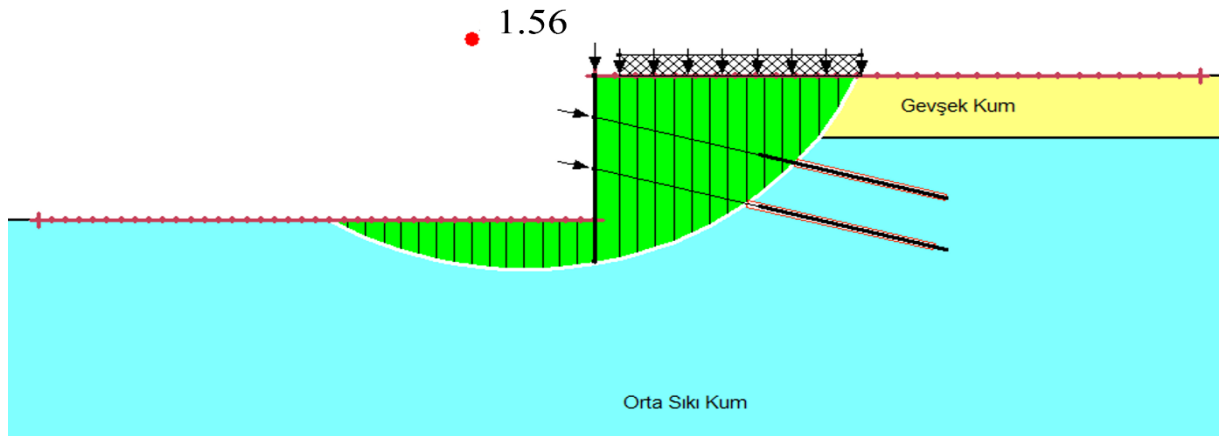
EK 44. Kazı derinliği 7 m olan sistemde $D=0,8$ m, $s=1$ m, soket boyu=3 m, yatay ankraj aralığı=1 m olan ankrajlı sistem statik yüklem durumu için FEM analizi deplasman miktarı



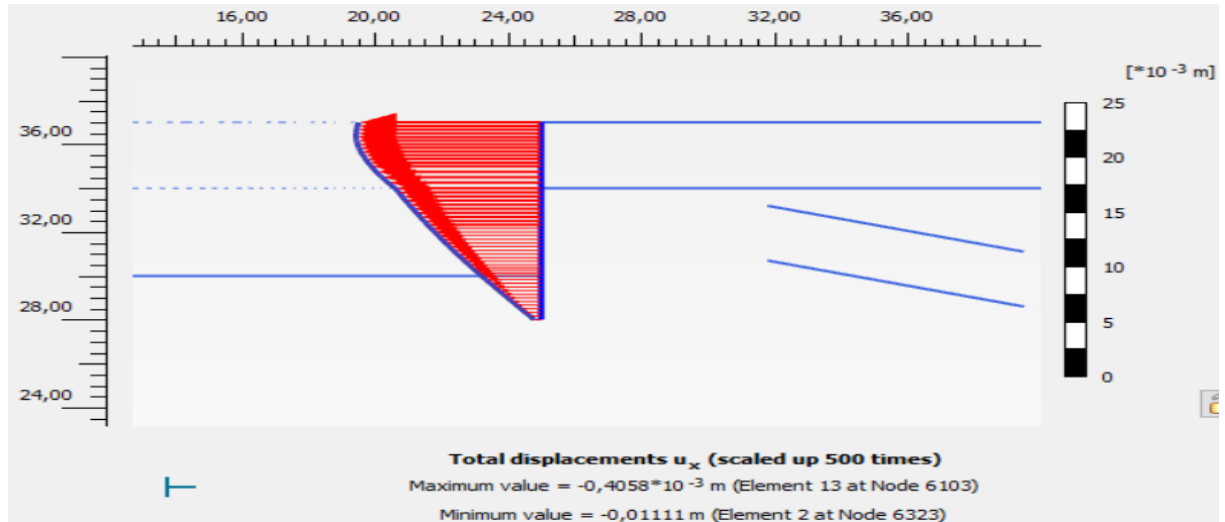
EK 45. Kazı derinliği 7 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=2 m, yatay ankraj aralığı=1,8 m olan ankrajlı sistem statik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



EK 46. Kazı derinliği 7 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=2 m, yatay ankraj aralığı=1,8 m olan ankrajlı sistem dinamik yükleme durumu için LEM analizi güvenlik sayısı



EK 47. Kazı derinliği 7 m olan sistemde $D=1$ m, $s=1,2$ m, soket boyu=2 m, yatay ankraj aralığı=1,8 m olan ankrajlı sistem statik yükleme durumu için FEM analizi deplasman miktarı



İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

4801210168-Turhan KARA

ORJİNALLİK RAPORU

%10

BENZERLİK ENDEKSİ

%8

İNTERNET KAYNAKLARI

%4

YAYINLAR

%3

ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1

Submitted to The Scientific & Technological
Research Council of Turkey (TUBITAK)

Öğrenci Ödevi

%2

2

www.setaf2018.com

İnternet Kaynağı

%2

3

acikbilim.yok.gov.tr

İnternet Kaynağı

%1

4

adana.imo.org.tr

İnternet Kaynağı

%1

5

Ahmed, Musfir. "Kirişe oturan kolonlara sahip
betonarme binanın davranışının yapım
aşamalarını dikkate alan analizle irdelenmesi",
Bursa Uludag University (Turkey), 2023

Yayın

%1

6

pdffox.com

İnternet Kaynağı

<%1

7

repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080

İnternet Kaynağı

<%1

8

www.kizilay.org.tr

İnternet Kaynağı

<%1