

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖNGERME ANKRAJLI KAZI DESTEKLEME YAPILARININ
GÜVENİLİRLİĞE DAYALI TASARIMI

TUBA TEKE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Programı

Danışman
Doç. Dr. Pelin ÖZENER

Haziran, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖNGERME ANKRAJLI KAZI DESTEKLEME YAPILARININ
GÜVENİLİRLİĞE DAYALI TASARIMI

İnş. Müh. Tuba TEKE tarafından hazırlanan tez çalışması 20.06.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Pelin ÖZENER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Pelin ÖZENER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet Muhit BERİLGİN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Özer ÇİNİCİOĞLU, Üye
Boğaziçi Üniversitesi

Doç Dr. Pelin ÖZENER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan öngerme Ankrajlı Kazi Destekleme Yapılarının G venilirliğ  Dayalı Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğ r kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

TUBA TEKE

 mza



*Aileme
ve
dostlarıma*

TEŞEKKÜR

Herşeyden önce rehberliği için, çalışmalarım boyunca benden desteğini esirgemeyen ve konuyla ilgili beni motive eden, her daim sabırlı ve hoşgörülü olan Sayın Prof.Dr. M. Mehmet BERİLGİN'e ve resmi danışmanlığımı kabul ederek yardım ve desteklerini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Pelin ÖZENER'e minnettarlığımı ve teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, tüm eğitim hayatımda ve bu tezin hazırlanması sırasında sevgileri ve destekleri için aileme ve dostlarıma teşekkür ederim.

Tuba TEKE

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.1.1 Geoteknik Mühendisliğinde Değişkenlik ve Belirsizlik.....	2
1.1.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Güvenilirlik Analizi.....	4
1.1.3 Belirsizlik ve Duyarlılık Analizi.....	5
1.2 Tezin Amacı	8
1.3 Hipotez	8
2 BELİRSİZLİKLER DİKKATE ALINARAK GÜVENİLİRLİĞE DAYALI TASARIM	9
2.1 Güvenilirlik Analizi	9
2.1.1 Güvenilirlik Analizinin Esasları.....	10
2.1.2 Güvenilirlik Analizi Yöntemleri.....	12
2.1.3 Monte Carlo Simülasyon Yöntemi.....	12
2.1.4 Birinci Derece Güvenilirlik Yöntemi (FORM).....	14
2.1.5 İkinci Derece Güvenilirlik Yöntemi (SORM).....	15
2.1.6 Nokta Tahmin Yöntemi (PEM).....	15
2.2 Güvenilirliğe Dayalı Tasarımda Güvenilirlik Endeksi	16
2.3 Göçme Olasılığı ve Göçme Mekanizmaları.....	18
2.4 Limit Durum Fonksiyonu	20
2.4.1 Hizmet Verebilirlik Sınır Durumu.....	21
2.4.2 Nihai Sınır Durumu.....	21
3 DERİN KAZILAR VE DESTEKLEME SİSTEMLERİ	23
3.1 İçten Destekli Kazılar	23
3.1.1 Zemin Çivileri ile Derin Kazıların Desteklenmesi.....	24
3.2 Dıştan Destekli Kazılar	26
3.2.1 Öngermeli Ankrajlı Kazı Yöntemi.....	26

3.3	Derin Kazılarda Düşey Taşıyıcılar	27
3.3.1	Palplanş Duvarlar.....	27
3.3.2	Mini Kazık Duvarlar.....	28
3.3.3	Fore Kazık Duvarlar.....	29
3.3.4	Kesişen Kazık Duvarlar.....	30
3.3.5	Kuyu Tipi Betonarme Perdeler.....	30
3.3.6	Diyafram Duvarlar.....	31
3.4	Yanal Toprak Basınçları.....	32
3.4.1	Rankine Toprak Basıncı Teorisi.....	34
3.4.2	Coulomb Toprak Basıncı Teorisi.....	35
3.5	Destekli Kazılarda Yanal Toprak Basınçları.....	37
3.6	Öngerme Ankrajlı Destekleme Sisteminin Tasarımı	42
3.6.1	Ankraj İmalat Yöntemleri.....	42
3.6.2	Zemin Ankrajı Tasarımı.....	45
3.6.3	Yanal Basınçlara Göre Destekleme Sistemi Tasarımı.....	48
3.7	Öngerme Ankrajlı Sistemlerde Göçme Mekanizması.....	49
3.8	Öngerme Ankrajlı Destekleme Sistemlerinin Genel Stabilitesi	51
3.8.1	Derin Kayma Tahkiki.....	52
3.8.2	Blok Göçme Analizi (Kranz Yöntemi).....	52
4	ÖNGERME ANKRAJLI BİR DESTEKLEME SİSTEMİNİN BELİRSİZLİK DİKKATE ALINARAK ANALİZLERİ	54
4.1	Öngerme Ankrajlı Bir Destekleme Sisteminin Belirsizlik Analizi.....	55
4.1.1	Tek Sıralı Ankrajlı Perde İçin Limit Denge Analizi.....	57
4.2	Duyarlılık ve Belirsizlik Analizi.....	59
4.2.1	Duyarlılık Analizi.....	60
4.2.2	Belirsizlik Analizi.....	60
5	ÖNGERME ANKRAJLI BİR DESTEKLEME SİSTEMİNİN BELİRSİZLİK DİKKATE ALINARAK GÜVENİLİRLİK ANALİZLERİ	67
5.1	Blok Göçme Analizi.....	72
6	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	86
	KAYNAKÇA	90
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	100

SİMGE LİSTESİ

K_a	Aktif Toprak Basıncı
ψ	Çarpıklık
$P_{f,sup}$	Destek Sistemin Göçme Olasılığı
σ_v	Düşey Toprak Basıncı
P_f	Göçme Olasılığı
β	Güvenilirlik Endeksi
β_t	Hedef Güvenilirlik Endeksi
u	Hesaplanan Yer Değiştirme
u_{adm}	İzin Verilen Maximum Yer Değiştirme
$\emptyset$	Kayma Mukavemeti Açısı
c	Kohezyon
μ	Ortalama
D	Palplanş Duvar Çakma Derinliği
$P_{f,sp}$	Palplanş Duvarın Göçme Olasılığı
K_p	Pasif Toprak Basıncı
ν	Poisson Oranı
Z	Sınır Durum Fonksiyonu
Φ	Standart Normal Olasılık Dağılım Fonksiyonu
σ	Standart Sapma
K_0	Sükunetteki Toprak Basıncı
P_0	Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısı
q	Sürşarj Yüğü
σ_h	Yanal Toprak Basıncı
K	Yanal Toprak Basıncı Katsayısı
n_f	Yenilen Simülasyon Sayısı
$P_{f,soil}$	Zeminin Göçme Olasılığı

KISALTMA LİSTESİ

FORM	Birinci Derece Güvenilirlik Metodu
FOSM	Birinci Derece İkinci Moment Yöntemi
DA	Duyarlılık Analizi
SLS	Hizmet Verebilirlik Sınır Durumu
SORM	İkinci Derece Güvenilirlik Yöntemi
CDF	Kümülatif Dağılım Fonksiyonu
MCS	Monte Carlo Simülasyonu
ULS	Nihai Sınır Durumu
PDF	Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
PEM	Tek Nokta Tahmin Yöntemi
COV	Varyasyon Katsayısı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Jeolojik model, zemin modeli ve geoteknik model arasındaki ilişki (Keaton, 2013).....	4
Şekil 1.2 Belirsizlik türleri (Van Gelder,2000)	5
Şekil 1.3 Geoteknik mühendisliğinde belirsizlik türleri (Baecher ve Christian,2003).....	6
Şekil 2.1 Güvenilirliğe dayalı tasarım şeması	9
Şekil 2.2 Limit denge durumları.....	11
Şekil 2.3 Monte Carlo simülasyonu akış şeması (Wang vd, 2016)	13
Şekil 2.4 U-uzayda iki boyut için tasarım noktası ve doğrusallaştırılmış sınır durumu (Schweckendiek, 2006)	14
Şekil 2.5 Olasılık değişim grafiği	16
Şekil 2.6 Ankrajlı palplanş duvarlı dayanma yapıları için göçme ağacı (Schweckendiek, 2006).....	19
Şekil 2.7 Çeşitli geleneksel inşaat tesisler ve diğer büyük yapılar veya projeler tarafından oluşturulan ortalama yıllık riskleri gösteren grafik (Baecher ve Christian, 2003).....	20
Şekil 2.8 Palplanş duvarlar: a) Ankrajlı olmayan b) Ankrajlı (Tek sıra)	21
Şekil 2.9 Ankrajlı destekleme sistemleri için zemindeki göçme mekanizmaları (Schweckendiek, 2006)	22
Şekil 3.1 Çelik boru destekli kazı yöntemi	24
Şekil 3.2 Zemin çivili kazı yöntemi.....	25
Şekil 3.3 Zemin çivili duvarların yapım aşamaları (Byrne,R.J. ve diğerleri,1998)..	25
Şekil 3.4 Öngerme ankrajlı kazı (Çınar, 2010).....	26
Şekil 3.5 Ankraj elemanları.....	27
Şekil 3.6 Palplanş duvara bir örnek.....	28
Şekil 3.7 Mini kazık uygulaması	29
Şekil 3.8 Fore kazıklar ve öngerme ankarajlarla desteklenen bir derin kazı	30
Şekil 3.9 Diyafram duvar imalatı	32
Şekil 3.10 Bir dayanma yapısında aktif ve pasif bölgeler.....	33
Şekil 3.11 Coulomb aktif toprak basıncı göçme kama yüzeyi (a) ve kuvvet vektörü (b) (Das,1990)	35
Şekil 3.12 Coulomb pasif basınç göçme kaması (a) ve kuvvet vektörleri (b)	36
Şekil 3.13 Esnek ve rijit sistemlerde zemin basıncı dağılım şekli (Önal O.)	37
Şekil 3.14 Peck (1969) tarafından önerilen kum (a), yumuşak ve orta katı killer (b), sert killer (c) için toprak basıncı dağılımları (Das,1990)	38
Şekil 3.15 Tschebotarioff tarafından önerilen toprak basıncı dağılımı.....	39
Şekil 3.16 İsveç yapı şartnamesi (1974) tarafından önerilen sıkı (a) ve gevşek (b) kohezyonsuz zeminler için toprak basıncı dağılımı.....	40
Şekil 3.17 İsviçre zemin ankrajları standartlarına göre kohezyonsuz zeminlerde toprak basınç dağılımı	40
Şekil 3.18 Navfac (1986) tarafından önerilen kohezyonsuz zeminler için toprak basıncı dağılımı	41
Şekil 3.19 Navfac(1986) tarafından önerilen kohezyonlu zeminler için toprak	41
Şekil 3.20 Delgi ve enjeksiyona göre ankraj türleri.....	43
Şekil 3.21 Öngermeli ankraj bölümleri	45
Şekil 3.22 Öngermeli serbest ankraj boyunun belirlenmesi.....	46

Şekil 3.23 Ankraj yatay aralığının belirlenmesi (Sabatini, vd., 1999)	48
Şekil 3.24 Eğilme momentlerinin belirlenmesi (Sabatini, 1999)	49
Şekil 3.25 Öngermeli ankrajlarda meydana gelebilecek göçme durumları	50
Şekil 3.26 Ankrajlı yapılarda göçme biçimleri a) Toptan göçme b) Derin kayma düzleminde zemin göçmesi (İncecik, 1977)	51
Şekil 3.27 Tek sıralı ankrajda blok göçme durumu (Yıldırım, 2004)	52
Şekil 3.28 Blok göçme durumunda kuvvet poligonu (Yıldırım, 2004)	52
Şekil 4.1 Ankrajlı palplanş duvarlar için yer değiştirme ve moment dağılımı: (a) serbest toprak destek yöntemi; (b) sabit toprak destek yöntemi	56
Şekil 4.2 Kumlu zeminde ankrajlı palplanş duvar penetrasyonu (Das, 1990)	57
Şekil 4.3 Duyarlılık analizi	60
Şekil 4.4 MC-SEY yalnızca zemin değişkenliği içeren kayma mukavemeti açısı histogram grafiği	62
Şekil 4.5 Kayma mukavemeti açısı ve çakma derinliği arasındaki ilişki	63
Şekil 4.6 Kayma mukavemeti açısı ve ankraj aralığı arasındaki ilişki	64
Şekil 4.7 Kayma mukavemeti açısı ve ankraj kuvveti arasındaki ilişki	65
Şekil 4.8 Kayma mukavemeti açısı ve serbest uzunluk arasındaki ilişki	66
Şekil 5.1 Olasılık hesaplaması için kullanılan Plaxis modeli	68
Şekil 5.2 Sonlu eleman modeli ve ağları	69
Şekil 5.3 Plaxis modelinde yatay deplasman değerleri	69
Şekil 5.4 Plaxis modelinde düşey deplasman değerleri	70
Şekil 5.5 Plaxis modelinde palplanş duvar maksimum eğilme momenti değeri	70
Şekil 5.6 Plaxis modelinde elde edilen ankraj kuvveti	71
Şekil 5.7 Kranz yöntemi ile göçme durumu	71
Şekil 5.8 Blok göçme analizinde kullanılan diyagram	72
Şekil 5.9 Kayma mukavemeti açısının histogram ve olasılık dağılım fonksiyon grafiği	73
Şekil 5.10 Rastgele üretilen kayma mukavemeti açısına bağlı elastisite modülü ..	74
Şekil 5.11 Rastgele üretilen kayma mukavemeti açısına bağlı güvenlik sayısı	74
Şekil 5.12 Rastgele üretilen kayma mukavemeti açısına bağlı yatay deplasmanlar	75
Şekil 5.13 Kayma mukavemeti açısı ve elastisite modülü arasındaki ilişki	75
Şekil 5.14 Kayma mukavemeti açısı ve güvenlik sayısı arasındaki ilişki	76
Şekil 5.15 Kayma mukavemeti açısına bağlı olarak elde edilen grafiklerde renk tonlarının anlamları	76
Şekil 5.16 Analiz sonucunda elastisite modülü ile yatay deplasman arasındaki ilişki	77
Şekil 5.17 Analiz sonucunda elastisite modülü ile güvenlik sayısı arasındaki ilişki	77
Şekil 5.18 Analiz sonucunda elastisite modülü ile ankraj kuvveti arasındaki ilişki	78
Şekil 5.19 Analiz sonucunda elastisite modülü ile blok göçme analizinde elde edilen ankraj kuvveti arasındaki ilişki	78
Şekil 5.20 Analiz sonucunda elastisite modülü ile blok göçme durumunda güvenlik sayısı arasındaki ilişki	79
Şekil 5.21 Analiz sonucunda maksimum yatay deplasman ile güvenlik sayısı arasındaki ilişki	79
Şekil 5.22 Analiz sonucunda blok göçme durumuna göre ankraj kuvveti ile blok göçme durumuna göre güvenlik sayısı arasındaki ilişki	80

Şekil 5.23 Mukavemet azaltımı yöntemine göre göçme olasılık dağılım fonksiyonu	81
Şekil 5.24 Log – normal ve normal dağılım olasılık yoğunluk grafikleri için göçme olasılığı tanımı (Odabaş, 2016)	82
Şekil 5.25 Güvenlik sayısı olasılık dağılım fonksiyon grafiği	84
Şekil 5.26 Z Tablosu	84



TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 İstinat yapılarının güvenilirliğe dayalı tasarımına ilişkin literatür (Viviescas, vd., 2017)	2
Tablo 2.1 Tipik varyasyon katsayıları	13
Tablo 2.2 Güvenilirlik endeksi (β) ve göçme olasılığı (P_f) arasındaki ilişki (US Army Corps of Engineers, 1997)	16
Tablo 2.3 Çeşitli güvenilirliğe dayalı tasarım kodlarında hedef güvenilirlik endeksi (β_t) özet tablosu	17
Tablo 3.1 Zemin türlerine göre K_0 değerleri (Yıldırım, 2019)	33
Tablo 3.2 Ankrajlı duvarlar için klasik tasarım adımları (Sabatini, vd., 1999).....	44
Tablo 4.1 Monte Carlo Simülasyon yönteminde kullanılan parametreler	59
Tablo 4.2 Belirsizlik analizi için stokastik veri ve dağılım türü.....	61
Tablo 5.1 Örnek Plaxis modeli kum zemin parametreleri.....	68
Tablo 5.2 Göçme olasılığı ve karşılık gelen güvenilirlik endeks değeri	84

Öngerme Ankrajlı Kazı Destekleme Yapılarının Güvenilirliğe Dayalı Tasarımı

Tuba TEKE

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Pelin ÖZENER

Geoteknik tasarımlarda alışagelmış mühendislik yaklaşımı deterministik analizlere dayanmaktadır. Deterministik analizlerde, zemin gibi mühendislik özellikleri geniş aralıklarda değişen doğal malzemelerin malzeme parametrelerindeki belirsizlik dikkate alınmaz. Bu durumun üstesinden gelebilmek için Eurocode 7 ve AASHTO gibi yönetmeliklerde mukavemet parametrelerinin azaltılması ve kütle parametrelerinin artırılması yoluna gidilmiştir. Bu tez çalışmasında, geniş bir aralıkta değişen zemin mühendislik özelliklerinden kaynaklanan belirsizliğin öngerme ankrajlı derin kazı destekleme sistemlerinin tasarımına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, kum zeminde yer alan varsayımsal bir kazının tek sıra öngerme ankrajlı bir destekleme sisteminin kuvvet dengesine dayalı deterministik tasarımı yapılarak, belirsizlik olgusunun dikkate alınması durumu incelenmiştir. Sonuçlar üzerinde en büyük etkiye sahip olan parametreyi belirlemek için duyarlılık analizleri yapılmıştır. Öngerme ankrajlı sistemin kuvvete dayalı deterministik ve Monte Carlo Simülasyonu ile yapılan belirsizlik analizleri Python programlama dili ile geliştirilen bir yazılımla gerçekleştirilmiştir. Destekli kazının güvenilirlik durumu blok göçme ve genel göçme durumları için yapılmıştır. Blok göçme durumu Kranz Yöntemi ile yazılan Python kod tarafından yapılırken genel

göçme mukavemet azaltımı yönteminin dikkate alındığı sayısal gerilme şekil değiştirme analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Python'da geliştirilen yazılım ile ilk olarak verilen kazı derinliği ve zemin özelliklerine göre ankrajlı palplanş hesabı yapılmaktadır. Palplanşın gömülü ucunun serbest mesnetli olduğu kabulü ile yapılan bu hesap sonucunda ankraj kuvveti ve perde gömülme derinliği ile ankraj aralığı ve kök derinliği elde edilmektedir. Python kodu ile yürütülen analizlerin ikinci aşamasındaki belirsizlik analizlerinde Monte Carlo Simülasyonu ile kayma mukavemeti açısı için lognormal olasılık dağılım ve varyasyon katsayısı (COV) dikkate alınmıştır. Binin üstünde iterasyon ile gerçekleştirilen bu analizlerin her bir iterasyon adımıda verilen olasılık dağılım fonksiyonuna göre, rastgele üretilen kayma mukavemeti açısı değeri dikkate alınarak tek sıra öngerme ankrajlı perde hesapları yinelenmiştir. Bu analizlerde, minimum kök boyu ve ankraj aralığı yönetmeliklerde önerildiği şekilde sınırlandırılmış ve buna göre çakma derinliği, ankraj kuvveti, ankraj kök uzunluğu, ankraj aralığı ve serbest uzunluk değerleri hesaplanmıştır. Monte Carlo Simulasyonu ile yapılan belirsizlik analizleri sonucunda elde edilen verilerle; Python Eko Sistem'in olanakları kullanılarak, ankrajlı perde gömülme derinliği, ankraj kuvveti, serbest ve kök boyu değerlerinin kayma mukavemeti açısına bağlı değişimi ve birbirleri ile ilişkilerini gösteren grafikler çizdirilmiştir. Güvenilirlik analizleri her bir rastgele üretilen kayma mukavemeti açısına bağlı olarak gerçekleştirilen Plaxis analizlerinin ankraj kuvveti sonuçlarına bağlı olarak blok göçme analizi şeklinde yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kazı destekleme sistemleri, iksa yapıları, ankrajlı perdeler, güvenilirlik analizi, Monte Carlo simülasyonu, güvenilirliğe dayalı tasarım.

Reliability Based Design of Prestressed Anchor Excavation Supporting Structures

Tuba TEKE

Department of Civil Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr.Pelin ÖZENER

The conventional engineering approach in geotechnical designs is based on deterministic analysis. In deterministic analysis, the uncertainty in the material parameters of natural materials whose engineering properties vary widely, such as soil, is not taken into account. In order to overcome this situation, in Eurocode 7 and AASHTO regulations, reducing the strength parameters and increasing the mass parameters are preferred. In this paper, it is aimed to investigate the effect of uncertainty arising from a wide range of varying soil engineering properties on the design of prestressed anchor deep excavation support systems. In this context, a deterministic design based on the force balance of a single-row prestressed anchorage system of a hypothetical excavation at a depth of 7 m on a sandy soil was made, and the case of taking into account the uncertainty phenomenon was investigated. Sensitivity analyzes were performed to determine the parameter that has the greatest effect on the results. The force-based deterministic of the prestressed anchored system and the uncertainty analysis made with Monte Carlo Simulation were carried out with a software developed with the Python

programming language. The reliability status of the supported excavation is made for block failure and general failure situations. While the block failure situation is made by the Python code written with the Kranz Method, the general failure strength reduction method is taken into account by numerical stress-strain analyzes. With the software developed in Python, anchored sheet pile calculations are made according to the given excavation depth and soil properties. As a result of this calculation, which is made by assuming that the buried end of the sheet pile is freely supported, the anchor force and the wall burial depth, the anchor spacing and the root depth are obtained. The lognormal probability distribution and coefficient of variation (COV) for the shear strength angle were taken into account with Monte Carlo Simulation in the uncertainty analysis in the second stage of the analyzes carried out with the Python code. According to the probability distribution function given in each iteration step of these analyzes, which were carried out with more than one thousand iterations, the calculations of the shear strength angle, which is randomly generated, were repeated with a single row of prestressed anchorage. In these analyses, the minimum root length and anchor spacing were limited as recommended in the regulations, and the driving depth, anchor force, anchor root length, anchor spacing and free length values were calculated accordingly. With the data obtained as a result of the uncertainty analysis made with Monte Carlo Simulation; Using the possibilities of the Python Eco-System, graphs were drawn showing the changes in the anchorage wall embedment depth, anchor strength, free and root length values depending on the shear strength angle and their relations with each other. Reliability analyzes were performed in the form of block failure analysis based on the anchor force results of Plaxis analyzes performed depending on each randomly generated internal friction angle.

Keywords: Excavation supported systems, retaining structures, reliability analyses, Monte Carlo simulation, reliability based design.

1.1 Literatür Özeti

Geoteknik mühendisliği çalışmalarında her zaman belirsizlik ve risk mevcuttur. Güvenli ve ekonomik olmak mühendisin ana amaçlarından olması sebebi ile geoteknik mühendislerinin proje üzerindeki rolü riskleri belirli kodlarda belirtilmiş olan kabul edilebilir seviyelerde yönetmektir. Deterministik yöntemler zeminde meydana gelebilecek göçmelerin olasılığını değerlendirememesi sebebiyle belirsizliğin üstesinden tam olarak gelemez. İstatistiksel ve olasılık kavramları kullanılarak yapılan güvenilirliğe dayalı tasarım deterministik tasarımın yerini almaz fakat eğer uygun şekilde kullanılırsa faydalı bir ek yöntem olarak tasarımın bir parçası olabilir. Olasılık analizi, genellikle dikkate alınan güvenilirlik analizi yoluyla bu belirsizlikler için geleneksel deterministik analizden elde edilenlere tamamlayıcı bilgiler sağlayabilir (Duncan, 2000).

Geoteknik mühendisliği tasarımlarında genel mühendislik yaklaşımı problem ve deneyime dayalı güvenlik faktörlerinin kullanılmasıdır. Bu mühendislik yaklaşımında güvenlik faktörlerinin tecrübeye dayalı olması dolayısı ile her zaman tatmin edici performans elde olunamaz. Aynı zamanda bu şekilde dikkate alınan güvenlik faktörleri tasarımı oluşturan bileşenlerin sistem performansına etkisi tam olarak anlaşılamaz. Diğer yandan klasik güvenlik faktörüne dayalı tasarımlarda, güvenliğin maksimum ve maliyetin minimum seviyede tutulması için parametrelerin göreceli önemi hakkında bilgi sahibi olunamaz. Oysa güvenilirliğe dayalı tasarımda yani olasılık tasarım yöntemleri ile tasarım yapıldığında dile getirilen tüm bu hususlar dikkate alınabilir. Geoteknik mühendisliğinde güvenilirliğe dayalı tasarımda “Belirsizlik tipleri nelerdir?”, “Mevcut belirsizlikleri azaltma yöntemleri nelerdir”, “Neden güvenilirliğe dayalı tasarım yapmalıyız?” gibi sorulara cevap aranmaktadır. Bu bölümde geoteknik mühendisliğinde güvenilirliğe tasarıma ilişkin güncel literatür bilgilerine yer verilmiştir

1.1.1 Geoteknik Mühendisliğinde Değişkenlik ve Belirsizlik

Geçmişte temel tasarımı ve inşası deneysel ve yerel tecrübeye dayalı yapılıyordu. Zemin mekaniğinin temel ilkeleri 1900'lerin başından itibaren geliştikçe temel mühendisliği de gelişti. Bu kapsamda deterministik temel tasarımı gelişmiş ve mühendisler tarafından benimsenmiştir. Zemin malzemesinin belirsizliği deterministik analizlere dayanan tasarımlarda aşırı güvenli tarafta kalmak veya güvenliği kabul edilmeyecek seviyelerde tasarım sağladığından deterministik yöntemlerle tasarımın yanısıra güvenilirliğe dayalı tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesine yol açmıştır. Ancak geoteknik mühendisliğinde güvenilirliğe dayalı tasarımın benimsenmesi yavaştır ve süreç henüz tamamlanmasa da günümüzde güvenilirliğe dayalı tasarım önemli ölçüde artmıştır (Kulhawy, F. H., (2017)).

Geoteknik mühendisliğinde yapılan güvenilirliğe dayalı çalışmalara bakıldığında en çok çalışmanın şev stabilitesi üzerine olduğu görülmektedir. İstinat yapıları üzerine de çok sayıda belirsizlik ve olasılık hesaplarını içeren güvenilirlik üzerine çok fazla çalışma literatürde yer almaktadır. Bu çalışmalar Tablo 1.1'de özetlenmiştir. Tablo 1.1'de görüldüğü gibi güvenilirliğe dayalı tasarımda kazıklı istinat yapıları üzerine çalışma olmakla birlikte ankrajlı duvarlar üzerine bu çalışmaların daha az olduğu görülmektedir.

Tablo 1.1 İstinat yapılarının güvenilirliğe dayalı tasarımına ilişkin literatür
(Viviescas, vd., 2017)

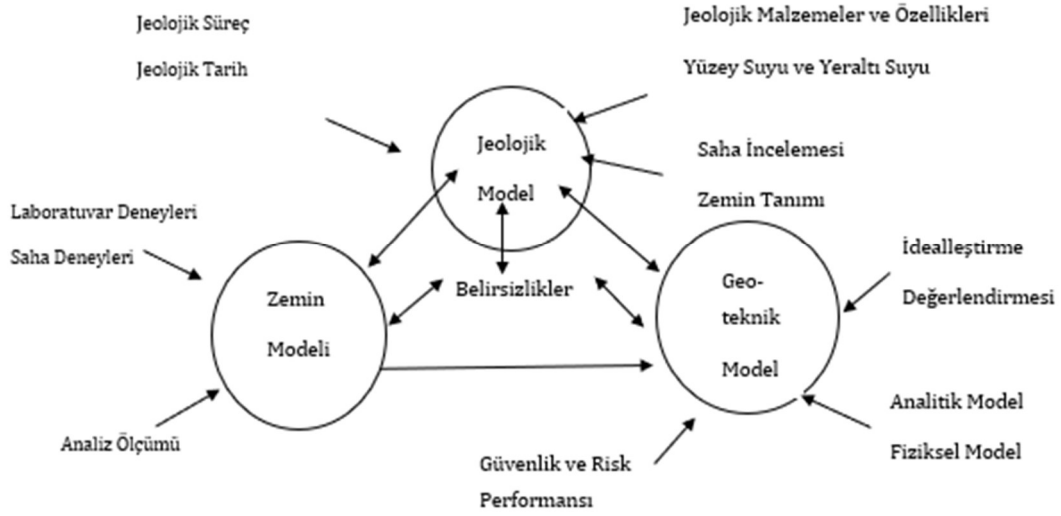
Duvar Tipi	Referans
Kazık Duvar	Basma,1991a; Cherubini vd.,1992; Goh ve Kulhawy,2005; Papaioannou ve Straub,2010; Sessa ve D'Urso,2013; Aslay (2013); GuhaRay ve Baidya,2015; Koreta vd.,2015; Low ve Phoon,2015; Li vd.,2016; Prastings vd.,2016; Wang,2013; Bozkurt (2019)
Zemin Çivili Sistem	Babu ve Singh, 2009, 2010, 2011; Cao vd.,2014; Hui ve Zhu, 2013; Lu ve Jiang, 2012; Zhang vd., 2009; Zhao ve An, 2011

Tablo 1.1 İstinat yapılarının güvenilirliğe dayalı tasarımına ilişkin literatür
(devamı)

Konsol Duvar	Fenton vd., 2005; Goh vd., 2009; Griffiths vd.,2008; Duncan (2000); GuhaRay ve Baidya,2014; Juang vd., 2013; Liu vd., 2013; Prada vd., 2011; Zevgolıs ve Bourdeau, 2010a; Mandali vd., 2011
Ağırlık Tipi Duvar	Basheer ve Najjar, 1996; Chalermmyanont ve Benson, 2004, 2005a, 2005b; Hegazy vd., 2009; Kim ve Salgado, 2012; Miyata ve Bathurst, 2012; Zevgolıs ve Bourdeau, 2008, 2010b
Ankrajlı Duvar	Basha ve Sivakumar Babu, 2008; Basma, 1991b; Chen vd., 201; Cherubini, 1999; Low, 2005; Schwekendiek, 2006; Schweiger (2005); Rippi (2016)

Ledesma vd. (2019) ankraj destekli bir derin kazıda Birinci Dereceden İkinci Moment (FOSM), Taylor Serisi Yöntemi ve Nokta Tahmin Yöntemi (PEM) kullanarak güvenilirliğe dayalı tasarım çalışmıştır. Çalışma neticesinde göçme olasılığı, nihai sınır durumu için % 0,2 ila % 2 arasında ve hizmet verilebilirlik sınır durumu için % 0,8'den az tahmin edilmiştir.

Geoteknik analiz Şekil 1.1'de gösterildiği gibi jeolojik model, zemin modeli ve geoteknik model olmak üzere üç tip modelden oluşur. Her tip model farklı seviyelerde belirsizlikler içermektedir. Bu belirsizliği değerlendirmek için yapılan güvenilirliğe dayalı tasarımda istatistiksel yöntemler kullanılır.



Şekil 1.1 Jeolojik model, zemin modeli ve geoteknik model arasındaki ilişki
(Keaton, 2013)

1.1.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Güvenilirlik Analizi

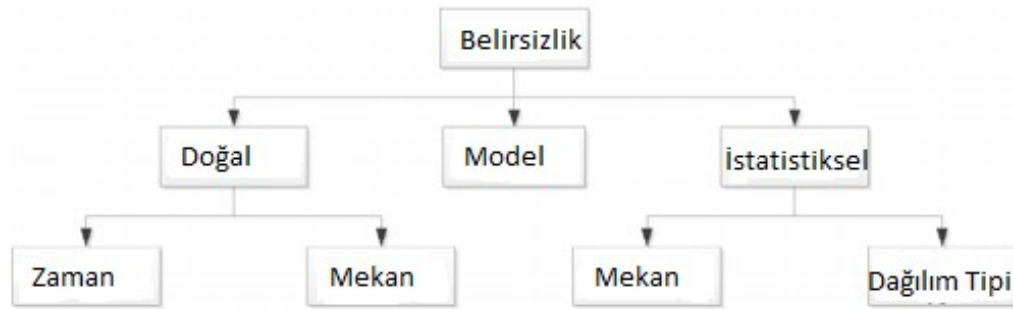
Sonlu Elemanlar Yöntemi(SEY), temel olarak servis durumunda olası deformasyonu hesaplamak için geliştirilmiştir. Sonlu Elemanlar Yöntemi sayesinde geoteknik problemlerin karmaşık analizini yapmak ve zemin davranışının anlaşılması daha kolay hale gelmeye başlamıştır. SEY programları kullanıcı dostu hale geldikçe ve bilgisayar kapasitesi arttıkça geoteknik yapıların tasarımında daha yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Limit dengeye dayalı tasarımlarda da kullanılabilmekte ve özellikle analitik modellerin tatmin edici sonuç vermediği karmaşık problemlerin çözümünde daha verimlidir. Ancak limit dengeye dayalı tasarımda SEY uygulaması analitik veya ampirik modellerden farklı olabilir ve bu nedenle analiz sonuçlarının dikkatlice değerlendirilmesi önerilir.

Tasarım sürecinde temel sorun temel ve zemin etüdü yöntemlerinin sınırlı miktarda olması ve yetersiz olmasından dolayı karşılaşılan parametre belirsizliğidir ve/veya deneylerden elde edilen verilerin literatür kullanılarak dönüştürülmesiyle oluşturulan parametrelerdeki dönüşüm belirsizliğinin yüksek olmasıdır. Bu sebeplerle güvenilirlik analizi yöntemlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile birlikte kullanılması faydalı olarak görülmektedir. SEY ile güvenilirlik analizi yapmak için, stokastik olarak kabul edilen her parametreye, saha deneyleri veya mühendislik tecrübesi ile tahmin edilen belirli bir olasılık yoğunluk fonksiyonu atanır. Bu şekilde

malzeme parametrelerinin mekansal değişimi de gözönüne alınabilir. Modelde zemin ortamına atanan stokastik özellik, belirli bir olasılık dağılımından rastgele olarak alınır.

1.1.3 Belirsizlik ve Duyarlılık Analizi

Geoteknikte belirsizlik, tasarım için toplanan eksik yada yeterli olmayan bilginin ve olası bir yanılmanın ölçüsü olarak tanımlanabilir. Bu nedenle bir olayın/göçmenin gerçekleşme olasılığı irdelenmelidir.

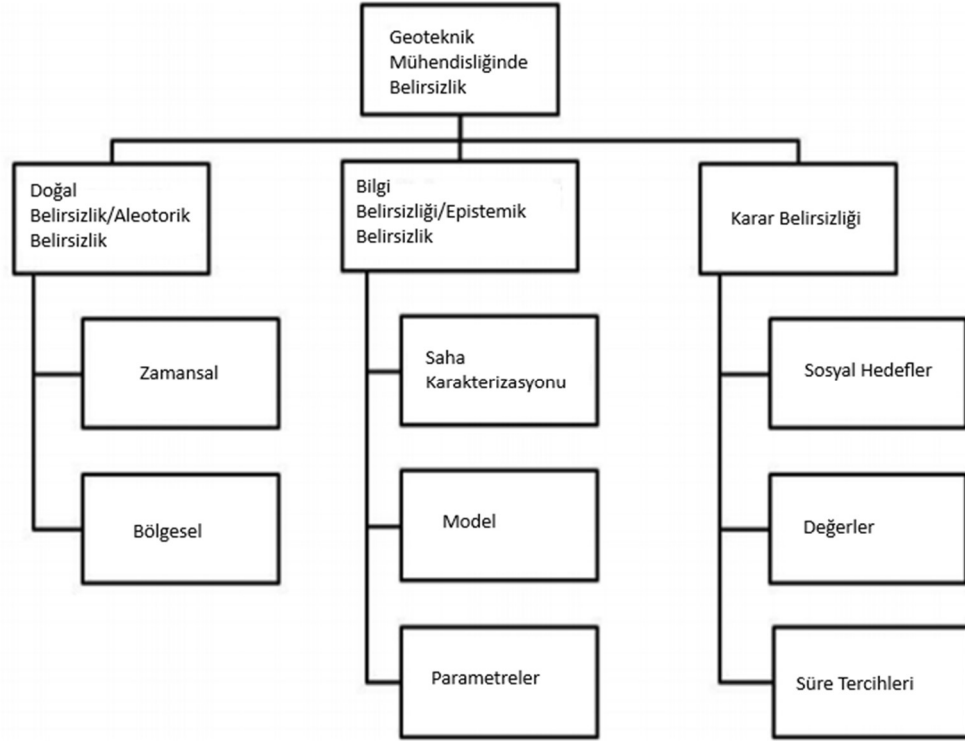


Şekil 1.2 Belirsizlik türleri (Van Gelder,2000)

Şekil 1.2’ de gösterildiği gibi Van Gelder (2000) tanımına göre belirsizlik kaynakları doğal değişkenlik, model ve istatistiksel belirsizliktir. Doğal değişkenlik, zemin ve kaya kütlelerini üreten ve sürekli olarak değişime uğratan jeolojik süreçlerin sonucudur (Phoon ve Kulhawy 1999a). Doğal değişkenlik bilgi geliştikçe azaltılamayan olarak nitelendirilebilir. (Baecher ve Christian 2003; Wang ve Cao 2013; Wang ve Aladejere 2015). Doğal belirsizliklere ayrıca jeolojik, sismik ve iklim değişimleri gibi doğadaki rastlantısallık da katkıda bulunur. Zemin ve kaya özelliklerini belirlemek için istatistiksel çıkarımlar yapıldığında sınırlı miktarda bilgi kullanılabildiği için istatistiksel belirsizlik ortaya çıkar (Sari ve Karpuz 2006; Wang vd., 2016; Wang ve Zhao 2016a). Tasarımda, sahada bulunan zemin yada kaya ortamının gerçek davranışının eksiksiz bir şekilde modellenmesi pek mümkün değildir. Tahmin edilen davranışın gerçek davranıştan sapması model belirsizliği ile ifade edilmekle birlikte seçilen tasarım hesaplama yöntemi ile sınırlı olduğu göz ardı edilmemelidir.

Belirsizlikleri modellemeye yönelik olasılıklı yöntemler, son birkaç yılda geoteknik mühendisliğinde kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır (örneğin, Whitman, 1984; Baecher ve Christian, 2003; Fenton ve Griffiths, 2008; Phoon ve Ching, 2015).

Geoteknik mühendisliğindeki belirsizlik, Şekil 1.3'te gösterildiği gibi aleatorik, epistemik ve karar modeli belirsizliği olarak kategorize edilebilir. (Baecher & Christian ,2003).



Şekil 1.3 Geoteknik mühendisliğinde belirsizlik türleri (Baecher ve Christian,2003)

Aleatorik belirsizlik, doğal süreçlerin içsel rastgeleliği olarak tanımlanan doğal değişkenlikle ilişkilidir. Diğer bir deyişle, bir parametrenin rastgele davranabilmesinden kaynaklanan belirsizlik türüdür. Epistemik belirsizlik, bir parametre hakkında bilgi eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik türüdür. Gerçekçi bir model yaratma yolunda zeminin mühendislik özelliklerinin tam ve doğru olarak anlaşılmasına engelleyici unsur olarak da ifade edilebilir. Geoteknik tasarımda karşılaşılan belirsizliklerin gözden geçirilmesiyle belirsizlik kaynaklarının çoğu aleatorik belirsizlikten ziyade epistemik belirsizliktir (Baecher ve Christian, 2003). Son olarak, karar belirsizliği sosyal hedeflerin farkında olmanın ve planlama seçimlerini tahmin etmenin zorluğunu tanımlar. Epistemik belirsizlik istatistiksel ve model belirsizliği olmak üzere iki alt gruba ayrılabilir. İstatistiksel belirsizliğin kaynağı parametre ve dağılım belirsizliğidir. Parametre belirsizliği eksik bilgi olmasından yada parametre tahmin yönteminin yetersiz olmasından

kaynaklanmaktadır. Dağılım belirsizliği ise rastgele olarak seçilen bir verinin hangi olasılıksal dağılıma sahip olacağını tahmin etmede karşılaşılan güçlükten kaynaklanmaktadır. Normal dağılım, log-normal dağılım, Gumbel, Beta dağılımı güvenilirliğe dayalı tasarımda kullanılan dağılım tiplerindendir. Bu çalışma kapsamında yaygın olarak kullanılan normal ve log-normal dağılım açıklanmıştır. Özellikle sadece pozitif değerler alan zemin parametreleri log-normal dağılım rastgele değişkenleri ile modellenenilmektedir (Spry vd., 1988).

1.Normal Dağılım (Gauss Dağılımı)

Bu dağılım türü $-\infty$ ve $+\infty$ arasındaki rastgele bir değişkenin herhangi bir değeri için geçerlidir. Dağılım, ortalama etrafında simetriktir doğrudan verilerden tahmin edilebilir. Örneğin, bir zeminin su içeriği normal bir dağılım sergiler. Normal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu (1.1) eşitliği ile hesaplanabilmektedir.

$$f_x(x) = (1/\sigma_x\sqrt{2\pi}) \exp (-1/2 [(x-\mu_x) / \sigma_x]^2) \quad -\infty < x < +\infty \quad (1.1)$$

Burada; σ_x ortalama ve μ_x standart sapmadır.

2.Log-normal Dağılım

Log - normal dağılımda değişkenler 0 ile $+\infty$ arasında değerler alırlar. Geoteknik mühendisliği çalışmalarında zeminlerin mühendislik parametrelerinin çoğu sıfırdan büyük değerler alması dolayısıyla geoteknik problemler için yapılan güvenilirliğe dayalı tasarım çalışmalarında log-normal dağılım daha uygun olmaktadır. Örneğin, zeminin elastisite modülü, sürtünme açısı negatif değerler alamaz.

Log-normal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu (1.2) eşitliği yardımıyla belirlenebilmektedir.

$$f_x(x) = (1/\zeta_x x \sqrt{2\pi}) \exp (-1/2 [(\ln x - \lambda_x) / \sigma_x]^2) \quad 0 \leq x < +\infty$$

$$\lambda_x = E(\ln X) = \ln \mu_x - 1/2 \zeta_x^2 \quad (1.2)$$

$$\zeta_x^2 = \text{Var} (\ln X) = \ln [1 + (\sigma_x / \mu_x)^2] = \ln (1 + \delta_x)$$

Genel olarak, zemin özelliklerinin mekânsal değişkenliği belirsizliğin kaynaklarından yalnızca biri olmasına rağmen, güvenilirliğe dayalı tasarım söz konusu olduğunda, en belirgin belirsizlik kaynağı olarak kabul görmektedir. Birçok tasarımda karşılaşılan problemlerde, istatistiksel tahmin hatası, hesaplama modeli hatası ve deney sonuçlarından elde edilen (örneğin SPT-N değerleri) zemin parametrelerinin belirlenmesine yönelik dönüşüm hatası daha yüksek belirsizlik gösterir.

Hatayı ölçmek için ise tutarlılık ve çarpıklıktan/sapma durumuna değinilmek gerekmektedir. Çarpıklık, deneysel veri hatasının bir ölçüsüdür ve deneysel veri sayısına bağlıdır. Numune/gözlem sayısı arttıkça, N, ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması sabit bir değere yaklaştırmaya başladığında tahminler daha tutarlı bir şekilde değerlendirilir.

Belirsizlik etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla ve farklı belirsizlik kaynaklarının ilgilenilen değişkenler üzerindeki katkısını bulmak için bir duyarlılık analizi yapılabilir. Duyarlılık analizi önemli olan veriyi ayırt etmeye yardımcı olmaktadır. Bir belirsizlik analizi yapmadan önce model ve hesaplama çabasını daha uygun bir hale getirmek amacıyla daha az önem arzeden parametreleri belirlemek için tavsiye edilir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezde zemin olarak nitelendirilen malzemelerin, mühendislik özelliklerinin geniş bir aralıkta değişmesindeki belirsizliğin öngerme ankrajlı derin kazı destekleme sistemlerinin tasarımına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda dikkate alınan tek sıra öngerme ankrajlı bir derin kazı destekleme sisteminin tasarımı deterministik ve olasılıksal olarak gerçekleştirilmiştir.

1.3 Hipotez

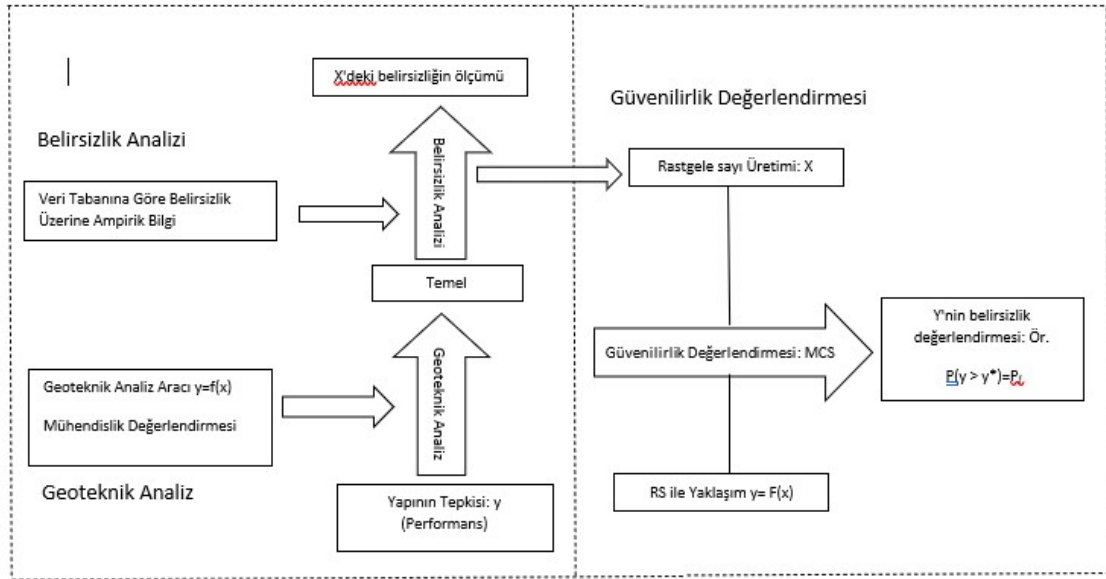
Öngerme ankrajlı destekleme sistemlerinin tasarımında geoteknik belirsizlikler dikkate alınarak güvenilirlik analizi yapılabilir.

BELİRSİZLİKLER DİKKATE ALINARAK GÜVENİLİRLİĞE DAYALI TASARIM

2.1 Güvenilirlik Analizi

Güvenilirlik analizi temelde olasılık teorisine dayanmaktadır. Olasılık teorisi ile belirsiz olan yük ve dayanım koşullarına dayalı olarak göçme olasılıkları elde edilir. Olasılık kuramı sayesinde mühendislikte çeşitli belirsizlikler göreceli olarak değerlendirilebilir ve uygun ihtiyat seviyelerine karar verilebilir.

Bir sürecin ya da sistemin güvenilirliği, meydana gelmesi istenmeyen olayları göçme kriterleri kullanılarak analiz edilir. Sonuç olarak genellikle bir güvenilirlik endeksi veya bir göçme olasılığı elde edilir. Güvenilirliğe dayalı tasarım için önerilen şema Şekil 2.1’de özetlenmektedir.



Şekil 2.1 Güvenilirliğe dayalı tasarım şeması

Şekil 2.1’de belirtilen temel değişkenler, tasarımla ilişkili çevresel etkiler, geoteknik parametreler, malzeme özellikleri, yapının şekli ve boyutu, sınır koşullarının tamamını kapsar. Şema; geoteknik tasarım, temel değişkenlerin belirsizlik analizi ve güvenilirlik değerlendirilmesi olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır. Temel

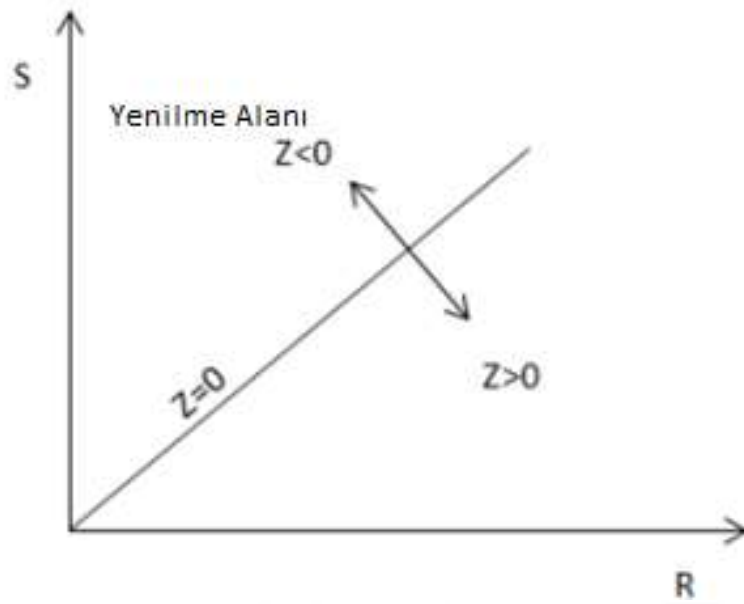
değişkenlerin belirsizlik analizi kısmı güvenilirliğe dayalı tasarımın ana unsurudur (Honjo, 2011).

Güvenilirliğe dayalı tasarımda bir rastgele değişkendeki belirsizlik, genellikle olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) ve kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) ile modellenenir. Bu fonksiyonların belirlenmesi için parametrelerin tahmin edilmesi gerekmektedir. Parametrelerin tahmin edilmesi genellikle daha önce yapılan çalışmalar neticesinde mevcut olan verilerden elde edilen ortalama (μ) ve varyasyon katsayısı (COV) kullanılarak yapılır.

Geoteknikte güvenilirliğe dayalı tasarımda karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, analizde kullanılan değişken parametreler sahadan sahaya değişmesidir. Bu durum analizde kullanılacak olan varyasyon katsayısı (COV) değerlerini önceden belirlenmesini zorlaştırmaktadır.

2.1.1 Güvenilirlik Analizinin Esasları

Mühendislikte bir elemanın /unsurun/faktörün güvenilirliği söz konusu olduğunda göçme olasılığının belirlenmesi temel ilkedir. Göçmenin olduğu ve olmadığı durum arasındaki sınır, bir sınır durumu olarak ifade edilmektedir ve güvenilirlik bu sınır durumunun aşılma olasılığını incelemektedir. Şekil 2.2’de limit denge durumları gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Limit denge durumları

Sınır durumları genel biçimiyle limit denge durumları ile aşağıda verildiği şekilde eşitlik 2.1 ile belirlenir.

$$P=R-L \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte R, göçmeye karşı direnç ve L, yük olarak tanımlanmıştır. Limit denge fonksiyonunun (P) sıfırdan büyük olması gerekmektedir ($P>0$). Aksi takdirde sistem başarısız olmaktadır.

Hem dayanımın hem de yükün oluşturduğu verilerin/miktarların çoğu belirsiz olmakla beraber tasarımın temel amacı, performans kriterinin bir yapının ömrü boyunca geçerli olmasını sağlamaktır. Bu sebeple, performans kriterini karşılama olasılığı güvenilirlik olarak ifade edilir. Güvenilirlik belirli koşullar altında başarısız olmama olasılığını verirken genellikle göçme olasılığına bakılır. Başarısız olma ve olmama olasılıkları birbirini tamamlayıcı nitelikte olduğu için toplamaları 1'dir.

Göçme olasılığı Eşitlik (2.2) ile aşağıdaki gibi belirlenir:

$$P_f = \frac{n_f(P = R - L \leq 0)}{N} \quad (2.2)$$

Bu nedenle, göçme olasılığı Eşitlik (2.3a) ve (2.3b) gösterildiği gibi güvenilirliği tamamlar:

$$P(Z > 0) = 1 - P_f \quad (2.3a)$$

$$P(Z > 0) = 1 - P_f \quad (2.3b)$$

Sistem güvenilirliği göçme olasılığı ve güvenilir endeksi Eşitlik (2.4) ile ifade edilir:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (2.4)$$

Φ : Standart normal olasılık dağılım fonksiyonudur.

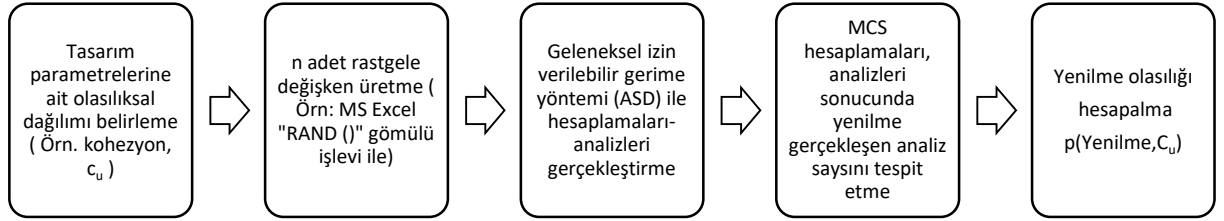
2.1.2 Güvenilirlik Analizi Yöntemleri

Güvenilirliğe dayalı tasarım için en fazla tercih edilen yöntemler arasında birinci derece güvenilirlik metodu (FORM), birinci derece ikinci moment yöntemi (FOSM), tek nokta tahmin yöntemi (PEM) ve Monte Carlo Simülasyonu (MCS) bulunmaktadır. Son yıllarda tasarımda en çok Monte Carlo simülasyon yöntemi kullanılmasıyla birlikte bu tez kapsamında da Monte Carlo simülasyonu tercih edilmiştir. Monte Carlo simülasyonu, olasılık teorisinin ayrıntılı bilgisini gerektirmemesi sebebiyle basit bir güvenilirlik analizi yöntemidir (Honjo, 2011).

2.1.3 Monte Carlo Simülasyon Yöntemi

Monte Carlo simülasyonu, rastgele sayılar kullanılarak çok sayıda çözüm yapıp gerçekleştirileceklerin elde edilmesine dayalı olasılıksal bir yöntemdir. Bu yöntemde rastgele değişkenlerin elde edilmesi için olasılık dağılım fonksiyonları kullanılabilir. Her simülasyon bir ya da birden fazla rastgele olarak belirlenen değişkenin bir dizi değerinin oluşturulmasıyla elde edilir (Zevgolis ve Bourdeau, 2010) . Simülasyon işlemi sonunda her tekrar edilen işlemin sonucu, fiziksel bir deney ile gözlemlenebilen bir örneğe benzer şekilde, gerçek çözümün bir örneği kabul edilir (Wang, 2013). Şekil 2.3'te Monte Carlo Simülasyonu akış şeması gösterilmektedir. Bu olasılık yaklaşımı geoteknik model tasarım kavramsal olarak üç temel adım içerir (Wang, 2013):

- 1) Deterministik yöntemlerle bir hesaplama modeli oluşturmak
- 2) Tasarımda ilgili belirsizlikleri belirlemek ve olasılık dağılımına karar vermek
- 3) Monte Carlo simülasyonunu gerçekleştirmek ve istatistiksel analiz yapmak



Şekil 2.3 Monte Carlo simülasyonu akış şeması (Wang vd, 2016)

Gerçekleştirmeleri birçok kez tekrarlayarak, göçme olasılığı Eşitlik (2.5) ile tahmin edilebilir:

$$P_f \approx \frac{n_f}{n} \quad (2.5)$$

Burada, n toplam simülasyon sayısını n_f ise başarısız/yenilen simülasyon sayısını ifade etmektedir.

Monte Carlo simülasyonu için kullanılan her bir parametrenin varyasyon katsayıları (COV), bu tür parametrelerin fiziksel olarak olası aralıkları hakkında günümüze kadar elde edilen bilgilere ve çeşitli araştırmalarda verilen önerilere göre seçilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında parametrelerin Bölüm 1’de bahsedilen log-normal dağılımı sergilediği kabul edilmiştir. Literatürde mevcut olan bazı zemin parametreleri için varyasyon katsayıları Tablo 2.1’de sunulmuştur.

Tablo 2.1 Tipik varyasyon katsayıları

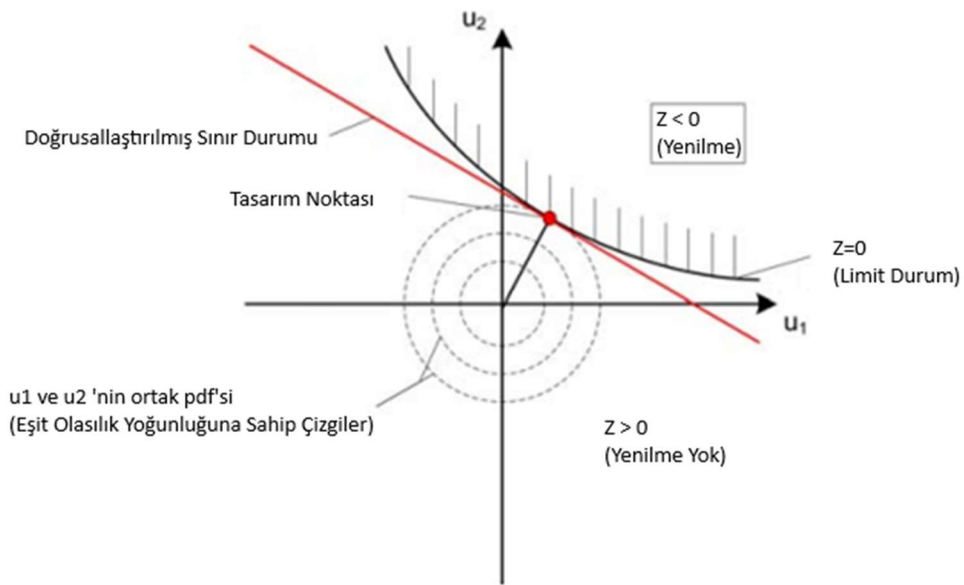
Zemin	Cov Φ (%)	Cov c (%)
Çakıl	2-15	-
Kum	2-15	-
Silt	5	20-30
Kil	10	15-25

MCS, şev stabilitesi gibi geoteknik mühendisliğinde güvenilirlik analizlerinin dikkate alındığı problemlerin çözümü için yaygın olarak kullanılmaktadır (Baecher

ve Christian, 2003; Griffiths ve Fenton 2004; El-Ramly vd., 2005; Low, 2008; Wang vd., 2010, 2011), istinat duvarları (Chalermyanont ve Benson, 2004; 2005; Fenton, vd., 2005; Goh, vd. 2009; Zevgolis ve Bourdeau 2010) ve temeller (Phoon, vd., 2006; Wang ve Kulhawy 2008; Misra ve Roberts 2009).

2.1.4 Birinci Derece Güvenilirlik Yöntemi (FORM)

Rackwitz (2000), bir sistemin güvenliğinin veya performansının bir güvenilirlik indeksi ile ölçüldüğü birinci dereceden güvenilirlik yöntemi (FORM) ile güvenilirlik sorunlarının % 90'ının doğru bir şekilde çözülebileceğini belirtmiştir. Birinci Derece Güvenilirlik Yöntemi'nde "Birinci Derece" terimi, sınır durum fonksiyonunun Şekil 2.4'te görüldüğü gibi doğrusallaştığını ifade eder.



Şekil 2.4 U-uzayda iki boyut için tasarım noktası ve doğrusallaştırılmış sınır durumu (Schweckendiek, 2006)

Hasofer ve Lind (1974), Birinci Derece Güvenilirlik Yöntemi olarak bilinen geometrik bir yoruma da yol açan başka bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde ilk adım olarak rastgele değişkenler eşdeğer standart normal dağılımlı değişkenlere dönüştürülür. Normal dağılımlı değişkenler için adım aşağıdaki gibidir:

$$u_i = \frac{x_i - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \quad (2.6)$$

Burada; x_i değişkenler, μ ortalama, σ standart sapmadır.

2.1.5 İkinci Derece Güvenilirlik Yöntemi (SORM)

İkinci Derece Güvenilirlik Yöntemi (SORM), FORM yönteminin hesaplanmasıyla başlar ve FORM yöntemiyle belirlenen tasarım noktasında ikinci dereceden bir düzeltme yapılır. Limit durum fonksiyonu, fonksiyonda bulunan bazı değişkenlerin normal olması ya da bazı rastgele değişkenler arasındaki ilişki sebebiyle doğrusal olmayabilir, bu durumda SORM yöntemi kullanılabilir. Korelasyonlu değişkenlerin korelasyonsuz değişkenlere dönüşümü doğrusal olmama durumuna sebep olabilir.

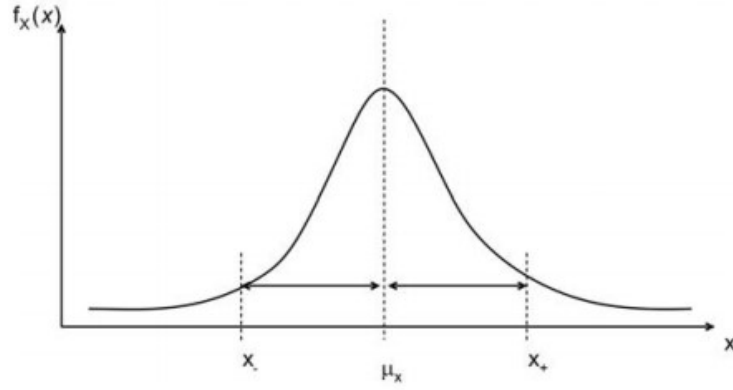
Limit Durum Fonksiyonu'nun tasarım noktasındaki doğrusallaştırılmış formu Eşitlik (2.7) ile ifade edilebilir (Schweckendiek, 2006).

$$Z_{lin} = Z(\mathbf{u}^*) + \sum \alpha_i (u_i - u_i^*) = 0 + \sum \alpha_i u_i - \sum -\alpha_i^2 \beta = \beta + \sum \alpha_i u_i \quad (2.7)$$

2.1.6 Nokta Tahmin Yöntemi (PEM)

Nokta Tahmin Yöntemi'nde (PEM) temel düşünce belirli bir olasılık yoğunluk fonksiyonunu aynı ilk üç merkezi momentle (ortalama değer μ , standart sapma σ ve çarpıklık ψ) ayrık bir fonksiyonla değiştirmektir.

Geoteknik model tasarım sürecinde Nokta Tahmin Yöntemi (PEM) kullanılarak daha az sonlu elemanlar analizi ile çözüm sağlanabilir. Zhou ve Nowak (1988) bu yaklaşımı kullanmışlardır. "Yöntem, çok sayıda rastgele değişkenli bir fonksiyonun istatistiksel parametrelerini hesaplamak için basit bir sayısal entegrasyon geliştirir. Temel değişkenlerin örnekleri, standart normal uzayda önceden seçilen noktaların temel değişken uzayına dönüştürülmesiyle elde edilir" [Zhou ve Nowak, 1988]. Şekil 2.5 'te olasılık değişim grafiği gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Olasılık değişim grafiği

2.1.6.1 Birinci Derece İkinci Moment Yöntemi (FOSM)

Birinci Derece İkinci Moment Yöntemi (FOSM) istatistiksel olarak bağımsız normal veya lognormal olarak dağıtılmış değişkenlerle sınırlıdır. Ayrıca bir yapının güvenilirlik seviyesinin kaba tahminleri için uygun olan ve sınır durum fonksiyonuna kayıtsız olmayan bir yöntemdir. Performans fonksiyonu $Z=R-S$ olduğundan (R:direnç, S:yük) göçme $R<S$ veya $R-S<0$ olarak ifade edilir ve güvenilirlik indeksi β , Z'nin ortalama değerinin ve standart sapmasının oranıdır ve Eşitlik (2.8)'de olduğu gibi ifade edilir.

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (2.8)$$

2.2 Güvenilirliğe Dayalı Tasarımda Güvenilirlik Endeksi

Güvenilirliğe dayalı tasarımın amaçlarından biri hedef göçme olasılığı (P_f) yada hedef güvenilirlik indeksi (β_T) gibi olasılık terimleriyle ifade edilen uygun güvenilirlik derecelerine sahip tasarımlar yapmaktır.

Tablo 2.2 Güvenilirlik indeksi (β) ve göçme olasılığı (P_f) arasındaki ilişki (US Army Corps of Engineers, 1997)

Güvenilirlik Endeksi β	Göçme Olasılığı $P_f = \Phi(-\beta)$	Beklenen Performans Seviyesi
1	0.16	Tehlikeli
1.5	0.07	Tatminsiz
2.0	0.023	Yetersiz

Tablo 2.2 Güvenilirlik endeksi (β) ve göçme olasılığı (P_f) arasındaki ilişki (US Army Corps of Engineers, 1997 (devamı))

2.5	0.006	Ortalamanın altında
3.0	0.001	Ortalamanın üstünde
4.0	0.00003	İyi
5.0	0.0000003	Yüksek

Not: $\Phi()$ = standard normal CDF

Güvenilirliğe dayalı tasarımlarda parametrelerin belirsizlikleri incelenir/dikkate alınır ve güvenlik güvenilirlik endeksi ile değerlendirilir (Babu ve Basha, 2008). Tablo 2.2’de, geoteknik yapıları için güvenilirlik endeksleri ve bu endekslere karşılık gelen göçme olasılıkları ile sistemden beklenen performans seviyeleri ilişkilendirilmiştir (US Army Corps of Engineers, 1997). Çoğu geoteknik yapısı için güvenilirlik endeksleri, (P_f) Tablo 2.2’de gösterildiği gibi, yaklaşık 1 ile 4 arasındadır. Tablo 2.3’te farklı kodlarda bulunan nihai sınır denge (ULS) ve hizmet verebilirlik sınır denge (SLS) durumları için güvenilirlik endeksi değerleri gösterilmektedir.

Tablo 2.3 Çeşitli güvenilirliğe dayalı tasarım kodlarında hedef güvenilirlik endeksi (β_t) özet tablosu

Tasarım Kodu	ULS β_t	SLS β_t
Elektrik Gücü Araştırma Enstitüsü (EPRI) çoklu direnç ve yük faktörü tasarımı (MRFD)	3.2	2.6
Kanada Otoyol Köprüsü Tasarım Kodu (CHBD 2014)	3.1 – 3.7	2.3 – 3.1
Kanada Ulusal Bina Kodu (NCBC)	3.5	Mevcut değil

Tablo 2.3 Çeşitli güvenilirliğe dayalı tasarım kodlarında hedef güvenilirlik endeksi (β_t) özet tablosu (devamı)

Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilisi Birliği (AASHTO) kuruluş tasarım kodu	2.0 – 3.5	Mevcut değil
Eurocode 7	4.7	2.9

Tablo 2.3'te özetlendiği üzere AASHTO Köprü Tasarım Şartnamesi'ne göre geoteknik sistemler için hedef güvenilirlik için 3.5 mertebeleri uygun görülmüştür (AASHTO, 2012). Farklı tasarım kodları için en yüksek güvenilirlik endeksi değeri nihai sınır denge durumunda (ULS) ve 4,7 değerinde, en düşük güvenilir endeksi değeri hizmet verebilirlik sınır denge durumunda (SLS) ve 2,3 olarak kabul edilmektedir.

2.3 Göçme Olasılığı ve Göçme Mekanizmaları

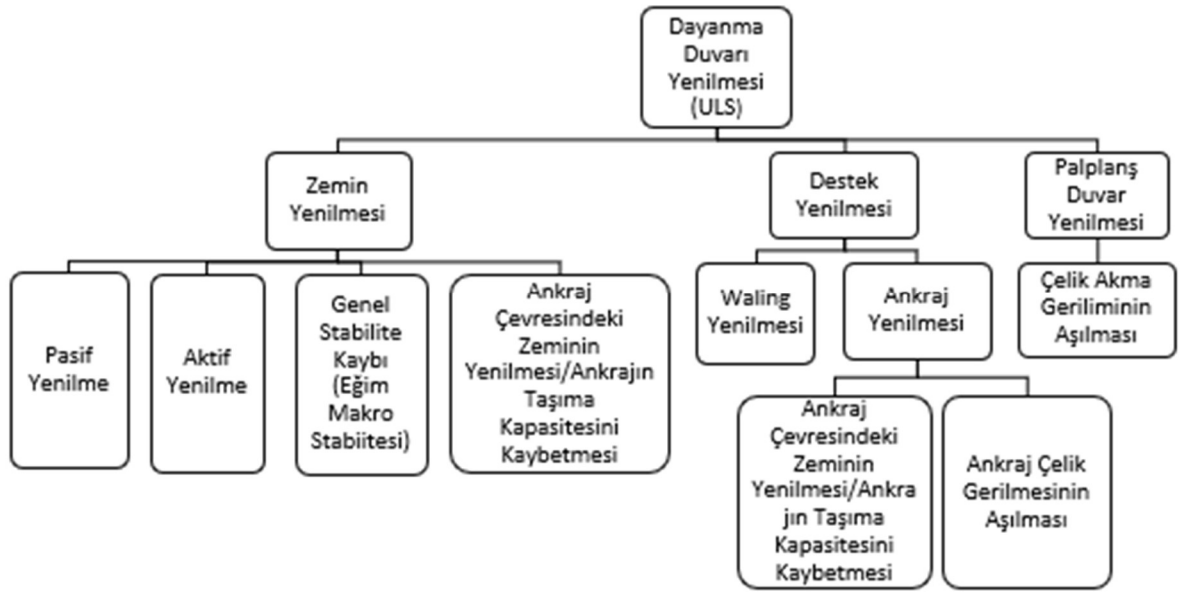
Bir yapının, geoteknik sistemin veya bileşenlerinin güvenilirlik analizi söz konusu olduğunda, karşılık gelen yapısal elemanların farklı göçme durumlarının tanımlanması gerekmektedir. Hizmet Verebilirlik Sınır Durumu (SLS) ve Nihai Sınır Durumu (ULS) için ayrı ayrı göçme olasılığı hesaplanabilmektedir. Her ikisi için de farklı gereksinimler vardır ve bu sebeple toplam bir göçme olasılığı ile birleştirilmeyeceklerdir.

Göçme olasılığı P_f , ULS için bir üst sınır, üç bileşen katkısının da ilişkisiz olduğu varsayılarak elde edilebilir:

$$P_{f,ULS} = P_{f,sp} + P_{f,soil} + P_{f,supp} \quad (2.9)$$

$P_{f,sp}$ palplanş duvarın göçme olasılığı, $P_{f,soil}$ zeminin göçme olasılığı, $P_{f,sup}$ destek sistemin göçme olasılığıdır.

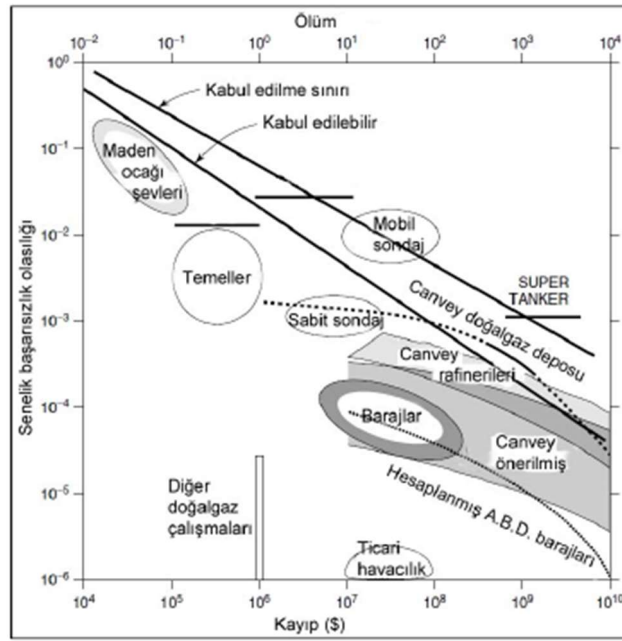
Ankrajlı palplanş duvarlı dayanma yapıları için göçme ağacı Şekil 2.6'da verilen şemada gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Ankrajlı palplanş duvarlı dayanma yapıları için göçme ağacı (Schweckendiek, 2006)

Yeterli sayıda deney verisi elde etmenin pek mümkün olmadığı durumlarda, tasarımda girdi olarak kullanılacak parametreleri eksiksiz bir şekilde belirlemek ve göçmenin olabileceği koşulları tespit etmek kolay bir şekilde mümkün olmamaktadır. Güvenilirliğe dayalı tasarımda söz konusu tasarım için uygun bir hedef göçme olasılığı (P_T) seçilmelidir.

Kabul edilebilir riski tahmin etmek amacıyla farklı türde mühendislik yapılarının tasarımı için farklı grafikler kullanılmaktadır. Bu grafiklerin bir örneği ortalama yıllık göçme olasılığını farklı tipte inşaat mühendisliği yapıları için aşağıdaki Şekil 2.7’de gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Çeşitli geleneksel inşaat tesisler ve diğer büyük yapılar veya projeler tarafından oluşturulan ortalama yıllık riskleri gösteren grafik (Baecher ve Christian, 2003)

2.4 Limit Durum Fonksiyonu

Sınır durumu meydana gelmesi istenen ve istenmeyen durum arasındaki sınır olarak ifade edilir. Sınır durumunun kendisi göçme alanına aittir. Güvenilirliğe dayalı tasarımda Limit Durum Fonksiyonları (LSF), bir sistemin durumunu limit durumuna göre tanımlamak için matematiksel bir denklem ile ifade edilmesidir. Genellikle verimli bir güvenilirlik analizi yapmak için yeterli bir sınır durum fonksiyonu formülasyonu yapılmalıdır. Bu tez çalışmasında Nihai Sınır Durumu (ULS) ölçütleri ile sınır durum fonksiyonları oluşturulmuştur. Sınır durum fonksiyonunu Z ile ifade edilir. Temel rastgele değişkenler X 'in bir fonksiyonudur:

$$Z = f(X) \quad (2.10)$$

Üç durum ayırt edilebilir:

- $Z > 0$: istenen durum (göçme yok)
- $Z = 0$: sınır durumu
- $Z < 0$: istenmeyen durum (göçme)

Sınır durum fonksiyonu şu şekilde ifade edilir:

$$Z=R-S \quad (2.11)$$

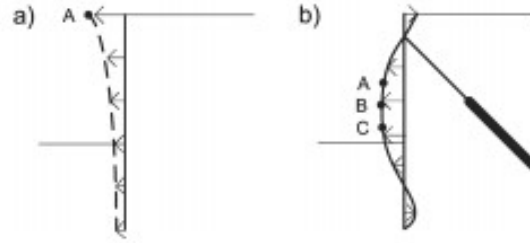
Burada R bir yapının direnci ve S yüküdür. Bu durumda göçme direnci aşan yük olarak tanımlanır ve güvenilirlik analizinde aşma olasılığı hesaplanmaktadır.

2.4.1 Hizmet Verebilirlik Sınır Durumu

Hizmet verebilirlik Sınır Durumu (SLS), inşa edilen bir yapının hizmet verme fonksiyonunu kaybetmesine yol açabilecek yada dolaylı olarak diğer yapılara zarar verebilecek aşırı deformasyonları önlemek adına tasarım hesaplarında kontrol edilir. Bu sınır durumunun genel formülasyonu yalnızca maksimum kabul edilebilir yer değiştirmelerin aşılma olasılığını belirleme şeklindedir.

$$Z= u_{adm} - u \quad (2.12)$$

Eşitlik 2.12 'de bahsedilen u_{adm} izin verilen maksimum yer değiştirme ve u hesaplanan yer değiştirmedir.



Şekil 2.8 Palplanş duvarlar: a) Ankrajlı olmayan b) Ankrajlı (Tek sıra)

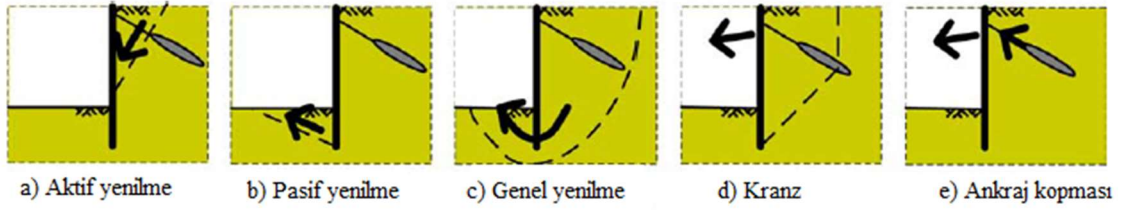
Hesaplanan yer değiştirmenin belirlenmesi her yapı türü için deformasyon davranışı hakkında bilgi gerektirmektedir. Şekil 2.8' de gösterilen tipik bir palplanş duvarını incelenmesi durumunda;

1. Ankrajlı olmayan bir palplanş duvar da en büyük yer değiştirmelerin A noktasında gelmesi beklenilmektedir.
2. Ankrajlı bir palplanş duvar yapısında ise maksimum yer değiştirmeleri belirleyen bir nokta ya da düğüm açıkça yoktur.

2.4.2 Nihai Sınır Durumu

Nihai Sınır Durumu (ULS), yapısal göçmeyi tanımlar. Her ilgili yapısal bileşen için uygun limit durum fonksiyonları kullanılır. Zeminin kayma mukavemeti ile ilgili

çeşitli göçme mekanizmaları mevcuttur. Analitik veya diğer yaklaşım yöntemlerini kullanarak bunların değerlendirilmesi mümkündür (Schwekendiek, 2006). Derin kazılar için bazı göçme mekanizmaları Şekil 2.9'da gösterilmektedir.



Şekil 2.9 Ankrajlı destekleme sistemleri için zemindeki göçme mekanizmaları (Schwekendiek, 2006)

Aktif göçme durumunda (Şekil 2.9a) duvarın kazıya doğru yer değiştirmesi söz konusudur. Zemindeki kayma gerilmeleri kayma dayanımını aştığında kayma düzlemi oluşur ve zemin kaması çöker.

Pasif göçme (Şekil 2.9b) yanal yükler pasif toprak direncini aşmaktadır. Bu göçmede, yanal gerilmeler artar ve duvarın deforme olması sebebi ile kayma mukavemeti daha büyüktür. Bu göçme türü, palplanş duvar uzunluğunun olduğundan daha az öngörülmesi sebebiyle meydana gelmektedir.

Genel göçme (Şekil 2.9c) durumu, yapının etrafında bir kayma düzlemi oluştuğunda meydana gelmektedir.

Çok kısa tasarlanmış ankrajlar bir zemin bloğunun çökmesine (Kranz Stabilitesi) Şekil 2.9d'de gösterildiği gibi göçmeye sebep olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında nihai sınır durumu olarak Kranz stabilitesi incelenmiştir.

Ankrajın etrafındaki zeminin kayma direncinin aşılması ankrajın kopmasına sebep olmaktadır (Şekil 2.9e)

DERİN KAZILAR VE DESTEKLEME SİSTEMLERİ

Medeniyetin gelişmesi ve artan nüfus kentlerin kalabalıklaşması yüksek ve yeraltı yapılarının kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Endüstrileşme sonucu ortaya çıkan bu yapıların inşası için gerekli derin kazılar kent ortamında şevli kazı yapılamadığı için desteklenmesi ihtiyacı doğmuş ve böylece kazı destekleme elemanları ve yöntemleri geliştirilmiştir. 6m'den daha derin kazılar, derin kazı olarak nitelendirilmekte ve bunların desteklenmesinde çoğunlukla uygun bir istinat yapısı inşa edilmektedir. Destekli kazı projelerinin hayata geçirilmesinde stabilite problemleri, deformasyon problemleri, su sızdırmazlık problemleri vb. karşılaşılabilmektedir. Bu problemleri çözmek amacıyla ve teknolojik gelişmelerin yardımıyla alternatif olarak çok sayıda destek yöntemi geliştirilmiştir. Bu bölümde derin kazıları destekleme yöntemleri ele alınmış olup güncel derin kazı destekleme yöntemlerinden bahs olunmuştur.

3.1 İçten Destekli Kazılar

Bu kazı destekleme sistemi palplanş, kazık veya betonarme perdeler (diyafram duvar) gibi karşılıklı düşey taşıyıcı elemanlar ve yatay destekleme elemanları ile teşkil edilir. Yatay taşıyıcı elemanlar genellikle çelik boru, profil ve kafes kirişler veya ahşap kirişlerdir. Şekil 3.1'de çelik boru destekli kazı yöntemi gösterilmiştir. Bu yatay taşıyıcı elemanlar düşey taşıyıcı elemanlara kuşak kirişler ile bağlanır. Düşey taşıyıcıların kazık olması durumunda bu kazıklar kuşak kirişler yanında başlık kirişleri ile birbirine bağlanır. İçten destekleme sistemlerini teşkil etmede yaygın kullanılan diğer bir yaklaşım Berlin Duvarı olarak adlandırılan istinat yapısıdır. Berlin Duvarı'nda temel prensip kazı sınırlarına belirli aralıklarla çakılan H veya I kirişlerin aralarına ahşap elemanlar yerleştirilerek kazı yüzeyinin kaplanmasıdır. İçten destekli kazılarda düşey elemanlar kazı öncesi, yatay destekler ve kuşaklar ise adımsal kazı yapıları olarak teşkil edilirler.

İçten destekli kazılar her türden kazı alanı ve derinliği için uygulanabilir bir yöntem olup kazı sırasında oluşabilecek yer değiştirme ve deformasyonların kazıda ve.

evresinde soruna yol açmasını önlemede başarılı bir yöntem olduğundan kazı genişliğinin fazla olmadığı durumlarda sıkça tercih edilen bir kazı destekleme yöntemidir. İçten destekli kazılarda yatay destekler yanında diyagonal ve köşe destekler de kullanılabilir. Yatay destekler, istinat duvarının arkasında bulunan yükleri taşımak için yerleştirilirken diyagonal destekler de yatay desteklerin üzerine gelen yükü azaltmak için kullanılırlar. Köşe destekleri imalat için yer kazandırmak amacıyla köşelere diyagonal olarak yerleştirilir. Gğsleme kirişleri, toprak basınçlarını yatay ve diyagonal desteklere dağıtmak için istinat duvarının kazı içine bakan tarafına yerleştirilir.



şekil 3.1 elik boru destekli kazı yöntemi

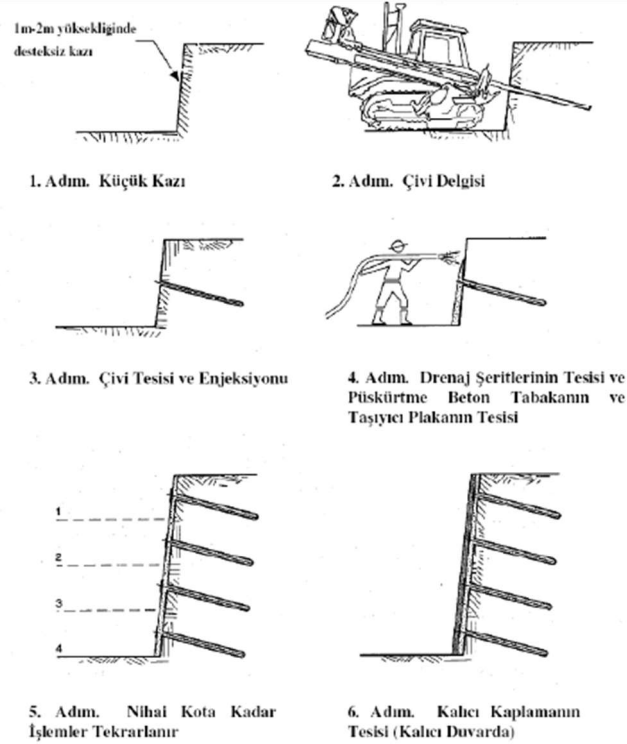
3.1.1 Zemin vileri ile Derin Kazıların Desteklenmesi

Zemin vileri derin kazıların ve şevlerin stabilitesini artırmak için yaklaşık 50 yıldır kullanılmaktadır. şekil 3.2’de gösterildiği gibi özellikle kalıcı kazıların desteklenmesi için kullanılan bu zemin vileri ulaştırma yapıları yarma şevlerinde sıkça kullanılmaktadır (Clouterre, 1991). Öngermeli zemin ankrajlarına benzer şekilde yatayla düşük açılarda (5°-15°) yapılan sondaj delgileri ile oluşturulan deliklere elik veya fiber donatı sürülerek betonlanmakta ve betonun mukavemetini alması sonrasında donatı elamanı başlık kısmına yerleştirilen plakaya tutturulmaktadır. Her kazı kademesinde bu şekilde teşkil edilen zemin vileri tasarımıda n grldği şekilde belirli aralıklarla imal edilmektedir. Zemin vilerine ngirme hiç uygulanmamaktadır veya çok düşük mertebelerde uygulanmaktadır. Zemin vileri çevresindeki zemin ortamının yer değiştirmesi sonucunda yük almaya başlamaktadır.



Şekil 3.2 Zemin çivili kazı yöntemi

Zemin çivileri sıradan inşaat çeliği ile imal edilirler, uygulandığı zeminle birlikte esnek bir sistem oluştururlar ve imal edildikten sonra bakım gerektirmezler. Şekil 3.3'te zemin çivili duvarların yapım aşamaları gösterilmiştir. Bu yüzden kazılarda ve şevlerde uygulanması sıkça tercih edilir.

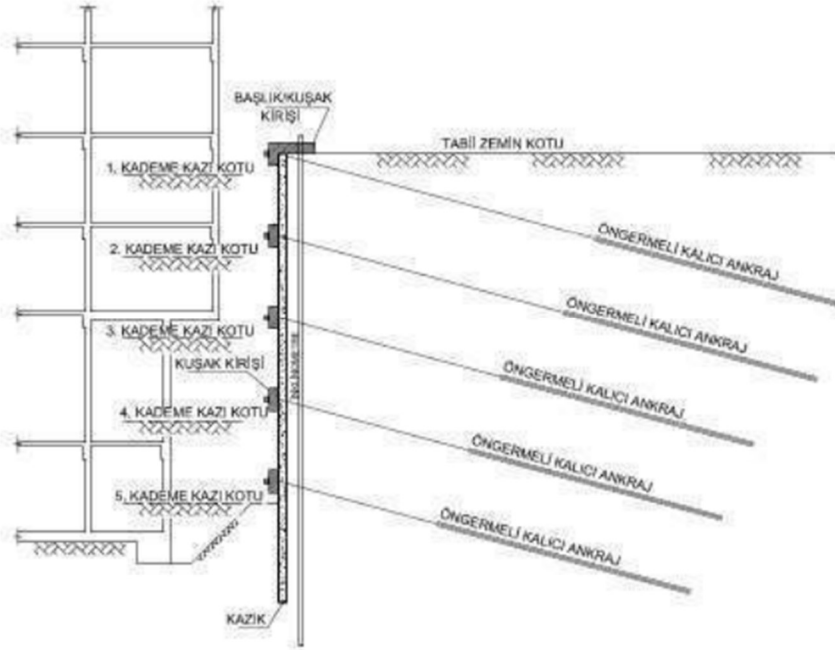


Şekil 3.3 Zemin çivili duvarların yapım aşamaları (Byrne,R.J. ve diğerleri,1998)

3.2 Dıştan Destekli Kazılar

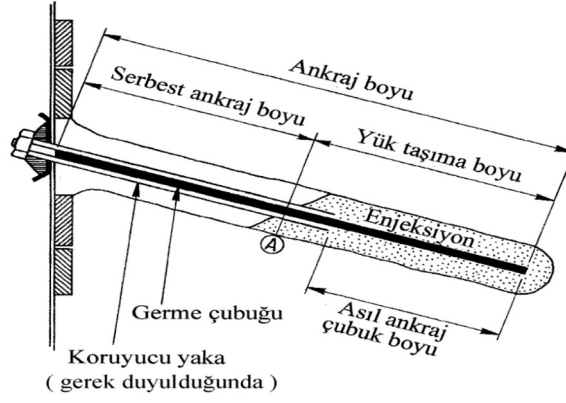
3.2.1 Öngermeli Ankrajlı Kazı Yöntemi

Öngermeli ankrajlar cepheye etki eden yanal toprak basınçlarını aktif kayma kamasının dışında yer alan zemine ileterek kazının güvenliğini sağlarlar. İçten destekli kazılarda olduğu şekilde kazı öncesinde kazı sınırlarında imal edilen düşey taşıyıcı iksa elemanları adımsal kazı yapılarak zemin çivisinde olduğu gibi sondaj delgisi yapılarak yüksek mukavemetli donatı yerleştirilip kök kısmı enjeksiyonlanır. Enjeksiyonun mukavemetini alması sonrasında özel bağlantı elemanları ile düşey taşıyıcılara veya kuşak kirişlerine yerleştirilen ankraj plakaları ve başlıklara yüksükler ile bağlanır. Yüksükler kök kısmından zemine bağlanan yani ankrajlanan donatının hidrolik krika ile gerilmesi sonrasında öngerme yükünün kilitli kalmasını sağlar. Şekil 3.4'te öngerme ankrajlı kazı sistemi gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Öngerme ankrajlı kazı (Çınar, 2010)

Öngermeli ankrajlar serbest bölge ve kök bölge olmak üzere iki ana kısımdan oluşur (Şekil 3.5). Aktif kayma kamasının dışında bulunan ve zemin tabakası içerisinde enjeksiyonlanan kısım kök bölgedir. Aktif kayma kaması içerisinde bulunan enjeksiyonsuz kısım ise serbest bölgedir. Ankrajlı sistemlerde istenilen derinlikte delgiler açılır ve bu delgilerin içerisine ankraj elemanları yerleştirilerek istenen bölgelere enjeksiyon işlemi uygulanır.



Şekil 3.5 Ankraj elemanları

Ankrajlı kazılarda izlenmesi gereken uygulama adımları aşağıdaki gibidir:

- 1) İlk kademe kazısı yapılır.
- 2) Belirlenen açı ve kot değerleriyle delgiler açılır.
- 3) Delgilere ankraj yerleştirilir.
- 4) Ankrajların enjeksiyonu yapılır.
- 5) Prizini tamamlamış ankrajlara belirlenen yüklerde öngerme kuvveti uygulanır ve kilitlenir.
- 6) İkinci kademe kazı yapılır ve ankraj imalatı tekrar edilir.
- 7) Temel kazı kotuna ulaşılarak yapı temeli inşa edilir.
- 8) Bina döşemeleri oluşturularak iksa sistemi ve binanın inşaatı.

Öngerme ankrajlı destekleme yapılarının duraylılığında gözetilmesi gerekli durumlardan bir tanesi ankrajın gerilmesi ile birlikte ankraj kökünün belirlediği bir zemin kamasının ana kitleden koparılmasına karşı yeterli güvenliğin sağlanıp sağlanmadığıdır.

3.3 Derin Kazılarda Düşey Taşıyıcılar

3.3.1 Palplanş Duvarlar

Palplanş duvarlar toprak yüklerini karşılamak amacıyla yan yana sıra ile çakılarak oluşturulan iksa sistemidir. Çakılma yöntemleri ise darbe, titreşim veya basınç olabilir. Uygulama yönteminin seçilmesi zemin tabakasının özelliklerine bağlıdır. Genel olarak, inşa esnasında yapıya hasar verecek yatay zemin itkilerinden

korunmak ve/veya su tutma yapılarında suyu inşaat sahasından uzaklaştırmak amacıyla kullanılır. Palplanş duvarlar, ahşap, betonarme ve çelik palplanş duvarlar olmak üzere üç tipte imal edilirler. Çelik olanları mukavemeti çok olduğundan ve yeniden kullanılabilirdiği için en sık tercih edilenidir. Şekil 3.6'da palplanş duvara bir örnek gösterilmektedir. Kazı alanında yeraltı suyu yüksekse geçirimsizlik perdesi olarak kullanılırlar. Palplanş perdelerin yapımında yeraltı suyunun uzaklaştırılmasına gerek yoktur. Genellikler yer altı su seviyesinin yüksek olduğu ya da taşıma gücünün düşük olduğu zeminlerde kullanım alanı bulurlar.

Palplanş duvarlar yarı geçirimsiz olarak çakıldıklarında sıkı kumlarda borulanma, gevşek kumlarda kabarma görülebilir. Kabarma, palplanş topuğunda oluşacak kaldırma kuvvetinin o nokta üzerindeki zemin kolonunun su altındaki ağırlığını aşınca meydana gelmektedir. Borulanma veya kabarmayı önlemek için palplanş belirli bir derinliğe kadar uzatılmalıdır.



Şekil 3.6 Palplanş duvara bir örnek

3.3.2 Mini Kazık Duvarlar

Mini kazık sistemi daha çok normal kazık ekipmanının yaklaşmadığı tavan yüksekliği sınırlı bodrum katları, temel yanları vb. yerlerde kullanılmaktaydı. Sondaj ve enjeksiyon tekniğindeki gelişmeler sonucu bugün mini kazıklar hem çekme hem de basınç taşıyan elemanlar olarak kullanılabilir. Mini kazıklar genelde 10 cm ile 30 cm arasında çaplarda çimento şerbeti enjeksiyonu ile hazırlanmaktadır. Mini kazıkların moment taşıma kapasiteleri düşük olacağı göz önünde bulundurulduğunda önlerine yapılacak betonarme perdeler ile dayanımları artırılabilir. Donatı olarak beton çeliği veya özel çelik profiller kullanılabilir.

Mini kazıklar genellikle sürtünme kazıkları olarak projelendirilmektedirler. Yani zemine yükleri beton kesitlerinin yüzeyi boyunca oluşan srtnmelerle aktarmaktadırlar. şekil 3.7’de mini kazık uygulamasından bir örnek gösterilmektedir.



şekil 3.7 Mini kazık uygulaması

3.3.3 Fore Kazık Duvarlar

Kazıklar fore ve çakma kazıklar olmak üzere ikiye ayrılır. Çakma kazıklar, önceden imal edilen prekast betonarme kazıkların veya elik profillerin zemine çakılması veya vibrasyonla sürülmesiyle inşa edilmektedirler. Fore kazıklarda ise imalat, auger, karotiyer, rotary ile zeminde delgi yapıldıktan sonra donatı kafesi veya elik profilin yerleştirildikten sonra kuyuya beton dökülmesiyle yapılmaktadır.

Fore kazıklar kazıklı temel uygulamalarında sık sık kullanılan bir yöntem olduğu gibi zemin destekleme amacıyla da kullanılabilmektedirler. şekil 3.8’de fore kazıklar ve öngerme ankrajlarla desteklenmiş bir derin kazı gösterilmektedir. Kazıkların çapları, toprak basınçlarının büyüklüklerine, şekline ve taşıma kapasitelerine göre değişmektedir. Bu uygulama pek çok saha ve zemin koşulunda gerçekleştirilmektedir. Fore kazıklar projeye göre aralıklı, teğet veya kesişen kazıklar olarak uygulanabilirler.

Fore kazıklı duvarların diğer istinat duvarlarına avantajları arasında imalat sırasında çakma kazıklar veya palplanş perdelerde olduğu gibi vibrasyon ve gürültü olmaz, kazık boylarının istenilen derinlikte imal edilebilir, karotiyerle kayalarda imalat yapılabilir ve palplanş perdelerden daha rijit olmaktadır. Dezavantajları arasında ise imalat süresinin palplanş perdelerden daha uzun olması, diyafram duvarlardan daha az rijitliğe sahip olması ve etkinliğinin büyük ölçüde işçiliğe bağlı olması gelmektedir.



Şekil 3.8 Fore kazıklar ve öngerme ankarajlarla desteklenen bir derin kazı

3.3.4 Kesişen Kazık Duvarlar

Kesişen kazık duvarlar zemini destek amacıyla kullanılırlar. Kazıklar arasında boşluk kalması ve bunun sonucu olarak da su tutuculuğun azalması kesişen kazık duvarlarda meydana gelmez. Kesişen kazıklı duvarlarda bütün kazıklara donatı koyulmalıdır çünkü kazık betonları arasında bir mukavemet farklılığı yok ise bütün kazıklar yatay yüklere karşı beraber ve eşit olarak karşı koyarlar. Kesişen kazıklar genellikle teğet veya aralıklı fore kazıklarla imal edilen diğer duvar yöntemlerine göre daha pahalı bir çözümdür.

3.3.5 Kuyu Tipi Betonarme Perdeler

Kuyu perde imalatı makine ve ekipmanın zor çalışabileceği dar alanlarda çok sık tercih edilmektedir. En önemli tercih sebebi mevcut yapıların tam sınırından veya temelının altından kuyu perde imalatı yapılabilir. Ancak, işçiliğinin zorluğu, su seviyesinin altında ve her zeminde kolaylıkla yapılamaması nedeniyle özel projeler dışında tercih edilmemektedir (Çınar, 2010)

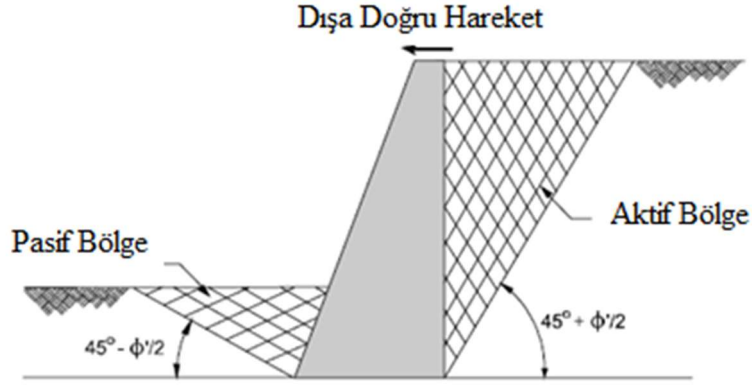
Kuyu tipi betonarme perdeler zemin destekleme yöntemlerinden sıkça kullanılan yöntemlerdendir. Zeminin kendini tutabilmesi halinde ve yeraltı su seviyesinin derinde olması durumunda kullanılan bir yöntemdir.

3.3.6 Diyafram Duvarlar

Diyafram duvarlar çok katlı yüksek binalar, yer altı otoparkları, endüstriyel tesisler, hidroelektrik santraller, atıksu arıtma tesisleri, tanklar ve depolar ve derin şaftlar gibi birçok yapının inşasında kullanılmaktadırlar. Bu yöntem her zemin türü ve hemen hemen her derinlikte kullanılabilirler. Duvar kalınlıklarının fazla olmasından dolayı yapının taşıyıcı perdeleri olarak da kullanılmaktadır. Diyafram duvar tiplerinin sınıflandırılması, duvarın fonksiyonuna bağlıdır. Genellikle geçirimsizlik perdesi veya bir kazıyı tutan yapı elemanı olarak ya da her iki fonksiyonu bir arada sağlayan yapı elemanı olarak projelendirilirler. Diyafram duvarlar kuyu yöntemi veya özel geliştirilmiş kazı makineleri ile kazılan anolarlarla imal edilen betonarme perdelerdir.

Kuyu tipi duvar yönteminin uygulanabilmesi için yeraltı su seviyesinin kuyu derinliğinin altında olması ve zeminin kendini tutabiliyor olması gerekmektedir. Kumtaşı, kıltaşı gibi kaya özelliği gösteren zeminlerde uygulanması iyi sonuçlar verir. Kuyu tipi duvar imalatı için kazı projede belirtilen kuyu tabanına kadar devam ettirilir, konsol olarak çalışan perdelerde kuyu derinliği kazı tabanının oldukça altına indirilmektedir. Kuyuların kazısı tamamlandıktan sonra betonarme perdenin kalıp ve donatısı hazırlanır. Kuyu tipi betonarme perdeler 1,5 -3,0 m aralığında anolar halinde dökülürler. Diyafram makineleri ile imal edilen diyafram duvarların imalat aşamaları aşağıdaki gibidir:

- 1) İstenilen derinlikte kuyu kazılır. Kuyunun stabilitesini sağlamak amacıyla kuyu içine bentonit çamuru pompalanır (Şekil 3.9).
- 2) Kuyunun kenarına stop-end ismi verilen dairesel bir boru indirilir.
- 3) Bentonit çamuru ile dolu olan kuyu içerisine dışarıda hazırlanmış ve bağlanmış olan diyafram duvarın donatısı indirilir.
- 4) Tremi boruları aracılığıyla kuyuya beton dökülür. Kuyunun kenarına yerleştirilen dairesel boru beton prizini almaya başladıkça kademeli olarak çekilir ve beton kesiti oluşur.



Şekil 3.10 Bir dayanma yapısında aktif ve pasif bölgeler

Sükunetteki toprak basıncı katsayısı zemin türlerine göre değişmektedir. Tablo 3.1’de zemin türlerine göre K_0 değer aralıkları verilmiştir.

Tablo 3.1 Zemin türlerine göre K_0 değerleri (Yıldırım, 2019)

Zemin Türü	K_0
Gevşek Kum	0,50
Sıkı Kum	0,35
Sıkıştırılmış Kum	1 - 1,5
Normal Konsolide Kil	0,5 - 0,7
Aşırı Konsolide Kil	1-4
Sıkıştırılmış Kil	1 - 2

Sükunetteki toprak basıncı katsayısı Eşitlik 3.1 ile hesaplanmaktadır.

$$P_0 = \frac{\gamma \cdot H^2 \cdot K_0}{2} \quad (3.1)$$

Bir z derinliğinde meydana gelen yanal toprak basıncı Eşitlik 3.2 ile belirlenmektedir.

$$\sigma_h = \sigma_v \cdot K \quad (3.2)$$

σ_h = Yanal toprak basıncı

σ_v = Düşey toprak basıncı

K = Yanal toprak basıncı katsayısı

K değeri zeminin türüne, gerilme tarihçesine vb. etkenlere göre değişiklik göstermektedir.

Toprak basınçlarını hesaplamak için klasik olarak Rankine (1857) yada Coulomb (1776) teorilerinden yararlanılır.

3.4.1 Rankine Toprak Basıncı Teorisi

Rankine (1857), zeminin plastik denge durumundaki halinin gerilme koşullarını araştırmıştır. Rankine teorisi dayanma yapısının arkasında bulunan zeminin gerilme ve dayanım koşulları hakkında varsayımlar içermektedir. Bu teoride zeminin plastik denge durumuna ulaştığı andaki gerilmeler dikkate alınmaktadır.

Aktif ve pasif durumda elemana etkiyen düşey gerilme sabit kalmaktadır. Fakat aktif durumda yatay gerilmenin değeri göçme oluşuncaya kadar azalarak, pasif durumda ise artarak, sabit bir değere ulaşır.

Φ kayma mukavemeti açısı olmak üzere granüler zeminlerde aktif ve pasif toprak basıncı katsayısı Eşitlik 3.3 ve Eşitlik 3.4 ile hesaplanmaktadır.

$$K_A = \frac{1 - \sin \Phi'}{1 + \sin \Phi'} = \tan^2 (45 - \Phi' / 2) \quad (3.3)$$

$$K_P = \frac{1 + \sin \Phi'}{1 - \sin \Phi'} = \tan^2 (45 + \Phi' / 2) \quad (3.4)$$

Kohezyonlu zeminlerde ise Eşitlik 3.5 ve Eşitlik 3.6 ile bulunmaktadır.

$$K_A = \tan^2 (45 - \Phi' / 2) - \frac{2c'}{\sigma'_v} \tan (45 - \Phi' / 2) \quad (3.5)$$

$$K_P = \tan^2 (45 + \Phi' / 2) + \frac{2c'}{\sigma'_v} \tan (45 + \Phi' / 2) \quad (3.6)$$

$$K_0 = \nu / (1 - \nu) \quad (3.7)$$

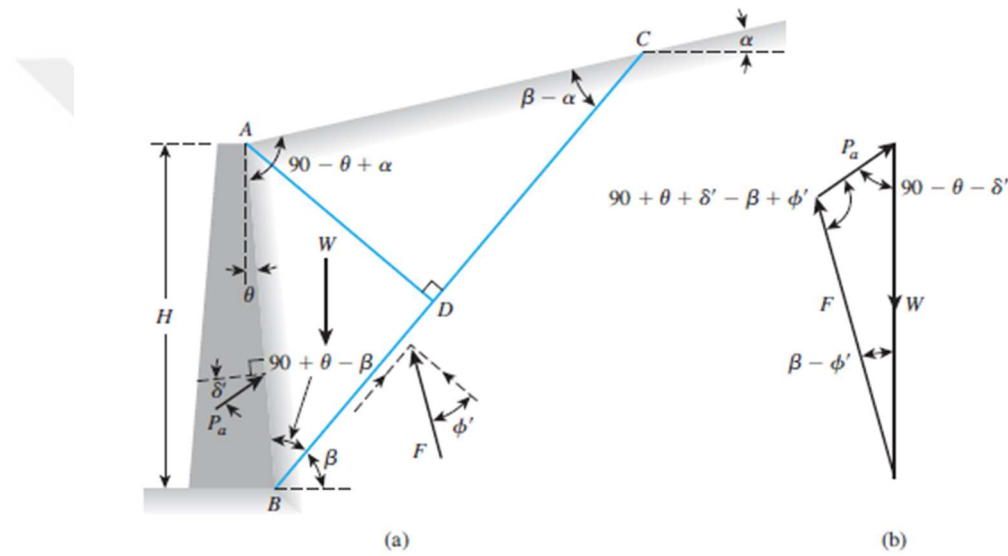
İdeal bir zemin ortamında sükunetteki toprak basıncı Eşitlik 3.7 ile bulunmaktadır. Burada ν poisson oranıdır.

Rankine Toprak Basıncı Teorisi kullanılarak dayanma yapısına etki eden yanal toprak basıncının belirlenmesi sadece duvarın taban ucu etrafında dönmesi ya da duvarın eğilmesi sonucu dışa doğru hareketi ile olabilir (Das,1995). Ayrıca bu teori

ile aktif basınç dağılımı hesabında kohezyonun (c) etkisi görmezden gelinip dolgunun kayma mukavemeti açısı için bir tahminde bulunmaktadır.

3.4.2 Coulomb Toprak Basıncı Teorisi

Coulomb 1776 yılında bir takım varsayımlara dayalı bir toprak basıncı teorisi ortaya koymuştur. Rankine teorisinin aksine duvar ile zemin arasında sürtünme dikkate alınmaktadır. Duvar arkasındaki zemin ortamında oluşan kayma yüzeyini düzlemsel olarak varsayması da bu kabullerinden biridir. Bu teoride duvar öne ya da arkaya doğru hareket ederken duvar arkasında oluşan ve kayan zeminin dengesi dikkate alınmıştır.



Şekil 3.11 Coulomb aktif toprak basıncı göçme kama yüzeyi (a) ve kuvvet vektörü (b) (Das,1990)

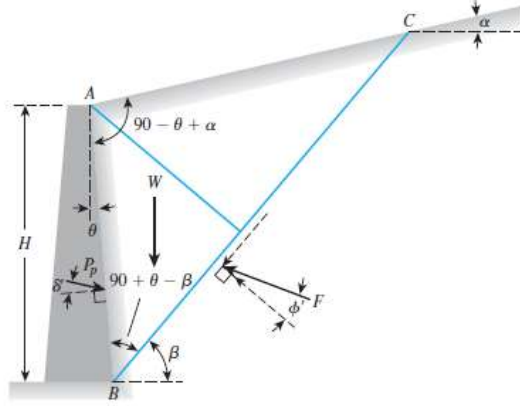
Şekil 3.11’de gösterilen zeminin ağırlığı W ile, BC göçme yüzeyindeki kesme ve normal kuvvetlerin bileşkesi F ile, duvarın birim uzunluğu başına aktif kuvvet Pa ile temsil edilmektedir. Şekil 3.12’te ise Coulomb pasif basınç göçme kaması ve kuvvet vektörleri gösterilmektedir.

Coulomb aktif toprak basıncı Eşitlik (3.8) ile bulunmaktadır.

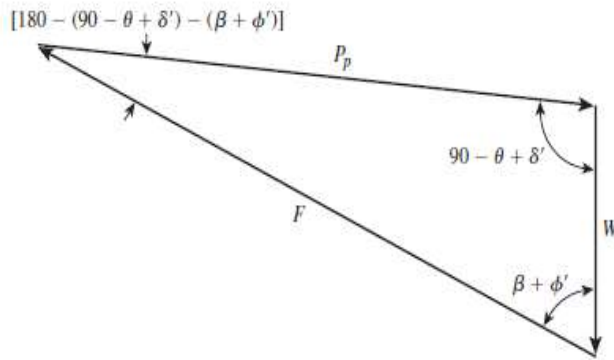
$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (3.8)$$

Coulomb aktif toprak basıncı katsayısı ise Eşitlik 3.9 ile bulunmaktadır.

$$K_a = \frac{\sin^2(\alpha + \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (3.9)$$



(a)



(b)

Şekil 3.12 Coulomb pasif basınç göçme kaması (a) ve kuvvet vektörleri (b)

Coulomb pasif toprak basıncı Eşitlik (3.10) yardımı ile bulunmaktadır.

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 \quad (3.10)$$

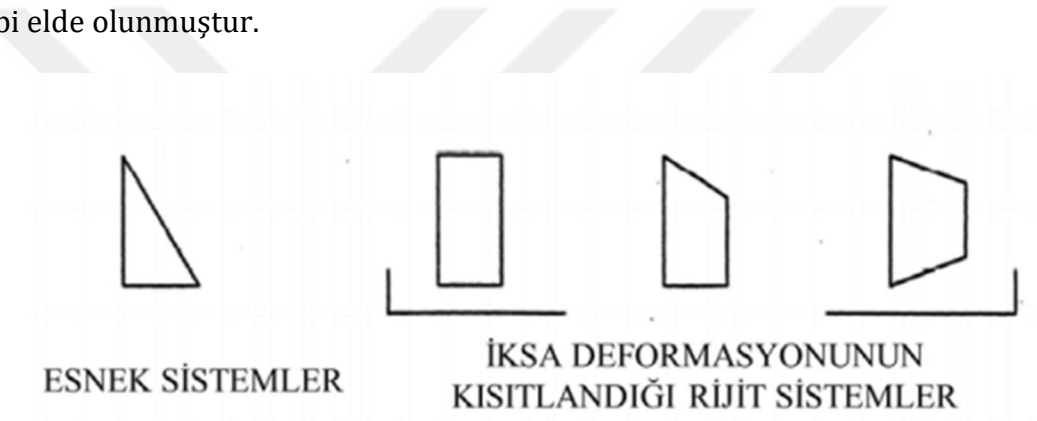
Coulomb pasif toprak basıncı katsayısı ise Eşitlik (3.11) ile bulunmaktadır.

$$K_p = \frac{\sin^2(\alpha - \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha + \delta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + \beta)}{\sin(\alpha + \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (3.11)$$

3.5 Destekli Kazılarda Yanal Toprak Basınçları

Destekli kazı sistemlerinde izin verilen deformasyon derecelerine göre rijit yada esnek davranış görülmektedir. Yatay iç destekli iksa sistemleri rijit davranış, konsol palplanş veya kazıklı iksa sistemleri esnek davranış, ankrajlı palplanş veya kazıklı iksa sistemleri izin verilen deformasyona göre esnek yada rijit davranış sergilemektedir.

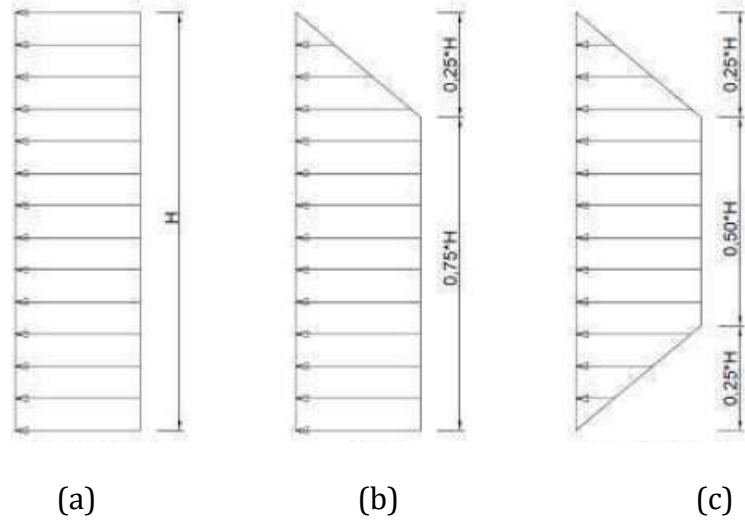
Esnek davranış gösteren destekli kazı sistemlerinde genel zemin basıncı dağılımı üçgen şeklinde, deformasyonu sınırlandırılmış rijit sistemlerde ise daha farklı olduğu yapılan arazi ölçümleriyle tespit olunmuştur. Bu ölçümlere göre esnek ve rijit dayanma yapılarına etkiyen toprak basınçları zarfları Şekil 3.13'te gösterildiği gibi elde olunmuştur.



Şekil 3.13 Esnek ve rijit sistemlerde zemin basıncı dağılım şekli (Önal O.)

Kazı aşamasında yapılan destekler zeminin yanal hareketini kısıtlamaktadır. Bu sebeple desteğe gelen yükler aktif basınç denklemleriyle hesaplanan değerlerden daha fazla olmaktadır (Yıldırım,2019.). Destekleme sistemi gerektiren kazılarda da toprak basınçları Coulomb ve Rankine teorisine benzemektedir. Fakat iksalı kazılarda konsol dayanma yapılarına göre farklı toprak basınçları oluşmaktadır.

Terzaghi ve Peck (1967) farklı zemin türlerine göre destekli kazılarda toprak basıncı dağılımı önermiştir. Şekil 3.14'de Peck tarafından önerilen toprak basıncı dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 3.14 Peck (1969) tarafından önerilen kum (a), yumuşak ve orta katı killer (b), sert killer (c) için toprak basıncı dağılımları (Das,1990)

Kum zeminler için Eşitlik (3.12) kullanılmaktadır.

$$\sigma_a = 0.65\gamma H \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad (3.12)$$

Yumuşak ve orta katı killer için (Şekil 3.14-b) Eşitlik (3.13), (3.14) ve (3.15) bağıntıları kullanılmaktadır.

$$N_o = \frac{\gamma H}{c_u} > 4 \quad (3.13)$$

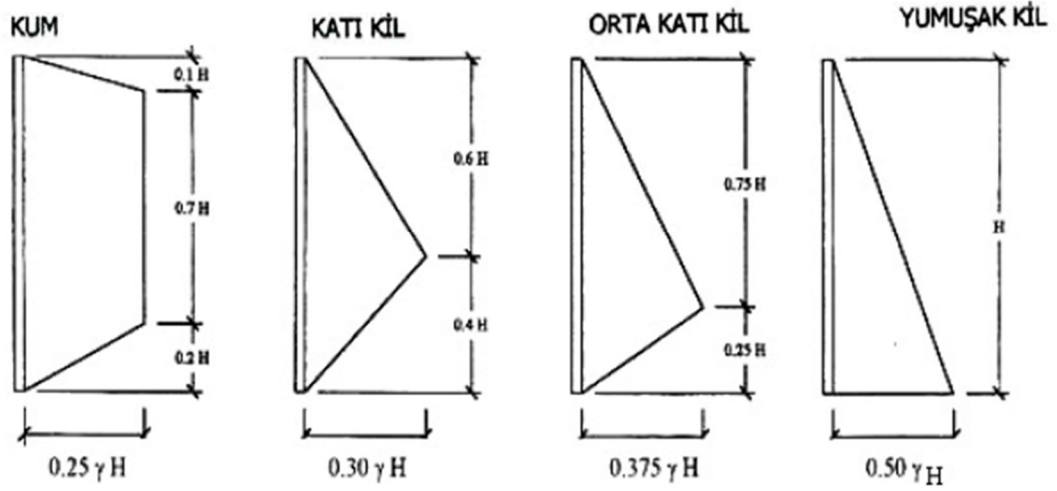
$$P_a = \left(1 - \frac{4c_u}{\gamma H}\right) \gamma H > 0.25 \quad (3.14)$$

$$P_a = 0.3\gamma H \quad (3.15)$$

Sert killer için (Şekil 3.14-c) Eşitlik (3.16) kullanılmaktadır.

$$P_a = 0.2\gamma H - 0.4\gamma H \quad (3.16)$$

Destekli kazılarda oluşabilecek yanal toprak basıncı dağılımı için Tschobotarioff (1973) tarafından da öneriler sunulmuştur. Şekil 3.15'te Tschobotarioff tarafından önerilen toprak basıncı dağılımı sunulmuştur.



Şekil 3.15 Tschebotarioff tarafından önerilen toprak basıncı dağılımı

Bu öneri ile kohezyonsuz zeminlerde toprak basıncı dağılımı Eşitlik (3.17) yardımıyla,

$$\sigma_a = 0.25 \gamma H \quad (3.17)$$

Katı kil zeminlerde Eşitlik (3.18) yardımıyla,

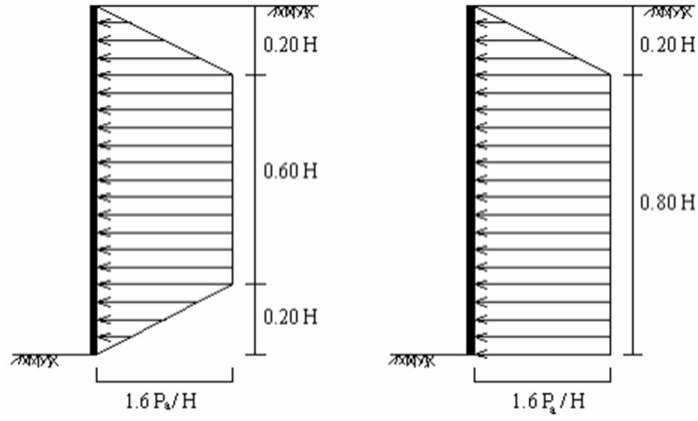
$$\sigma_a = 0.3 \gamma H \quad (3.18)$$

Orta katı kil zeminlerde Eşitlik (3.19) yardımıyla,

$$\sigma_a = 0.5 \gamma H \quad (3.19)$$

Bulunmaktadır.

İsveç (1974) yapı şartnamesinde yanal toprak basıncı dağılımı için öneriler bulunmaktadır ve Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16 İsviçre yapı şartnamesi (1974) tarafından önerilen sıkı (a) ve gevşek (b) kohezyonsuz zeminler için toprak basıncı dağılımı

$$P_a = 1.6 P/H \quad (3.20)$$

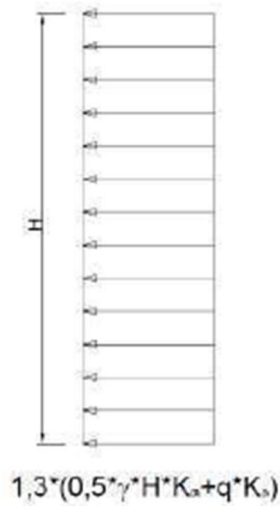
Bu şartname gereği yanal toprak basıncı Eşitlik (3.20) ile bulunmaktadır.

P: İksa yüzeyi boyunca oluşan toplam aktif toprak basıncı

H: İksa sisteminin yüksekliği

olarak ifade edilmektedir.

İsviçre zemin ankrajları standardı (SIA-191) kohezyonsuz zeminler için toprak basıncı dağılımı önermiştir ve Şekil 3.17’de gösterilmektedir.

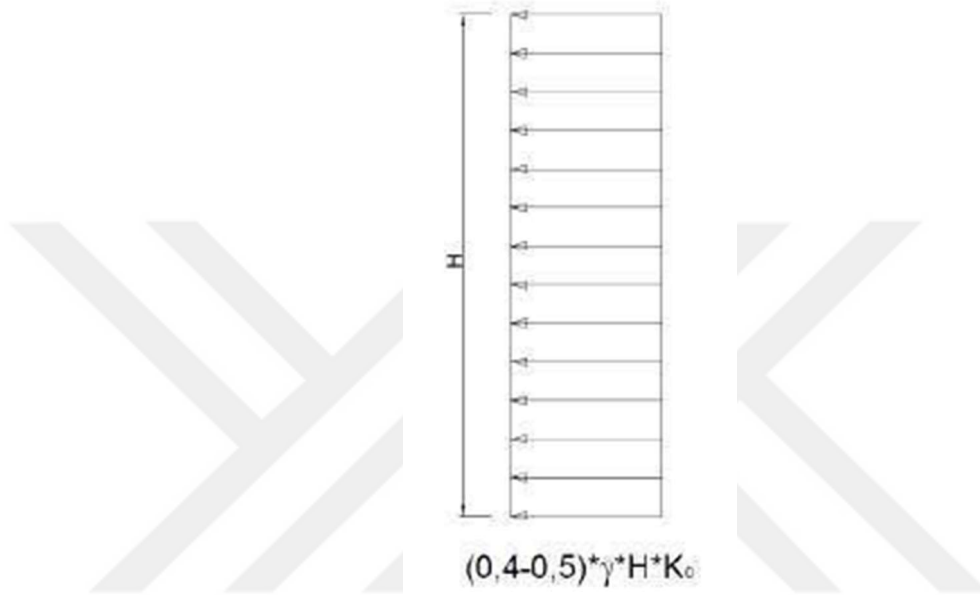


Şekil 3.17 İsviçre zemin ankrajları standartlarına göre kohezyonsuz zeminlerde toprak basınç dağılımı

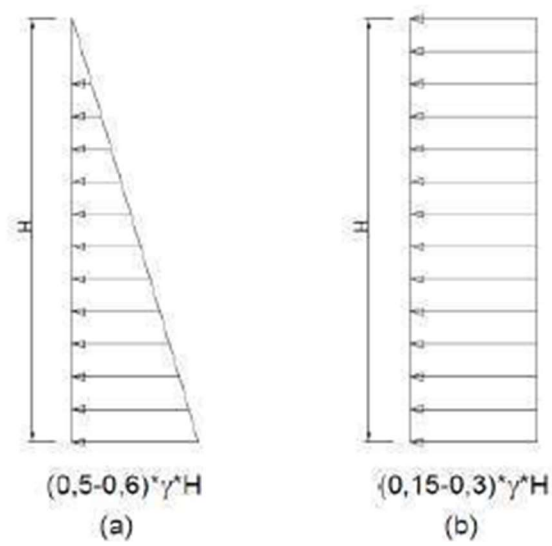
Bu yönetmeliğe göre toprak basıncı (q) sürşarj yükü ile Eşitlik 3.21 ile belirlenmektedir.

$$\sigma_a = 1.30 (0.5\gamma HK_a + qK_a) \quad (3.21)$$

Navfac (1986) tarafından kohezyonsuz zeminler için önerilen toprak basıncı dağılımı Şekil 3.18’de, kohezyonlu zeminler için ise Şekil 3.19’da gösterilmiştir.



Şekil 3.18 Navfac (1986) tarafından önerilen kohezyonsuz zeminler için toprak basıncı dağılımı



Şekil 3.19 Navfac(1986) tarafından önerilen kohezyonlu zeminler için toprak

Kohezyonsuz zeminler için Eşitlik (3.22) yardımıyla,

$$\sigma_a = (0.4 \sim 0.5)\gamma H K_0 \quad (3.22)$$

Katı ve çok katı killer için Eşitlik (3.23) yardımıyla,

$$\sigma_a = (0.15 \sim 0.3)\gamma H \quad (3.23)$$

Yumuşak ve orta katı killer için Eşitlik (3.24) yardımıyla,

$$\sigma_a = (0.5 \sim 0.6)\gamma H \quad (3.24)$$

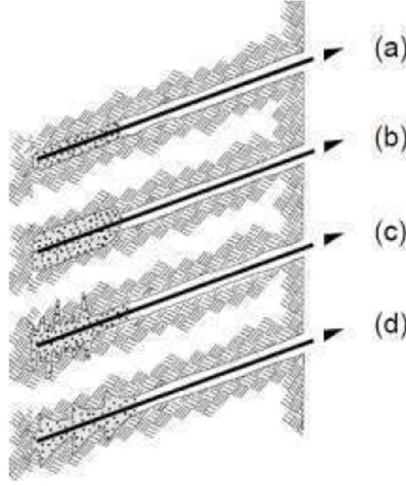
hesaplanmaktadır.

3.6 Öngerme Ankrajlı Destekleme Sisteminin Tasarımı

Ankrajlar proje ömrüne göre geçici ya da kalıcı olarak sınıflandırılmaktadır. Proje ömrü genelde 2 yıl olarak düşünülen ankrajlı geçici ankraj olarak tanımlanmaktadır. Tasarım ömrü 2 yıldan daha uzun olan ankrajlar kalıcı ankrajlar olarak tanımlanmaktadır. Geçici ankrajlar için korozyon önlemleri alınmasına gerek olmazken kalıcı ankrajlar için korozyon koruması ve sürekli kontrollerin yapılması gerekmektedir.

3.6.1 Ankraj İmalat Yöntemleri

Farklı tiplerde imal edilebilen öngermeli ankrajlı sistemlerde, öngerme yükünü zemin ve çimento enjeksiyonu arasındaki sürtünme direnci karşılamaktadır. Ankraj delgi yöntemi ve enjeksiyon basınç değerine göre sürtünme direnci değişim göstermektedir. Düz cidarlı basınçsız enjeksiyonlu ankraj, düz cidarlı basınçlı enjeksiyonlu ankraj, basınçlı enjeksiyonlu ankraj, genişletilmiş köklü ankraj olmak üzere 4 tipte ankraj imalat yöntemi bulunmaktadır. Delgi yöntemleri; burgulu, havalı ve darbeli şeklindedir. Delgi yöntemi ve enjeksiyon basıncına göre değişim gösteren ankraj türleri Şekil 3.20’de gösterilmektedir.



Şekil 3.20 Delgi ve enjeksiyona göre ankraj türleri

Şekil 3.20 (a) 'da gösterilen düz cidarlı basınçsız enjeksiyonlu ankraj imalat yönteminde delgi uygulaması burgulu yada havalı şeklinde yapılmaktadır. Delgi uygulamasının ardından kuyu içerisine konumlandırılan hortumlar aracılığıyla kuyu içerisine enjeksiyon gönderilmektedir. Bu uygulama ile ankraj kuvvetleri, kısmen pürüzsüz delik cidarı ve enjeksiyon arasındaki sürtünme ile karşılanmaktadır. Hızlı ve ekonomik olan bu yöntem genellikle kaya yada katı-sert kohezyonlu zeminlerde uygulanmaktadır.

Şekil 3.20 (b)'de gösterilen düz cidarlı basınçlı enjeksiyonlu ankraj imalatında, ankraj delgi işlemi burgulu yada havalı şeklinde yapılabilir. Bu yöntemde ankrajların kök bölgesine 1Mpa'dan daha düşük bir basınç uygulanmaktadır. Basınç sayesinde zemin ve enjeksiyon arasındaki sürtünme kapasitesi artırılmaktadır. Bu uygulamada, kohezyonsuz zeminlerde özellikle yeraltı su seviyesi altında yapılan delgilerde muhafaza borusu kullanılmalıdır.

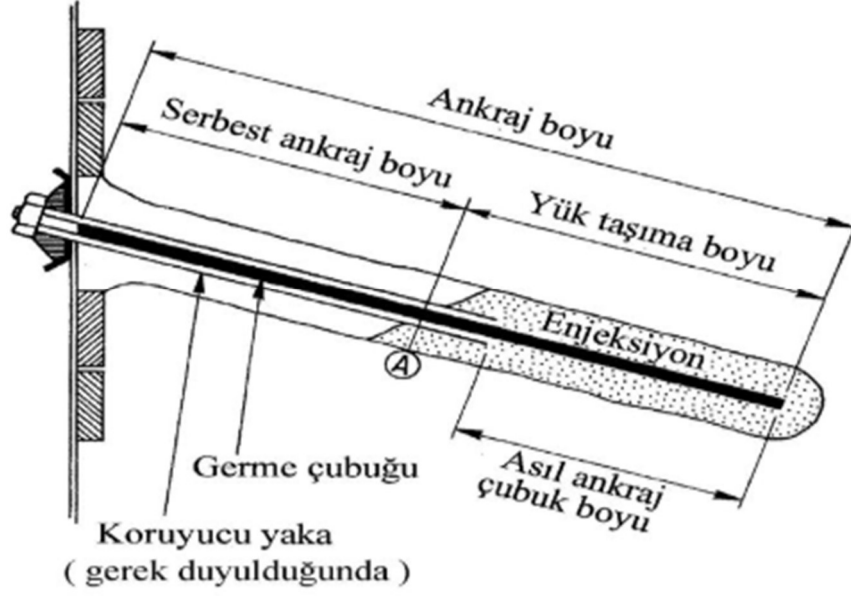
Şekil 3.20 (c)'de gösterilen basınçlı enjeksiyonlu ankraj yönteminde, kuyu içerisine 2 Mpa'dan daha yüksek bir basınçlı enjeksiyon gönderilmektedir. Bu basınç sayesinde ankraj kök bölgesinde sürtünme yüzeyi artırılmaktadır. Zemin ve enjeksiyon arasındaki sürtünme direnci sayesinde ankraj kuvvetleri karşılanmaktadır.

Şekil 3.20 (d)'de gösterilen genişletilmiş köklü ankraj yöntemi, diğer yöntemlere kıyasla daha az tercih edilmektedir. Bu uygulamada, genişletilen bölgenin çapı, kuyu çapının 4 katından daha fazla olabilmektedir.

Geçici ve kalıcı öngerme ankrajlı destekleme sistemlerinin tasarımı için genel adım dizini Tablo 3.2 'de gösterilmiştir (Sabatini, vd., 1999).

Tablo 3.2 Ankrajlı duvarlar için klasik tasarım adımları (Sabatini, vd., 1999)

1. Adım	Saha geometrisi, ankrajların geçici yada kalıcı olması, ankraj imalat yöntemi, projenin amacı olmak üzere proje gereksinimlerinin belirlenmesi.
2. Adım	Sahada bulunan zemin yada kaya ortamının özelliklerinin belirlenmesi.
3. Adım	Tasarım özelliklerinin değerlendirilmesi.
4. Adım	Nihai duvar yüksekliğinin belirlenmesi için yanal toprak basınç dağılımının belirlenmesi ve ilave yük, sismik basınçların ve eğer varsa suyun değerlendirilmesi.
5. Adım	Yatay ankraj yükünün ve duvar eğilme momentinin belirlenmesi. Duvar eğilme moment dağılımının optimum değerini belirleyen düşey ankraj aralığı ile konumunun belirlenmesi.
6. Adım	Yeraltı yapılarının ve komşu yapı sınırlamalarına göre ankraj açısının belirlenmesi.
7. Adım	Her bir yatay ankraj yükünü kuvvet bileşenleri dikkate alınarak belirlenmesi.
8. Adım	Seçilen destekleme yapı tipine göre ankraj yatay aralıklarının belirlenmesi ve her ankraj yükünün hesaplanması.
9. Adım	Zemin ankraj tipinin seçilmesi.
10. Adım	Kazı tabanı altındaki gömülü duvarın kapasitesinin belirlenmesi ve gerekirse yeniden boyutlandırılması.
11. Adım	Ankrajlı sistemin iç ve dış stabilitesinin değerlendirilmesi.
12. Adım	Maksimum yanal ve düşey deplasmanların tahmin edilmesi ve değerlendirilmesi.
13. Adım	Gerekirse kuşaklama tasarımının yapılması.



Şekil 3.21 Öngermeli ankraj bölümleri

Şekil 3.21’de gösterildiği gibi, öngermeli ankraj sistemi kafa bölgesi, serbest boy ve kök boyu olmak üzere 3 ana bölümden oluşmaktadır. Ankraj serbest boyu ve kök boyu zemin içerisine gömülmektedir.

Serbest ankraj boyunun enjeksiyon ile bir ilişkisi bulunmamaktadır ve öngerme yükünü ile hareketlenme ile meydana gelebilecek ek yükleri kök boyuna (yük taşıma boyu) aktarmaktadır.

Ankraj kök boyu, zemin ve enjeksiyon sürtünme direnci ile tüm yükleri taşıyan kısımdır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Yapı İşleri Genel Müdürlüğü 2018 yönetmeliğine göre (Kazı Genelgesi, 2018), kohezyonlu zemin formasyonlarda tasarlanacak ankraj kök boyunun minimum 10 m olması gerekmektedir. Ankraj kök boyunun 10 m’den fazla olması, belirli bir boy seviyesinden sonra gerilme aktarımı olmadığı için gereksiz görülmektedir (BS 8081).

Ankraj kafa bölgesinde öngerme yükü uygulanmaktadır. Ankraj kafa bölgesinde bulunan kamalar sayesinde istenilen yüke kilitlenme sağlanmaktadır. Bu bölge yüksek basınca maruz kaldıkları için kullanılan malzemeler kaliteli olmalıdır.

3.6.2 Zemin Ankrajı Tasarımı

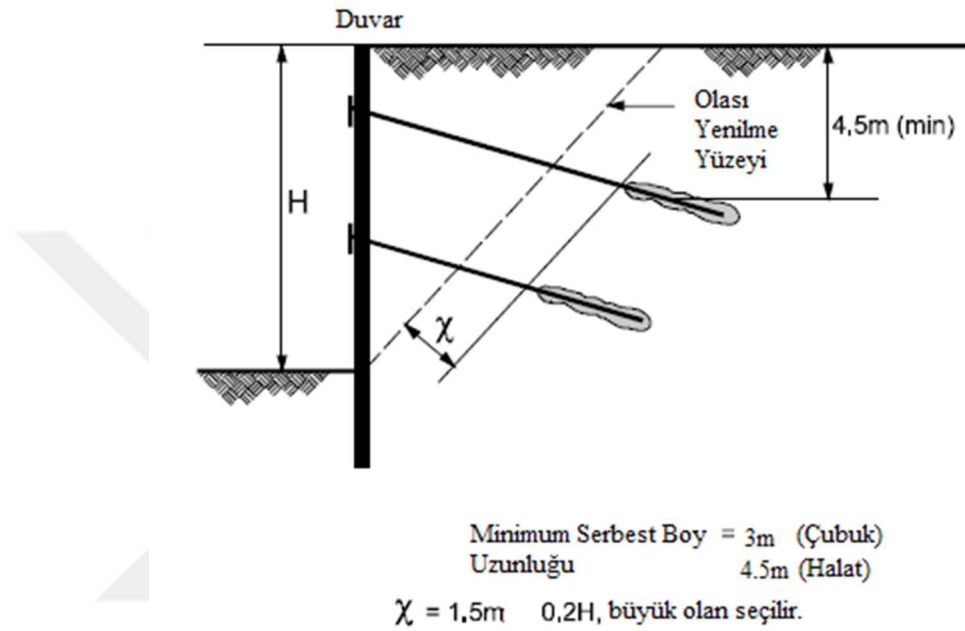
3.6.2.1 Kritik Olası Göçme Yüzeyinin Değerlendirilmesi

Yükün ankraj kök bölgesinden yüksüz bölgeye aktarılmaması için ankraj kök boyunun kritik olası göçme yüzeyinin arkasında kalması gerekmektedir (Sabatini,

vd., 1999). Ankraj serbest boyunun H yüksekliğinde olan bir duvarın yüzeyinden minimum H/5 mesafede olması ya da kritik olası göçme yüzeyinin 1.5 m arkasında olması, tasarımda olması gereken gerekliliklerdendir.

Kritik olası göçme yüzeyinin, kohezyonsuz zeminlerde kazı tabanı köşesinden $45^\circ + \Phi'/2$ açıyla yukarıya doğru uzandığı varsayımı yapılmaktadır (Sabatini, vd. 1999).

3.6.2.2 Ankraj Serbest Boyunun Belirlenmesi



Şekil 3.22 Öngermeli serbest ankraj boyunun belirlenmesi

Zemin ve kaya ankrajları için minimum serbest ankraj boyu çubuk tendonlar için 3 m ve halat tendonlar için 4.5 m'dir (Şekil 3.22). Genel olarak ankraj serbest uzunluğu, kritik olası göçme yüzeyinin arkasında 0.2H yada 1.5 m mesafe kadar ötelenmektedir. Özetle, ankraj serbest boyu kritik olası göçme yüzeyinin konumuna bağlı olmaktadır.

3.6.2.3 Ankraj Kök Boyunun Belirlenmesi

Belirli bir geoteknik proje için izin verilen minimum ankraj taşıma kapasitesini belirlemenin ilk adımı, maksimum ankraj kök uzunluğunu tahmin etmektir.

Kohezyonsuz zeminlerde ankraj taşıma gücü (T_f , kN) Eşitlik (3.25) yardımıyla bulunmaktadır.

$$T_f = \sigma_v \pi D L \tan \phi \quad (3.25)$$

σ_v : Ankraj kökü boyunca bulunan zeminin ortalama düşey efektif gerilmesi (kPa)

$\emptyset$: Ankraj kökü boyunca bulunan zeminin kayma mukavemeti açısı (°)

D: Ankraj kök bölgesinin delik çapı (m)

L: Ankraj kök bölgesinin uzunluğu (m)

Kohezyonlu zeminlerde ankraj taşıma gücü (T_f , kN) Eşitlik (3.26) ile bulunmaktadır.

$$T_f = \pi D L \alpha c_u \quad (3.26)$$

c_u : Ankraj kökü boyunca bulunan zeminin ortalama drenajsız kohezyon değeri (kPa)

α : Adezyon faktörü

Kaya ortamlarda yapılan öngermeli ankraj uygulamalarında birim sürtünme kapasitesi ile kök kapasitesi hesaplanabilmektedir. Kaya formasyonda q_u serbest basınç değeri mukavemeti olmak üzere Eşitlik (3.27) kullanılmaktadır.

$$T_f = (0.1 \sim 0.25 q_u) \quad (3.27)$$

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2018 Yönetmeliğine (Kazı Genelgesi, 2018) göre;

- Kohezyonlu zemin formasyonlarda tasarlanacak ankraj kök boyunun minimum 10 m olması gerekmektedir.
- Ankraj kök boyları arasındaki mesafe 110 cm'yi aşmamalıdır.
- Zemin cinsi farketmeksizin ankraj kök bölgesi üzerinde en az 5.0 m doğal zemin örtü yükü bulunması zorunludur.

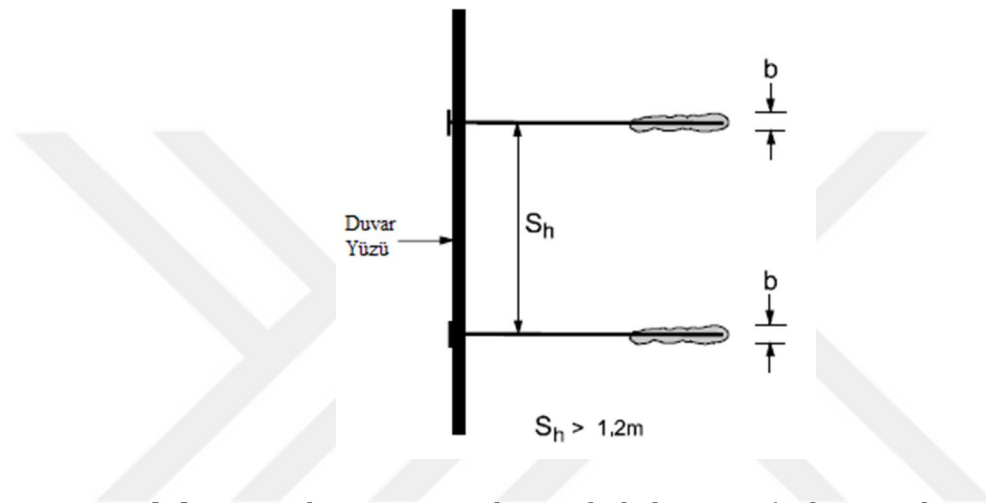
Ankraj kök boyu için minimum uzunluk zeminlerde 3.00 ve kayalarda 4.60 m olarak önerilmektedir. Ankrajların uygulandığı ortama bağlı olarak zeminlerde maksimum 12.0 kaya ortamlarda ise 7.5 m kök boyu dikkate alınarak ankrajların en yüksek taşıma kapasitesi hesaplanmalıdır.

3.6.2.4 Ankraj Yatay Aralığının Belirlenmesi

Zemin ankrajlarının yatay ve düşey aralığı, projeye özel olarak (yanal duvar hareketlerini kontrol etmek için ankrajların yakın olup olmamasını gerektirecek bir rijit sistem, ankrajların yerleşimi ve açısını etkileyecek olan yeraltı ve komşu yapılar

ve seçilen destekleme sisteminin tipi değişmektedir. Şekil 3.23'te ankraj yatay aralığı gösterilmiştir.

Ankrajlar arasındaki yatay aralığı belirlemede, her bir ankrajın taşıma kapasitesi ve kazıkların eğilme kapasitesi dikkate alınır. Yatay ankraj aralığını belirlemeden önce yatay yük dağılımının her bir düşey ankraja gelen miktarının hesaplanması gerekmektedir. Destekleme sisteminde her bir ankraj sırasına birim genişlikte etkiyen birim yük yatay ankraj aralığı ile çarpılmaktadır. Bu şekilde her bir ankraja gelen her bir ankraj için eksenel yük bulunmuş olmaktadır.

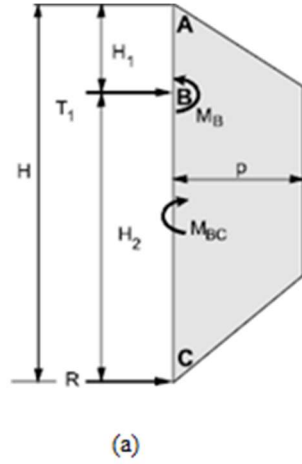


Şekil 3.23 Ankraj yatay aralığının belirlenmesi (Sabatini, vd., 1999)

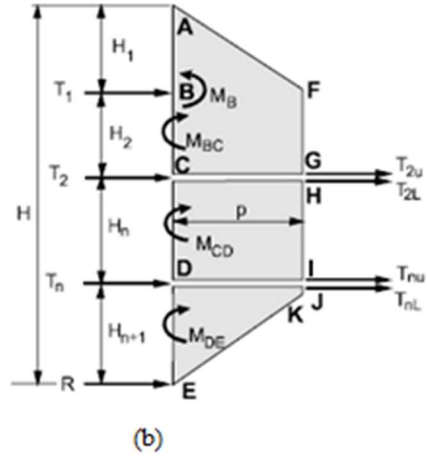
3.6.3 Yanal Basınlara Göre Destekleme Sistemi Tasarımı

Bu çalışma kapsamında destekleme sistemi olarak palplanş duvar tercih edilmiştir. Palplanş duvarın boyutlandırılmasında tasarımda dikkate alınan yöntemlerden bahsedilecektir. Palplanş duvar gibi düşey iksa elemanlarının boyutlandırılmasında yanal toprak yükleri, sürşarj, su ve sismik yükler göz önüne alınmaktadır. Düşey iksa elemanında yatay yük ve ankraj aralıklarına göre oluşan moment değeri boyutlandırmada en önemli kriterlerdendir.

Şekil 3.24'te moment yöntemi ile, tek sıralı ankrajlı sistem (a) ve birden fazla ankraj içeren sistem (b) için eğilme momentlerinin elde edilmesi gösterilmiştir.



$$M_B = \sum M_B$$



$$M_B = \sum M_B$$

$$M_C = M_D = M_E = 0$$

Şekil 3.24 Eğilme momentlerinin belirlenmesi (Sabatini, 1999)

M_{BC} : Kesme kuvvetinin sıfır olduğu noktada B ve C noktaları arasında maksimum moment

M_{CD} ve M_{DE} ; M_{BC} ile hesaplanabilir.

Sürekli kiriş kabulü ile palplanş duvar düşey iksa elemanı üzerinde oluşan maksimum moment Eşitlik (3.28) ile,

$$M_{\text{maks}} = \frac{1}{10}Pl^2 \quad (3.28)$$

P: Birim genişlik için hesaplanan maksimum yatay yük değeri

l : düşey ankraj aralığı

Kesme kuvveti ise Eşitlik (3.29) ile,

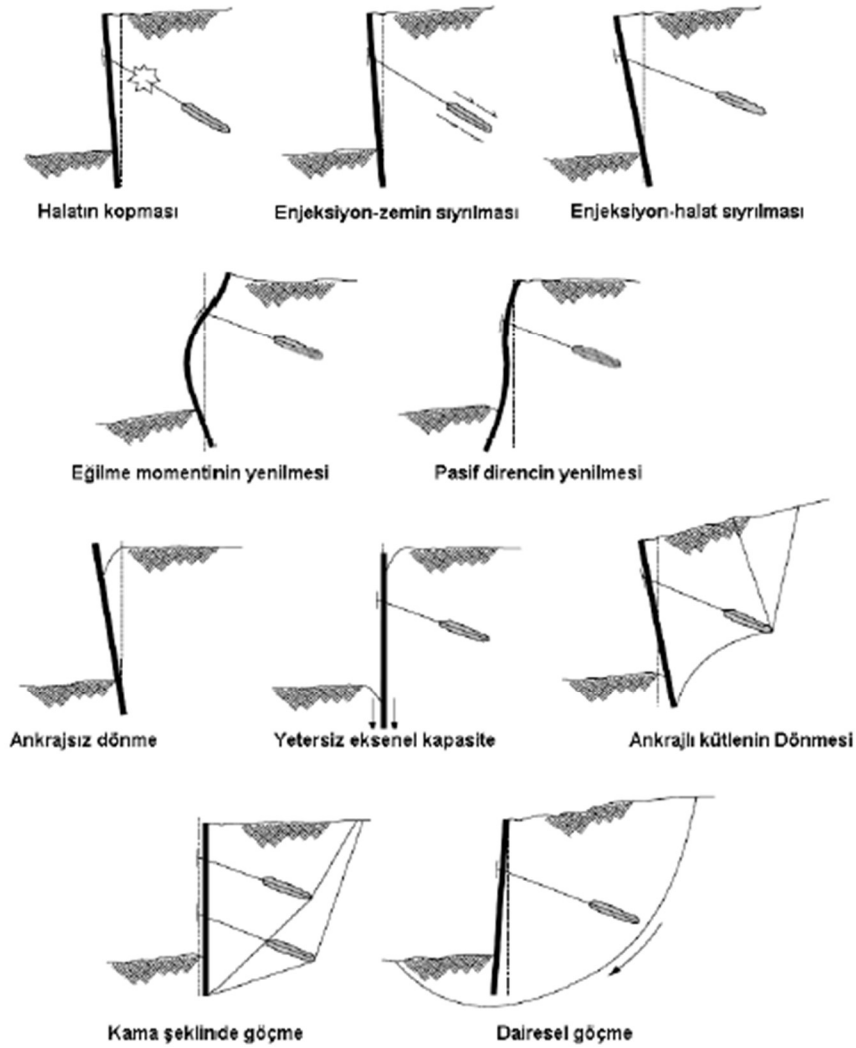
$$Q_{\text{maks}} = \frac{1}{120}Pl \quad (3.29)$$

hesaplanmaktadır.

3.7 Öngerme Ankrajlı Sistemlerde Göçme Mekanizması

Öngerme ankraj sistemi ile desteklenmiş bir kazının devrilme, kayma ve ötelenme gibi göçme durumlarına karşı güvenli olması gerekmektedir. Göçmenin meydana gelebileceği mekanizmalar Şekil 3.25'te gösterilmiştir. Göçme durumları genelde

ankraj halatları için izin verilen kapasiteden daha fazla servis yükünün belirlenmesi ve toprak basıncının yanlış tahmin edilmesi nedeniyle meydana gelmektedir.



Şekil 3.25 Öngermeli ankrajlarda meydana gelebilecek göçme durumları

Öngermeli ankrajlı destekleme sistemlerinde göçme; halatın kopması, enjeksiyon – zemin sıyrılması, enjeksiyon – halat sıyrılması, eğilme momentinin yenilmesi, pasif direncin yenilmesi, ankrajsız dönme, yetersiz eksenel kapasite , ankrajlı kütlenin dönmesi, kama şeklinde göçme ve dairesel göçme biçimlerinde meydana gelebilir. Ankrajlarda oluşabilecek göçme durumları, halat kopması, zemin – enjeksiyon veya halat – enjeksiyon arasındaki göçmenin sonucunda oluşmaktadır.

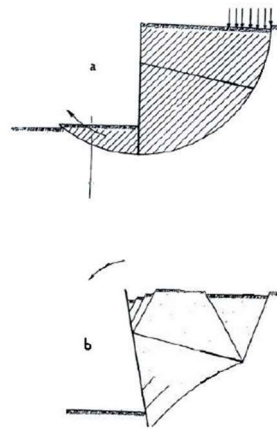
3.8 Öngerme Ankrajlı Destekleme Sistemlerinin Genel Stabilitesi

Genel stabilite, öngerme ankrajlı destekleme sistemlerinde temel bir stabilite analizidir. Bu analiz için klasik yöntemler Kranz(1953) yöntemi, Broms (1968) yöntemi ve Ranke ve Ostermayer'in (1968) gibi Kranz'a dayalı diğer yöntemlerdir (Guerra vd, 2017) .

Öngerme ankrajlı bir destekleme sisteminde, ankraj kökü, serbest ankraj uzunluğu ve duvar boyutlarının genel stabiliteyi sağlayacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Stabilite analizleri bu değerler belirlendikten sonra yapılmalıdır.

Destekleme sistemi ile ankraj arasında denge sağlanamazsa bir kayma yüzeyi boyunca sistem kayması olabilir yada ankraj uçlarından perde uçlarına doğru bir kayma düzlemi meydana gelebilir ve ankrajların boşalması sonucu devrilme tipi göçme oluşabilir (Şekil 3.26).

Bir kayma yüzeyi boyunca sistem kayma şeklinde gerçekleşen göçme durumunun stabilite tahkiki dairesel bir kayma yüzeyi olduğu varsayılarak gerçekleştirilmektedir. Ankraj uçlarından perde uçlarına doğru bir kayma düzleminin meydana gelmesi şeklinde göçme durumunda ise, ankraj ucundan perde ucuna doğru kayma düzleminin olduğu varsayılmaktadır. Bu yöntem ile yapılan tahkik ankraj boylarını kontrol etmek için önemlidir.



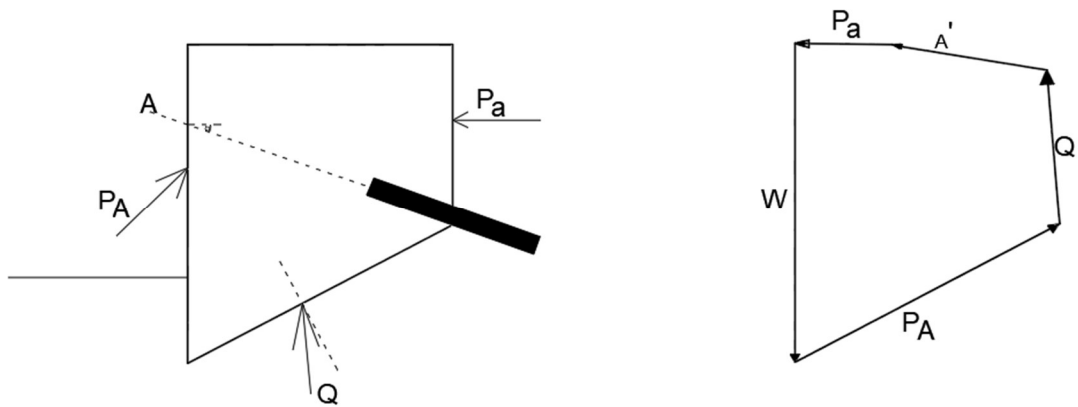
Şekil 3.26 Ankrajlı yapılarda göçme biçimleri a) Toptan göçme b)Derin kayma düzleminde zemin göçmesi (İncecik, 1977)

3.8.1 Derin Kayma Tahkiki

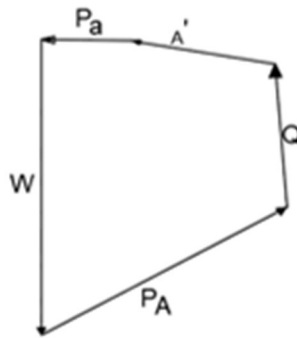
Öngerme ankrajlı bir destekleme sisteminin derin kayma tahkiki genellikle Kranz tarafından tek sıralı ankrajlı perdelerde uygulanabilir bir yöntem kullanılmaktadır. Kranz tarafından tek sıralı ankrajlar için geliştirilen yöntem, Ranke ve Ostermayer tarafından çok sıralı ankrajlı sistemler için de geliştirilmiştir.

3.8.2 Blok Göçme Analizi (Kranz Yöntemi)

Kranz (1953) tarafından ölü (pasif) ankrajlı destekleme yapıları için geliştirilen bu yöntemde ankraj kuvveti etkisi altında varsayımsal bir göçme bloğu göz önüne alınarak bu bloğu plastik dengeye ulaştıran ankraj kuvveti hesaplanmaktadır. Öngermeli ankrajlar için göçme bloğu Şekil 3.27’de gösterildiği ankraj kökünün ortasından geçtiği kabul edilir. Öngerme ankrajlı bir sistemde ankraj kuvveti etkisinde oluşabilecek göçme bloğu ve buna etkiyen kuvvetler ile kuvvet poligonu Şekil 3.28’de gösterilmiştir.



Şekil 3.27 Tek sıralı ankrajda blok göçme durumu(Yıldırım,2004)



Şekil 3.28 Blok göçme durumunda kuvvet poligonu (Yıldırım,2004)

P_a : Ankraj plağına gelen toprak basıncı

W: Blok ağırlığı

P_A : Duvara gelen toprak basıncı

Q: Blok destek kuvveti

A: Anraj çekme kuvveti

A': Bloğu dengede tutan kuvvet

Tek sıralı ankrajda blok analizinde güvenlik sayısı, denge için uygulanabilecek maksimum kuvvetin ankraja uygulanan kuvvete oranlanmasıyla elde edilmektedir. Potansiyel ankraj kuvveti gerçek kuvvetten daha büyük olduğunda sistem kararlıdır. Güvenlik sayısı 1.5'ten büyük olması istenir. Bu koşul sağlanmazsa ankraj serbest uzunluğu artırılmalı veya ankraj plakası daha derine indirilmelidir.

Kranz yöntemi ile gerçekleştirilen genel stabilite analizlerinde, göçmeyi başlatan kuvvetler, duvarın arkasına etki eden aktif toprak basıncı kuvveti (P_A) ve düşey ikinci kayma yüzeyine etki eden aktif toprak basıncı kuvvetidir (P_a) (Zohra vd., 2019). Göçmeyi önleyen kuvvetler ise tepki kuvveti (Q) ve ankraj kuvvetidir (A) (Sabatini vd., 1999). Kranz yöntemine göre gerçekleştirilen blok göçme analizlerinde duvarın önündeki pasif toprak basınç kuvveti dikkate alınmaz. Bu model, duvarın altından ankraj plakasının tabanına kadar olan ($\pi/4 + \phi/2$) açıyla zemine kadar uzanan derin bir kayma yüzeyi ile ifade edilir.

ÖNGERME ANKRAJLI BİR DESTEKLEME SİSTEMİNİN BELİRSİZLİK DİKKATE ALINARAK ANALİZLERİ

Derin kazıların stabilite ve deformasyon sorunu çıkarmadan yapılabilmesi için bir destekleme sistemine ihtiyaç vardır. Gelişen teknoloji ve artan nüfus inşaat mühendislerinin daha yüksek ve derin yapılar inşa etmesini teşvik etmektedir. Bundan dolayı derin kazıların da boyutları artmakta ve yeni inşaat teknolojilerinin kullanılmasının önünü açmaktadır. Bu bağlamda bilgisayarların ve ona bağlı olarak yazılımların gelişmesi sonucu, daha karmaşık mühendislik problemleri çözülebilmekte ve daha karmaşık tasarımlar yapılabildiğinden, daha karmaşık, ekonomik ve güvenli derin kazı destekleme sistemleri tasarımı mümkün olmaktadır. Bilgisayarların ve yazılımların gelişmesi yanında sensör ve data okuma sistemlerindeki gelişmelerin de derin kazıların tasarımı ve uygulamasına önemli katkılar sağlamıştır. Bu ekipmanlar sayesinde çok derin ve problemlili alanlardaki kazılarda toplanan veriler değerlendirilerek tasarım gözden geçirilmekte ve inşaat yürürken tasarım güncellenmektedir. Böylece daha güvenli ve ekonomik derin kazılar yapılabilmektedir. Diğer yandan günümüzde inşaat mühendisliği projelerinin talep edildiği şekilde eksiksiz, hatasız ve sorunsuz yapıp teslim edilmesi için BIM (Building Information Modeling) yaklaşımı benimsenmeye başlanmıştır. Bu yaklaşımda bir inşaat mühendisliği projesinin fizibilite aşamasından başlayıp tüm inşaat aşamaları ile inşa sonrası işletme ve bakım aşamalarının bulut denilen bilgisayar ortamlarında saklanması ve her aşamadaki teknik personelin ihtiyacı ve yetkisi kapsamında bilgiye ulaşması ve bilgi aktarması istenmektedir. Buna göre eldeki tüm bilgiler dijital olmakta ve bunlar için her aşamada uygun yazılımlara başvurulmaktadır. Derin kazı destekleme sistemi tasarımı ve inşaatına ilişkin veri ve bilgiler de tüm geoteknik mühendisliği hizmetleri ile birlikte BIM’de yer alır. Bu bilgilerin işlenmesi ve değerlendirilmesi için farklı yazılımlar geliştirilmiş olsa da bunların otomasyonu, birbirleri ile iletişimi ve/veya ihtiyaca uygun yazılım geliştirilmesi söz konusudur. Böylesi durumlar için

halen dünyada mühendisler tarafından en çok tercih edilen programlama dili Python'dır. Bu programlama dili ile çok sayıda modül geliştirilmiş ve geliştirilmekte olup alfanümerik bir programlamada güçlü olması yanında web tabanlı ve nesne tabanlı bir programlama dilidir. Bu özellikleri ile çok büyük veri işleme ve yönetimi ile makine öğrenmesi için uygundur. Python dilinin bu özellikleri dikkate alınarak tasarım ve mühendislik analizleri için geliştirilen ticari yazılım paketleri (CAD, sayısal analiz, boyutlandırma yazılımları vb) son yıllarda Python programlama dili ile programlanabilir hale getirilmiştir. Bu sayede tasarımlar ve analizler için otomasyon ve parametrik çalışma imkanı yanında optimizasyon, belirsizlik ve güvenilirlik analizleri yapılması kolaylaşmıştır. Tüm bu gelişmeler göz önüne alınarak bu çalışmada derin kazı sistemlerinin ticari bir yazılım ile otomatik modellenmiştir ve belirsizlik-güvenilirlik analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar bu bölümde sunulmuştur. Çalışma kapsamında tek sıra ankrajlı bir derin kazının Python ile belirsizlik analizi yapılmış ve sonraki aşamada ise Plaxis 2D yazılımında tek sıra ankrajlı bir destekleme sisteminin otomatik modellenerek güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir..

4.1 Öngerme Ankrajlı Bir Destekleme Sisteminin Belirsizlik Analizi

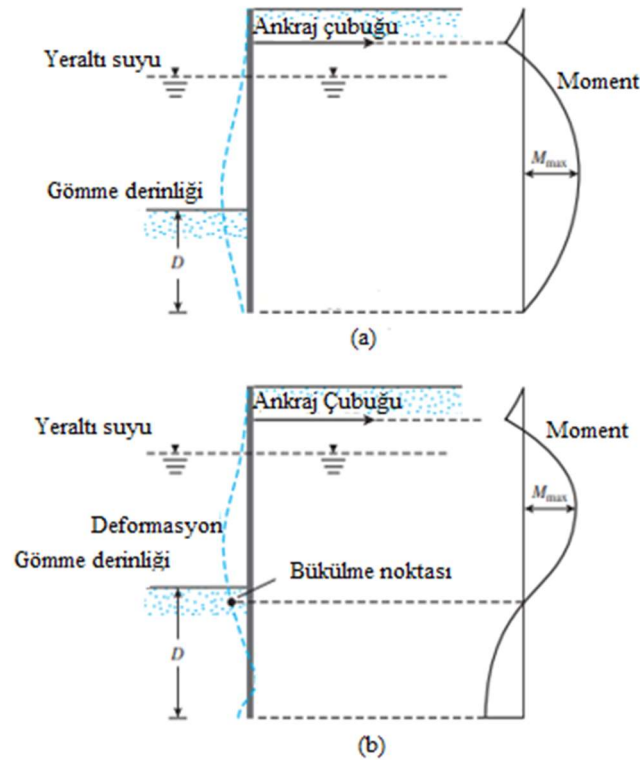
Öngerme ankrajlı bir destekleme sistemini tasarlarlarken, temel olarak parametreleri elde etme konusunda yaşanan yöntemlerin sınırlılığı ve yetersizliği sebebiyle parametre belirsizliği ile karşılaşmaktadır. Her geçen gün gelişen teknoloji sayesinde bu belirsizliği değerlendirmek ve yönetilebilir hale getirmek kolaylaşmıştır. Python gibi programlama dilleri ile bilgisayar ortamında olasılık kavramları ve istatistiksel bilgiler kullanılarak geoteknik tasarımlarındaki belirsizliği inceleme imkanı doğmuştur.

Bu tez kapsamında öngerme ankrajlı destekleme sisteminin belirsizlik analizini gerçekleştirmek için olasılıksal yöntemlerden biri olan Monte Carlo Simülasyon yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem ile tahmin edilmesi kolay olmayan değişkenlerin farklı sonuçlarının olasılığı elde edilebilmektedir. Monte Carlo yöntemi özellikle zemin parametrelerindeki belirsizliği incelemeyi kolaylaştırmaktadır. Fakat hesaplama süresinin uzun olması bu yöntemin geoteknik mühendisliğinde günlük olarak kullanılmasının önüne geçmektedir.

Bu çalışma kapsamında Monte Carlo Simülasyon yönteminde stokastik veri ve dağılımı kullanılmıştır. Stokastik verinin hangi veri olması gerektiğine duyarlılık analizi sonucunda karar verilmiştir.

Belirsizlik analizi Python programlama dilinde yazılan bir kod vasıtası ile yürütülmüştür. Belirsizlik analizini gerçekleştirmeden önce Monte Carlo analizini gerçekleştirebilmek için hizmet etmesi için sonlu elemanlar modeli oluşturmak amacıyla ayrı bir Python kodu geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında destekleme sistemi olarak öngörme ankrajlı bir palplanş duvar tercih edilmiştir. Belirsizlik analizinde kullanılan denklemler ve başvuru kriterlerin ayrıntısı Bölüm 4.1.1’de verilmiştir.

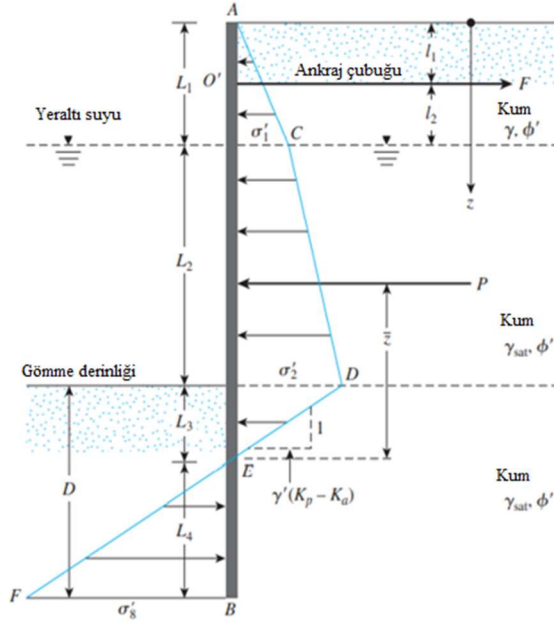
Ankrajlı palplanş duvarların tasarımı için önerilen 2 farklı yöntem vardır. Şekil 4.1a’da serbest toprak destek yöntemine göre ankrajlı palplanş duvarlar için yer değiştirme ve moment dağılımı Şekil 4.1b’de sabit toprak destek yöntemine göre yer değiştirme ve moment dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Ankrajlı palplanş duvarlar için yer değiştirme ve moment dağılımı: (a) serbest toprak destek yöntemi; (b) sabit toprak destek yöntemi

Serbest toprak destek yöntemi ile sabit toprak destek yöntemine göre daha küçük bir çakma derinliği hesaplanılmaktadır. Bu tez çalışmasında belirsizlik analizine hizmet edecek olan ankrajlı palplanş duvar sonlu elemanlar model tasarımı için serbest toprak destek yöntemi kullanılmıştır.

4.1.1 Tek Sıralı Ankrajlı Perde İçin Limit Denge Analizi



Şekil 4.2 Kumlu zeminde ankrajlı palplanş duvar penetrasyonu (Das,1990)

Şekil 4.2' de görüldüğü üzere ankraj ve palplanş duvarı birbirine bağlayan bağlantı çubuğu palplanş duvarın üst kısmının daha altında bir derinlikte bulunmaktadır.

Palplanş duvarın dengede kalabilmesi için yatay kuvvet dengesi ve moment dengesinin sıfır olması gerekmektedir. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi L_1 yeraltı su seviyesi derinliği ve l_1 birinci ankrajın zemin yüzeyine olan mesafesi olduğuna göre L_1 derinliğinde gerilme,

$$\sigma_1' = \gamma L_1 K_a \quad (4.1)$$

Eşitlik (4.1) ile hesaplanabilir. Bu eşitlikte γ =toplam birim hacim ağırlıktır. $L_1 + L_2$ derinliğinde gerilme ise Eşitlik (4.2) ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_2' = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_a \quad (4.2)$$

L_3 derinliği ise Eşitlik (4.3) yardımıyla belirlenmektedir.

$$L_3 = \frac{\sigma'_2}{K_p - K_a} \frac{1}{\gamma'} \quad (4.3)$$

Aktif ve pasif toprak basıncı katsayıları K_a ve K_p ;

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\emptyset}{2} \right) \quad (4.4)$$

$$K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\emptyset}{2} \right) \quad (4.5)$$

Eşitlik (4.4) ve (4.5) yardımıyla Rankine Toprak Basıncı teorisi'ne göre hesaplanabilir. D palplanş perde çakma derinliği olduğuna göre palplanş perde arkasındaki aktif basınç,

$$P = \frac{1}{2} \sigma'_1 L_1 + \sigma'_2 L_2 + \frac{1}{2} (\sigma'_2 - \sigma'_1) L_2 + \frac{1}{2} \sigma'_2 L_3 \quad (4.6)$$

Eşitlik (4.6) ile hesaplanabilir. Yatay denge için gerekli olan birim ankraj kuvveti birim uzunluk için (kN/m),

$$F = P - \frac{1}{2} [\gamma' (K_p - K_a)] L^2 \quad (4.7)$$

Eşitlik (4.7) ile hesaplanır. Bu eşitlikte γ' =su altındaki birim hacim ağırlıktır L_k ankraj kök boyu ve σ_v düşey gerilme olmak üzere nihai ankraj taşıma gücü Eşitlik (4.8) ve (4.9) ile bulunmaktadır.

$$T_u = \sigma_v \cdot K \cdot \tan\left(\frac{2}{3} \emptyset\right) \cdot \pi \cdot L_k \quad (4.8)$$

$$\sigma_v = L_1 \gamma + (h_0 - L_1) \gamma' \quad (4.9)$$

h_0 yüksekliği Eşitlik (4.10) ile bulunmaktadır. L_a kesitte en üstte bulunan ankrajın serbest ankraj uzunluğunu ifade etmektedir.

$$h_0 = \left(L_a + \frac{L_k}{2} \right) \cdot \sin(\emptyset) + L_1 \quad (4.10)$$

Özetle, deterministik tasarım aşamasında çakma derinliği ve ankraj kuvveti serbest toprak destek yöntemi yaklaşımına göre elde edilmiştir. Kısaca bu tasarım yaklaşımı aşağıda sunulmuştur:

1) K_a ve K_p hesaplanır.

2) Yanal basınçlar hesaplanır.

3) Yanal kuvvetler hesaplanır.

4) Çakmanın teorik derinliği belirlenir, D_{teorik} , böylece ankraj noktası etrafındaki pasif itme momenti, M_p , ankraj noktası M_a etrafındaki aktif itme momentine eşittir.

5) D_{teorik} belirli bir güvenlik faktörü ile çarpılarak tasarım çakma derinliği, $D_{\text{tasarım}}$ 'ı belirlenir.

6) Yatay yöndeki kuvvetler toplamının sıfıra eşit olduğu ankraj kuvveti belirlenir.

7 m derinliğe sahip bir kazıda tek sıra öngerme ankrajlı bir destekleme sisteminin deterministik ve olasılıksal tasarımını yapmak için geliştirilen Python yazılımının ilk aşamasında deterministik sonlu elemanlar modeli ile tasarım yapılmıştır. Bu aşamada yukarıda bahsedilen Şekil 4.2'de gösterilen kumlu zeminde ankrajlı palplanş duvar için çakma derinliği şekli esas alınmış ve buna göre algoritma oluşturulmuştur. Python kodunda ilk olarak ortalama kayma mukavemeti açısı değerine göre yatay kuvvet ve moment denge hesabına göre ankraj kuvveti ve çakma derinliği belirlenmektedir. Ankraj kök uzunluğu ve ankraj aralığı güvenlik sayısı 1.5 kabul edilerek nihai ankraj taşıma gücünden hesaplanılmaktadır. Ankraj aralığı (s) için $1.2 < s < H/2$ kriteri göz önünde bulundurularak ankraj kök uzunluğu ve ankraj aralığı belirlenmiştir. Tablo 4.1'de Monte Carlo Simülasyon yöntemine yürütebilmek için deterministik tasarımda kullanılan kum zemin için parametreler sunulmuştur.

Tablo 4.1 Monte Carlo Simülasyon yönteminde kullanılan parametreler

Kohezyon (c)	0
İçsel Sürtünme Açısı (°)	25
Doğal Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	17

4.2 Duyarlılık ve Belirsizlik Analizi

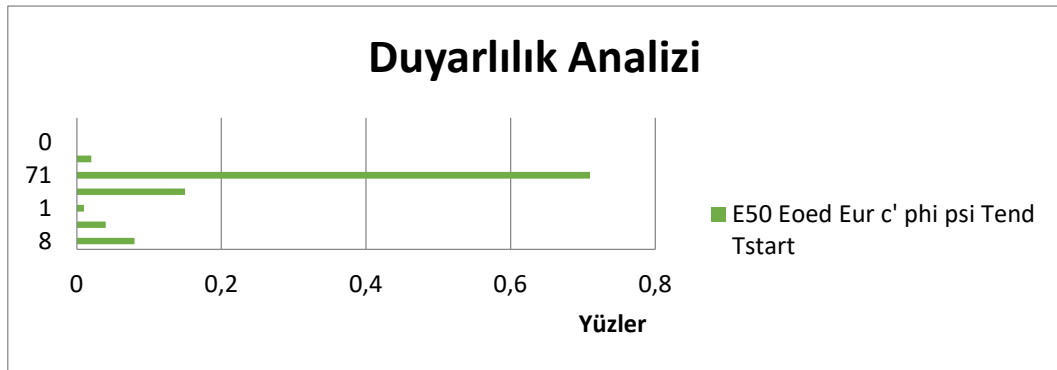
Öngerme ankrajlı kazı destekleme sisteminin güvenilirlik analizine başlamadan önce ana değişkenlerin sayısını azaltmak dolayısıyla analizi daha verimli ve hesaplama açısından daha uygun hale getirmek için duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Duyarlılık analizi sayesinde palplanş duvarın ana tasarım

sonuçlarında hangi parametrenin belirsizlik derecesine etkisinin daha fazla olduğu araştırılmıştır. Belirsizlik analizi Monte Carlo Simülasyon yöntemi esas alınarak geliştirilen bir Python kodu ile gerçekleştirilmiştir.

4.2.1 Duyarlılık Analizi

Duyarlılık analizi (DA), bir modelin çıktısındaki varyasyonun nicel ve nitel olarak model parametrelerindeki varyasyona nasıl paylaştırılabileceğinin incelenmesidir (Saltelli vd, 2004).

Şekil 4.3'te gösterildiği gibi %71 oran ile kayma mukavemeti açısının belirsizlik derecesine etkisinin en fazla parametre olduğu anlaşılmaktadır. Bu sebeple Python yazılımı ile gerçekleştirilen olasılıksal analiz için stokastik veri olarak kayma mukavemeti açısı tercih edilmiştir ve lognormal olasılık dağılıma sahip olduğu kabul edilmiştir. Lognormal olasılık dağılımının tercih edilmesindeki neden, kayma mukavemeti açısı gibi pozitif değerler alan parametreler için, genellikle lognormal olasılık dağılımının kabul edilmesidir. Kayma mukavemeti açısı, zeminin mukavemet parametrelerinden biridir ve sonlu elemanlar modelinde tasarım yaparken Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelinin her ikisinde de en önemli zemin parametresi olarak görülmektedir. Bu sebeple kayma mukavemeti açısının farklı değişkenleriyle elde edilen sonuçların öngerme ankrajlı destekleme sistemine etkisini incelemek önemlidir.



Şekil 4.3 Duyarlılık analizi

4.2.2 Belirsizlik Analizi

Ankrajlı palplanşların genel deterministik tasarımında Bölüm 4.1.1'de belirtildiği gibi çakma derinliği ve ankraj kuvveti, tasarım parametrelerindeki belirsizlik derecelerinden bağımsız olarak, yatay kuvvet ve moment dengesini sağlayacak

şekilde belirlenir. Bu sebeple aslında tasarım süreci, tasarım mühendisine palplanş duvarın güvenilirliğine ilişkin bir gösterge vermez. Ankrajlı palplanş duvarın girdi tasarım parametrelerinin değişkenliğinin tasarım çıktılarının güvenilirliğine ne kadar duyarlı olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Kayma mukavemeti açısı parametresi için güvenilirlik analizinde gerekli olan dağılım türü ve varyasyon katsayısı bu tür parametrelerin bugüne kadar elde edilen bilgi ve çeşitli araştırmalarda verilen önerilere göre seçilmiştir (Baecher ve Christian, 2003; Schweckendiek, 2006; Griffiths ve Fenton, 2007; Phoon, 2008). Belirsizlik analizi için seçilen parametrenin istatistiksel dağılımı ve COV değeri Tablo 4.2 'de gösterilmektedir.

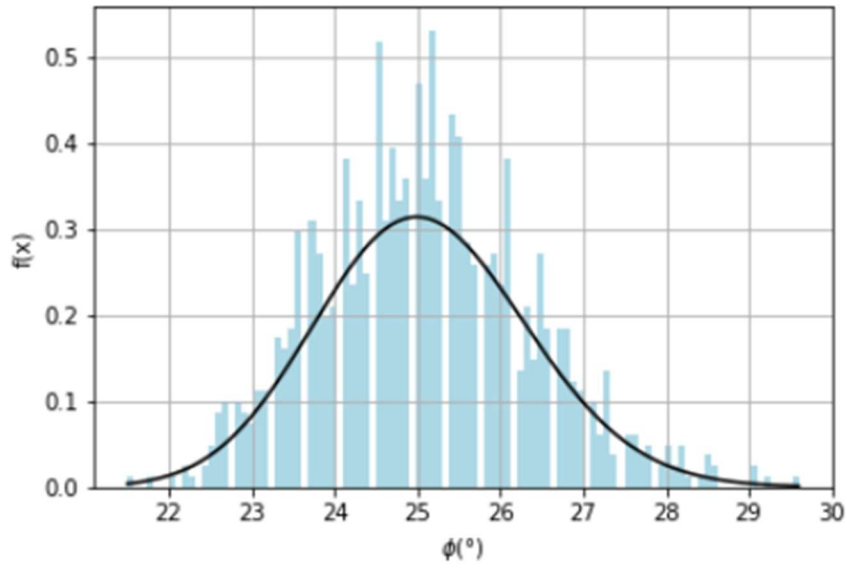
Birçok istatistik ve olasılığa dayalı bilimsel çalışmalarda normal dağılım tercih edilmektedir. Ama geoteknik tasarımlarında kullanılan sadece pozitif değerler alabilen zemin parametreleri için log - normal olasılık dağılımı önerilmektedir (Phoon ve Kulhawy, 1999; Spry vd, 1988).

Bu aşamada Python yazılımı ile hazırlanan kod ile log - normal olasılık dağılımı için Bölüm 4.1'de bahsedilen kriterler dikkate alınarak 10000 adet iterasyon ile analiz gerçekleştirilmiştir. Iterasyona göre yukarıda açıklanan deterministik analizdeki denge hesabı ve buna bağlı ankraj kök ve değerleri yukarıda verilen kriterler dikkate alınarak belirlenmektedir.

Tablo 4.2 Belirsizlik analizi için stokastik veri ve dağılım türü

Zemin Parametresi	Sembol	Olasılık Dağılımı	COV	Birimi
İçsel Sürtünme Açısı	Φ	Log - normal	%5	[°]

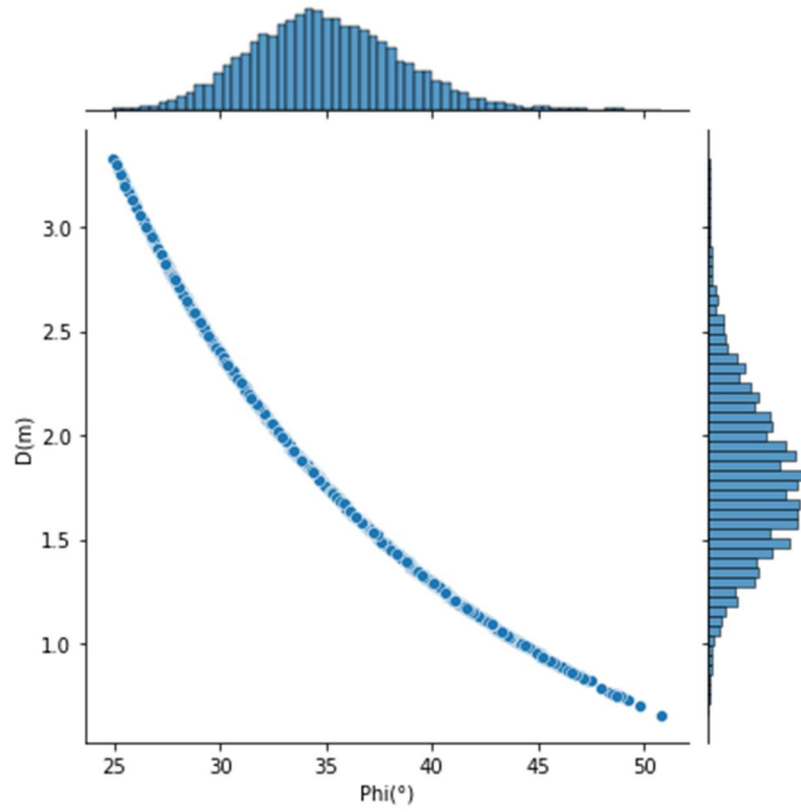
Log - normal olasılık dağılıma sahip kayma mukavemeti açısı için gerçekleştirilen Monte Carlo Simülasyon yöntemine göre elde edilen fonksiyon grafiği Şekil 4.4'de sunulmuştur. Bu yöntem ile COV ve olasılık dağılımına göre rastgele kayma mukavemeti açısı üretilmiştir ve her bir üretilen kayma mukavemeti açısına göre palplanş perde çakma derinliği, ankraj kuvveti, ankraj kök uzunluğu, ankraj aralığı ve serbest uzunluk elde edilmiştir.



Şekil 4.4 MC-SEY yalnızca zemin değişkenliği içeren kayma mukavemeti açısı histogram grafiği

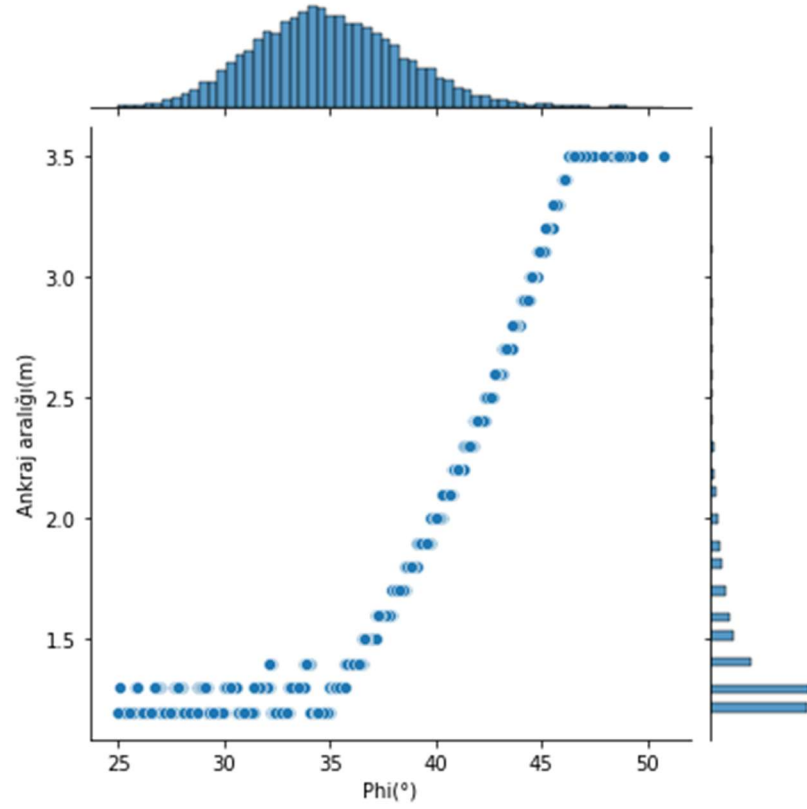
Bu sayede geoteknik anabilim dalında önemli bir problem olan zemin parametrelerindeki belirsizliği ve yine geoteknik tasarımlarında çok önemli bir parametre olan kayma mukavemeti açısının değişkenliğini, bilgisayar yazılımının gelişimi ve istatistik bilim dalının birleştirilmesi sayesinde inceleme imkanı olmuştur.

Elde edilen tüm değerler ile Python yazılımı aracılığıyla geliştirilen kod yardımıyla bir veritabanı oluşturulmuştur. Python yazılımında Pandas modül kullanılarak oluşturulan bu veritabanına kaydedilen verilerin kolaylıkla yorumlanabilmesi için Python Seaborn modül aracılığı ile grafiklere dönüştürülmüştür. Şekil 4.5'te bu grafiklerden biri verilmiştir. Python programlama dili ile yazılan Monte Carlo Simülasyon algoritması sayesinde kayma mukavemeti açısındaki değişkenliğin çakma derinliğine, ankraj kuvvetine, ankraj aralığına, ankraj kök uzunluğuna ve serbest uzunluğa olan etkisi irdelenmiştir.



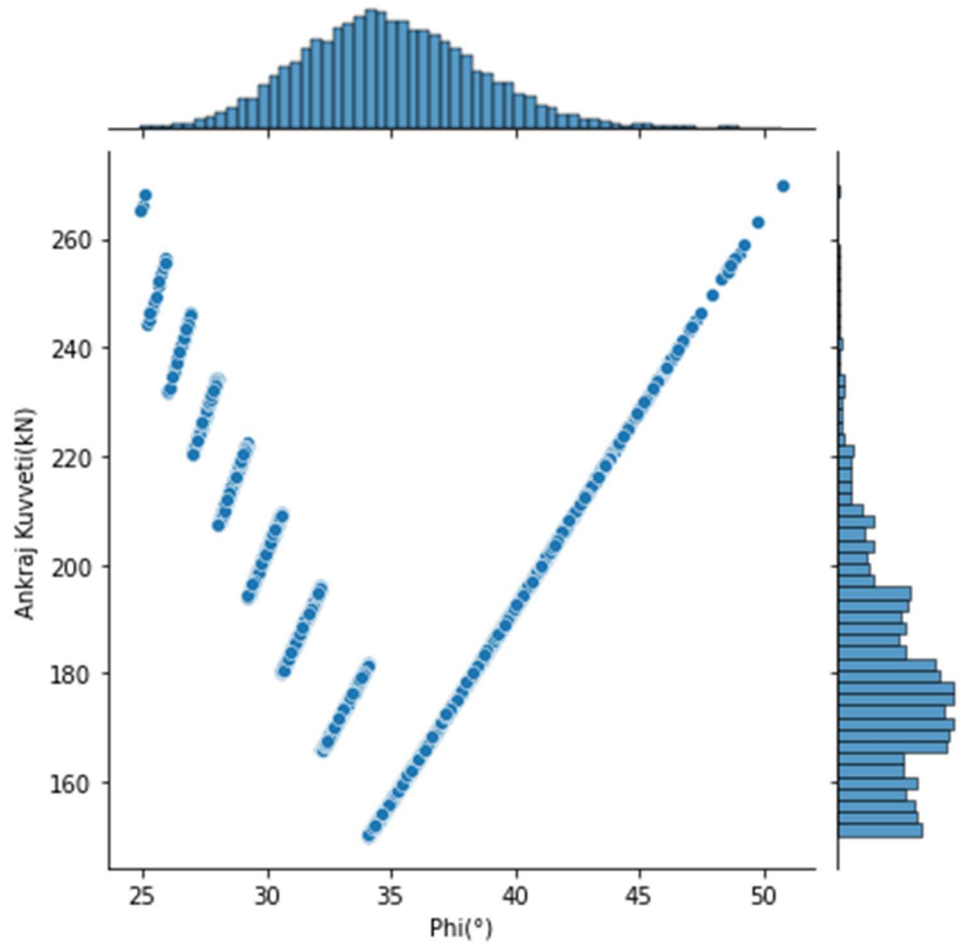
Şekil 4.5 Kayma mukavemeti açısı ve çakma derinliği arasındaki ilişki

Öngermeli ankraj ile desteklenmiş iksa sistemlerinde ankraja gelecek kuvvet ve palplanş duvarda oluşan eğilme momenti çakma derinliği tasarımının en önemli parametreleridir. Bu çalışma kapsamında kayma mukavemeti açısında meydana gelen değişkenliğin çakma derinliği ve ankraj kuvvetine olan etkisi incelenmiştir. Şekil 4.5’de görüldüğü üzere kayma mukavemeti açısı değeri arttıkça çakma derinliği azalma eğilimi göstermektedir. Kayma mukavemeti açısı 25° civarlarında olduğunda çakma derinliğinin 3 m’den fazla, 35° civarlarında ise 1,5 m ve 2,0 m aralığında olduğu gözlemlenmiştir. 50° den fazla olduğu durumlarda ise 1,0 m’den daha az bir çakma derinliği oluştuğu görülmektedir.



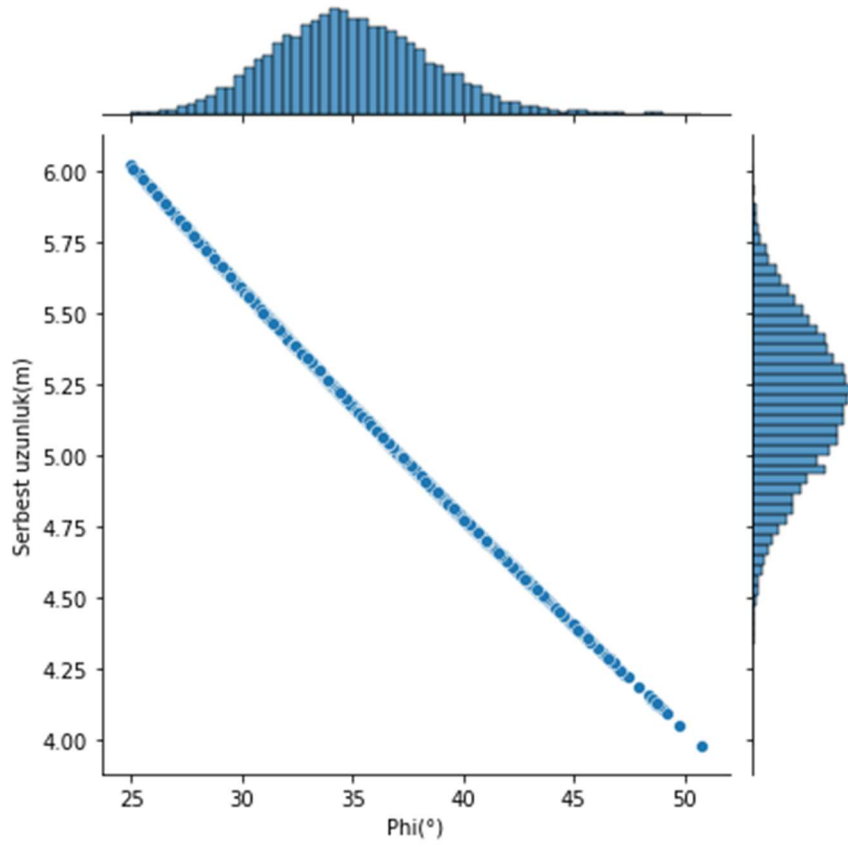
Şekil 4.6 Kayma mukavemeti açısı ve ankraj aralığı arasındaki ilişki

Öngerme ankrajlı destekleme sistemlerinde ankraj aralığı önem arz etmektedir. Ankraj yatay aralıkları azaltılarak yatay deformasyonlar azaltılabilmektedir ve daha rijit bir sistem oluşturulabilmektedir. Kayma mukavemeti açısının 25° - 35° değerleri arasında artmasının ankraj aralığına etkisi önemsenmeyecek kadar az olmuştur ve ankraj yatay aralıkları 1,5 m'nin altında olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte 35° - 45° değerleri arasında kayma mukavemeti açısının artmasıyla birlikte ankraj aralığı da azımsanmayacak derecede arttığı Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Kayma mukavemeti açısının 35° ve 45° olduğu değerlerde ankraj aralıkları 1,5 m ve 3,5m arasında değişim göstermektedir. Fakat 45° değerinden sonra kayma mukavemeti açısı değeri artsa bile ankraj aralığı değişmemekte ve 3,5 m civarlarında sabit değer olarak düşünülmektedir.



Şekil 4.7 Kayma mukavemeti açısı ve ankraj kuvveti arasındaki ilişki

Ankraj kuvveti ile palplanş duvar çakma derinliği arasında bir ilişki bulunmaktadır. Akan (2020) çalışmasında çakma derinliği arttıkça ankraj kuvvetinin azaldığını belirtmiştir. Bu çalışma kapsamında kayma mukavemeti açısındaki belirsizliğin çakma derinliğine ve ankraj kuvvetine olan etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Kayma mukavemeti açısı 25° - 35° aralığında kademeli bir şekilde ankraj kuvveti azalmaktadır. İçsel sürütme açısının 25° ve 50° civarlarda olduğunda ankraj kuvvetinin 260 kN'dan daha fazla olduğu Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Kayma mukavemeti açısı 35° - 50° arasında kayma mukavemeti açısı arttıkça ankraj kuvvetinin artış gözlemlenmiştir.



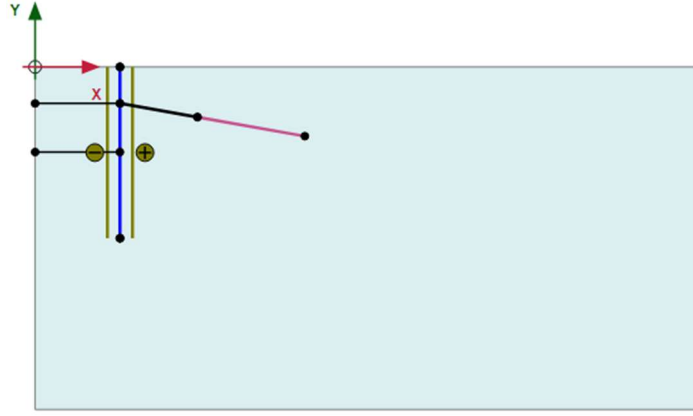
Şekil 4.8 Kayma mukavemeti açısı ve serbest uzunluk arasındaki ilişki

Ankraj serbest boyunun duraylılık analizlerine göre kayma düzlemi dışında kalması gerekmektedir dolayısıyla stabilite analizlerinde önem teşkil etmektedir. Bu çalışma kapsamında kayma mukavemeti açısındaki belirsizliğin ankraj serbest uzunluğuna olan ilişkisi incelenmiştir. Şekil 4.8’de gösterilen grafiğe göre kayma mukavemeti açısı ile serbest uzunluk arasında ters orantı olduğu anlaşılmaktadır. Kayma mukavemeti açısının 25° civarlarında olduğunda ankraj serbest uzunluğu 6 m olarak ve 35° - 40° aralarında ise 4,75 m ve 5,25 m aralığında olduğu gözlemlenmiştir.

ÖNGERME ANKRAJLI BİR DESTEKLEME SİSTEMİNİN BELİRSİZLİK DİKKATE ALINARAK GÜVENİLİRLİK ANALİZLERİ

Geoteknik mühendisliğinde güvenilirliğe dayalı tasarımda model, deterministik değerlerin kullanılmadığı, girdi değerleri olarak stokastik değişkenlerin kullanıldığı bir model türüdür. Plaxis programında gömülü halde bulunan Python aracılığıyla güvenilirlik analizlerini gerçekleştirebilmek için bir sonlu eleman modeline ihtiyaç vardır. Şekil 5.1’de güvenilirlik analizi için kullanılan Plaxis modeli gösterilmiştir. Plaxis programında 7 m kazı yüksekliğine sahip kum zemin, tek tabaka olacak şekilde Hardening Soil Zemin Modeli (Pekleşen Zemin Modeli) ile modellenmiştir. Hardening Soil Model ile gerilmeye bağlı rijitlik artışı, yükleme – boşaltma ve elastik plastik ayrımını dikkate alınması, zeminde gerilme – şekil değiştirme davranışının gerçeğe daha yakın sonuçlarla elde edilmesini sağlamaktadır. Tasarım için varsayılan zemin modelinde yeraltı suyu mevcut değildir.

Sonlu Eleman Analizi (Plaxis) ve güvenilirlik analizini birleştirmek için Plaxis V21 yazılımında gömülü halde bulunan Python yazılımından faydalanılmıştır. Python programlama dili sayesinde, öngerme ankrajlı destekleme sistemi Plaxis programında modellenmiştir ve Monte Carlo simülasyonu ile güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Güvenilirlik analiz sonuçları sunulmadan önce, deterministik olarak tasarımı yapılan modelin Plaxis analiz sonuçları sunulmuştur.



Şekil 5.1 Olasılık hesaplaması için kullanılan Plaxis modeli

Güvenilirlik analizini gerçekleştirebilmek amacıyla oluşturulan Plaxis modelinde kullanılan zemin parametreleri özellikleri Tablo 5.1’de özetlenmiştir. İlk kazı ve ankrajın zemin yüzeyine mesafesi -2,00 m seviyesinde bulunmaktadır. Şekil 4.2 ve Bölüm 4.1.1’de söz edilen kriterler, ankrajların 10” lik açığa sahip olduğu varsayılarak Python yazılım dilinde kod şeklinde hazırlanmıştır ve çıktı olarak serbest uzunluğu 4,63 m ve kök uzunluğu 6 m ve nihai ankraj kuvveti 134,0 kN elde edilmiştir. Sonlu elemanlar model ile çözümde, sistemin küçük elemanlara bölünmesi gerekmektedir. Modelde uygun bir şekilde sonlu elemanlar ağı üretilmesi gerçekleştirilen analizin doğruluğunu önemli derecede etkilemektedir. Şekil 5.2’de sonlu eleman modelinde üretilen ağlar gösterilmiştir.

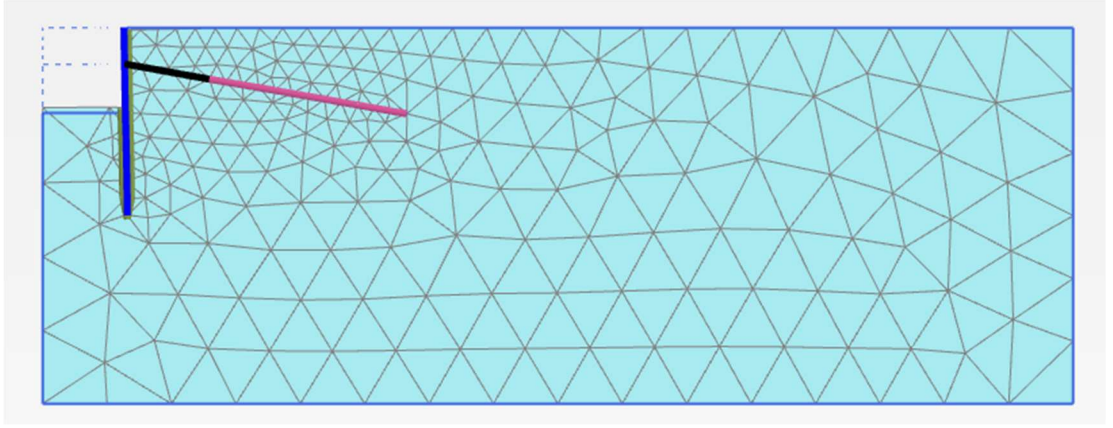
Tablo 5.1 Örnek Plaxis modeli kum zemin parametreleri

Tanım	Sembol	Birim	Değer
Birim Hacim Ağırlık	γ	kN/m ³	17
Kohezyon	c	kPa	0
Kayma Mukavemeti Açısı	ϕ	°	25
Elastisite Modülü	E	kN/m ²	21,4
Poisson Oranı	ν	-	0,2
Arayüz Dayanımı	R_{inter}	-	0,64

Palplanş duvar için kullanılan parametreler;

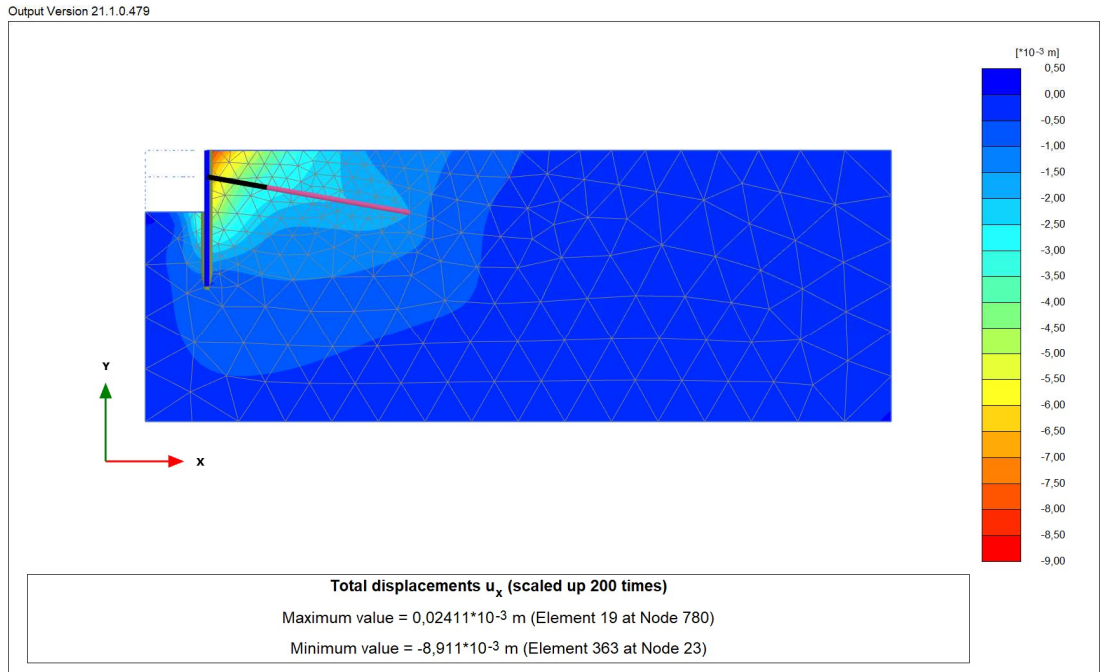
EA=10E6 kN/m

EI=208,3E3 kN/m² /m

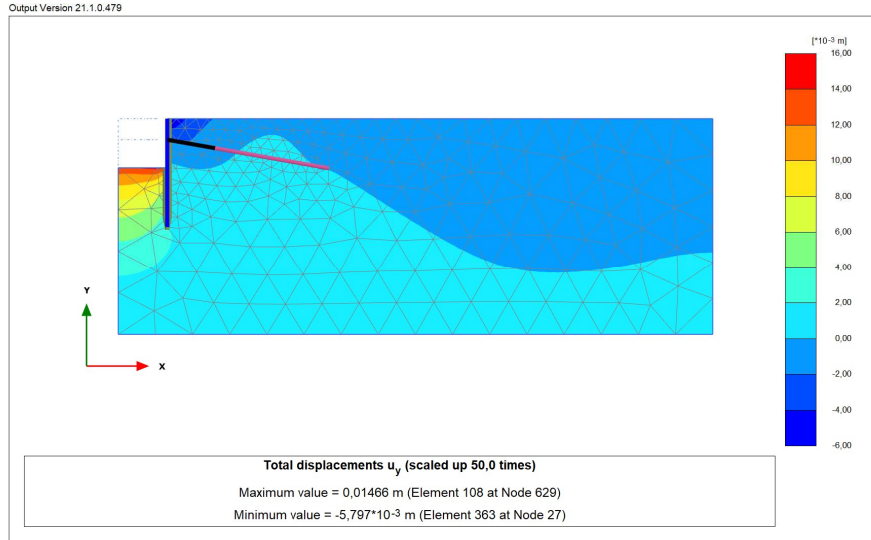


Şekil 5.2 Sonlu eleman modeli ve ağırları

7 m kazı derinliğine sahip tek sıra öngerme ankrajlı palplanş duvarın deterministik tasarımı sonucunda meydana gelen yatay ve düşey deplasmanlar Şekil 5.3 ile Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Deterministik analiz sonucunda yatay deplasman değeri 8,91 mm olarak bulunmuştur. Yatay destekli iksa sistemlerinin kendi stabilitesi açısından, yatay deplasman değerinin, kazı derinliğinin en çok binde 2,5 (17,5 mm) ile binde 5'i (35mm) arasında olması gerekmektedir (Çopan, 2020). Deterministik analiz sonucundan meydana gelen 8,91 mm değerinin bu değerlerden düşük olduğu görülmektedir.

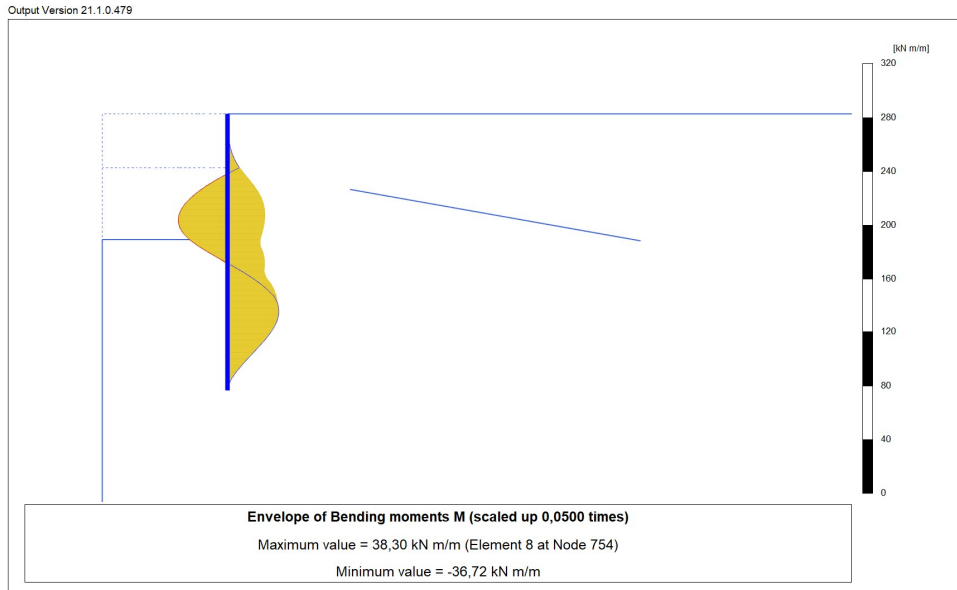


Şekil 5.3 Plaxis modelinde yatay deplasman değerleri



Şekil 5.4 Plaxis modelinde düşey deplasman değerleri

Şekil 5.5'te sunulan deterministik analiz sonucunda palplanş duvar maksimum eğilme momenti toprak tarafında 38,30 kN m/m olarak elde edilmiştir. Palplanş duvarlı sistem genel kararlılığı, palplanşın moment dayanımı esasına dayanarak deneme yanılma yöntemi ile yapılmaktadır (Das, 2015). Öngerme ankraj ile desteklenmiş palplanş duvar tasarımında ise ankrajların çekme kapasitesi ve gerekli durumlarda duvarın ve duvar arkasındaki zeminin deformasyonu da dikkate alınması gerekmektedir. Şekil 5.6'da gösterildiği üzere deterministik analiz sonucunda ankraj kuvveti 66,96 kN elde edilmiştir.



Şekil 5.5 Plaxis modelinde palplanş duvar maksimum eğilme momenti değeri

Structural element	Node	Local number	X [m]	Y [m]	N [kN]	N _{min} [kN]	N _{max} [kN]
NodeToNodeAnchor_1_1	65	1	4,667	-2,000	66,964	0,000	66,964
Element 1-1 (Node-to-node anchor)	3679	2	9,231	-2,805	66,964	0,000	66,964

Şekil 5.6 Plaxis modelinde elde edilen ankraj kuvveti

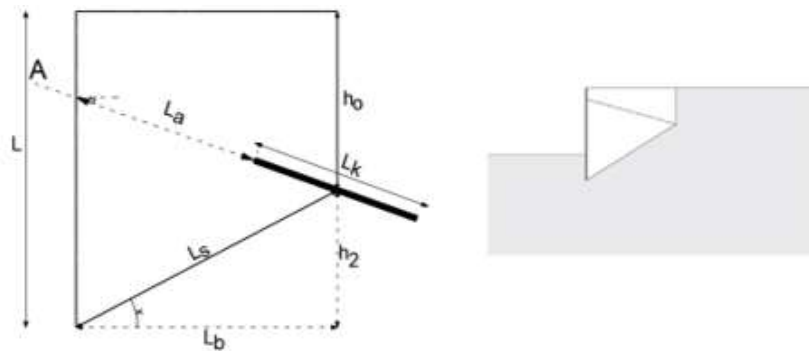
Plaxis modelinde inşa adımları;

- 1) Duvar inşası ve ilk kazı
- 2) Öngerme ve ikinci kazı
- 3) Güvenlik sayısı

Öngerme ankrajlı destekleme sistemlerinin genel stabilitesi, ankraj uzunluğuna bağlıdır. Denge yöntemi, genellikle ankrajlı bir destekleme sisteminin stabilitesini değerlendirmek ve zemin ankraj geometrisi ile kapasitesi için gereksinimleri belirlemek amacıyla kullanılır.

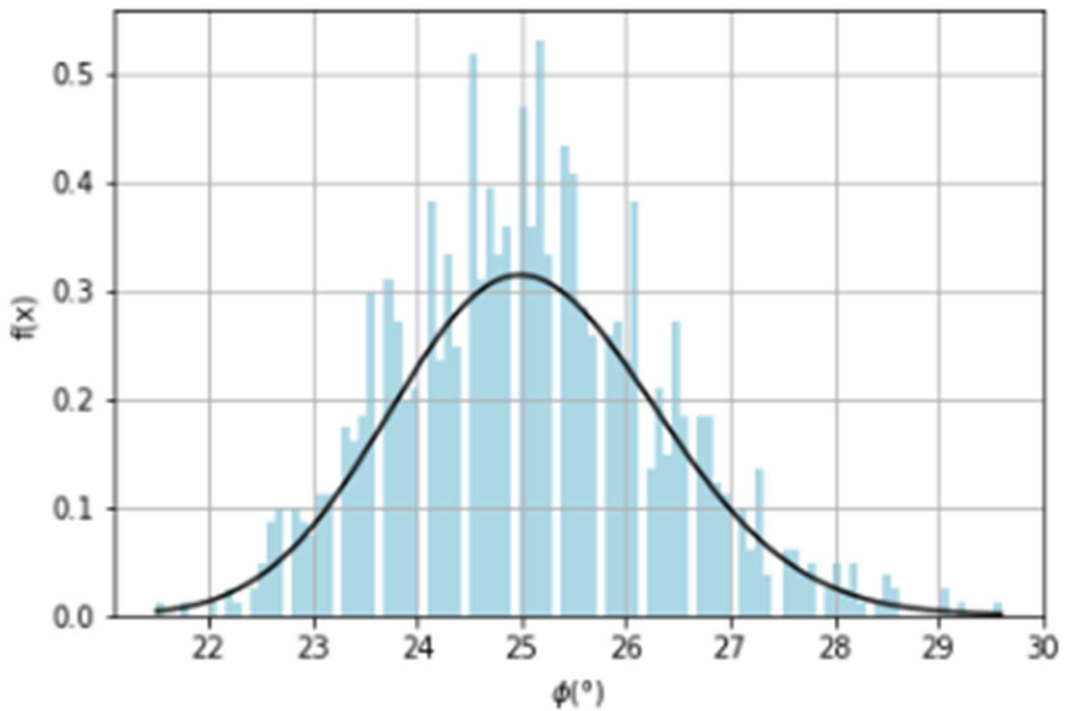
Öngerme ankrajlı palplanş duvarının daha eski yıllara dayanan tasarımında, ankraj için gerekli çubuk uzunluğu, istinat duvarının arkasındaki aktif kamanın ve ankraj plakasının önündeki pasif kamanın kesişmeyen kayma yüzeyleri aranması şeklinde belirlenmektedir. Bu tasarım prosedürünün yeterli olmadığı anlaşıldığından, Kranz (1940), istinat duvarının tabanından ankraj plakasının tabanına uzanan bir göçme yüzeyini hesaba katan yöntem önermiştir (Soubra ve Regenass,1997).

Bu tez çalışmasında öngerme ankrajlı destekleme sisteminin güvenilirlik analizi blok göçme (Kranz Yöntemi) durumuna göre yapılmıştır. Şekil 5.7’de Kranz yöntemi ile göçme durumunun diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Kranz yöntemi ile göçme durumu

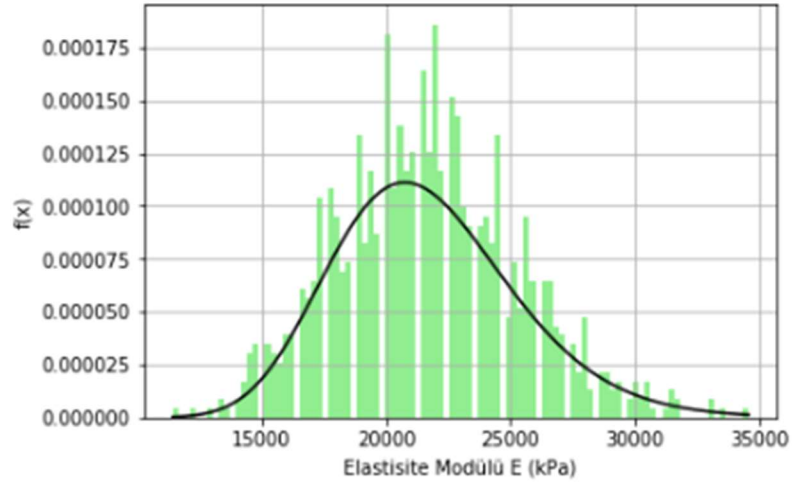
Python yazılımında elde edilen verileri görselleştirebilmek için kütüphaneler bulunmaktadır. Görselleştirme sayesinde çıktıları analiz etmek daha kolay hale gelmektedir. Bu çalışmada, rastgele üretilen kayma mukavemeti açısı ve bu parametreye bağlı olarak oluşan elastisite modülü, yatay deplasman, güvenlik sayısı Python Matplotlib kütüphanesi sayesinde grafik şeklinde görselleştirilmiştir. Matplotlib kütüphanesi 2 boyutlu en popüler görselleştirme kütüphanelerinden biridir. Kayma mukavemeti açısı değeri 25° ve varyasyon katsayısı 5 kabul edilerek tekrarlı analizlerle üretilen 1000 adet kayma mukavemeti açısının histogram ve olasılık dağılım fonksiyon grafiği Şekil 5.9'da sunulmuştur.



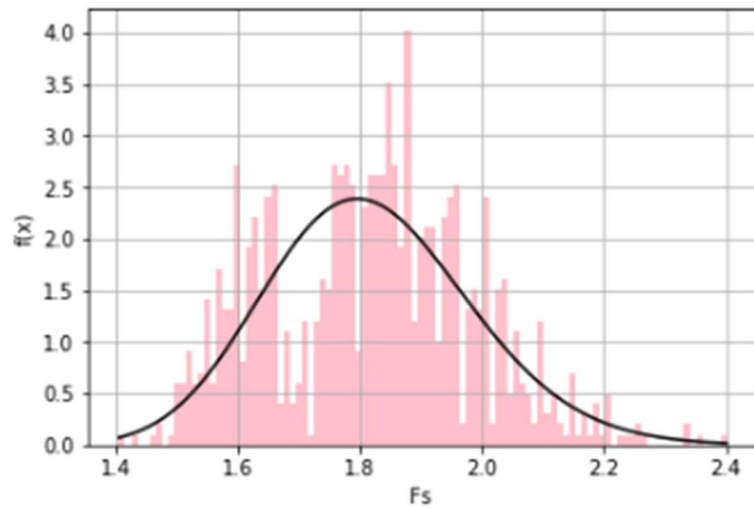
Şekil 5.9 Kayma mukavemeti açısının histogram ve olasılık dağılım fonksiyon grafiği

Varyasyon katsayısı standart sapmanın ortalamaya oranıdır. Üretilen kayma mukavemeti açısı değerleri başlangıçta alınan parametreye değerine ve kabul edilen varyasyon katsayısı oranına bağlı olarak üretilmektedir. Sonuç olarak, üretilen kayma mukavemeti açısı değerlerinin standart sapmasının ortalamasına oranı 5 olması gerekmektedir. 1000 adet ile gerçekleştirilen Monte Carlo Simülasyonu sonucunda kayma mukavemeti açısı 22° ve 30° derece arasında değişmekle birlikte yoğunlukla yaklaşık 25° civarında olmuştur.

Şekil 5.10'da random üretilen kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı olarak elde edilen elastisite modülünün histogram ve olasılık dağılım grafiği sunulmuştur. Elastisite modülü değerleri 15000 kPa ve 35000 kPa arasında değişmiştir fakat yaklaşık 20000 kPa civarında daha sık sonuçlar bulunmuştur.

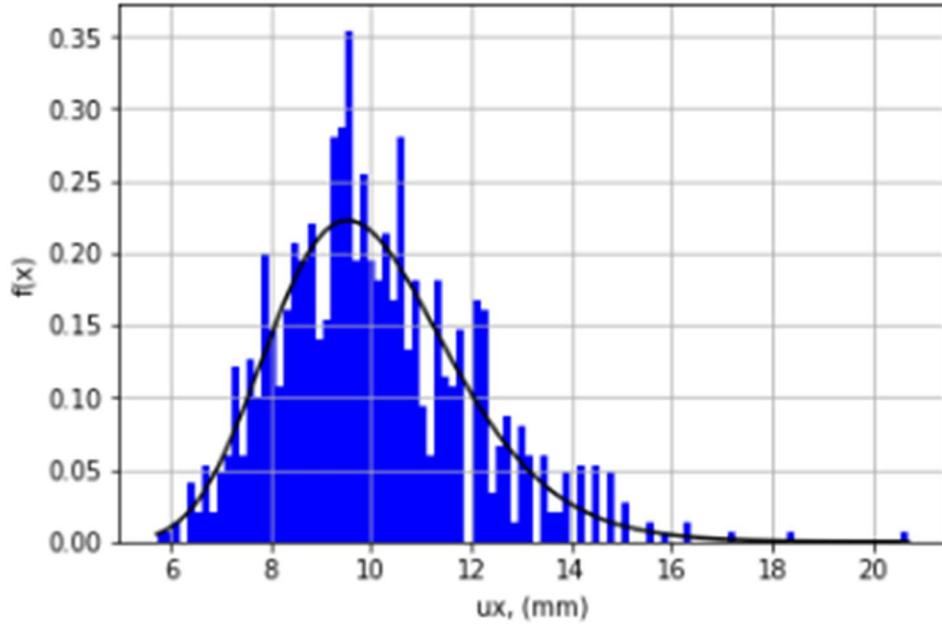


Şekil 5.10 Rastgele üretilen kayma mukavemeti açısına bağlı elastisite modülü 1000 adet rastgele kayma mukavemeti açısı ile Plaxis programında tekrarlı analizler sonuçlarında Plaxis programında güvenlik sayıları çıktı olarak alınabilmektedir. Şekil 5.11'de gösterildiği üzere güvenlik sayısı 1.4 ile 2.4 arasında değişen sonuçlar elde edilmiştir. Olasılık dağılım fonksiyon grafiğine göre güvenlik sayısı yaklaşık 1.8 olarak elde edilmiştir.

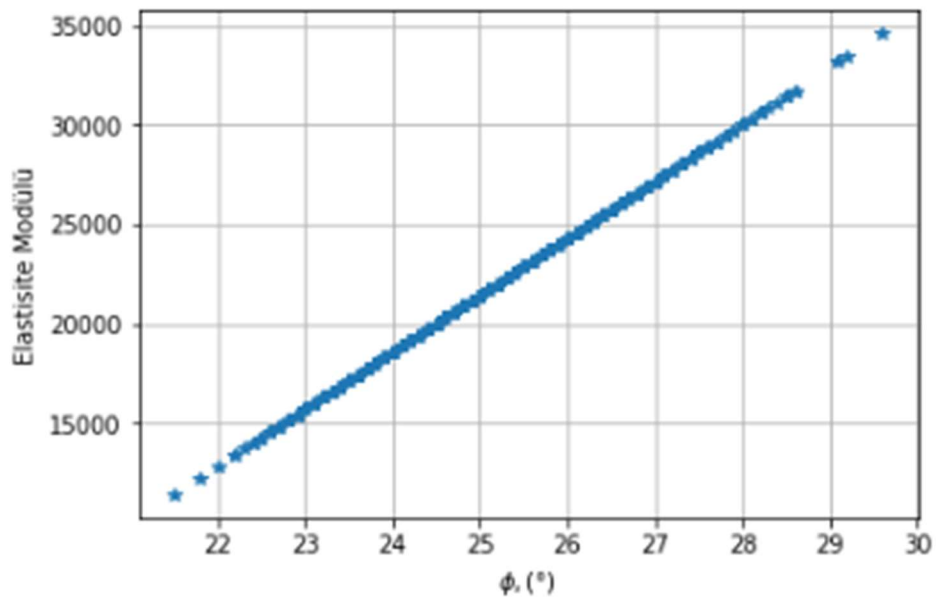


Şekil 5.11 Rastgele üretilen kayma mukavemeti açısına bağlı güvenlik sayısı

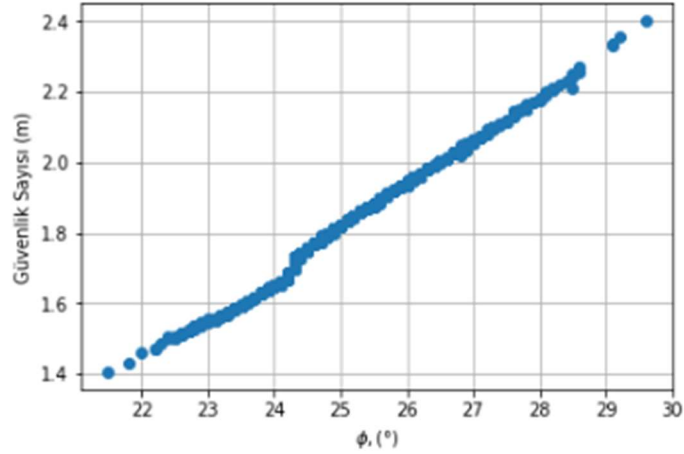
Şekil 5.12’de gösterildiği üzere, seçilen model ve zemin parametrelerine göre yatay deplasman değerleri 6 mm ile 16 mm arasında değişmektedir. Plaxis analizleri çıktılarından sıklıkla 8 mm - 10 mm arasında yatay deplasmanlar elde edilmiştir.



Şekil 5.12 Rastgele üretilen kayma mukavemeti açısına bağlı yatay deplasmanlar
Kayma mukavemeti açısı ile elastisite modülü arasındaki ilişki Şekil 5.13’te sunulmuştur. Kayma mukavemeti açısı arttıkça elastisite modülü artmaktadır.



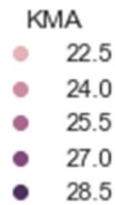
Şekil 5.13 Kayma mukavemeti açısı ve elastisite modülü arasındaki ilişki



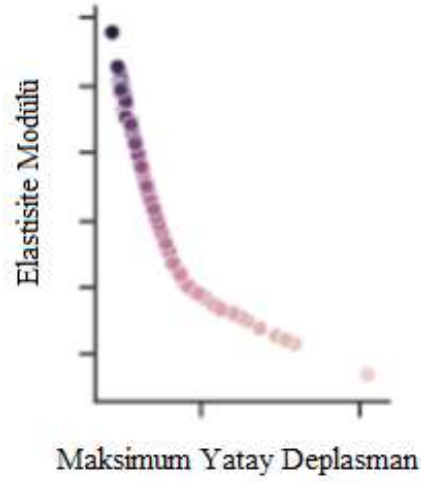
Şekil 5.14 Kayma mukavemeti açısı ve güvenlik sayısı arasındaki ilişki

Şekil 5.14'te gösterildiği gibi kayma mukavemeti açısı arttıkça yüksek güvenlik sayıları ile sistem çözülmüştür.

Üretilen her bir kayma mukavemeti açısı değerine göre elastisite modülü, yatay deplasman, güvenlik sayısı, ankraj kuvveti, blok göçme durumuna göre ankraj kuvveti ve blok göçme durumuna göre güvenlik sayısı belirlenmiştir. Python Seaborn kütüphanesi sayesinde rastgele üretilen kayma mukavemeti açısı ile elde edilen elastisite modülünün, yatay deplasmanın, güvenlik sayısının, ankraj kuvvetinin, blok göçme analizinde elde edilen ankraj kuvvetinin ve blok göçme durumuna göre güvenlik sayısının birbirleri ile olan ilişkisi grafik haline getirilmiştir. Grafiklerde yer alan renk tonlarının açıklamaları Şekil 5.15'te gösterilmiştir. Blok göçme analizi (Kranz) yöntemine göre gerçekleştirilen güvenilirlik analizlerinde, log - normal olasılık dağılıma göre random bir şekilde üretilen kayma mukavemeti açısına bağlı olarak belirlenmiş ankraj kuvvetleri kullanılmıştır.

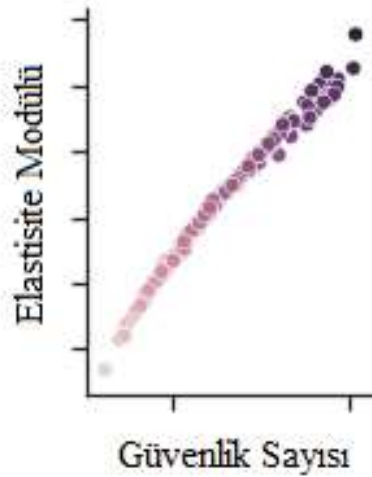


Şekil 5.15 Kayma mukavemeti açısına bağlı olarak elde edilen grafiklerde renk tonlarının anlamları



Şekil 5.16 Analiz sonucunda elastisite modülü ile yatay deplasman arasındaki ilişki

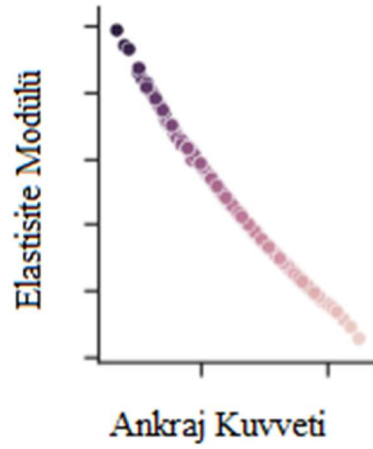
Şekil 5.16’da görüldüğü üzere, kayma mukavemeti açısı azaldıkça maksimum yatay deplasman artmakta elastisite modülü azalmaktadır. Geoteknik mühendisliği tasarımlarında elastisite modülü yatay deplasman açısından önem arz etmektedir. Bu çalışma ile kayma mukavemeti açısındaki belirsizliklerin elastisite modülüne etkisi ve elastisite modülü - yatay deplasman ilişkisini inceleme fırsatı olmuştur. Bu durum grafiğe elastisite modülü arttıkça maksimum yatay deplasmanın azalması olarak yansımıştır.



Şekil 5.17 Analiz sonucunda elastisite modülü ile güvenlik sayısı arasındaki ilişki

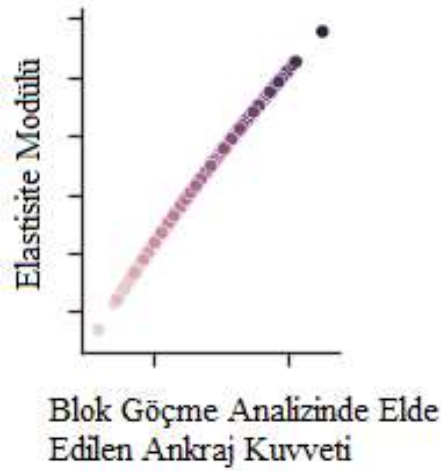
Şekil 5.17’de görüldüğü üzere kayma mukavemeti açısı arttıkça Plaxis analiz sonucundan elde edilen güvenlik sayısı ve elastisite modülü artmıştır. Dolayısıyla

daha doğru orantılı bir grafik elde edilmiştir. Kayma mukavemeti açısına bağlı olarak üretilen elastisite modülü arttıkça güvenlik sayılarında artış gözlemlenmiştir.



Şekil 5.18 Analiz sonucunda elastisite modülü ile ankraj kuvveti arasındaki ilişki

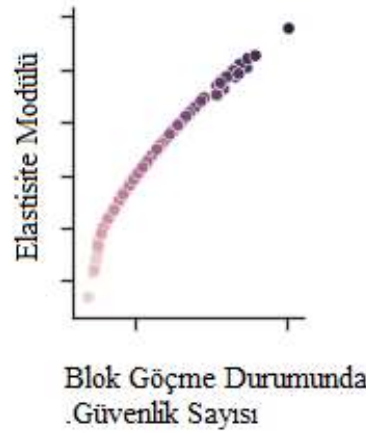
Şekil 5.18’de görüldüğü üzere kayma mukavemeti açısı nispeten azaldıkça ankraj kuvvetinin artma eğiliminde olduğunu, elastisite modülünün ise azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Kayma mukavemeti açısının daha düşük olduğu kohezyonlu zeminlerde gerekli olan öngerme ankraj kuvvetinin daha fazla olması gerektiği bu grafik ile yorumlanabilmektedir.



Şekil 5.19 Analiz sonucunda elastisite modülü ile blok göçme analizinde elde edilen ankraj kuvveti arasındaki ilişki

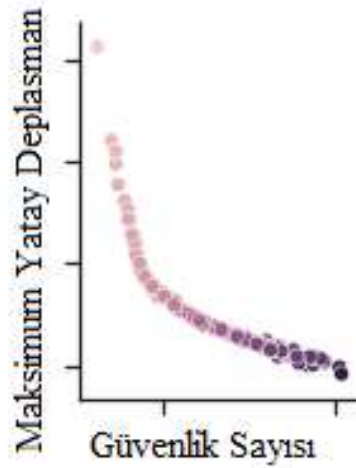
Kayma mukavemeti açısı arttıkça blok göçme analizinde elde edilen ankraj kuvveti ve elastisite modülü Şekil 5.19’da görüldüğü üzere artış göstermiştir. Kayma mukavemeti açısının hem ankraj kuvveti hem de elastisite modülü ile olan doğru

orantıya yakın ilişkisi grafikte doğru orantının nispeten daha fazla görülmesine neden olmuştur.



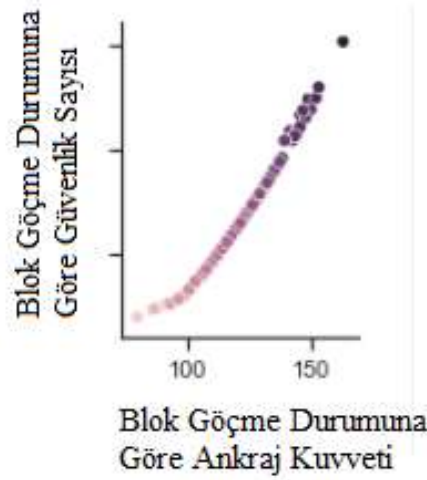
Şekil 5.20 Analiz sonucunda elastisite modülü ile blok göçme durumunda güvenlik sayısı arasındaki ilişki

Kayma mukavemeti açısı arttıkça blok göçme analizi sonucunda elde edilen güvenlik sayısı ve elastisite modülünde Şekil 5.20’de sunulduğu üzere artış meydana gelmiştir. Kayma mukavemeti açısının yaklaşık 28.5° değerlerinde, elastisite modülüne göre güvenlik sayısında nispeten daha fazla artış oluşmuştur.



Şekil 5.21 Analiz sonucunda maksimum yatay deplasman ile güvenlik sayısı arasındaki ilişki

Kayma mukavemeti açısı arttıkça, Şekil 5.21’de görüldüğü üzere güvenlik sayısının daha yüksek olduğu ve maksimum yatay deplasman değerlerinin daha düşük geldiği kısmen daha rijit bir sistem oluşmaktadır.



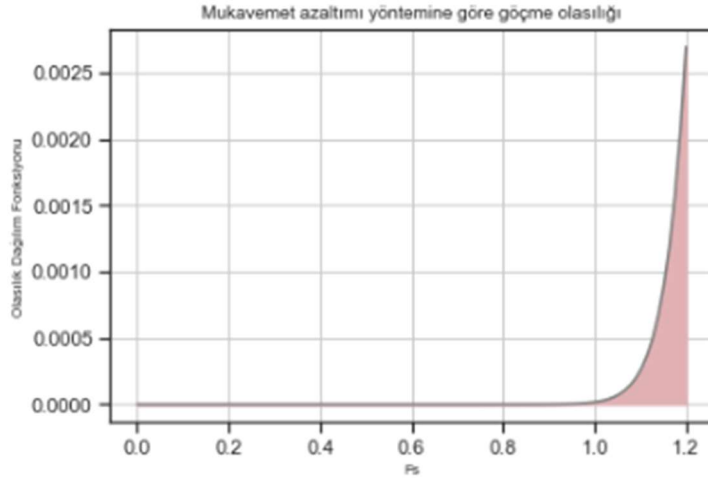
Şekil 5.22 Analiz sonucunda blok göçme durumuna göre ankraj kuvveti ile blok göçme durumuna göre güvenlik sayısı arasındaki ilişki

Kayma mukavemeti açısı arttıkça, Şekil 5.22’de görüldüğü üzere, blok göçme analizi ile daha yüksek güvenli analiz sonuçları ortaya çıkmıştır. Ayrıca kayma mukavemeti açısı arttıkça blok göçme analizi ile elde edilen ankraj kuvvetleri daha yüksek değerler almıştır. Sonuç olarak blok göçme analizi sonucunda elde edilen ankraj kuvvetleri arttıkça blok göçme analiz sonucundan elde edilen güvenlik sayıları da daha yüksek olmuştur.

Mühendislikte bir sistemin güvenilirliği söz konusu olduğunda göçme olasılığının belirlenmesi gerekmektedir. Göçme olasılığının belirlenmesi için göçme durumuna dolayısıyla limit denge analizlerine ihtiyaç vardır. Bu çalışma kapsamında, mukavemet azaltma yöntemi ve blok göçme durumuna göre göçme olasılığı hesaplanmıştır.

Mukavemet azaltma yönteminde, kayma mukavemeti parametreleri, c ve ϕ , göçme gerçekleşene ve denge çözümü ortadan kalkıncaya kadar azaltılır (Zienkiewicz ve Taylor, 1989). Bu yöntemde, gerçek kayma mukavemeti parametreleri bir dizi güvenlik sayısına bölünmektedir ve farklı kayma mukavemet parametreleri kullanılarak elastoplastik analizler gerçekleştirilmektedir. Plaxis analizinde güvenlik sayısı, hesaplama tipi “Safety Calculation” seçilerek belirlenmektedir. Güvenlik hesaplamasında c ve ϕ azaltma tekniği benimsenmiştir. Plaxis plastik analiz sonuçlarında $M_{stage}=1$ olması analizin tamamlanmış olduğunu göstermektedir. Fakat güvenilirliği hakkında bilgi vermemektedir. Mukavemet

azaltımı yöntemine göre göçme olasılığı %0.01 olarak elde edilmiştir ve Şekil 5.23'te grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 5.23 Mukavemet azaltımı yöntemine göre göçme olasılık dağılım fonksiyonu

Blok göçme durumuna göre ankraj bölümüne etki eden kuvvetlerin, palplanş duvar hesaplamalarından elde edilen gerçek kuvvetten daha büyük olduğunda sistem karardır. Özetle, sistem kararlılığı için potansiyel ankraj kuvvetinin gerçek ankraj kuvvetinden büyük olması gerekmektedir. Potansiyel ankraj kuvvetinin gerçek ankraj kuvvetine oranı 1,5'den büyükse sistem güvenlidir. Aksi takdirde ankraj serbest boyu artırılması önerilmektedir.

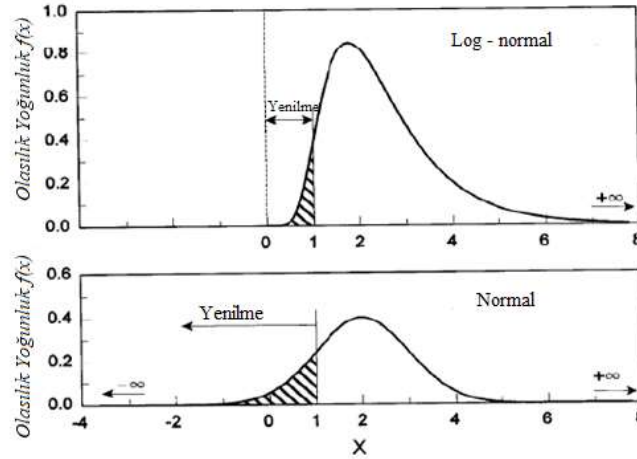
Bu kapsamda, Python yazılımı ile hazırlanan kod ile Kranz blok göçme yöntemi ile bulunan potansiyel ankraj kuvvetleri, Plaxis programı ile iterasyonlu bir şekilde gerçekleştirilen analiz sonuçlarından elde edilen ankraj kuvvetlerine oranlanmıştır. Bu oranın Eşitlik (5.1) de bahsedildiği üzere, 1.5'ten küçük olması göçme olarak nitelendirilmiştir. Fakat güvenilirlik analizleri değerlendirmeleri genellikle güvenlik sayısının 1,0'den küçük olduğu durumlara göre yapılmaktadır ve bu çalışmada göçme olasılığı FS=1,0'den küçük olduğu analiz sonuçlarına göre belirlenmiştir. Elde edilen göçme olasılığı ankrajın sıyrılmasına karşı sistemin göçme olasılığını ifade etmektedir.

$$F = \frac{T_{potansiyel}}{T_{gerçek}} \geq 1,5 \quad (5.1)$$

Eşitlik (5.1) ile güvenlik sayıları hesaplandığında dikkate alınan destekleme sisteminin ankraj bloğu göçme durumu için göçme olasılığı %67 olarak bulunmuştur.

Sistemin Göçme Olasılığı

Sistemin göçme olasılığının belirlenmesinde Şekil 5.24'te verilen log - normal ve normal dağılım olasılık yoğunluk grafikleri dikkate alınmıştır.



Şekil 5.24 Log - normal ve normal dağılım olasılık yoğunluk grafikleri için göçme olasılığı tanımı (Odabaş, 2016)

Şekil 5.25'te blok göçme analiz sonuçlarında elde edilen güvenlik sayılarının olasılık dağılım grafiği gösterilmektedir. Göçme olasılığı iki farklı şekilde bulunabilmektedir. İlk olarak Eşitlik (2.5) yardımıyla 669 adet göçen analiz sayısının 1000 adet toplam analiz sayısına oranlanmasıyla yaklaşık %67 olarak hesaplanmıştır. İkinci olarak Şekil 5.25'te sunulan grafikte $FS < 1$ 'den küçük gelen kısmın alanı bulunarak göçme olasılığı belirlenebilmektedir. Şekil 5.25'te verilen olasılık dağılım fonksiyonunun tüm alanı 1'e eşit olmaktadır. Bu sebeple grafikte $FS > 1$ 'den büyük değerlerin olduğu bölgenin alanı 1'den çıkartılarak göçme olasılığı hesaplanabilmektedir. Log - normal olasılık dağılım fonksiyonuna sahip olan grafikte sonuçlar, standart sapma (σ) 0,23 ve ortalama (μ) 0,94 değerlerine sahiptir. Log - normal olasılık dağılım fonksiyonunda logaritmik eğrinin alanı normal dağılım fonksiyonundan yararlanılarak hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada log - normal değerler normalize edilerek ve Z tablosu kullanılarak hesaplama kolaylığı sağlanmıştır. Z tablosu matematik ve istatistiksel hesaplamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

X rassal değişkeni $y=\ln(X)$ dönüşümü ile normal dağılıma sahip oluyorsa X rassal değişkeni log-normal dağılıma sahip demektir. Bu durumda y değişkeninin ortalama ve varyansının bilinmesi gerekmektedir. Y değişkeninin ortalaması Eşitlik (5.2) ve varyansı ise Eşitlik (5.3) ile hesaplanmaktadır.

$$\mu_y = \ln \left[\frac{\mu_x}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} + 1}} \right] = \ln \left[\frac{0.94}{\sqrt{\frac{0.23^2}{0.94^2} + 1}} \right] = -0.094 \quad (5.2)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\ln \left(\frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} + 1 \right)} = \sqrt{\ln \left(\frac{0.23^2}{0.94^2} + 1 \right)} = 0.2387 \quad (5.3)$$

P (X>1) koşulu için olasılık hesaplanıp sonuç 1'den çıkartılacaktır.

P (X>1) $y = \ln(X) = \ln(1) = 0$ durumunda X log-normal dağılımı, y ise normal dağılımı temsil etmektedir.

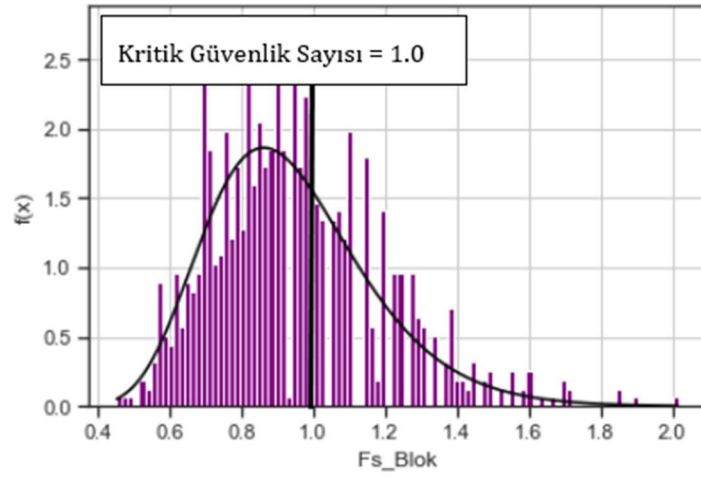
P (y>0) durumu için standart değere dönüştürme işlemi Eşitlik (5.4) yardımıyla Z tablosundan faydalanılarak yapılmaktadır.

$$Z = \frac{y - \mu_y}{\sigma_y} = \frac{0 - (-0.094)}{0.2387} = 0.327 \quad (5.4)$$

Eşitlik (5.4) sonucunda bulunan 0,327 değeri Şekil 5.26'da gösterilen Z tablosundan 0,3745 olarak okunmuştur. P (X<1) durumu için göçme olasılığı Eşitlik (5.5) ile %62 bulunmuştur.

$$P (X<1) = 1 - P (X>1) \quad (5.5)$$

Sonuç olarak olasılık dağılım fonksiyonunun 1'den küçük kısımlarının alanının bulunmasıyla elde edilen göçme olasılığı, göçen analiz sayısının toplam analiz sayısına oranlanmasıyla bulunan göçme olasılığı birbirine yakın çıkmıştır. Tablo 5.2'de göçmeye ulaşan analiz sayısı ve karşılık gelen göçme olasılığı ve güvenilirlik endeksi özetlenmiştir.



Şekil 5.25 Güvenlik sayısı olasılık dağılım fonksiyon grafiği

Z Tablosu										
z	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2297	0.2266	0.2236	0.2207	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1563	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1094	0.1075	0.1057	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0352	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233

Şekil 5.26 Z Tablosu

Tablo 5.2 Göçme olasılığı ve karşılık gelen güvenilirlik endeks değeri

Analiz Sayısı (n)	Göçmeye ulaşan Analiz Adedi ($F_s < 1.0$)	P_f (%)	β
1000	669	67	1,09

Monte Carlo Simülasyon yöntemi ile güvenilirlik endeksi, güvenlik sayılarının ortalama değeri ile kritik güvenlik sayısı değeri olan 1.0 arasındaki standart sapmaların ifadesidir (Akbaş, 2015).

Güvenilirlik endeksi Eşitlik (5.6) ve (5.7) ile belirlenebilmektedir.

Güvenlik sayısı dağılım sonuçları normal dağılım ise Eşitlik (5.6) ile,

$$\beta = \frac{\mu - 1}{\sigma} \quad (5.6)$$

Güvenlik sayısı dağılım sonuçları log - normal dağılım ise Eşitlik (5.7) ile bulunmaktadır.

$$\beta_{LN} = \frac{\ln \left(\frac{\mu}{\sqrt{1+COV^2}} \right)}{\sqrt{1+COV^2}} \quad (5.7)$$

Varyasyon katsayısı (COV) Eşitlik (5.8) ile hesaplanmaktadır.

$$COV = \frac{\text{standart sapma } (\sigma)}{\text{ortalama } (\mu)} \quad (5.8)$$

Bu tez çalışmasında log - normal olasılık dağılımı kullanıldığı için Eşitlik (5.7) kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlar ile standart sapma (σ) 0,23 ve ortalama (μ) 0,94 olarak belirlenmiştir.

Güvenilirlik sayısı (β) ile göçme olasılığı (P_f) arasındaki ilişki doğrusal olmadığı için aralarında kolayca ilişki kurulamaz. Tablo 2.2 ile β ve P_f aralarındaki ilişki tespit edilebilir. Bu çalışma kapsamında, hedef güvenilirlik endeksi olarak Tablo 2.2’de belirtilen Kanada Otoyol Köprüsü Tasarım Kodu (CHBD 2014)’nda en düşük güvenilirlik endeks değeri 2.30 seçilmiştir.

Elde edilen 1,09 güvenilirlik endeks değeri (β), Tablo 2.2’de gösterilen beklenen performans seviyesi açısından yetersiz olarak ifade edilebilir.

Bu tez çalışması kapsamında, geoteknik tasarımlar için önemli bir parametre olan kayma mukavemeti açısındaki belirsizliğin öngerme ankrajlı kazı destekleme sistemleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonlu elemanlar modeli ile modellenen öngerme ankrajlı palplanş duvar üzerinde güvenilirlik analizleri yapılmıştır. Belirsizlik ve güvenilirlik analizlerini gerçekleştirebilmek amacıyla, geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan Plaxis programında gömülü halde bulunan Python programlama dili kullanılmış olup güvenilirlik değerlendirmesi Monte Carlo Simülasyon yöntemi ile yapılmıştır. Python yazılım dili kolay öğrenilebilen ve okunabilen bir dil olması sebebi ile geoteknik mühendisliğinde güvenilirlik analizini uygulamak için büyük bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca Pandas, Matplotlib, Seaborn, SciPy, Nltk, Scikit-learn gibi zengin kütüphanelere sahip olan Python, mühendislik ve diğer bilim disiplinlerinde verileri etkin bir şekilde kullanmayı, verilerle tekrarlı analizler yapmayı, verileri Excel ortamında sunmayı ve aynı zamanda verileri görselleştirerek yorum yapmayı kolaylaştırmaktadır. Bu tez çalışmasında Pandas, Matplotlib, Seaborn, Datetime, Numpy kütüphaneleri kullanılmıştır. Geoteknik mühendisliğinde en yaygın kullanılan Plaxis programının Python yazılım dilini içermesi, geoteknik mühendisliğinde belirsizlik ve güvenilirliğe dayalı tasarımın önünü açmıştır. Deterministik tasarımların yanısıra olasılık ve güvenilirliğe dayalı tasarım hesapları da böylelikle kolayca yapılabilmekte ve günümüzde teknolojinin gelişiminden yararlanılarak hesaplamalarda uygulanması gerekmektedir. Bu durum olasılık ve belirsizliğe dayalı tasarımın öneminin anlaşılması için önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında Plaxis ve Python işbirliği ile güvenilirlik analizini gerçekleştirmek yeterli olmuştur. Fakat OpenBox ve OpenTurns gibi belirsizlik yazılım paketlerinin güvenilirliğe dayalı tasarımlarda kullanılması tercih edilebilir.

Python programı aracılığı ve varyasyon katsayısı ile olasılık dağılımı gibi istatistiksel bilgiler yardımıyla kayma mukavemeti açısı rastgele bir şekilde üretilmiştir. Sistemin güvenilirliği blok göçme durumuna göre değerlendirilmiştir. Yapılan

alışmalar ışığında, sistem göçme olasılığı %67 olarak, güvenilirlik endeksi ise 1.09 olarak elde edilmiştir. Mukavemet azaltma yöntemine göre göçme olasılığı ise %0,01 olarak bulunmuştur. Plaxis analizleri ile yapılan plastik analizlerde sistemde göçme gerçekleşmemiştir. Bunun sebebi ise deterministik tasarım sırasında Bölüm 4.1.1'de bahsedilen tek sıra öngerme ankrajlı sistem için gerekli kriterlerin uygulanmasıdır.

Rastgele üretilen kayma mukavemeti açısı ile belirsizlik analizleri, geliştiren Python algoritmaları ile gerçekleştirilmiştir. Belirsizlik analiz sonuçları ışığında kayma mukavemeti açısı değişkenliğinin palplanş çakma derinliğine, yatay ankraj aralığına, ankraj kuvvetine ve ankraj serbest uzunluğuna etkisi incelenmiştir.

1) Zeminlerde kayma mukavemeti, zeminde göçme meydana gelmeden, gelen yük altında zeminin gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir. Bu ifadeden yola çıkılarak zeminin kayma mukavemeti açısı değeri arttıķa, gelen yüklere karşı daha dirençli olma eğilimi olabilmektedir. Bu sebeple öngerme ankraj ile desteklenmiş palplanş duvar tasarımında, kayma mukavemeti açısı arttıķa palplanş çakma derinliği azalmıştır.

2) Kayma mukavemeti açısının 25° - 35° değerleri arasında artmasının ankraj aralığına etkisi çok az olmakla birlikte 35° - 45° değerleri arasında ankraj aralığı artış göstermektedir. Fakat 45° değerinden sonra kayma mukavemeti açısı değeri artsa bile ankraj aralığı değişmemektedir.

3) Kayma mukavemeti açısı 25° - 35° aralığında kademeli bir şekilde ankraj kuvveti azalmaktadır fakat 35° - 50° arasında kayma mukavemeti açısı arttıķa ankraj kuvvetinde artış olduğu gözlemlenmiştir.

4) Kayma mukavemeti açısı ile serbest uzunluk arasında ters orantı olduğu anlaşılmaktadır.

Monte Carlo Simülasyon algoritması sayesinde tekrarlı bir şekilde üretilen kayma mukavemeti açısı değerlerine göre elastisite modülü, maksimum yatay deplasman, güvenlik sayısı, ankraj kuvveti, blok göçme analizine göre ankraj kuvveti ve blok göçme durumuna göre güvenlik sayısı değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar Python aracılığı ile hem Excel dosyası şeklinde hem de grafik şeklinde çıktı olarak alınabilmemiştir.

- Kayma mukavemeti açısı arttıkça, analiz sonuçlarından elde edilen maksimum yatay deplasmanlar azalmakta, elastisite modülleri ise artmaktadır.
- Tekrarlı analiz sonuçlarından elde edilen kayma mukavemeti açısının artması ile birlikte elastisite modülü de artmış ve sistem daha yüksek güvenlik sayıları ile çözülmüştür.
- Kayma mukavemeti açısı arttıkça elastisite modülünün artması ile birlikte, kayma dayanımı yüksek olan bir zemin için daha düşük ankraj kuvvetlerinin gerekli olduğu görülmüştür.
- Blok göçme analiz sonucuna göre, kayma mukavemeti açısı arttıkça ankraj kuvveti de artmaktadır. Elastisite modülü ve blok göçme analizine göre ankraj kuvveti arasındaki ilişki ise, elastisite modülü arttıkça ankraj kuvveti de artmaktadır.
- Kayma mukavemeti açısının artışıyla yatay deplasmanlar düşük mertebelerde oluşmaktadır ve güvenlik sayısı daha yüksek gelmektedir. Maksimum yatay deplasman ve güvenlik sayısı arasındaki ilişki ise ters orantıda olmaktadır.
- Kayma mukavemeti açısı arttıkça maksimum yatay deplasmanlar ve ankraj kuvveti azalma göstermektedir. Kayma dayanımı yüksek olan bir zeminde daha az ankraj kuvveti uygulanabilir ve düşük miktarda yatay deplasmanlara maruz kalınabilir.

Geleneksel yöntemlerle tasarlanan öngermeli ankrajla desteklenmiş palplanş duvar modeli belirsizlikleri dikkate alamaz ve elde edilen güvenlik sayıları sistemin güvenli olduğu anlamına gelmez. Bu sebeple öngerme ankrajlı palplanş duvar modellemesinde olasılıksal analizler kullanılması göçme olasılıklarının değerlendirilmesi açısından daha iyi olmaktadır.

Çalışmada belirtildiği üzere, literatürde önerilen hedef güvenilirlik endeks değerleriyle gerçekleşen güvenilirlik endeksleri arasında önemli derecede fark oluşmaktadır. Mevcut tasarımların olasılıksal değerlendirmelerine ivme kazandırmanın, yatay destekli derin kazıların hedef güvenilirlik endeksini belirlemede yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında, bir sonlu eleman modeli ile modellenen öngerme ankrajlı palplanş duvarın, kayma mukavemeti parametresinin tam ve doğru olarak belirlenmesinin yetersizliğinden dolayı belirsizlik ve güvenilirlik analizleriyle göçme olasılığı belirlenmiştir. Kayma mukavemeti açısı parametresiyle

birlikte kohezyon parametresinin de belirsizlik ve güvenilirlik analizlerine dahil edilmesi tavsiye edilmektedir. Buna ek olarak, zemin parametreleri arasındaki korelasyon yapıldığında ortaya çıkan dönüşüm belirsizliğinin de incelenmesi önerilmektedir. Korelasyondan kaynaklanan dönüşüm belirsizliğinin incelenebilmesi için, önce bağımsız değişkenlerin belirsizliğe etkisinin analiz edilmesi korelasyon etkisinin değerlendirilmesine katkıda bulunacağı düşünülmektedir. Jeoloji ve yapısal geometriden kaynaklanan belirsizliklerin etkileri önemli olabilir. Bu sebeple yapılacak araştırmalarda bu etkilerin değerlendirilmeleri tavsiye edilmektedir.



- AASHTO. (2012). LRFD Bridge Design Specifications. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Akbaş, B. (2015). Probabilistic slope stability analysis using limit equilibrium, finite element and random finite element methods (Master's thesis, Middle East Technical University).
- Aslay, Z. (2013). Derin Kazılara Komşu Yapılar İçin Geoteknik Risk Analizleri (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Baecher, G. B., and Christian, J. T. (2003). Reliability and statistics in geotechnical engineering, Wiley, Hoboken, NJ, 605.
- Basha, B.M. and Sivakumar Babu, G.L. (2008). Target reliability based design optimization of anchored cantilever sheet pile walls. *Canadian Geotechnical Journal* 45(4), 535-548.
- Basheer, I. and Najjar, Y. (1996). Reliability-based design of reinforced earth retaining walls. *Transportation Research Record* 1526(1), 64-78.
- Basma, A.A. (1991a). Reliability-based design of sheet pile structures. *Reliability Engineering & System Safety* 33(2), 215-230.
- Basma, A.A. (1991b). Safety and reliability of anchored bulkhead walls. *Structural Safety* 10(4), 283-295.
- Bozkurt, S. (2019). Geoteknik risk analizinde sonlu elemanlar teorisinin kullanımı: Destekli derin kazılar için bir uygulama (Sinem Bozkurt – Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi.
- Broms, B. B. (1968). Swedish tie-back systems for sheet pile walls. *Acta Technica*.
- BS 8081, 1989. British Standard of Practice for Ground Anchorages, British Standard Institution.

- Byrne, R. J., Cotton, D., Porterfield, J., Wolschlag, C. and Ueblacker, G. (1998) "Soil Manual for design and construction monitoring of soil nail wall" *Manual of the Federal Highway Administration Division*, No. FHWA0-SA-96-069R.
- Cao, J., Liu, T. and Liu, H.M. (2014). Soil nailing reliability optimization design of foundation pit based on response surface method. *Applied Mechanics and Materials* 556, 4655-4659.
- Chalermyanont, T. and Benson, C.H. (2004). Reliability- based design for internal stability of mechanically stabilized earth walls. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130(2), 163-173.
- Chalermyanont, T., and C. H. Benson. 2005. "Reliabilitybased Design for External Stability of Mechanically Stabilized Earth Walls." *International Journal of Geomechanics* 5 (3).
- Chalermyanont, T. and Benson, C.H. (2005a). Method to estimate the system probability of failure of Mechanically Stabilized Earth (MSE) walls. *GeoFrontiers Congress 2005, Slopes and Retaining Structures Under Seismic and Static Conditions*, Austin, 2735-2749.
- Chalermyanont, T. and Benson, C. H. (2005b). Reliability-based design for external stability of mechanically stabilized earth walls. *International Journal of Geomechanics* 5(3), 196-205.
- Chen, J.B., Hu, Q. and Zhou, Y.W. (2011). Research of controlling for pile-anchor joint supporting structure on deformation of deep foundation pits. *Advanced Materials Research* 261, 1809-181.
- Cherubini, C. (1999). Probabilistic approach to the design of anchored sheet pile walls. *Computers and Geotechnics* 26(3), 309-330.
- Cherubini, C., Garrasi, A. and Petrolla, C. (1992). The reliability of an anchored sheet-pile wall embedded in a cohesionless soil. *Canadian Geotechnical Journal* 29(3), 426-435.
- Coulomb, C. A. (1776). "Essai sur une application des regles des Maximis et Minimis a quelques problemes de Statique relatifs a l'Architecture." *Memoirs Academie Royal Pres. Division Say. 7*, Paris, France (in French).

- Çınar, A. (2010). Trakya Formasyonunda Yapılan Öngermeli Ankrajlı Derin Kazıların Sonlu Elemanlar İle Modellenmesi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Çopan, M. (2020). Derin kazılı iksa sisteminin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi: İstanbul-Basf Teknopark örneği (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Das Braja, M. (1990). Principles of geotechnical engineering. PWS-KENT Publishing Company, Boston, Massachusetts, 7-98
- Das, B. M. (1995). *Soil Mechanics: Principles of geotechnical engineering, Volume 1 and 2*.
- Duncan, J. M. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(4), 307-316.
- Duncan, J. M. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(4), 307-316.
- El-Ramly, H., Morgenstern, N. R., & Cruden, D. M. (2005). Probabilistic assessment of stability of a cut slope in residual soil. *Geotechnique*, 55(1), 77-84.
- Fenton, G.A., Griffiths, D.V. and Williams, M.B. (2005). Reliability of traditional retaining wall design. *Géotechnique* 55(1), 55-62.
- Goh, A. T., Phoon, K. K., & Kulhawy, F. H. (2009). Reliability analysis of partial safety factor design method for cantilever retaining walls in granular soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135(5), 616-622.
- Goh, A.T.C. and Kulhawy, F.H. (2005). Reliability assessment of serviceability performance of braced retaining walls using a neural network approach. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 29(6), 627-642.
- Gordon A., Fenton, & Griffiths, V. D. (2008). Risk assessment in geotechnical engineering (pp. 381-399). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Griffiths, D. V., & Fenton, G. A. (2004). Probabilistic slope stability analysis by finite elements. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130(5), 507-518.

- Griffiths, D.V. and Fenton, G.A (Eds.). (2007). Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering. *Lecture notes, monographs, edited works and proceedings in the field of Mechanics, Engineering, Computer Science and Applied Mathematics*. Italy.
- Griffiths, D.V., Fenton, G.A. and Ziemann, H.R. (2008). Reliability of passive earth pressure. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* 2(2), 113-121.
- GuhaRay, A. and Baidya, D.K. (2014). Partial safety factors for retaining walls and slopes: A reliability based approach. *Geomechanics and Engineering* 6(2), 99-115.
- GuhaRay, A. and Baidya, D.K. (2015). Reliability-based analysis of cantilever sheet pile walls backfilled with different soil types using the finite-element approach. *International Journal of Geomechanics* 15(6), 6015001-11.
- Hasofer, A. M., & Lind, N. C. (1974). Exact and invariant second-moment code format. *Journal of the Engineering Mechanics division*, 100(1), 111-121.
- Hegazy, Y.A., Withiam, J.L., Gladstone, R.A. and Anderson, P.L. (2009). LRFD pullout resistance calibration of coherent gravity method for steel reinforced MSE walls. *17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, vol. 2, 1481-1484.
- Honjo, Y. (2011). Challenges in geotechnical reliability based design. *Geotechnical Safety and Risk*. ISGSR 2011, 11-28.
- Hui, C.Y. and Zhu, Y.P. (2013). Analysis of the reliability of soil nailing supporting structure. *Applied Mechanics and Materials* 353, 540-543.
- İncecik, M. (1977). Çok Ankrajlı Dayanma Perdelerinde Stabilité Problemleri. *İTÜ Dergisi*, 5, 18, 23.
- Josefino, C. S., Guerra, N. M. C., & Antão, A. N. (2017). Influence of the embedded length on the overall stability of single anchored retaining walls. *Soils Rocks*, 40(2), 133-145.
- Juang, C.H., Liu, Z. and Atamturktur, H.S. (2013). Reliability- based robust geotechnical design of retaining walls. *Sound Geotechnical Research to Practice: Honoring Robert D. Holtz II, Geotechnical Special Publication* 230, 514-524.
- Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler Hakkında Genelge, 2018.

- Keaton, J. R. (2013). Engineering geology: fundamental input or random variable. *In Foundation Engineering in the Face of Uncertainty: Honoring Fred H. Kulhawy* (pp. 232-253).
- Kim, D. and Salgado, R. (2012). Load and resistance factors for external stability checks of mechanically stabilized earth walls. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 138(3), 241-251.
- Koreta, O., Myftaraga, E. and Tanku, E. (2015). Probabilistic analysis of a cantilever sheet pile wall penetrating clay. *XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Edimburgh*, Vol. 7, 3965-3970.
- Kranz, E. (1953). Über die verankerung von Spundwänden. TU lib 13768530 (000151256).
- Kranz, W. (1940). Zur Notiz „Alte Steinbrüche“. *Geologische Rundschau*, 31(5-6), 437-438.
- Kulhawy, F. H. (2017). Foundation engineering, geotechnical uncertainty, and reliability-based design. *In Geotechnical Safety and Reliability* (pp. 174-184).
- Ledesma, O. N., Gibson, W., & Sfriso, A. O. (2019). Reliability-based design of an anchor-supported excavation. *In Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges* (pp. 585-592). IOS Press.
- Li, D.Q., Shao, K.B., Cao, Z.J., Tang, X.S. and Phoon, K.K. (2016). A generalized surrogate response aided-subset simulation approach for efficient geotechnical reliability-based design. *Computers and Geotechnics* 74, 88-101.
- Liu, Z., Juang, C.H. and Atamturktur, S. (2013). Confidence level-based robust design of cantilever retaining walls in sand. *Computers and Geotechnics* 52, 16-27.
- Low, B. K. 2008. "Practical Reliability Approach Using Spreadsheet." *In Reliability Based Design in Geotechnical Engineering Computations and Applications*. Chap. 3, edited by Phoon, 134168. London: Taylor & Francis.
- Low, B.K. (2005). Probabilistic design of anchored sheet pile wall. *16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka*, Vol. 4, 2825-2828.
- Low, B.K. and Phoon, K.K. (2015). Reliability-based design and its complementary role to Eurocode 7 design approach. *Computers and Geotechnics* 65, 30-44.

- Lu, R.L. and Jiang, Q.H. (2012). Reinforcement scheme and numerical simulation for sequential excavation of the deep foundation pit. *Applied Mechanics and Materials* 204, 359-365.
- Mandali, A.K., Sujith, M.S., Rao, B.N. and Maganti, J. (2011). Reliability analysis of counterfort retaining walls. *Electronic Journal of Structural Engineering* 11 (1), 42-56.
- Misra, A., & Roberts, L. A. (2009). Service limit state resistance factors for drilled shafts. *Geotechnique*, 59(1), 53-61.
- Miyata, Y. and Bathurst, R.J. (2012). Reliability analysis of soilgeogrid pullout models in Japan. *Soils and Foundations* 52(4), 620-633.
- NAVFAC, D. M. (1986). 7.02, *Foundations & Earth Structures*. Department of the Navy, Naval Facilities Engineering Command, Alexandria, VA.
- Odabaş, A. (2016). Monte Carlo Method Based Geotechnical Design Of Slopes Along The Banks Of Bartın River (Master's thesis, Dokuz Eylül University).
- Önal, O. Dayanma Yapıları, İmo – Miek Geoteknik Kurs Programı.
- Papaioannou, I. and Straub, D. (2010). Geotechnical reliability updating using stochastic FEM. *Reliability and Optimization of Structural Systems*, Munich, 155-162.
- Phoon, K. K. (Ed.). (2008). Reliability-based design in geotechnical engineering: computations and applications. *CRC Press*.
- Phoon, K. K., Chen, J. R., & Kulhawy, F. H. (2006). Characterization of model uncertainties for augered cast-in-place (ACIP) piles under axial compression. *In Foundation Analysis and Design: Innovative Methods* (pp. 82-89).
- Phoon, K. K., ve Kulhawy, F. H. (1999a). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 612-624.
- Phoon, K.K., Ching, J. 2015. Risk and reliability in geotechnical engineering. New York: *CRC Press*.
- Plumelle, C., & Schlosser, F. (1991). P3/4 A French national research project on soil nailing: Clouterre. *In Performance of reinforced soil structures* (pp. 219-223). Thomas Telford Publishing.
- Prada, F., Ramos, A., Solaque, D. and Caicedo, B. (2011). Reliability applied to the geotechnical design of a retaining wall. *Obras y Proyectos* 9, 49-58.

- Prastings, A., Larsson, S. and Müller, R. (2016). Multivariate approach in reliability-based design of a sheet pile wall. *Transportation Geotechnics* 7, 1-12.
- Rackwitz, R. (2000). Reviewing probabilistic soils modelling. *Computers and Geotechnics*, 26(3-4), 199-223.
- Ranke, A., & Ostermayer, H. (1968). Beitrag zur Stabilitätsuntersuchung mehrfach verankerter Baugrubenumschließungen. *Die Bautechnik*, (10).
- Rankine, W. 1857. On the stability of loose earth, *Philos. Trans. R. Soc. London*, 147, 9-27.
- Recep, A. K. A. N. (2020). Palplanş Duvarlarda Çakma Derinliğinin Etkisinin İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(2), 552-561.
- Rippi, K., & Teixeira, A. (2016). Reliability-based assessment of a retaining wall using FEM. *In Proceedings of the 25th European Young Geotechnical Engineers Conference*.
- Sabatini, P. J., Pass, D. G., & Bachus, R. C. (1999). *Ground anchors and anchored systems (No. FHWA-IF-99-015)*. United States. Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., & Ratto, M. (2004). Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models (Vol. 1). New York: Wiley.
- Sari, M., & Karpuz, C. (2006). Rock variability and establishing confining pressure levels. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 43, 328-335.
- Schweckendiek, T. (2006). Structural reliability applied to deep excavations. Coupling reliability methods with finite elements.
- Schweiger, H. F., & Peschl, G. M. (2005). Reliability analysis in geotechnics with the random set finite element method. *Computers and Geotechnics*, 32(6), 422-435.
- Sessa, S. and D'Urso, M.G. (2013). Employment of Bayesian networks for risk assessment of excavation processes in dense urban areas. *11th International Conference on Structural Safety and Reliability*, 3163-3169.
- SIA 191, (1977): Swiss Standart, Ground Anchorages, Part Stressing Procedures, Zurich.
- Sivakumar Babu, G.L. and Singh, V.P. (2009). Reliability analysis of soil nail walls. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* 3(1), 44-54.

- Sivakumar Babu, G.L. and Singh, V.P. (2010). Reliability analyses of a prototype soil nail wall using regression models. *Geomechanics and Engineering* 2(2), 71-88.
- Sivakumar Babu, G.L. and Singh, V.P. (2011). Reliability-based load and resistance factors for soil-nail walls. *Canadian Geotechnical Journal* 48(6), 915-930.
- Soubra, A. H., & Regenass, P. (1997). Overall Stability Analysis of Anchored Sheet Pile Structures. *In Ground anchorages and anchored structures: Proceedings of the international conference organized by the Institution of Civil Engineers and held in London, UK, on 20–21 March 1997* (pp. 100-108). Thomas Telford Publishing.
- Spry, M., Kulhawy, F. H., ve Grigoriu, M. D. (1988). Reliability-based foundation design for transmission line structures: *Geotechnical site characterization strategy*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1967). Soil mechanics in engineering practice, Wiley. New York, 566pages.
- Tschebotarioff, G. P. (1973): Foundations, Retaining and Earth Structure, McGraw-Hill, New York, pp.415-457.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1997). Introduction to Probability ve Reliability Methods for Geotechnical Engineering. *Engineering Technical Letter*, Dept of Army, Washington, DC.
- Viviescas, J. C., Osorio, J. P., & Cañón, J. E. (2017). Reliability-based designs procedure of earth retaining walls in geotechnical engineering. *Obras y proyectos*, (22), 50-60.
- Vrijling, J. K., & Van Gelder, P. H. A. J. M. (2000). Policy implications of uncertainty integration in design. *In Eighth International Symposium on Stochastic Hydraulics* (ISSH 2000)(pp. 633-646).
- Wang, Y. (2013). MCS-based probabilistic design of embedded sheet pile walls. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* 7(3), 151-162.
- Wang, Y., & Aladejare, A. E. (2015). Selection of site-specific regression model for characterization of uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 75, 73-81.
- Wang, Y., and F. H. Kulhawy. 2008. "Reliability Index for Serviceability Limit State of Building Foundations." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 34 (11).

- Wang, Y., and Zhao, T. (2016a). "Statistical interpretation of soil property profiles from sparse data using Bayesian compressive sampling." *Géotechnique*, 67(6), 523-536.
- Wang, Y., Cao, Z., & Au, S. K. (2010). Efficient Monte Carlo simulation of parameter sensitivity in probabilistic slope stability analysis. *Computers and Geotechnics*, 37(7-8), 1015-1022.
- Wang, Y., Cao, Z., & Li, D. (2016). Bayesian perspective on geotechnical variability and site characterization. *Engineering Geology*, 203, 117-125.
- Wang, Y., Schweckendiek, T., Gong, W., Zhao, T., ve Phoon, K. K. (2016). Direct probability-based design methods. Reliability of Geotechnical Structures in ISO2394. *London: CRC Press Taylor and Francis Group*, 193-226.
- Whitman, R.V., 1984. Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. *J. Geotech. Eng.* 110(2), 145-88.
- Yapı İşlerinde İşçi Sağlığı ve İş güvenliği Tüzüğü, Resmi Gazete, Eylül 1974.
- Yıldırım, S., (2004). *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Yıldırım, S. (2019) "*Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*", Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Zevgolis, I. E., & Bourdeau, P. L. (2010). Probabilistic analysis of retaining walls. *Computers and Geotechnics*, 37(3), 359-373.
- Zevgolis, I. E., and P. L. Bourdeau. 2010. "System Reliability Analysis of the External Stability of Reinforced Soil Structures." *Georisk* 4 (3).
- Zevgolis, I.E. and Bourdeau, P.L. (2008). Stochastic modeling of redundancy in mechanically stabilized earth (MSE) walls. *GeoCongress 2008, New Orleans*, 1179-1186.
- Zevgolis, I.E. and Bourdeau, P.L. (2010a). Probabilistic analysis of retaining walls. *Computers and Geotechnics* 37(3), 359-373.
- Zevgolis, I.E. and Bourdeau, P.L. (2010b). System reliability analysis of the external stability of reinforced soil structures. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* 4(3), 148-15.
- Zhang, L.L., Zhang, L.M. and Tang, W.H. (2009). Uncertainties of field pullout resistance of soil nails. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 135(7), 966-972.

- Zhao, Y.L. and An, W.G. (2011). Reliability-based stability analysis of a foundation pit supported by composite soil nailing. *Journal of Harbin Engineering University* 32(10), 1300-1304.
- Zhou, J., & Nowak, A. S. (1988). Integration formulas to evaluate functions of random variables. *Structural safety*, 5(4), 267-284.
- Zienkiewicz, O.C. ve Taylor, R.L., The Finite Element Method, Vol. 1, 4th Edition, McGrawHill, New York, 1989.
- Zohra, B. F., Lazhar, B., & Ammar, R. (2019). Proposed Improvements To Analytical Models of Anchored Retaining Walls. *Environmental & Engineering Geoscience*, 25(2), 115-126.



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Belirsizlik Etkisinde Derin Öngerme Ankrajlı Kazı Destekleme Sistemi Tasarımı, ICONSAD'21 Uluslararası Bilimsel Gelişmeler Kongresi, İstanbul, 2021.

