GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

GEOTEKNİK RİSK ANALİZİNDE SONLU ELEMANLAR TEORİSİNİN KULLANIMI: DESTEKLİ DERİN KAZILAR İÇİN BİR UYGULAMA

Sinem BOZKURT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2019

Sinem BOZKURT tarafından hazırlanan "GEOTEKNİK RİSK ANALİZİNDE SONLU ELEMANLAR TEORİSİNİN KULLANIMI: DESTEKLİ DERİN KAZILAR İÇİN BİR UYGULAMA" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Nejan Huvaj SARIHAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Üye: Prof. Dr. A. Samet ARSLAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Üye: Prof. Dr. Nail ÜNSAL

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Nabi Kartal TOKER

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Tez Savunma Tarihi: 11/01/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……..…….

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sinem BOZKURT

11/01/2019

GEOTEKNİK RİSK ANALİZİNDE SONLU ELEMANLAR TEORİSİNİN KULLANIMI: DESTEKLİ DERİN KAZILAR İÇİN BİR UYGULAMA

(Yüksek Lisans Tezi)

Sinem BOZKURT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2019

ÖZET

Deterministik sonlu elemanlar yöntemi ile mühendislik hesapları gerçekleştirilen derin kazı destek sistemlerinin güvenilirliğinin irdelenmesi, zemin değişkenliğinin etkisinin olasılıksal analizlerle birlikte tasarım aşamasına dahil edilmesini gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda Ankara, Söğütözü semtinde bir otel inşaatı için geleneksel deterministik yöntemlerle tasarlanan yaklaşık 20 m derinliğe haiz, ankraj destekli bir derin kazı ile İstanbul'da İstinye Park kompleksi geçici kazı imalatları için gerçekleştirilen zemin çivisi destekli derin kazı vaka örnekleri incelenmiştir. Çalışmalarda sahada gerçekleştirilen inklinometre okumaları vasıtası ile geri analizler yapılarak tespit edilen zemin dayanım parametreleri, zemin değişkenliği etkisi de analizlere dahil edilerek değerlendirilmiştir. Ankraj destekli derin kazı vakasında tanımlanan formasyon olan aşırı konsolide Ankara Kiline ait geoteknik parametrelerin olasılıksal dağılımları, literatürde oldukça detaylı biçimde incelenmiştir. Geoteknik parametre istatistikleri çerçevesinde Monte Carlo Simülasyon yöntemi vasıtasıyla üretilen zemin parametreleri sonlu eleman yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde kullanılmıştır. Ankara Kilinde sıklıkla rastlanan kum-çakıl bantlarının ankraj kapasitesinde önemli ölçüde azalmaya sebebiyet vereceği, yapılan deneyler neticesinde görülmektedir. Bu husus da dikkate alınarak zemin parametrelerinde görülen değişkenliğin, kazık yapısal kapasitesi ve kazık-duvar yanal deplasmanı üzerindeki etkisi başta olmak üzere sistem güvenilirliği çalışmalar dahilinde irdelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, sonlu eleman analizlerinin Python komut yazılımı ile otomasyonu gerçekleştirilmiş, Monte Carlo Simülasyon yöntemi vasıtasıyla geleneksel yöntemlerle tasarlanmış olan derin kazının güvenilirlik seviyesi ortaya çıkartılmıştır.

Bilim Kodu	:	91105
Anahtar Kelimeler	:	Derin kazılar, risk analizi, Monte Carlo simülasyonu, PLAXIS, Python
Sayfa Adedi	:	114
Danışman	:	Prof. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

APPLICATION OF FINITE ELEMENT METHOD IN GEOTECHNICAL RISK ANALYSIS: AN APPLICATION FOR SUPPORTED DEEP EXCAVATIONS

(M. Sc. Thesis)

Sinem BOZKURT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2019

ABSTRACT

Evaluation of the reliability of deep excavation support systems designed by the deterministic finite element method requires the inclusion of the effect of soil variability in conjunction with probabilistic analysis in the design phase. In this context, a 20 m deep excavation case history with anchor support in Söğütözü, Ankara designed with conventional deterministic methods and a deep excavation case history of a soil nailed wall designed for the temporary excavation of Istinye Park complex in Istanbul were investigated. In this study, in addition to effect of soil variability the soil strength parameters determined by back analysis via inclinometer readings were included in the analyzes. The probabilistic distributions of geotechnical parameters of the formation of over-consolidated Ankara Clay had been defined in the literature in detail. The soil parameters determined by Monte Carlo simulation method were used in the analyses performed by the finite element method. Experimental results indicate that sand-gravel bands which are common in Ankara Clay, cause a significant decrease in the anchorage capacity. Considering this effect, variability of soil parameters on wall structural capacity and wall lateral displacement is evaluated in this study. For this purpose, the finite element analysis is performed with Python scripting software and the reliability of the deep excavation designed with the conventional methods is examined by the Monte Carlo Simulation method.

Bilim Kodu	:	91105
Anahtar Kelimeler	:	Deep excavations, risk analysis, Monte Carlo simulation, PLAXIS, Python
Sayfa Adedi	:	114
Danışman	:	Prof. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım ve yüksek lisans eğitimim boyunca çok değerli katkılarıyla beni yönlendiren, süreç boyunca sabır ve hoşgörülerini benden esirgemeyen Hocam Sayın Prof. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ'a teşekkürlerimi sunarım. En büyük destekçilerim, çok sevgili ailem babam S. Mehmet BOZKURT, annem Müfide BOZKURT ve ablam İrem BOZKURT ÇAKIR'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

1.1. Problem Tanımlama ve Çalışmanın Kapsamı 1

1.2. Araştırmanın Amacı ve Önemi 2

2. GÜVENİLİRLİĞE DAYALI TASARIM LİTERATÜR İNCELEMESİ 5

2.1. Güvenilirliğe Dayalı Tasarım ve Monte Carlo Simülasyon Yöntemi 5

2.2. Zemin Bünyesinde Değişkenliğin Belirlenmesi 9

2.3. Hedef Yenilme Olasılığı ve Güvenilirlik Endeksi 12

2.4. Derin Kazı Tasarımına Dair İncelemeler 16

3. YÖNTEM 19

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM): PLAXIS 2D 19

3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi: Python - PLAXIS Harici Kodlama 21

4. SONLU ELEMAN ve MONTE CARLO SİMÜLASYON YÖNTEMLERİNİN ANKRAJ DESTEKLİ DERİN KAZI SİTEMLERİNDE KULLANIMI 25

4.1. Vaka İncelemesi 25

4.2. FEM Risk Analizlerine Esas Modelin Geri Analizi 29

4.3. FEM Analizlerinde Zemin Bünyesindeki Değişkenliğin Belirlenmesi 32

4.4. Yenilme Olasılığının Tariflenmesi 37

Sayfa

4.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) Risk Analizleri 40

4.5.1. Ankara Kili bünyesindeki değişkenliğin güvenilirlik analizleri dahilinde incelenmesi 42

4.5.2. Ankara Kili bünyesindeki değişkenliğin ve birim dahilinde kum-çakıl ihtivasının güvenilirlik analizleri dahilinde incelenmesi 51

4.6. Sonlu Eleman Yöntemi (FEM) Sonuçlarının Risk Analizleri Kapsamında Değerlendirilmesi ve Deterministik Sonlu Eleman Yöntemi ile Karşılaştırılması 59

5. SONLU ELEMAN ve MONTE CARLO SİMÜLASYON YÖNTEMLERİNİN ÇİVİ DESTEKLİ DERİN KAZI SİTEMLERİNDE KULLANIMI 61

5.1. Vaka İncelemesi 61

5.2. Risk Analizlerine Esas Modelin PLAXIS Yazılımı ile Geri Analizi 66

5.3. Yenilme Olasılığının Tariflenmesi 70

5.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) Risk Analizleri 71

5.5. M-C FEM Sonuçlarının Risk Analizleri Kapsamında Değerlendirilmesi ve RSM-FEM ile Karşılaştırılması 75

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 77

6.1. Sonuçlar 77

6.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler 79

KAYNAKLAR 81

EKLER 87

EK-1. PLAXIS – Python kodları, ankraj destekli derin kazı vakası 88

EK-2. PLAXIS – Python kodları, çivi destekli derin kazı vakası 103

ÖZGEÇMİŞ 114

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Tasarım parametreleri için yönerge 11

Çizelge 2.2. Güvenilirliğe dayalı tasarım için çeşitli kodlarda yer alan hedef güvenilirlik endeksi, β_t 13

Çizelge 2.3. Güvenilirlik endeksi, yenilme olasılığı ve karşılık gelen beklenen performans derecesi 15

Çizelge 2.4. Kazı çevresinin korunmasına dair kontrol kriterleri 17

Çizelge 4.1. Ankara Söğütözü derin kazı laboratuvar sonuçları 27

Çizelge 4.2. Vaka geri analizlerinde kullanılan başlangıç değerleri 28

Çizelge 4.3. Vaka kapsamında gerçekleştirilen geri analizlere ait Kil-1 birim parametreleri ve normalize deplasman sonuçları 28

Çizelge 4.4. Mövenpick Hotel inşaatı ankraj destekli iksa yapısı geometrik ve parametrik özellikleri 29

Çizelge 4.5. Vaka geri analizlerinde bulunan parametreler 30

Çizelge 4.6. Ankara Kili için farklı geoteknik parametrelerin bünyesel varyasyon katsayıları 33

Çizelge 4.7. Killer için farklı geoteknik parametrelerin bünyesel varyasyon katsayıları 33

Çizelge 4.8. Analizlerde kullanılan bazı değişkenler için varyasyon katsayıları 34

Çizelge 4.9. Ankara Kili kum-çakıl ihtivası tahlili örnek sondaj verileri 35

Çizelge 4.10. Ankara Kilinde kum-çakıl mercek varlığı 35

Çizelge 4.11. Ankrajlı dayanma yapıları geoteknik tasarım için yük ve direnç faktörleri 39

Çizelge 4.12. Risk analizlerinde kullanılan Kil-1 birime ait zemin değişkenleri 40

Çizelge 4.13. Ankara Kilinde kum-çakıl mercek varlığı doğrultusunda uygulanan ankraj yükleri 40

Çizelge 4.14. Kil-1 birim parametrelerinin tespitinde kullanılan korelasyonlar 41

Çizelge 4.15. Yalnızca zemin değişkenliği dahilinde gerçekleştirilen FEM nümerik analizleri yaklaşık süresi 44

Çizelge 4.16. Zemin değişkenliği dahilinde yenilme mekanizması 44

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.17. Elasto plastik analiz sonuçları (500 analiz) 50

Çizelge 4.18. Kum- çakıl ihtivası dahilinde zemin değişkenliği, gerçekleştirilen FEM nümerik analizleri yaklaşık süresi 52

Çizelge 4.19. Kum-çakıl ihtivası dahilinde zemin değişkenliği yenilme mekanizması . 56

Çizelge 4.20. Yalnızca zemin değişkenliği dahilinde FEM analizleri, kazık limit yanal deplasman ile kazık kapasite aşma olasılığı ve karşılık gelen güvenilirlik endeksi değerleri 59

Çizelge 4.21. Kum- çakıl ihtivası dahilinde zemin değişkenliği FEM analizleri, kazık limit yanal deplasman ile kazık kapasite aşma olasılığı ve karşılık gelen güvenilirlik endeksi değerleri 59

Çizelge 5.1. Zemin çivisi destekli vakalara ait tasarım ve performans parametreleri.. 62

Çizelge 5.2. İstinye Park zemin çivili iksa yapısı geometrik ve parametrik özellikleri 63

Çizelge 5.3. Tüm kazı aşamalarında Phase2 modelinden elde edilen yanal deplasman değerlerinin derinliğe bağlı değişimi 64

Çizelge 5.4. Risk değerlendirmelerinde kullanılan rastsal değişkenlere ait istatistiksel özellikler 65

Çizelge 5.5. İçsel sürtünme açısı ve elastisite modülü arasındaki lineer korelasyon ... 65

Çizelge 5.6. Vaka geri analizlerinde kullanılan parametreler 67

Çizelge 5.7. Tüm kazı aşamalarında PLAXIS modelinden elde edilen yanal deplasman değerlerinin derinliğe bağlı değişimi 68

Çizelge 5.8. Gerçekleştirilen FEM nümerik analizleri yaklaşık süresi 73

Çizelge 5.9. Zemin değişkenliği dahilinde yenilme mekanizması 73

Çizelge 5.10. Zemin değişkenliği dahilinde PLAXIS FEM analizleri, duvar limit yanal deplasman aşma olasılığı ve karşılık gelen güvenilirlik endeksi değerleri 75

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Geoteknik mühendisliğinde güvenilirliğe dayalı tasarım genel prosedürü... 5

Şekil 2.2. Farklı makalelere ait güvenilirliğe dayalı geoteknik tasarımda kullanılan simülasyon metotları ... 6

Şekil 2.3. Monte Carlo simülasyonu akış şeması ... 7

Şekil 2.4. Zemin özelliklerinin hesaplanmasındaki belirsizlikler ... 9

Şekil 2.5. Güvenilirliğe dayalı tasarımda belirsizlikler ... 10

Şekil 2.6. Destekli derin kazı sistemleri yenilme mekanizması ... 12

Şekil 2.7. Çeşitli geleneksel inşaat tesis ve büyük yapılarının ortalama yıllık riskini gösteren F-N eğrisi ... 14

Şekil 2.8. Güvenilirlik endeksi ve yenilme olasılığı arasındaki ilişki ... 15

Şekil 2.9. Kazı derinliğine karşılık gelen normalize maksimum yatay deplasman ... 16

Şekil 2.10. Örnek bir derin kazı problemi için toplam göreceli hassasiyet ... 18

Şekil 3.1. Standart drenajlı üç eksenli deneyi ön yükleme hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ... 19

Şekil 3.2. HS modeli asal gerilme koşulları toplam akma yüzeyi görünümü ... 20

Şekil 3.3. PLAXIS 2D harici kodlama kurulumu ... 22

Şekil 3.4. PLAXIS-Python iletişimi metodolojisi ... 22

Şekil 4.1. Vaka ankrajlı iksa sistemi bitmiş görünüş ... 25

Şekil 4.2. Eskişehir yoluna komşu cephe kesiti ... 26

Şekil 4.3. Derin kazı inklinometre okumaları ... 27

Şekil 4.4. Analizlere esas derin kazı geometrisi ... 29

Şekil 4.5. Vaka geri analizi, fore kazık yanal deplasmanı ($\delta_{maksyanal} \cong 26$ mm) ... 31

Şekil 4.6. Vaka geri analizi, fore kazık maksimum moment değeri (M_{maks}=236,7 kNm/m) ... 31

Şekil 4.7. Drenajsız kayma dayanımının bünyesel varyasyon katsayısının ortalama drenajsız kayma dayanımı ile değişimi ... 32

Şekil 4.8. Ankara Kili örnek sondaj verileri ... 36

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.9. Kum-çakıl mercek bantlarında uygulanan öngerme kuvvetine ait kabul edilen olasılıksal dağılım fonksiyonu 37

Şekil 4.10. M-C FEM yalnızca zemin değişkenliği, içsel sürtünme açısı histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz 42

Şekil 4.11. M-C FEM yalnızca zemin değişkenliği, kohezyon histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz 43

Şekil 4.12. M-C FEM yalnızca zemin değişkenliği, kazık momenti histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz..... 43

Şekil 4.13. M-C FEM yalnızca zemin değişkenliği, kazık yanal deplasman histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz 43

Şekil 4.14. PLAXIS analizi, yarma şevi yenilme mekanizması 45

Şekil 4.15. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (100 analiz)..... 46

Şekil 4.16. FEM analizi kazı sonu maksimum kazık momenti dağılımı (100 analiz) 46

Şekil 4.17. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (300 analiz)..... 46

Şekil 4.18. FEM analizi kazı sonu maksimum kazık momenti dağılımı (300 analiz) 47

Şekil 4.19. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (500 analiz)..... 47

Şekil 4.20. FEM analizi kazı sonu maksimum kazık momenti dağılımı (500 analiz) 47

Şekil 4.21. Maksimum eğilme momenti ve eksenel kuvvet kombinasyonu 48

Şekil 4.22. Donatı çeliği davranışı (Yeniden düzenlenmiştir, orijinal kaynak: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007) 49

Şekil 4.23. Fore kazık N_p, M_p tespitinde kullanılan etki diyagramı 50

Şekil 4.24. M-C FEM zemin değişkenliği ve kum-çakıl ihtivası, içsel sürtünme açısı histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz 52

Şekil 4.25. M-C FEM zemin değişkenliği ve kum-çakıl ihtivası, kohezyon histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz 53

Şekil 4.26. M-C FEM zemin değişkenliği ve kum-çakıl ihtivası, kazık momenti histogramları: (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz 53

Şekil 4.27. M-C FEM zemin değişkenliği ve kum-çakıl ihtivası, kazık yanal deplasman histogramları: (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz..... 53

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.28. M-C FEM zemin değişkenliği ve kum-çakıl ihtivası, içsel sürtünme açısı histogram (1000 analiz) 54

Şekil 4.29. M-C FEM zemin değişkenliği ve kum-çakıl ihtivası, kohezyon histogram (1000 analiz) 54

Şekil 4.30. M-C FEM zemin değişkenliği ve kum-çakıl ihtivası, kazık momenti histogram (1000 analiz) 55

Şekil 4.31. M-C FEM zemin değişkenliği ve kum-çakıl ihtivası, kazık yanal deplasman histogram (1000 analiz) 55

Şekil 4.32. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (100 analiz)..... 56

Şekil 4.33. FEM analizi kazı sonu maksimum kazık momenti dağılımı (100 analiz) 56

Şekil 4.34. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (300 analiz)..... 57

Şekil 4.35. FEM analizi kazı sonu maksimum kazık momenti dağılımı (300 analiz) 57

Şekil 4.36. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (500 analiz)..... 57

Şekil 4.37. FEM analizi kazı sonu maksimum kazık momenti dağılımı (500 analiz) 58

Şekil 4.38. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (1000 analiz)..... 58

Şekil 4.39. FEM analizi kazı sonu maksimum kazık momenti dağılımı (1000 analiz) .. 58

Şekil 5.1. İstinye Park vakası, inklinometre No:4 okumaları, kesit ve görünüş (Durgunoğlu ve diğerleri, 2007) 62

Şekil 5.2. İstinye Park Kompleksi Phase^2 modeli, her bir aşamada hesaplanan yanal deplasmanlar 64

Şekil 5.3. Analizlere esas derin kazı geometrisi 67

Şekil 5.4. Vaka geri analizi, duvar maksimum yanal deplasmanı ($\delta_{maksyanal} \cong 25$ mm) 68

Şekil 5.5. İstinye Park Kompleksi PLAXIS modelinde her bir aşamada hesaplanan yanal deplasmanlar..... 69

Şekil 5.6. PLAXIS ve Phase^2 sonlu eleman yöntemleri ile gerçekleştirilen geri analize ait karşılaştırma..... 69

Şekil 5.7. M-C FEM yalnızca zemin değişkenliği, içsel sürtünme açısı histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz 71

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.8. M-C FEM yalnızca zemin değişkenliği, birim hacim ağırlık histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz..... 72

Şekil 5.9. M-C FEM yalnızca zemin değişkenliği, elastisite modülü histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz..... 72

Şekil 5.10. M-C FEM yalnızca zemin değişkenliği, duvar yanal deplasman histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz 72

Şekil 5.11. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (100 analiz)..... 74

Şekil 5.12. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (300 analiz)..... 74

Şekil 5.13. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (500 analiz)..... 74

Şekil 5.14. PLAXIS analizinde oluşan plastik noktalar..... 76

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A_c	Beton kesit alanı
A_{st}	Kayma donatısı alanı
c_u **(arazi)**	Veyn deneyi düzeltilmiş drenajsız kayma dayanımı
f_{ck}	Karakteristik basınç dayanımı
f_u	Boyuna donatı kopma dayanımı
f_{yk}	Boyuna donatı akma dayanımı
E_m	Kaya kütlesi modülü
$G(x)$	Sistem performans fonksiyonu
K_h	Yatay itki katsayısı
$M_{deterministik}$	Maksimum kazık momenti
M_{stage}	PLAXIS plastik analiz başarı oranı
M_p	Betonarme kazık moment kapasitesi
N_p	Betonarme kazık eksenel kapasitesi
n_f	Yenilen analiz adedi
p_T	Hedef yenilme olasılığı
p_f	Yenilme olasılığı
s_u	Drenajsız kayma dayanımı
TC	Üç eksenli basınç deneyi
β	Güvenilirlik endeksi
β_t	Hedef güvenilirlik endeksi
δ_{ymaks}	Maksimum yanal deplasman
ϕ'	Efektif içsel sürtünme açısı
ϕ' **(CV)**	Kritik durum sabit hacim ϕ
μ	Ortalama
σ	Standart sapma
Φ	Standart normal olasılık dağılım fonksiyonu

Kısaltmalar	Açıklamalar
CIUC	Konsolidasyonlu izotropik drenajsız üç eksenli basınç deneyi
COV	Varyasyon katsayısı
FEM	Sonlu elemanlar yöntemi
M-C	Monte Carlo
PDF	Olasılık yoğunluk fonksiyonu
SLS	Hizmet verebilirlik sınır denge durumu
ULS	Nihai sınır denge durumu
UU	Konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneyi

1. GİRİŞ

Günümüzde güvenilirliğe dayalı geoteknik tasarıma verilen önem giderek artmaktadır. Ancak standart saha araştırmalarıyla gerekli veri setinin büyük alt yapı projeleri haricinde elde edilemiyor olması ve nümerik analizlere olasılık kavramını dahil etmenin kompleks geoteknik yapılarda hesaplama zorluğuna yol açması sebebiyle geoteknik pratiğinde olasılık analizlerine dayalı uygulama örneklerine nadiren rastlanmaktadır (Schweiger ve Peschl, 2005). Geoteknik mühendisliğinde destekli derin kazıların güvenilirliğini belirlenmesi hususunda, son yıllarda gelişen teknolojik ilerlemeler sayesinde büyük kolaylıklar sağlanmıştır.

Ankara Kili'ne ait geoteknik parametre değişkenliğinin ve kum bantları varlığının sistem güvenilirliği üzerindeki etkisi, ankraj destekli bir derin kazı vakası baz alınarak incelenmiştir. Ayrışmış kayaç birimlerde teşkil edilecek zemin çivisi destekli iksa yapılarının güvenilirliğinin tespitine yönelik olarak ise Grovak birimde imal edilen bir derin kazı vakası irdelenmiştir.

1.1. Problem Tanımlama ve Çalışmanın Kapsamı

Destekli derin kazı vakaları öncelikle deterministik yöntemlerle, sahada inklinometre okumalarında tespit edilen hareketi modellemek üzere geri analize tabi tutulmuştur. Ankraj destekli derin kazı vakası deterministik analizleri neticesinde, Bridge Design Specifications AASHTO (2012) ve Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları TS500 (2000) şartnameleri uyarınca yük artırım faktörleri kullanılarak kazık yapısal kapasitesi elde edilmiştir. Çalışmalar kapsamında zemin parametrelerinde mevcut olan değişkenliğin kazık yapısal kapasitesi, kazık-duvar yanal deplasman limitlerinin aşılması gibi yenilme mekanizmaları ve neticesinde sistem güvenilirliği üzerindeki etkisinin tespitine olanak tanıyan PLAXIS 2D programı ile sonlu elemanlar (FEM) analizleri gerçekleştirilmiştir. Zemin parametrelerindeki değişkenlik Monte Carlo (M-C) simülasyon yöntemi vasıtası ile modellenmiştir. PLAXIS 2D programı kullanılarak M-C Simülasyonu destekli sonlu eleman analizleri gerçekleştirilebilmesi, arayüz kullanım ihtiyacını doğurmaktadır. Bu kapsamda Python komut yazılımı ile harici kodlama gerçekleştirilerek çoklu analiz gerçekleştirme olanağı sağlanmıştır.

Geleneksel deterministik yöntemlerle hesaplanan derin kazıların güvenilirliğinin, bu çalışma kapsamında zemin heterojenliği dikkate alınarak incelendiğinde önemli ölçüde değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Yukarıda belirtilen hususlardan hareket ile bu çalışmanın ana amacı, M-C simülasyonu vasıtasıyla destekli derin kazılarda zemin değişkenliğini modelleyerek sonlu eleman analizleri gerçekleştirmek ve sonuçları deterministik yöntemlerle karşılaştırarak risk değerlendirmelerinde bulunmaktadır.

Bu noktadan hareketle çalışmanın ikinci bölümünde, zemin değişkenlerine ait geoteknik parametreler ve güvenilirliğe dayalı tasarım kavramlarından kısaca bahsedilmiş, ardından derin kazı sistemleri için yenilme olasılığı tanımlanmış ve literatürdeki güvenilirlik endeksi değerlerine yer verilmiştir.

Üçüncü bölüm kapsamında sonlu elemanlar yöntemi özet biçimde tanıtılmıştır. M-C simülasyon yöntemi ile hesaplanan rastgele değişken parametrelerinin PLAXIS 2D analizlerinde kullanılması ve PLAXIS-Python arayüzü kullanımı adım adım açıklanmıştır.

Dördüncü ve beşinci bölümlerde, analizlere esas ankraj ve zemin çivisi destekli vaka örneklerinin incelenmesi, özellikle bu çalışmada kullanılan geoteknik parametrelerin değişkenliğinin, istatistiksel özelliklerinin belirlenmesi, vaka örneklerine ait yenilme mekanizmasının tanımı ve risk analizlerinin gerçekleştirilmesi incelenen başlıca konulardır. Ankraj destekli derin kazı vakasında tanımlı formasyon olan aşırı konsolide Ankara Kiline ait zemin değişkenliğinin ve kum bantlarının varlığının analizlere etkisi ayrı başlıklar altında değerlendirilmiştir.

Son bölümde ise yenilme olasılığından hareketle tasarımların güvenilirlik endekslerinin tahmini gerçekleştirilmiş, elde edilen temel sonuçlar ve ilerideki çalışmalarda üzerinde durulması önerilen konular belirtilmiştir.

1.2. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Bu çalışma kapsamında derin kazı tasarımlarına yönelik olarak aşağıdaki sorulara cevap aranmıştır.

- Ankara Kili bünyesindeki geoteknik parametre değişkenliğinin derin kazı tasarımına ve güvenilirliğine etkileri nelerdir?

- Ankara Kilinde yer alan kum-çakıl merceklerin tasarım ve güvenilirlik üzerinde etkileri nelerdir?

- Uygulamada M-C simülasyonu sonlu elemanlar yöntemine pratik biçimde entegre edilebilir mi?

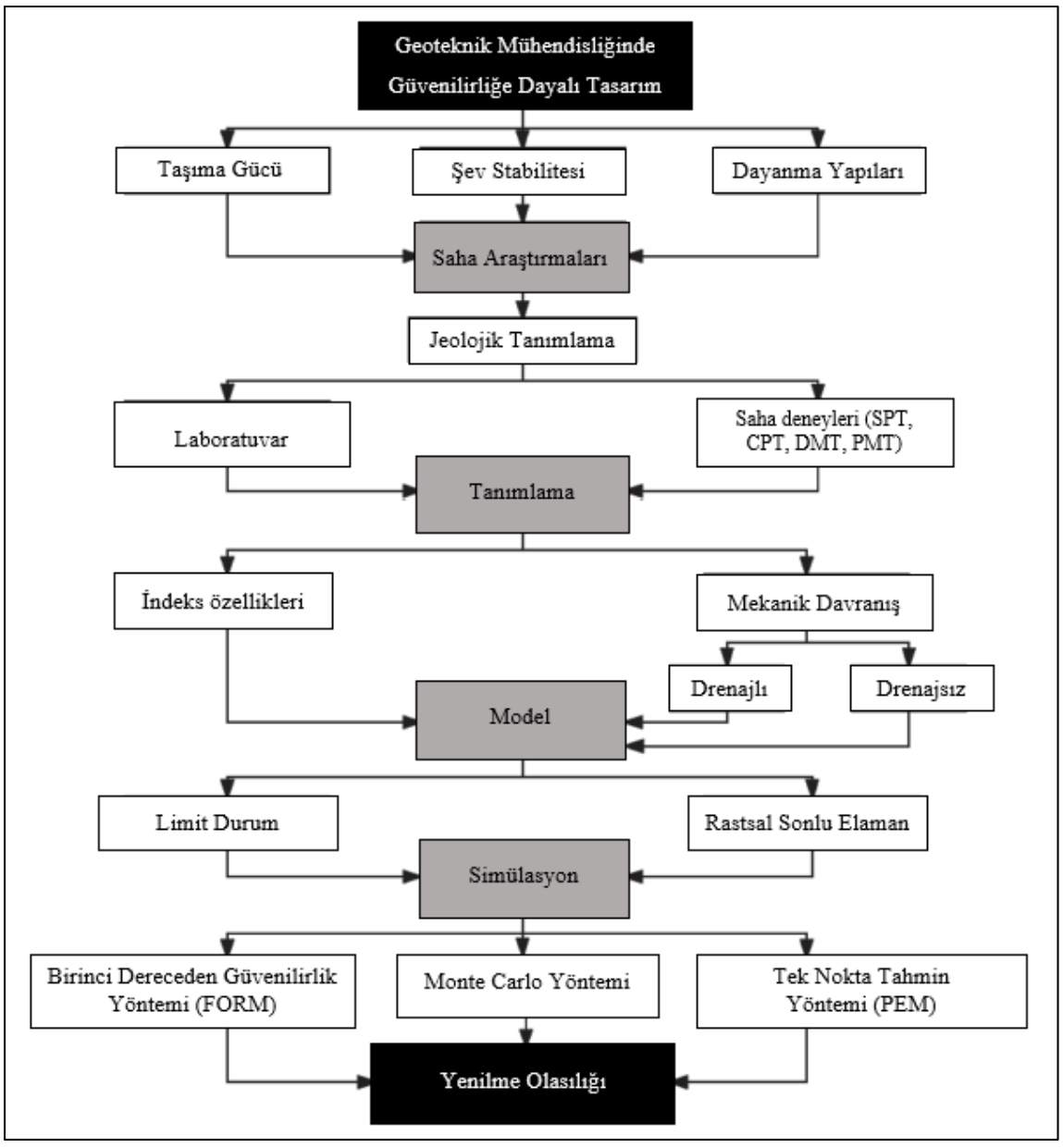
- Geleneksel yöntemlerle dizayn edilen ankraj ve zemin çivisi destekli derin kazıların tasarımı risk değerlendirmeleri kapsamında incelendiğinde ortaya çıkan sonuçlar nelerdir?

Geoteknik risk değerlendirmeleri kapsamında irdelenen konuların derin kazı sistem güvenilirliğinin tahlili hususunda aydınlatıcı olacağı düşünülmektedir. Yürütülen çalışmadan hareketle, geleneksel yöntemler kullanılarak yalnızca mühendislik karar ve kabulleri doğrultusunda gerçekleştirilen tasarımların olasılıksal analizlerle desteklenmesi gerektiğine inanılmaktadır.

2. GÜVENİLİRLİĞE DAYALI TASARIM LİTERATÜR İNCELEMESİ

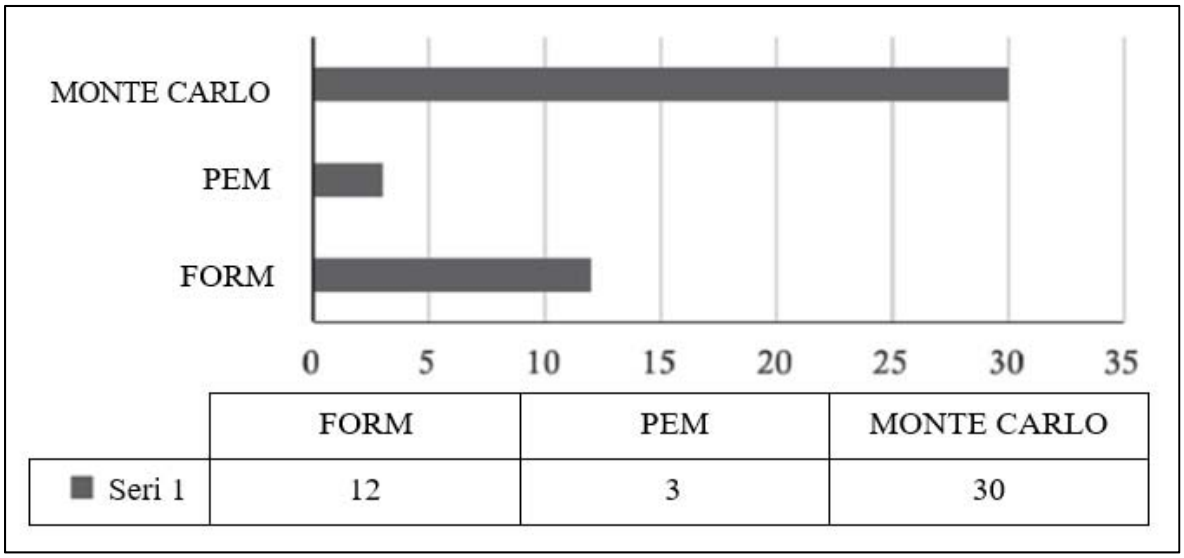
2.1. Güvenilirliğe Dayalı Tasarım ve Monte Carlo Simülasyon Yöntemi

Geoteknik tasarımların olasılık teorileri kullanılarak güvenilirliğini belirlemede, sayısal analiz tekniğiyle gerçekleştirilen pek çok istatistiksel yöntem kullanılır. Geoteknik mühendisliğinde güvenilirliğe dayalı tasarım hususunda dikkate alınan bazı problemler ve yenilme olasılığının tespitine yönelik genel prosedür Şekil 2.1'de sunulmuştur.



Şekil 2.1. Geoteknik mühendisliğinde güvenilirliğe dayalı tasarım genel prosedürü (Viviescas ve diğerleri, 2017)

Güvenilirliğe dayalı tasarımda en çok kullanılan yöntemler arasında birinci derece güvenilirlik metodu (FORM), tek nokta tahmin yöntemi (PEM) ve Monte Carlo (M-C) simülasyonu yer almaktadır. Günümüzde tasarımlarda en çok kullanılan bu üç metot arasında öne çıkan yöntem Monte Carlo Yöntemidir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Farklı makalelere ait güvenilirliğe dayalı geoteknik tasarımda kullanılan simülasyon metotları (Viviescas ve diğerleri, 2017)

Monte Carlo simülasyon yöntemi, rastgele veya belirli bir dağılım içinde değişkenlik gösteren matematiksel ya da ampirik bir parametrenin tekrarlı şekilde hesaplandığı nümerik yöntemdir (Wang ve diğerleri, 2016). Rastgele değişkenlerden oluşan çok sayıda giriş verisini fiziksel test yapmadan sürekli olarak hesaplayarak benzetim yapma günümüz koşullarında bilgisayar destekli olarak kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Monte Carlo Yönteminin uygulanabilirliği diğer yöntemlerle kıyaslandığında kavramsal basitliğiyle bilinmektedir (Lacasse ve Nadim, 1998). M-C simülasyonu akış şeması Şekil 2.3'te sunulmuştur.

Şekil 2.3. Monte Carlo simülasyonu akış şeması (Yeniden düzenlenmiştir, orijinal kaynak: Wang ve diğerleri, 2016)

Literatürde PEM, FORM ve M-C yöntemleri kullanılarak (Excel veya program arayüzünde) destekli derin kazı ve şevlerin güvenilirliğinin belirlendiği çalışmalar son yıllarda artış göstermektedir (Goh ve Kulhawy, 2005; Rippi, 2015; Janssen, 2016; Akbaş, 2015). Geleneksel olasılık teorisinin, zemindeki tüm değişkenliği (doğal değişkenlik ve bilgi eksikliği) yansıtamayabileceği kabul edilmektedir ve rastgele analizler bu eksikliklerin önüne geçmek hususunda alternatif oluşturmaktadır (Schweiger ve Peschl, 2005). Yenilme mekanizmasını anlamak ve limitleri aşan koşulları tespit ederek mühendislik kararlar doğrultusunda geoteknik tasarımları nihayetlendirebilmek için bilgisayar destekli istatistiksel analiz ve hesaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda öncelikli olarak Monte Carlo benzetiminde, problemi oluşturan değişkenlerin istatistiksel dağılımına karar verilir. Dağılım bilgisi kullanılarak deterministik hesap yöntemi için rasgele sayılarla fiziksel veriler elde edilmiş olur.

Güvenilirlik problemi için limit denge fonksiyonu (P=R-L) kontrol edilmelidir. Sistem yenilme mekanizması yük (L) ve direnç (R) operatörleri ile tanımlanabilir. Yenilme geoteknik tasarıma esas elemanların tamamının yenilmesini değil, yalnızca yükün direnç kuvvetlerini aşması (L>R) veya limit koşulların aşılması olarak nitelendirilebilir. Eğer limit denge fonksiyonu (P) sıfırdan küçükse sistem başarısız olur. Gerçekleştirilen benzetimlerin sayısının N olduğu kabulüyle yenilen analiz adedi (n_f) hesaplanarak yenilme olasılığı (p_f) yaklaşık olarak Eş. 2.1 ile belirlenir:

$$p_f = \frac{n_f(P=R-L\leq 0)}{N} \tag{2.1}$$

Monte Carlo simülasyon yöntemi ile sistem performansını etkileyen değişkenlerin rastgele seçimi doğrultusunda sonlu eleman analizleri aşağıdaki şekilde gerçekleştirilebilir:

1) Derin kazı geometrisinin oluşturulması ve zemin bünyesine ait değişkenlerin ortalama, varyasyon katsayısı vb. istatistiki parametrelerinin belirlenmesi
2) Analizlerde kullanılacak malzeme modelinin (Hoek Brown, Mohr Coulomb, Pekleşen Zemin (HS), Yumuşak Zemin (Soft Soil) vb.) ve malzeme istatistiksel dağılımının (normal, log-normal vb.) belirlenmesi
3) Sonlu eleman modelinin oluşturulması
4) Zemin değişkenlerine ait parametrelerin Monte Carlo yöntemi ile rastgele olarak üretilmesi
5) Gerekli analiz sayısının (N) tespiti
6) Gereken analiz sayısı kadar sonlu eleman analizlerinin gerçekleştirilmesi
7) Sonuçların değerlendirilmesi ve yenilme olasılığının (p_f) hesaplanması
8) Yenilme olasılığından hareketle sistem güvenilirlik endeksinin (β) değerlendirilmesi

Sistem performansı p_f ve β değerleriyle ifade edilebilir. Güvenilirlik endeksi (β) aşağıdaki gibi Eş. 2.2 ile tanımlanır:

$$\beta = -\Phi^{-1}(p_f) \tag{2.2}$$

Burada Φ () = standart normal olasılık dağılım fonksiyonudur.

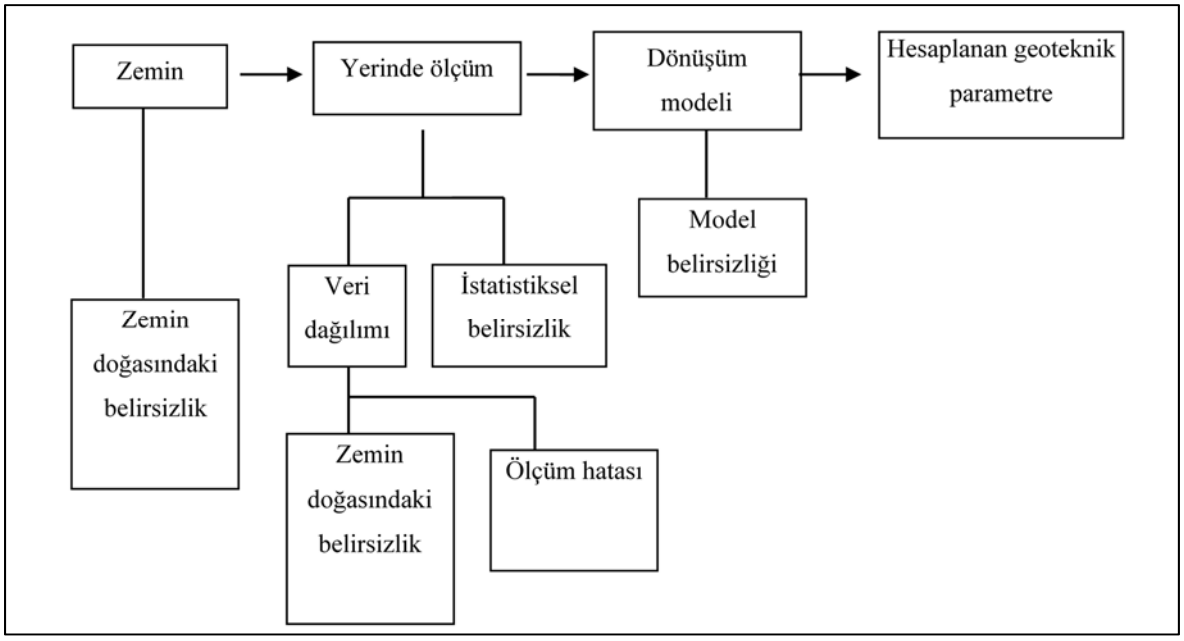
M-C yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen pek çok çalışmada analiz sayısının 1000 olarak kullanıldığı görülmüştür. Tang (2011) tarafından derin kazıların ve Akbaş (2015) tarafından şevlerin güvenilirliğini belirlemeye yönelik olarak yürütülen çalışmalarda 1000 adet analiz ile risk değerlendirmeleri yapılmıştır. Literatürde (Baecher ve Christian, 2003), %95 güven aralığı için gerekli benzetim sayısının 0,03 hata payı ile 1000 adet mertebelerinde olacağı belirtilmektedir. Ahmed ve Soubra (2011) çalışmasında yenilme olasılığı değişiminin sabit bir değere yakınsadığı durumun dikkate alınmasıyla gerçekleştirilecek analiz sayısının belirlenebileceği önerilmiştir.

Gerekli analiz sayısı, Ahmed ve Soubra (2011) çalışmasından hareketle güvenilirlik endeksinin (β) ve yenilme olasılığının (p_f) değişiminin stabil hale geldiği değeri tespit etmek vasıtası ile kontrol edilebilir. Sistem değişkenlerinin olasılık yoğunluk (PDF) grafiklerinin istenilen dağılımı yansıtma yetisi ancak yeterli sayıda rastgele analiz

gerçekleştirilerek sağlanabilir. Bu husus analiz süresinin uzamasına sebebiyet verebileceği için M-C simülasyon yönteminin ana dezavantajı olarak görülebilir.

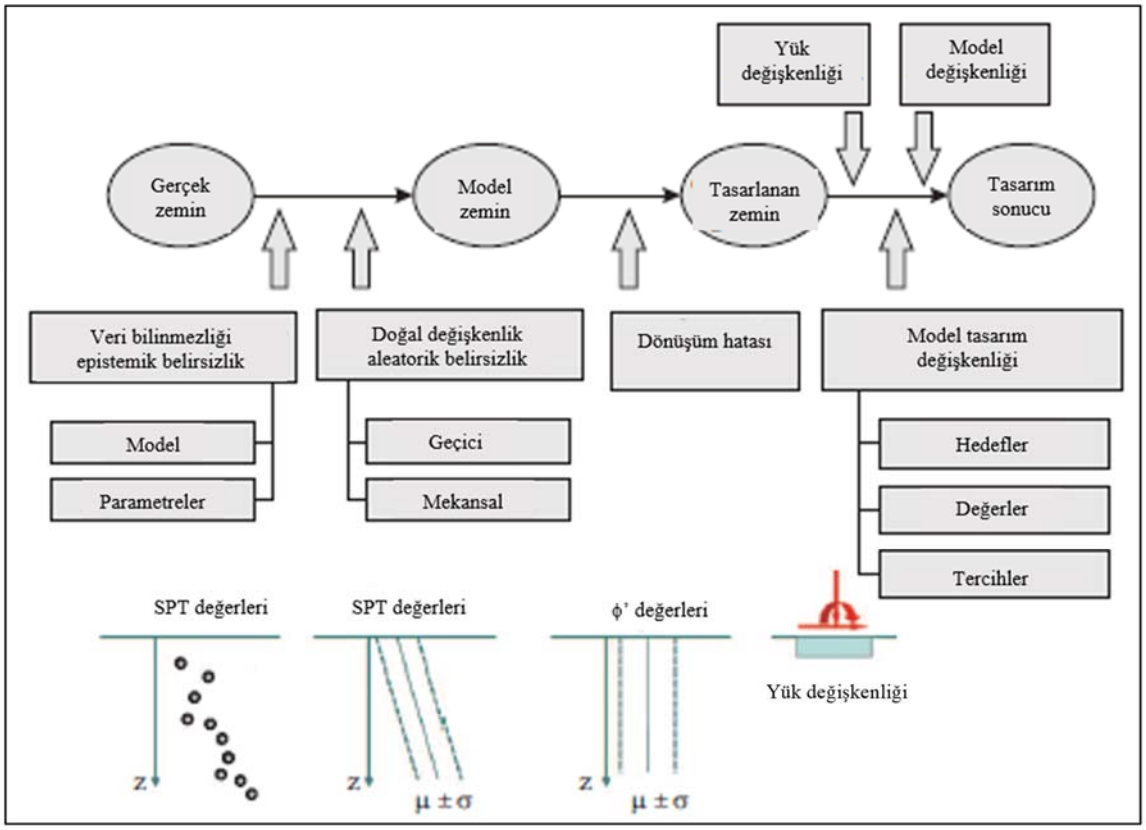
2.2. Zemin Bünyesinde Değişkenliğin Belirlenmesi

Kompleks bir mühendislik materyali olan zemin bünyesini gerçekçi şekilde tanımlamak hususu, tasarımcıyı laboratuvar çalışmaları ve kapsamlı bir saha araştırma programı yürütmeye sevk eder. Ancak kısıtlı veri mevcudiyetinde, zemin değişkenliğini tanımlamaya yönelik olarak gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda sunulan literatür verilerinden faydalanılabilir. Geoteknik literatürde bildirilen istatistiksel zemin özellikleri doğrudan kullanım için genellikle uygun değildir (Akbaş, 2007). Mevcut istatistiksel veriler, değişkenliğin kaynağının düzgün dağılım gösterdiği kabulü ile toplam değişkenlik analizleri sonucunda elde edilmiştir (Phoon ve Kulhawy, 1999). Ancak zemin değişkenliği Şekil 2.4'te gösterildiği biçimde daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Zemin parametrelerindeki değişkenliğin kapsamı temel olarak, parametrelerin rastgele davranışı (rastgele, aleatorik değişkenlik) ve parametre hakkında bilgi eksikliği kaynaklı değişkenlik (epistemik değişkenlik) olmak üzere iki başlık altında tanımlanır (Helton, 1997). Bu kapsamda literatürde bildirilmiş olan zemin özelliklerinin varyans katsayıları ön planlamada yol gösterici olacaktır.



Şekil 2.4. Zemin özelliklerinin hesaplanmasındaki belirsizlikler (Baecher ve Christian, 2003)

Geoteknik belirsizlik, ölçüm hataları, dönüşüm belirsizlikleri ve zeminin doğasındaki belirsizlikler olmak üzere üç grupta toplanabilir. Birinci belirsizlik, ekipman, yöntem, operatör ve rastgele test etkilerinden; ikinci belirsizlik, laboratuvar veya arazi deney sonuçlarını ampirik ve diğer korelasyonlarla zemin tasarım özelliklerine çevrilmesinden; üçüncü belirsizlik ise zemin formasyonunun oluşmasına yol açan doğal jeolojik süreçten kaynaklanır (Phoon ve Kulhawy, 1999). Korelasyon ve malzeme dönüşüm modelleri belirsizlik hususunda bir yaklaşım sunar ve onlar da hata içerir. Limit denge (LE) ve sonlu eleman yöntemi (FEM) sadeleştirmeler içeren analitik yöntemlerdir ve yine hatalar barındırır. Ölçüm hataları kaynaklı belirsizliklerin oranı, daha fazla ölçüm almak gibi veri sayısını artışını sağlamak koşulu ile düşürülebilir. Bu belirsizliklerin tamamı saha koşullarına, ekipman kalitesine, deney süreçlerine ve korelasyon modelinin hassasiyetine bağlıdır. Bahsi geçen maddeler dışında belirsizlikleri oluşturan, temeli insan faktörü olmak üzere başka hatalar mevcut olsa dahi genellikle ihmal edilmektedir (Baecher ve Christian, 2003). Güvenilirliğe dayalı tasarımda karşılaşılan temel belirsizlik unsurları Şekil 2.5'te özetlenmiştir.



Şekil 2.5. Güvenilirliğe dayalı tasarımda belirsizlikler (Huber, 2013)

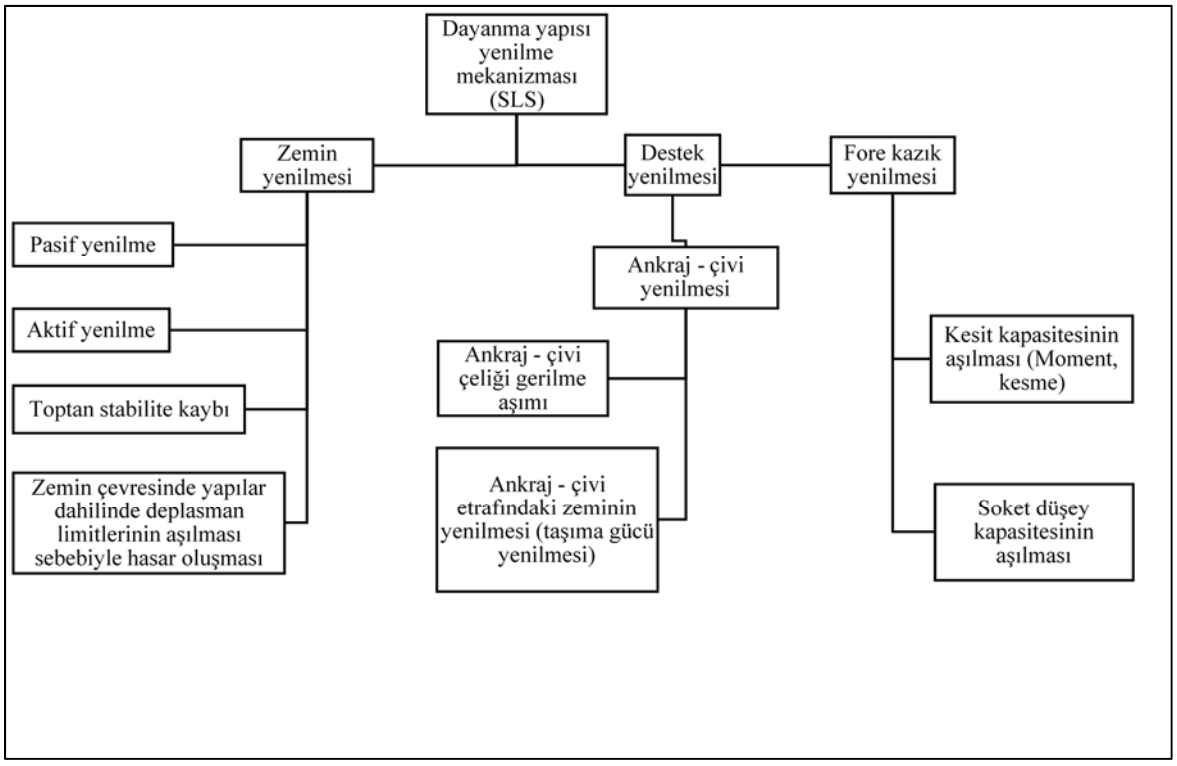
Normal dağılım, birçok bilim disiplininde veri setindeki rastgele değişkenliği tanımlamak için en sık kullanılan yöntemdir. Çan eğrisi şekliyle kolayca ayrımı yapılan yöntemde, aritmetik ortalama, μ ve standart deviasyon, σ değişkenleri ile veri seti $\mu \pm \sigma$ ifadesi ile tanımlanır. Ancak ölçümler az veya çok asimetri göstermektedir. Serilerin simetriden ne kadar uzaklaştığını gösteren "Çarpıklık Katsayısı" normal dağılımda 0'dır. Negatif çarpıklık katsayısı sağa çarpık dağılıma, pozitif çarpıklık katsayısı sola çarpık dağılıma işaret eder. Asimetri gösteren dağılımların bazı koşullarda, log-normal dağılım kullanılarak logaritmik ölçekte simetrikliğin yakalanması neticesinde daha iyi ifade edilebildiği görülmüştür (Limpert ve diğerleri, 2001). Özellikle sadece pozitif değerler alan zemin parametreleri log-normal dağılım rastgele değişkenleri ile modellenebilir (Phoon ve Kulhawy, 1999; Spry ve diğerleri, 1988). Bu çalışma kapsamında güvenilirliğe dayalı tasarım analizlerinde, zemin değişkenliğini modellemek üzere kullanılan parametrelerin log-normal dağılım sergilediği kabul edilmiştir. Bazı zemin parametreleri için önerilen varyasyon katsayısı değerleri Çizelge 2.1'de sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Tasarım parametreleri için yönerge (Phoon ve Kulhawy, 1999a; Phoon ve Kulhawy, 1999b)

Parametre	Deney	Zemin tipi	COV (%)
s_u (UC)	Doğrudan	kil	20-55
s_u (UU)	Doğrudan	kil	10-35
s_u (CIUC)	Doğrudan	kil	20-45
s_u (arazi)	VST	kil	15-50
c_u (UU)	q_T	kil	30-40
c_u (CIUC)	q_T	kil	35-50
c_u (UU)	SPT-N	kil	40-60
c_u	K_D	kil	30-55
c_u (arazi)	PI	kil	30-55
ϕ'	Direkt (Lab)	kil, kum	7-20
ϕ' (TC)	q_T	kum	10-15
ϕ' (CV)	PI	kil	15-20

2.3. Hedef Yenilme Olasılığı ve Güvenilirlik Endeksi

Geoteknik tasarım yapılarında *"yenilme"* farklı mekanizmalar kapsamında değerlendirilir. Derin kazılarda servis koşulları altında destek elemanlarının (fore kazık, diyafram duvar, ankraj, zemin çivisi vb.) ve çevre yapılar dikkate alındığında zeminin deplasman limitinin aşılması, kazı destek elemanlarında yüksek tesir kuvvetlerinin oluşması gibi pek çok durumda sistem yenilmesinden bahsedilebilir. Ankraj destekli dayanma yapılarının yenilme mekanizması Şekil 2.6 kapsamında özetlenmektedir. Bu yenilme koşullarını tespit edebilmek ancak çalışılan sahayı tamamen tanımlayabilmekle mümkündür. Ancak tasarıma esas zemin parametrelerini eksiksiz bir şekilde tespit etmek, özellikle yetersiz sayıda deney verisi mevcudiyetinde mümkün olamamaktadır. Güvenilirliğe dayalı tasarımın önemli bir aşaması hedef yenilme olasılığı (p_T) için uygun bir değerin seçilmesidir.



Şekil 2.6. Destekli derin kazı sistemleri yenilme mekanizması (Yeniden düzenlenmiştir, orijinal kaynak: Schweckendiek, 2006)

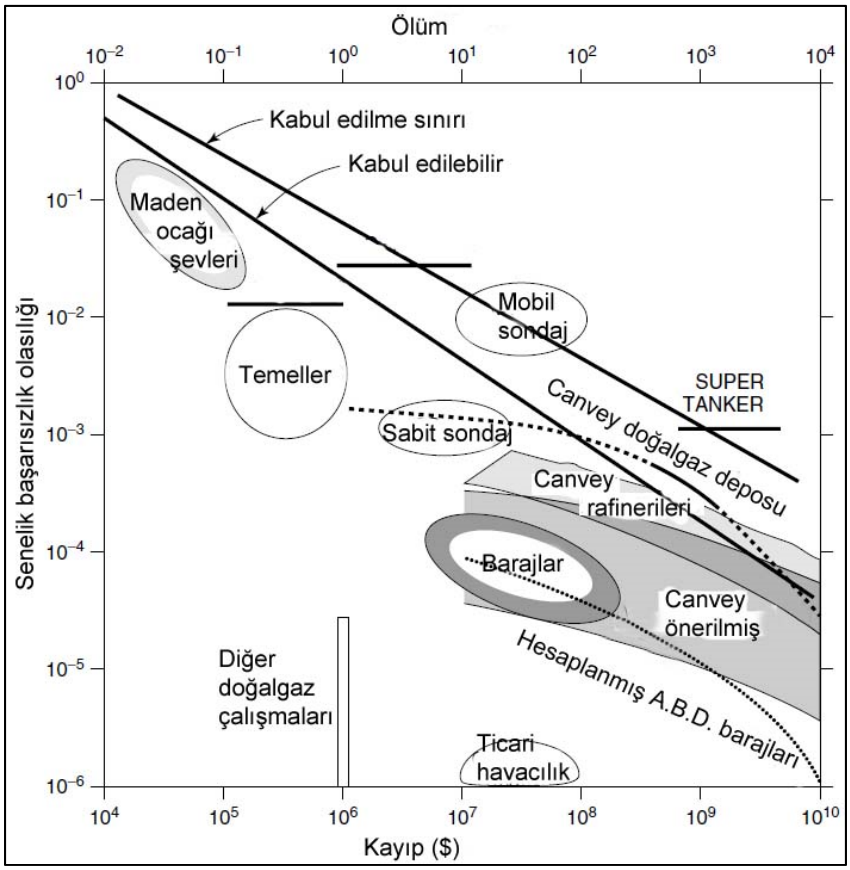
Derin kazılar için tasarım ömrü süresince uygun hedef yenilme olasılığı veya kabul edilebilir risk değerini kolayca bulmak mümkün olmamaktadır.

Tasarlanan yapılar için güvenilirlik endeksi mühendislik disiplinlerine ait standartlar ve zemin parametrelerindeki değişkenlik doğrultusunda farklılık göstermektedir (Cushing ve diğerleri, 2003). Bu kapsamda farklı kodlarda yer alan nihai sınır denge (ULS) ve hizmet verebilirlik sınır denge (SLS) durumları için güvenilirlik endeksi değerleri Çizelge 2.2'de sunulmuştur.

Çizelge 2.2. Güvenilirliğe dayalı tasarım için çeşitli kodlarda yer alan hedef güvenilirlik endeksi, β_t (Wang ve diğerleri, 2016)

Tasarım kodu	ULS β_t	SLS β_t
Electric Power Research Institute (EPRI) multiple resistance and load factor design (MRFD)	3,2	2,6
Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC 2014)	3,1-3,7	2,3-3,1
Canadian National Building Code (NCBC)	3,5	Mevcut değil
American Association of Satate Highway and Transportation Official (AASHTO) foundation design code	2,0-3,5	Mevcut değil
Eurocode 7	4,7	2,9

Kabul edilebilir hedef yenilme olasılığını düzenlemek için en yaygın yaklaşım maliyet-yarar analizidir. Yenilme olasılığının optimum değeri başarısızlığın sonuçlarına, bakım veya yenilemenin maliyetine ve ilk yatırıma bağlıdır (Mortensen, 1993). Kabul edilebilir riski belirlemenin uygun bir yöntemi yenilme olasılığı ile sonuçlarının özetlendiği F-N eğrilerini kullanmaktır. Bu eğriler tarihsel yenilme oranlarını maliyetlerine göre çizerek oluşturabilir ve kabul edilemez risk bölgelerini bölen sınır çizgilerini belirleyerek geliştirilir. Şekil 2.7'de geleneksel mühendislik tesisleri, büyük yapılar ve projeler için ortalama yıllık risk değeri F-N grafiğine örnek olarak gösterilmiştir (Baecher, 1987).



Şekil 2.7. Çeşitli geleneksel inşaat tesis ve büyük yapılarının ortalama yıllık riskini gösteren F-N eğrisi (Baecher, 1987)

β değişimi p_f değişimi ile kolayca ilişkilendirilemez. Çünkü birbirleriyle ilişkileri doğrusal değildir (Phoon ve diğerleri, 1995). Çizelge 2.3 kullanılarak β ve p_f arasındaki ilişki tespit edilebilir. Log-normal dağılım gösteren bir X değişkenin güvenilirliği Eş. 2.3 ile hesaplanabilir:

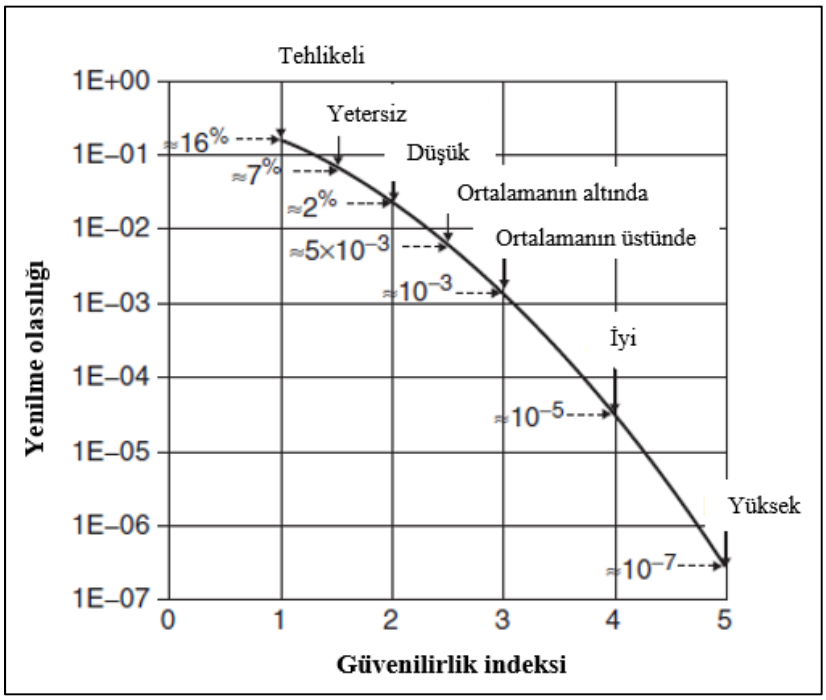
$$\beta_{LN} = \frac{Ln\left(\frac{\mu_x}{\sqrt{1+(COV_x)^2}}\right)}{Ln\sqrt{1+(COV_x)^2}} \tag{2.3}$$

Geoteknik sistemlerin hedef güvenilirliği AASHTO Bridge Design Specifications (2012) şartnamesi uyarınca 3,5 mertebelerinde kabul edilmektedir. Phoon ve diğerleri (1995) iletişim hatları yapılarının temellerinin nihai sınır denge ve hizmet verebilirlik sınır denge durumları için sırasıyla β_T değerlerini 2,6 ve 3,2 olarak seçmişlerdir. Güvenilirlik düzeyleri arasındaki fark, hizmet verebilirlik ve nihai denge durumları için yenilmenin olası sonuçlarıyla ilgilidir.

Gerçekleştirilen çalışmalarda, derin kazı yapısının geçici yapı statüsünde değerlendirilebileceği dikkate alındığında hedef güvenilirlik endeksi olarak Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC 2014) şartnamesinde belirlenen en düşük güvenilirlik endeksi olan 2,3 değeri kıyas parametresi olarak belirlenmiştir. Şekil 2.8 ve Çizelge 2.3 incelendiğinde bu değer, beklenen performans seviyesi olarak ortalamanın altında – düşük aralığında yer almaktadır.

Çizelge 2.3. Güvenilirlik endeksi, yenilme olasılığı ve karşılık gelen beklenen performans derecesi (U.S. Army Corps of Engineers, 1997)

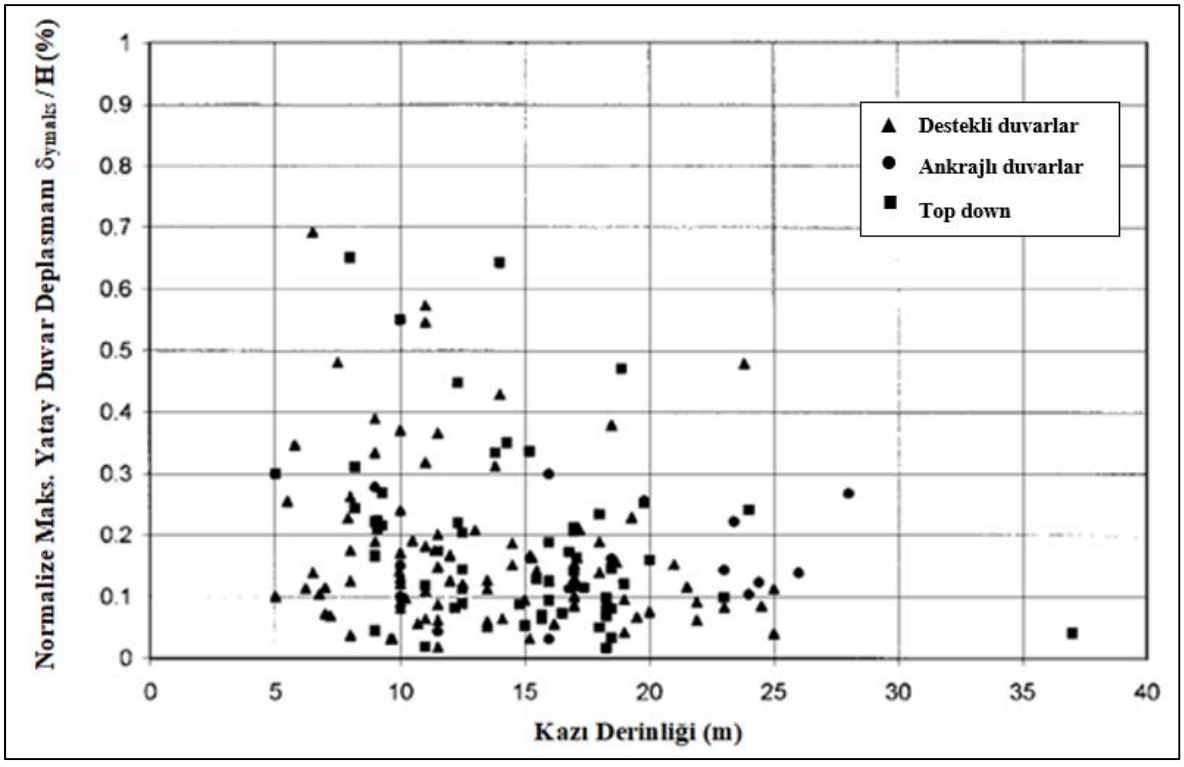
Güvenilirlik endeksi β	Yenilme olasılığı $p_f = \Phi(-\beta)$	Beklenen performans seviyesi
1	0,16	Tehlikeli
1,5	0,07	Yetersiz
2	0,023	Düşük
2,5	0,006	Ortalamanın altında
3	0,001	Ortalamanın üstünde
4	0,00003	İyi
5	0,0000003	Yüksek



Şekil 2.8. Güvenilirlik endeksi ve yenilme olasılığı arasındaki ilişki (US Army of Engineers, 1977)

2.4. Derin Kazı Tasarımına Dair İncelemeler

Güvenilirlik analizleri yenilme koşullarına ait limit değerlerin tespitini gerekli kılmaktadır. Çalışmalar çerçevesince limit kazık yapısal kapasitesi, kazık yanal deplasmanı başta olmak üzere risk değerlendirmelerinde dikkate alınması gereken başlıca hususlar literatür kullanılarak tespit edilmiştir. Maksimum kabul edilebilir yatay duvar deplasmanını belirlemeye yönelik olarak Long (2001) tarafından 300 adet vaka örneğine ait veri seti tahkik edilmiş, derin kazılarda normalize yatay deplasman, $\delta_{yataymaks}$ / H > %0,3 durumunda, vakalardan elde olunan tecrübeye göre sahada problemlerle karşılaşıldığı kayıt altına alınmıştır. Söz konusu çalışmada kazı derinliklerine karşılık gelen normalize yatay deplasman değerleri Şekil 2.9'da sunulmuştur.



Şekil 2.9. Kazı derinliğine karşılık gelen normalize maksimum yatay deplasman (Long, 2001)

Şangay, Çin'de metro imalatlarına yönelik olarak gerçekleştirilen derin kazılardan elde edilen mühendislik tecrübeleri, güvenilirlik ve ekonomi hususları dahilinde incelenerek oluşturulan Şangay temel tasarımı standardında (PSCG, 2000) yer alan deformasyon kriterleri ile Çizelge 2.4'te sunulmuştur.

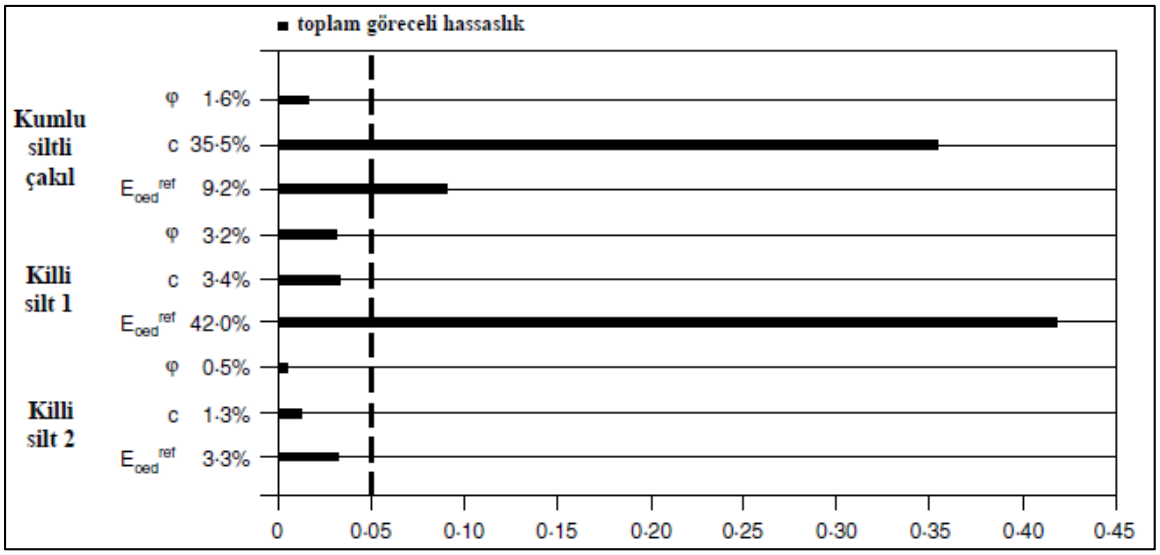
Çizelge 2.4. Kazı çevresinin korunmasına dair kontrol kriterleri (PSCG, 2000)

Önem Derecesi	Limit zemin deplasmanı ve maksimum dayanma yapısı yatay deplasmanı	Önem derecesine ait kısıtlamalar
1	Maksimum zemin deplasmanı ≤ %0,1 H*; Dayanma yapısı maksimum yatay deplasman ≤ %0,14 H; Ks**≥ 1,8	Kazı alanından 0,7H mesafede metro, belediye altyapı şebekesi, doğal gaz hatları, önemli su şebekesi vb. yapılar olması durumunda bu yapı ve tesisat hatlarının güvenliği sağlanmalıdır.
2	Maksimum zemin deplasmanı ≤ %0,2 H; Dayanma yapısı maksimum yatay deplasman ≤ %0,3H; Ks**≥ 1,6	Kazı alanından 1~2H uzaklıkta önemli ana yollar, su şebekeleri, yapı ve binaların bulunması durumu
3	Maksimum zemin deplasmanı ≤ %0,5 H; Dayanma yapısı maksimum yatay deplasman ≤ %0,7H; Ks**≥ 1,4	Daha az önem teşkil eden tali yol hatları, umumi yapı ve tesislerin kazı alanından en az 2H uzaklıkta bulunması durumu

* Kazı derinliği, H **Taban kabarmasına karşılık gelen güvenlik sayısı, K_s

Geoteknik risk analizlerinde zemin bünyesi içindeki değişkenlik, güvenilirliği doğrudan etkileyen bir husustur. Tasarım üzerinde belirleyici etkisi olan zemin parametreleri, mühendislik tecrübesi ve mevcut literatür kullanılarak modellenebildiği gibi hassasiyet (sensitivity) analizleri vasıtası ile bu parametrelerin doğrudan tespiti mümkündür. Mevcut belirsizliklerin etkisini daha kapsamlı bir biçimde kavramak, ilgilenilen parametrelere farklı değişkenlik kaynaklarının etkisinin dahil edilmesi vasıtasıyla hassasiyet analizleriyle gerçekleştirilebilir (Rippi ve diğerleri, 2016) .

Schweiger ve Peschl (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kumlu, siltli çakıl birime ait kohezyon, c ve tek eksenli sıkışma deneyleri ile belirlenen odömetrik modül, E_{oed} ile killi silt 1 olarak tanımlanan birime ait odömetrik modül, E_{oed} PLAXIS hassasiyet analizleri vasıtasıyla zemin değişkenleri olarak belirlenmiş, çalışmaya ait sonuçlar Şekil 2.10'da sunulmuştur. Böylece söz konusu çalışma kapsamında, mühendislik tecrübesi ile belirlenebilen en kötü senaryo tasarım parametrelerinin, analizler neticesinde sayısal olarak da tespit edilebildiği görülmüştür.



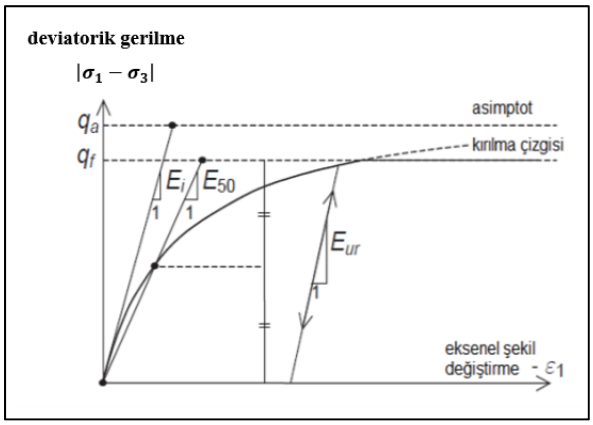
Şekil 2.10. Örnek bir derin kazı problemi için toplam göreceli hassasiyet (Schweiger ve Peschl, 2005)

3. YÖNTEM

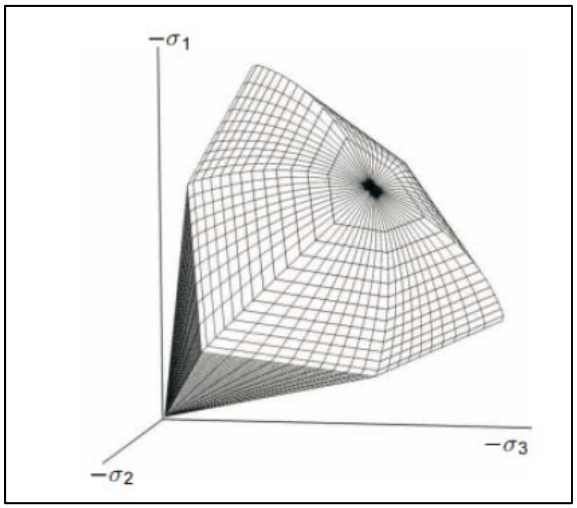
Bu bölüm çalışmalarda kullanılan yönteme dair ayrıntıları kapsamaktadır. Risk analizleri kapsamında PLAXIS 2D ve Python yazılımlarından faydalanılmıştır.

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM): PLAXIS 2D

Geoteknik mühendisliğinde tasarım aşamasında kullanılan pek çok sonlu eleman analiz programı mevcuttur (DIANA, PLAXIS, Catpro vb.). Çalışmalar kapsamında derin kazı sonlu eleman analizleri PLAXIS 2D yazılımı 2017 versiyonu vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. PLAXIS 2D zemin davranışını modellemeye yönelik olarak Mohr Coulomb, Modified Cam Clay (MCC), Soft Soil (SS), Hardening Soil (HS) gibi pek çok malzeme bünye modelini kullanıcı seçimine sunar. Hardening Soil (Pekleşen Zemin) modeli farklı tipteki yumuşak ve sert zeminler için geliştirilmiş bir modeldir. İlk olarak Kondner (1963) tarafından malzeme gerilme şekil değiştirme ilişkisi hiperbolik olarak tanımlanmış ve modelin temel prensibi belirlenmiştir. HS modeli, daha sonra Duncan ve Chang (1970) tarafından geliştirilen doğrusal olmayan elastik bünye modelinin yeniden uyarlanması ile tanımlanmış, gelişmiş bir malzeme modelidir (Schanz ve diğerleri, 1999). Mohr Coulomb yönteminden akma yüzeyinin asal gerilme koşullarında sabit kalmaması, plastik şekil değiştirme aşamasında rijitlik artışı ve pekleşen davranışı sergilemesi sebebiyle ayrılır. Model davranışını gösteren hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 3.1'de, asal gerilme koşulları-toplam akma yüzeyi görünümü ise Şekil 3.2'de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Standart drenajlı üç eksenli deneyi ön yükleme hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Brinkgreve ve diğerleri, 2016)



Şekil 3.2. HS modeli asal gerilme koşulları toplam akma yüzeyi görünümü (Brinkgreve ve diğerleri, 2016)

Özellikle gerilmeye bağlı rijitlik artışının (yükleme-boşaltma ve elastik-plastik davranış ayrımının) göz önüne alınması, bu bünye modelinin zemin gerilme-şekil değiştirme davranışını gerçeğe daha yakın modelleyebilmesini sağlamaktadır. Bu sebeple, bu çalışmada ankraj destekli derin kazı analizlerinde Hardening Soil (HS) malzeme bünye modeli kullanılmıştır. HS modele esas zemin modülleri aşağıdaki eşitlikler (Eş. 3.1, Eş. 3.2, Eş. 3.3 ve Eş. 3.4) yardımı ile belirlenebilir.

E_{50}, drenajlı üç eksenli deneylerle elde edilen ilk yüklemeye ait rijitlik modülüdür ve Eş. 3.1 ile tanımlanabilir.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos\varphi - \sigma_3' \sin\varphi}{c \cos\varphi + p^{ref} \sin\varphi} \right)^m \tag{3.1}$$

E_{oed}, odömetrik deformasyon modülü için Eş. 3.2'nin kullanılması önerilmektedir.

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{\sigma_1'}{\sigma_{ref}'} \right)^m \tag{3.2}$$

E_{ur}, boşaltma-geri yükleme modülü için Eş. 3.3'nin kullanılması önerilmektedir. E_{ur} ve E_{50} arasında ise yaklaşık olarak Eş. 3.4 bağıntısı kullanılmaktadır (PLAXIS 2D Material Models Manual, 2018).

$$E_{ur} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cos\varphi - \sigma_3' \sin\varphi}{c \cos\varphi + p^{ref} \sin\varphi} \right)^m \quad (3.3)$$

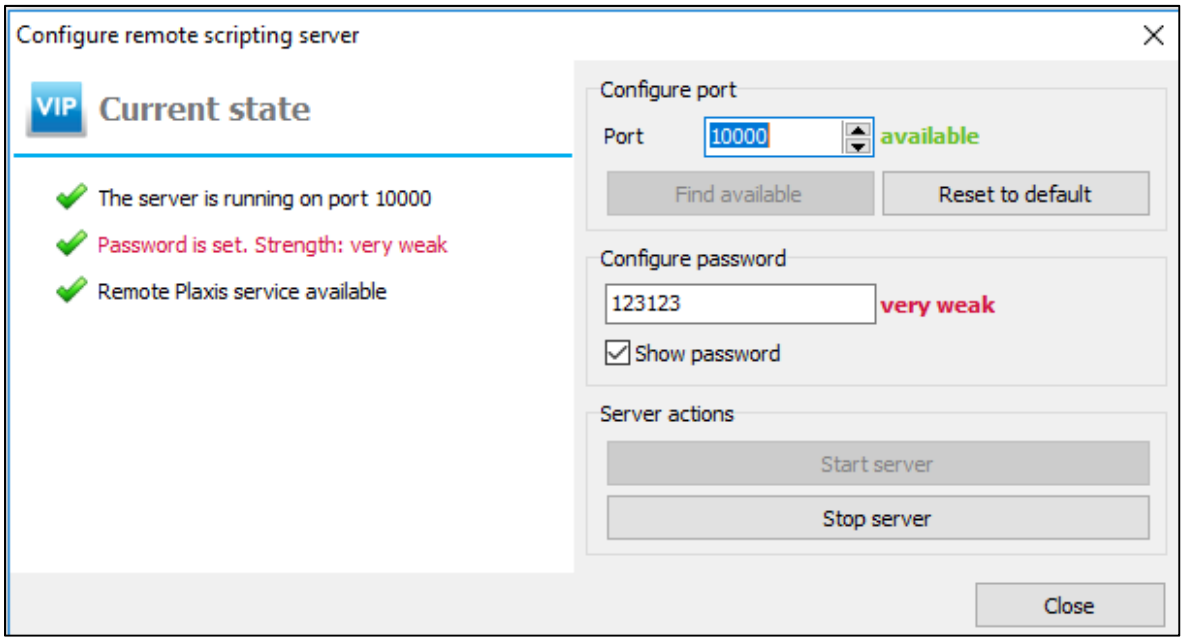
$$E_{ur} \cong 3E_{50}^{ref} \quad (3.4)$$

Eş. 3.1, Eş. 3.2 ve Eş. 3.3'te kullanılan gerilmeye bağlı rijitlik parametresi, m değeri yumuşak killi zeminlerde 1,0 ve sıkı kumlarda 0,5 olmak üzere 0,5-1,0 arasında değişmektedir (PLAXIS 2D Material Models Manual, 2018).

3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi: Python - PLAXIS Harici Kodlama

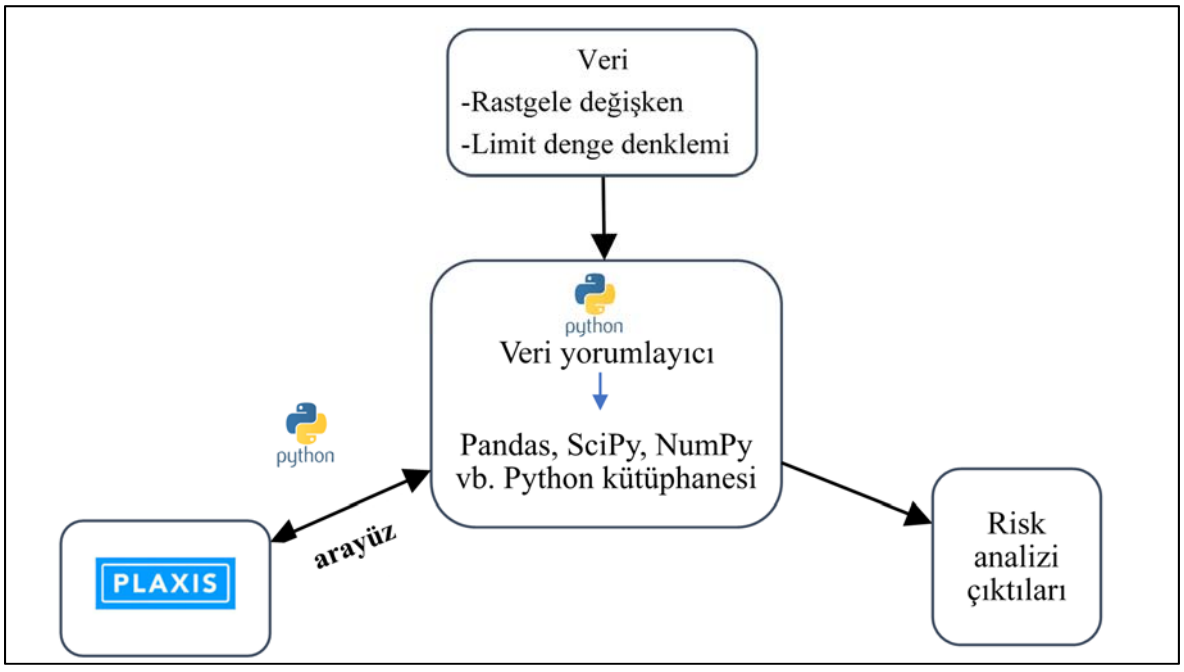
PLAXIS 2D, zemin ve kaya davranışını düzlem gerinim ve eksenel simetrik olarak modellemede kullanılan güçlü ve kullanışlı bir geoteknik araçtır, ancak olasılıksal analizlere yönelik ayrı bir hesaplama mekanizmasını henüz içerisinde gömülü olarak barındırmamaktadır. Bu sebeple risk değerlendirmelerine yönelik olarak çok sayıda veri girişi yapılarak sonlu eleman analizlerini gerçekleştirmek bir arayüz kullanımını gerekli kılmaktadır. Program bu eksikliği 2014 yılı itibariyle gidermiş, VIP modülü vasıtasıyla Python kod yazılımı etkileşim arayüzünü yaratmıştır. Ayrıca risk değerlendirmelerinde kullanılan değişkenleri mühendislik tecrübeleri yerine doğrudan hassasiyet (sensitivity) analizleri ile sayısal olarak belirlemek PLAXIS 2015 versiyonu ile mümkün kılınmıştır.

PLAXIS 2D 2014 versiyonu itibariyle risk değerlendirmeleri kapsamında istatistiksel yöntemlerle parametre türetmek ve çoklu analizlere temel oluşturacak değişken girdi setlerini programa tanımlayarak sonlu eleman analizlerini gerçekleştirmek hususunda büyük kolaylıklar sağlanmıştır. Programı kullanmak için geçerli VIP lisansı ve internet erişimi gereklidir. 2017 ve daha yeni versiyonlarda Python yazılımı program araçları arasında gömülü olarak yer bulmuştur. PLAXIS tarafından harici kodlama için sistemde gömülü olmayan bir yazılım kullanılacak ise Python 3.4 versiyonu önerilmektedir. PLAXIS 2D harici kodlama kurulumuna ait ayrıntılar Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.3. PLAXIS 2D harici kodlama kurulumu

Risk değerlendirmelerine yönelik olarak seçilen olasılıksal dağılıma göre Python yazılımı kullanılarak Monte Carlo yöntemi ile rastgele üretilen değişken parametreler PLAXIS-Python arayüzü vasıtası ile girdi olarak PLAXIS programına tanıtılır. İstenilen sayıda parametre girişi sağlanarak geoteknik probleme ait M-C FEM analizleri gerçekleştirilmiş olur. M-C FEM analizlerinde uygulanan işlemlere ait akış Şekil 3.4'te sunulmuştur.



Şekil 3.4. PLAXIS-Python iletişimi metodolojisi

Sonlu eleman analizlerinde değişken zemin parametreleri, belirlenen istatistiksel dağılım çerçevesince analizlere tabi tutulur. Ancak analizler sırasında bazı yenilme koşullarında veya program kaynaklı olarak nümerik hesaplama hataları göz önünde bulundurulduğunda, analizlerin tanımlanan son aşamaya kadar gelemeyeceği ve analizin tamamlanamayacağı öngörülebilir. Geoteknik problem için istenilen sayıda analizi iteratif olarak gerçekleştirmeye yönelik hazırlanacak kodlarda bu durum dikkate alınmalı, gerçekleştirilemeyen analizler hata kodları uyarınca ayrıca depolanabilmeli ve hesaplamalara devam edilmesi sağlanmalıdır. Çalışmalar kapsamında yenilen analizler ayrıca tespit edilmiş olup yenilme olasılığı ve risk değerlendirilmeleri aşamasında dikkate alınmıştır. Derin kazı modeli oluşturmak, Monte Carlo simülasyon yöntemi vasıtasıyla zemin bünyesine ait model parametrelerini sisteme atamak, çoklu veri girişi ile analizlerin iteratif olarak gerçekleştirilmesini sağlamak, PLAXIS üzerinden istenilen sonuç parametrelerini alarak istenilen formatta depolayarak risk değerlendirmelerini gerçekleştirmek gibi kullanım amaçları doğrultusunda Python yazılımı ile hazırlanan kodlar gelecek çalışmalara örnek oluşturmak amacıyla Ekler bölümünde sunulmuştur.

4. SONLU ELEMAN ve MONTE CARLO SİMÜLASYON YÖNTEMLERİNİN ANKRAJ DESTEKLİ DERİN KAZI SİTEMLERİNDE KULLANIMI

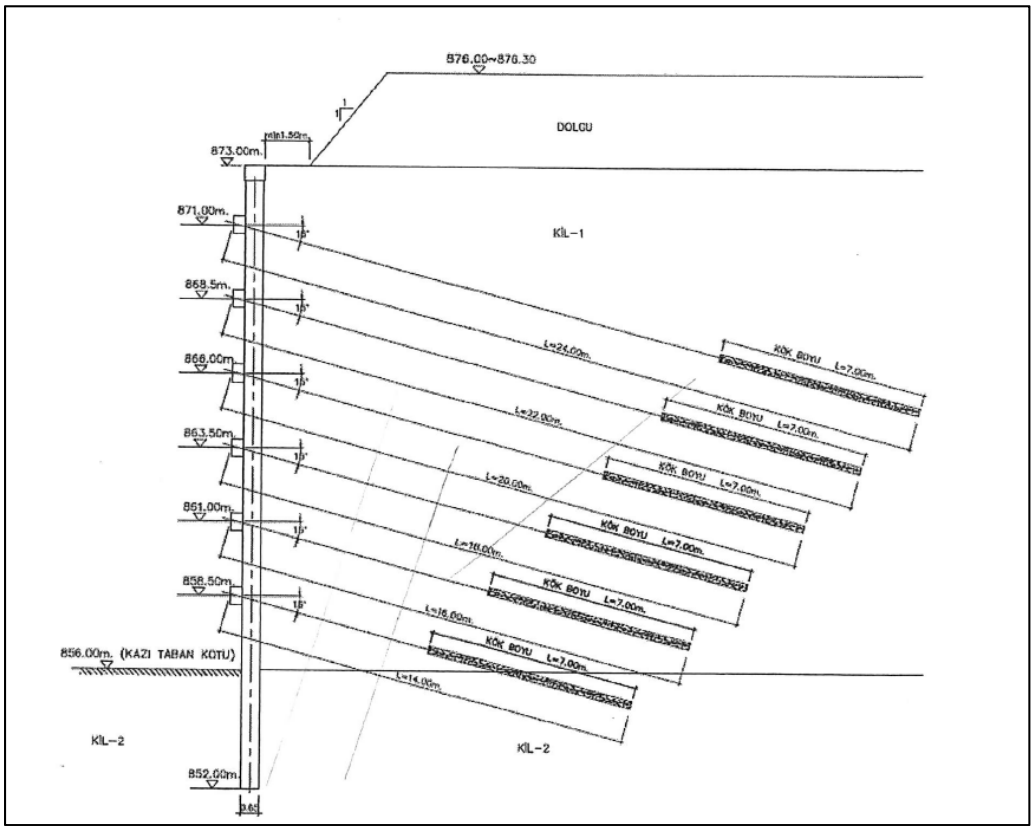
4.1. Vaka İncelemesi

Ankara ili Söğütözü semtinde Varan Turizm'e ait Mövenpick Hotel inşaatı için yaklaşık 20 m derinliğinde bir kazıya ait iksa sistemi vakası (Çalışan, 2009) bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Söz konusu çalışmaya ait ankraj destekli iksa sisteminin cephe görünüşü Şekil 4.1'de sunulmuştur.

Şekil 4.1. Vaka ankrajlı iksa sistemi bitmiş görünüş (Çalışan, 2009)

İksa perdesi için yatay düzlemde ϕ65 cm çaplı fore kazıklar merkezden merkeze 100 cm aralıklı olarak teşkil edilmiştir. Derin kazı yatayda 2 m ve düşeyde 1,5 m aralıklı 6 sıra ankraj ile desteklenmiştir. Ankraj kök boyları 7 m uzunluğundadır. Örnek vakaya ait daha önce gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında (Çalışan, 2009), inklinometre okumaları vasıtasıyla sahada tespit edilen hareketin geri analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde deplasmanların daha gerçekçi tahminine yönelik olarak zeminin boşaltma durumundaki rijitliğini hesaba katan pekleşen zemin (HS) malzeme modeli kullanılmıştır. Deplasmanların gerçekçi tahmininin ancak gerçekçi elastisite modülü kullanımı ile mümkün olduğu açıktır.

Ülkemizdeki zemin araştırma ve laboratuvar çalışmalarının ortalama kalitesi düşünüldüğünde, örselenmemiş numune alımının zor olduğu sert-katı Ankara Kilinde laboratuvar deneyleri ile bu verilerin tespitinin neredeyse imkansız olduğu düşünülmektedir (Çalışan, 2009). Parametre tayininde literatürde yer alan mevcut korelasyonların aynı zemin formasyonu için daha önceden yapılan uygulamalardan edinilen bilgiler doğrultusunda kalibre edilmesinin önemi Çalışan (2009) tarafından belirtilmiştir. Örnek vaka kapsamında daha önce gerçekleştirilen çalışmalarda kazı kesiti için inklinometre deney verilerinde tespit edilen hareketi yansıtan elastisite modülü değerleri geri analizlerle belirlemiştir. Analizlere esas teşkil eden kazı kesiti Şekil 4.2'de sunulmuştur.



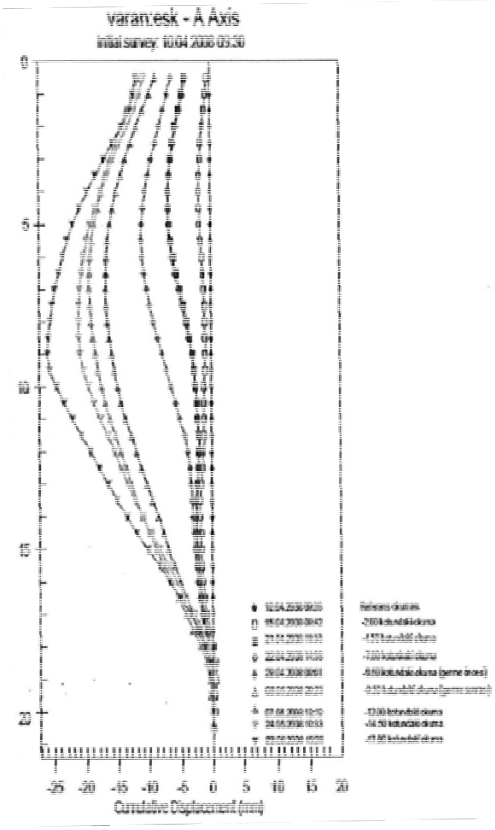
Şekil 4.2. Eskişehir yoluna komşu cephe kesiti (Çalışan, 2009)

İksa imalatlarına yönelik olarak çalışma alanında 5 adet zemin sondajı yapıldığı, zemin litolojisinin nadiren çakılı, az kumlu siltli kil tabakası olarak tanımlandığı ve bütün laboratuvar deneylerinde yüksek plastisiteli kil olarak sınıflama yapıldığı söz konusu çalışmada kayıtlıdır. Laboratuvar deneyleri sonucunda tespit edilen drenajsız kayma dayanımı değerleri ve ilgili derinlikteki kum oranları Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Ankara Söğütözü derin kazı laboratuvar sonuçları (Çalışan, 2009)

c_u = 67 kPa (SK-1; UD-3; 9,0 m)	Kum oranı ~%15
c_u = 53 kPa (SK-2;UD-4; 12,0 m)	Kum oranı ~%14
c_u = 41 kPa (SK-3; UD-1; 3,0 m)	Kum oranı ~%11
c_u = 62 kPa (SK-4; UD-2; 6,0 m)	Kum oranı ~%14
c_u = 60 kPa (SK-5; UD-3; 9,0 m)	Kum oranı ~%8

Vaka verilerine göre sahada gerçekleştirilen inklinometre okumalarında tam kazı durumunda iksa sisteminde meydana gelen maksimum yanal deplasmanın 26 mm mertebelerinde olduğu belirtilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Derin kazı inklinometre okumaları (Çalışan, 2009)

Daha önce gerçekleştirilen çalışma kapsamında sahada ölçümü yapılan hareketi modellemek üzere sistem PLAXIS programı ile geri analize tabi tutulmuş, geri analizlerde 400 kN ankraj kuvveti uygulanmıştır (Çalışan, 2009). Vaka kapsamında öncelikli olarak SPT-N ve PI ilişkisi kullanılarak Duncan ve Buchignani (1976) yöntemi ile E_u/c_u alt limitleri için birimlere ait drenajlı elastisite modülleri bulunmuş ve geri analiz başlangıç değerleri tespit edilmiştir (Çalışan, 2009).

Vaka kapsamında, önceki çalışmaya ait analizlerde kullanılan birimlerin drenajlı malzeme parametreleri Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Vaka geri analizlerinde kullanılan başlangıç değerleri (Çalışan, 2009)

Parametre	Dolgu	Kil-1	Kil-2	Birim
Malzeme Model	Pekleşen Zemin (HS)	Pekleşen Zemin (HS)	Pekleşen Zemin (HS)	-
Tip	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	-
c'	3	20	25	kN/m^2
ϕ'	25	25	25	°
E_{50}^{ref}	12000	25000	35000	kN/m^2
E_{oed}^{ref}	12000	25000	35000	
E_{ur}^{ef}	36000	75000	105000	kN/m^2

Söz konusu çalışmada Kil-1 olarak tanımlanan birim için geri analizlerle inklinometre okumalarında tespit edilen 26 mm değerinin elde edildiği elastisite modülü bulunmuştur. İncelenen önceki çalışmaya ait geri analizler neticesinde Kil-1 olarak tanımlanan birim için belirlenen parametreler ve normalize deplasman sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

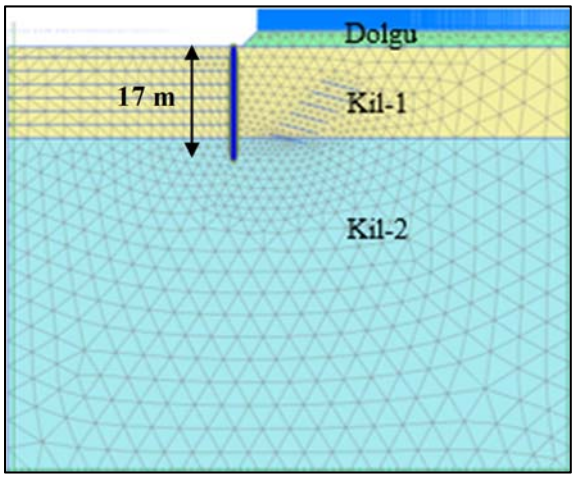
Çizelge 4.3. Vaka kapsamında gerçekleştirilen geri analizlere ait Kil-1 birim parametreleri ve normalize deplasman sonuçları (Çalışan, 2009)

ANALİZ	KİL-1 Parametreleri	Maximum Yatay Kazık Deplasmanı δ_l (mm)	δ_l / H
1	c=20 kPa $\phi=25^0$ E_{50}^{ref} = 55,000 kPa E_{oed}^{ref} = 55,000 kPa E_{ur}^{ref} = 165,500 kPa m=0.5	26	0.13 (%)
2	c=15 kPa $\phi=25^0$ E_{50}^{ref} = 55,000 kPa E_{oed}^{ref} = 55,000 kPa E_{ur}^{ref} = 165,500 kPa	29	0.15 (%)
3	c=10 kPa $\phi=25^0$ E_{50}^{ref} = 55,000 kPa E_{oed}^{ref} = 55,000 kPa E_{ur}^{ref} = 165,500 kPa	32	0.16 (%)

Böylece bu vakada Kil-1 birim için korelasyonun E_u/c_u =520 değerinin kullanılması durumunda gerçekçi bir tasarım gerçekleştirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır (Çalışan, 2009). Çalışan (2009) tarafından vaka kapsamında gerçekleştirilen geri analizler neticesinde sahada izlenen 26 mm mertebelerindeki hareket, sonlu eleman analizleri ile tespit edilmiştir.

4.2. FEM Risk Analizlerine Esas Modelin Geri Analizi

Ankara Söğütözü semtinde gerçekleştirilen derin kazı tasarımına ait vaka örneği, sahada ölçümü yapılan hareketi modellemek ve risk analizlerine temel oluşturacak model parametrelerini tespit etmek üzere geri analizlere tabi tutulmuştur. Vakada kullanılan tip geometri, çalışmalar kapsamında aynı şekilde kullanılmış olup Şekil 4.4'te sunulmuştur.



Şekil 4.4. Analizlere esas derin kazı geometrisi

Ankraj destekli iksa sistemi geri analizlerinde kullanılan parametreler Çizelge 4.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.4. Mövenpick Hotel inşaatı ankraj destekli iksa yapısı geometrik ve parametrik özellikleri

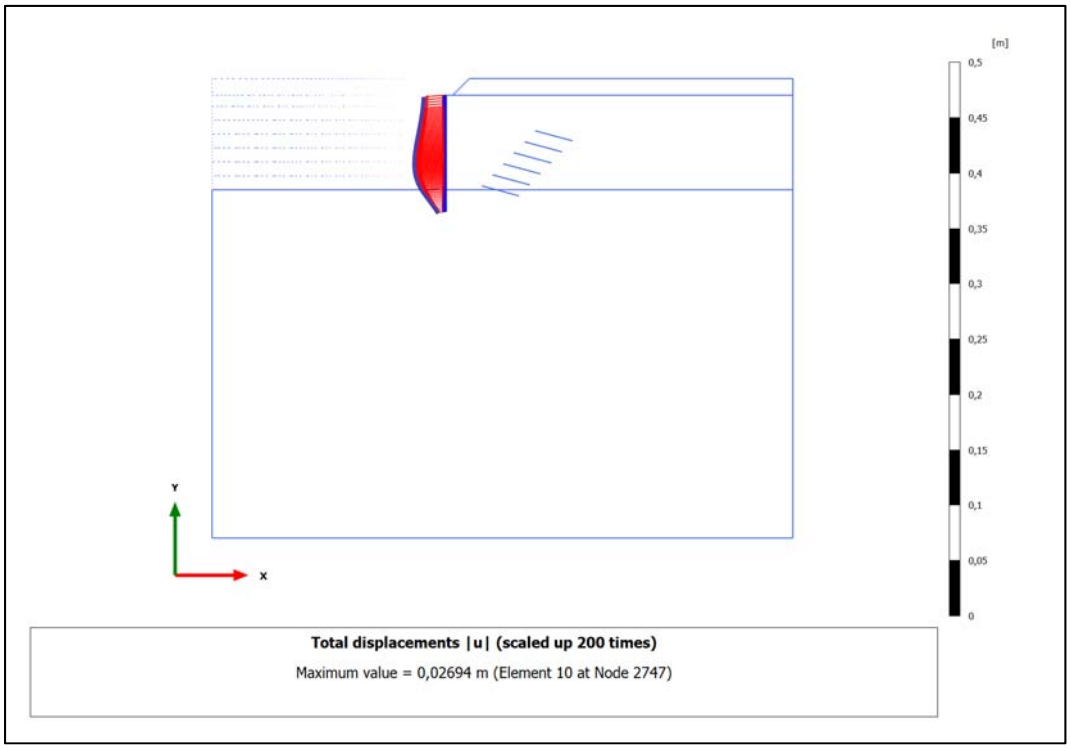
Özellik	Değer
Kazı derinliği	20 m
Fore kazık çapı	ϕ65 cm
Kazık boyu	17 m
Kazık yatay aralığı	1 m
Fore kazık malzeme modeli	Lineer elastik
Ankraj adedi	6 sıra
Ankraj kök boyu	7 m
Donatı malzemesi	Nervürlü STIIIa inşaat demiri
Beton malzemesi	C25
Ankraj yatay aralıkları	2,0 m
Ankraj düşey aralıkları	1,5 m
Ankraj eğimi (α)	15°
Sürşarj yükü	10 kPa

Vaka geri analizlerinde (Çalışan, 2009), Kil-1 olarak tanımlanan birime ait drenajlı parametreler ile aynı değerler kullanılarak sahadaki hareketi gerçekçi bir şekilde modellemek üzere inklinometre grafiklerinde ölçümü yapılan 26 mm mertebelerindeki hedef deplasman değerine ulaşılmıştır. Çalışmalar çerçevesinde risk analizlerine temel oluşturacak drenajlı malzeme parametreleri Çizelge 4.5'te sunulmuş olup drenajlı parametrelerin tespitinde kullanılan korelasyonlar Bölüm 4.3 kapsamında sunulmuştur.

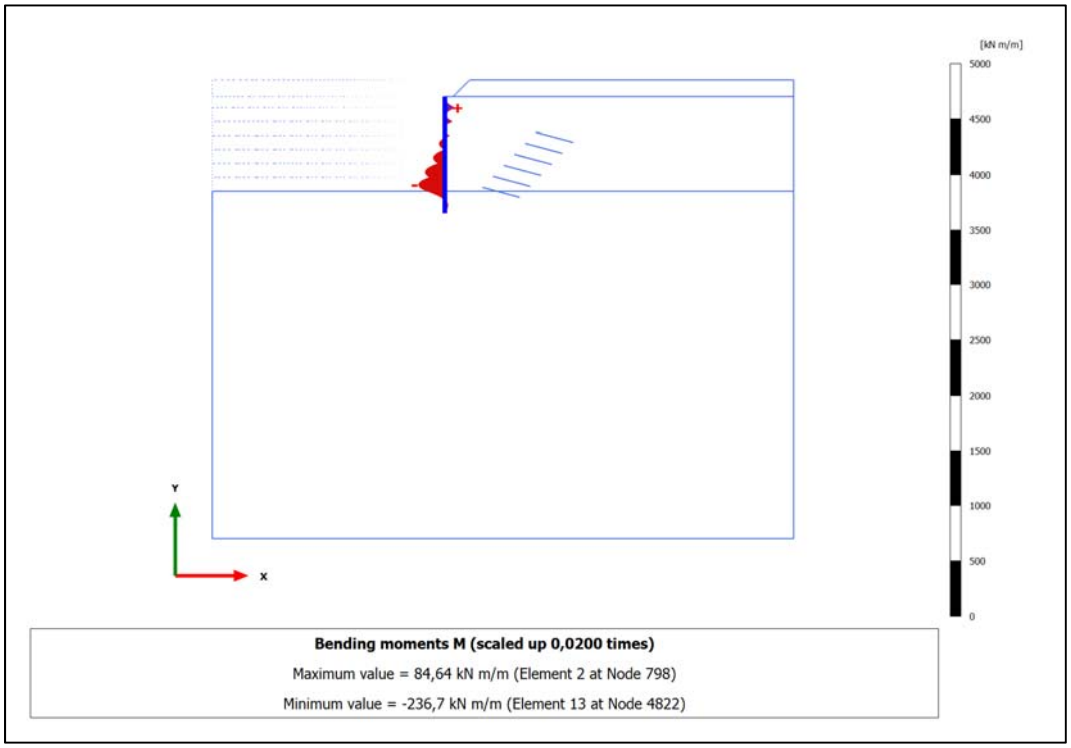
Çizelge 4.5. Vaka geri analizlerinde bulunan parametreler

Parametre	Dolgu	Kil-1	Kil-2	Birim
Malzeme Model	Pekleşen Zemin (HS)	Pekleşen Zemin (HS)	Pekleşen Zemin (HS)	-
Tip	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	-
E_{50}^{ref}	12000	55000	110000	kN/m^2
E_{oed}^{ref}	12000	55000	110000	kN/m^2
E_{ur}^{ref}	36000	165000	330000	kN/m^2
Power (m)	0,5	0,5	0,5	-
c'	3	20	25	kN/m^2
ϕ'	25	25	25	°
R_{inter}	0,70	0,70	0,80	-

Deterministik analizler sonucunda hesaplanan maksimum kazık yanal deplasman değeri 26 mm Şekil 4.5'te, maksimum kazık momenti 236 kNm/m Şekil 4.6'da sunulmuştur.



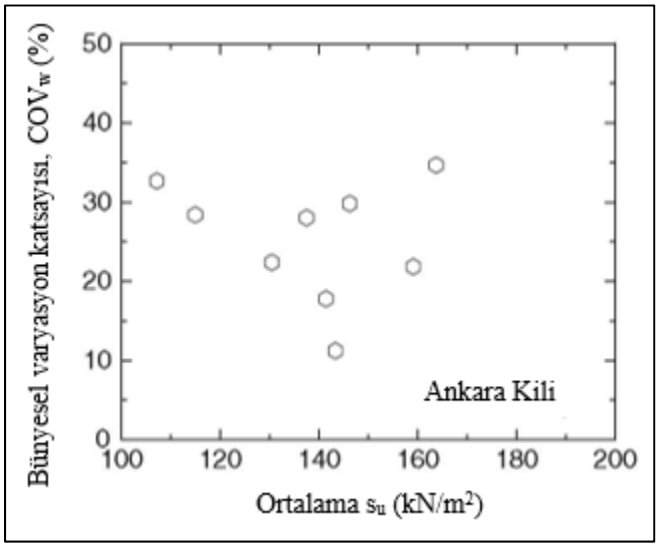
Şekil 4.5. Vaka geri analizi, fore kazık yanal deplasmanı ($\delta_{maksyanal} \cong 26$ mm)



Şekil 4.6. Vaka geri analizi, fore kazık maksimum moment değeri (M_{maks}=236,7 kNm/m)

4.3. FEM Analizlerinde Zemin Bünyesindeki Değişkenliğin Belirlenmesi

Vaka kapsamında sunulan zemin profili Ankara Kili olarak tanımlanmıştır. Ankara Kili genel özellikleri itibari ile sert, yarı doygun, plastik ve kırmızı-kahve renklidir. Formasyon derinlere indikçe iyice katı kıvama girdiği gözlenmektedir (Ergun, 1987). Kilin drenajsız kayma dayanımı 125-200 kN/m^2 arası değişmekte, derin seviyelerde daha yüksek değerler almaktadır (Ergun, 1987). Akbaş ve Kulhawy (2010) tarafından Ankara Kilinin bünyesel değişkenliğini belirlemeye yönelik kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Fakat, bu veya buna benzer herhangi bir çalışmada diğer dış etkenlerin değişkenlik üzerindeki etkilerini tam anlamı ile ayırt edip ortadan kaldırmak mümkün değildir. Bu sebeple, geoteknik risk analizleri kapsamında kullanılacak parametrenin bünyesel değişkenliği için elde edilmiş olan varyasyon katsayısı (COV) üst sınırlar kullanılarak hesaplanacaktır. Bu tutucu yaklaşım dış etkenlerin ortadan tamamı ile kaldırılması mümkün olmadığından, en kötü senaryo tahminlerine uygun bir yaklaşım olacaktır. Drenajsız kayma dayanımının bünyesel varyasyon katsayısını belirlemekte kullanılabilecek veriler son derece sınırlı miktarda olup, bu değerin ortalama drenajsız kayma dayanımı ile değişimi Şekil 4.7'de sunulmuştur.



Şekil 4.7. Drenajsız kayma dayanımının bünyesel varyasyon katsayısının ortalama drenajsız kayma dayanımı ile değişimi (Akbaş ve Kulhawy, 2010)

Söz konusu şekilden de görüldüğü üzere drenajsız kayma dayanımının bünyesel varyasyon katsayısı %11 ile %35 arasında değişkenlik göstermektedir. Ankara Kili için farklı geoteknik parametrelerin bünyesel varyasyon katsayıları Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.6. Ankara Kili için farklı geoteknik parametrelerin bünyesel varyasyon katsayıları (Akbaş ve Kulhawy, 2010)

Parametre	Veri grubu sayısı	Her gruba ait deney sayısı	Parametre değeri		Parametre COV_w(%)	
			Aralık	Ortalama	Aralık	Ortalama
w_L (%)	25	4-24	50-79	64	9-22	14
w_P (%)	25	4-25	20-35	26	6-19	12
w_n (%)	26	4-18	23-37	29	12-22	4
PI (%)	25	4-24	21-52	38	13-28	19
e_o	14	4-25	0,65-0,98	0,84	3-16	9
γ_d (kN/m^3)	20	3-12	14-17	15,8	2-8	5
s_u (kN/m^2)	9	4-8	106-186	148	11-35	23
C_c	7	3-8	0,18-0,38	0,26	14-35	26
SPT N	12	6-31	23-60	38	10-46	29

Genel olarak killer için geoteknik parametre istatistikleri çerçevesinde önerilen değerler ise Çizelge 4.7'da gösterilmektedir. Bu iki tablo incelendiğinde, Ankara Kili için hemen hemen tüm parametrelerde bünyesel varyasyon katsayısının çok daha dar bir aralıkta tanımlanabildiği anlaşılmaktadır. Bu, olasılıksal değerlerin spesifik bir formasyon için ortaya çıkartılmasının çok daha uygun bir yaklaşım olduğu tezini güçlendirmektedir.

Çizelge 4.7. Killer için farklı geoteknik parametrelerin bünyesel varyasyon katsayıları (Phoon ve diğerleri, 1995; Lacasse ve Nadim, 1996; Baecher ve Ladd, 1997; Zhu ve diğerleri, 2001)

Parametre	Veri grubu sayısı	Her gruba ait deney sayısı	Parametre COV_w(%)	
			Aralık	Ortalama
w_L (%)	38	15-299	7-39	18
w_P (%)	23	32-299	6-34	16
w_n (%)	40	17-439	7-46	18
PI (%)	33	15-299	9-57	29
e_o (Tüm zemin tipleri)	-	-	7-30	-
γ_d (kN/m^3)	8	4-315	2-13	7
s_u (kN/m^2)	42	24-124	6-80	32
C_c, C_r	-	-	20-28	-
SPT N	2	2-61	37-57	44

Ankara Kili bünyesindeki zemin değişkenliğini tanımlamak üzere içsel sürtünme açısına ait literatür verilenden faydalanılmış, analizlerde kullanılan bazı değişkenler için varyasyon katsayıları Çizelge 4.8 kapsamında sunulmuştur.

Çizelge 4.8. Analizlerde kullanılan bazı değişkenler için varyasyon katsayıları (Phoon ve Ching, 2015)

Geoteknik parametre	Varyasyon katsayısı (COV%)	Kaynak
Drenajsız kayma dayanımı, (s_u)	%13 - %40	Harr (1984), Kulhawy (1992), Lacasse ve Nadim (1996)
Efektif içsel sürtünme açısı, ϕ' (°)	%2 - %13	Harr (1984), Kulhawy (1992)

Ankara Kilinde yapılan çalışmalar kapsamında yer yer su içeren kum çakıl bant ve merceklerin varlığı sondajlar sırasında tespit olunmaktadır (Ergun, 1987). Ankara kilinde gerçekleştirilen bazı ankraj deney sonuçlarına göre bir grup ankrajda aşırı deformasyonlar gözlenmiş ve sıyrılma yenilmeleri gerçekleşmiştir (Ergun, 1987). Bu grubun ortak özelliği olarak ankraj deliklerinin kumlu, çakıllı, bantlı seviyelerden geçmekte olduğu ve delik içlerine sızan suların plastik Ankara kili katmanları geçilirken zemine nüfuz ettiği, delik içinde sürekli burgu ile adeta çamur karıldığı ve delik cidarında film tabakalarının oluştuğu öne sürülmüştür (Ergun, 1987). Bu bulgulardan hareketle Ankara kili bünyesinde kum-çakıl mercek ihtivasının ankraj kapasitesinde önemli ölçüde azalmaya sebebiyet vereceği görülmüştür. Aynı çalışma kapsamında yenilmenin gözlendiği ankraj deneylerinde uygulanan yükün 7-20 ton aralığında ve ankraj kök boylarının 8 m mertebelerinde olduğu kaydedilmiştir.

Ankara kilinde gerçekleştirilecek derin kazıların güvenilirliğinin risk değerlendirmeleri kapsamında tahlilinde, zemin bünyesindeki değişkenliğe kum-çakıl mercek ihtivası dahil edilmiştir. Ankara Kili bünyesindeki kum-çakıl ihtivasının tespitine yönelik olarak Akademi Etüt Proje Müh. Müş. Ltd. Şti. laboratuvarlarında Ankara ili Akyurt, Kazan mevkilerinde gerçekleştirilen arazi ve laboratuvar deney sonuçları incelenmiştir. Ankara Kili kum-çakıl ihtivasının tahlili için örnek sondaj verilerinde yer alan jeolojik tanımlamalar Çizelge 4.9'da verilmiştir.

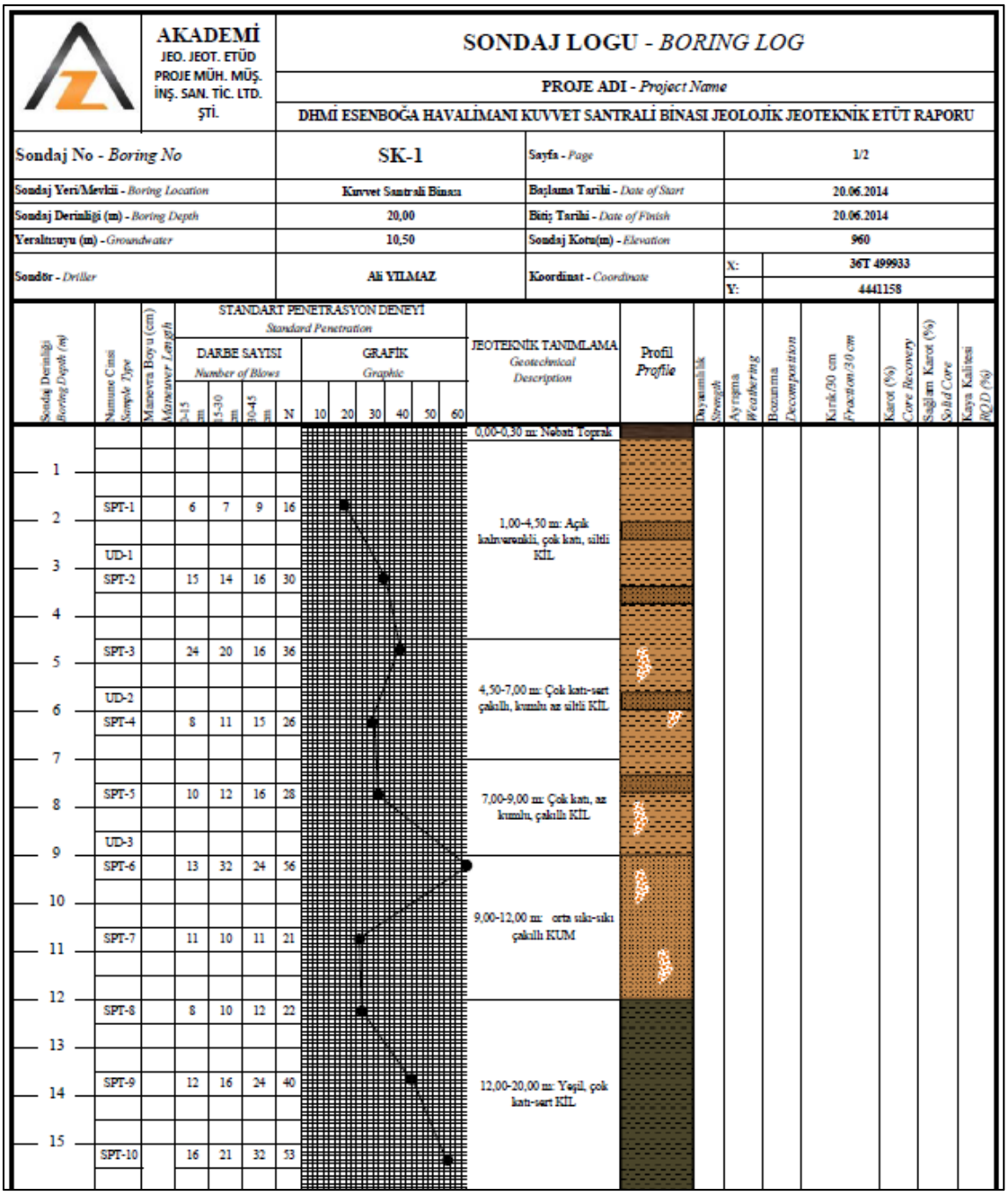
Çizelge 4.9. Ankara Kili kum-çakıl ihtivası tahlili örnek sondaj verileri (Akademi Etüt Proje, 2014)

DHMİ Esenboğa Havalimanı Santral Binası, Akyurt		
Sondaj no	Sondaj derinliği	Jeoteknik tanımlama
SK-1	1,00-4,50 m	Açık kahverenkli, çok katı, siltli KİL
"	4,50-7,00 m	Çok katı-sert çakıllı, kumlu az siltli KİL
"	7,00-9,00 m	Çok katı az kumlu, çakıllı KİL
"	9,00-12,00 m	Orta sıkı-sıkı çakıllı KUM
"	12,00-20,00 m	Yeşil, çok katı-sert KİL
SK-2	0,30-6,00 m	Çakıllı, kumlu sert KİL
"	6,00-11,00 m	Çakıllı, kum bantlı, çok katı KİL
"	11,00-14,00 m	Çakıllı, orta sıkı KUM
"	14,00-20,00 m	Yeşil, sert KİL

Yapılan değerlendirmelere göre 37 adet sondaj verisi dahilinde Ankara Kilinde mevcut kum-çakıl bant ihtivasının kalınlıkça %15 mertebelerinde olduğu görülmüş, örnek sondaj logu Şekil 4.8, sonuçlar ise Çizelge 4.10 kapsamında sunulmuştur.

Çizelge 4.10. Ankara Kilinde kum-çakıl mercek varlığı

Ankraj birimi	Birimin mevcudiyet olasılığı (%)
Kil	85
Kum-çakıl bant	15



AKADEMİ JEO. JEOT. ETÜD PROJE MÜH. MÜŞ. İNŞ. SAN. TİC. LTD. ŞTİ.

SONDAJ LOGU - *BORING LOG*

PROJE ADI - *Project Name*

DHMİ ESENBOĞA HAVALİMANI KUVVET SANTRALİ BİNASI JEOLOJİK JEOTEKNİK ETÜT RAPORU

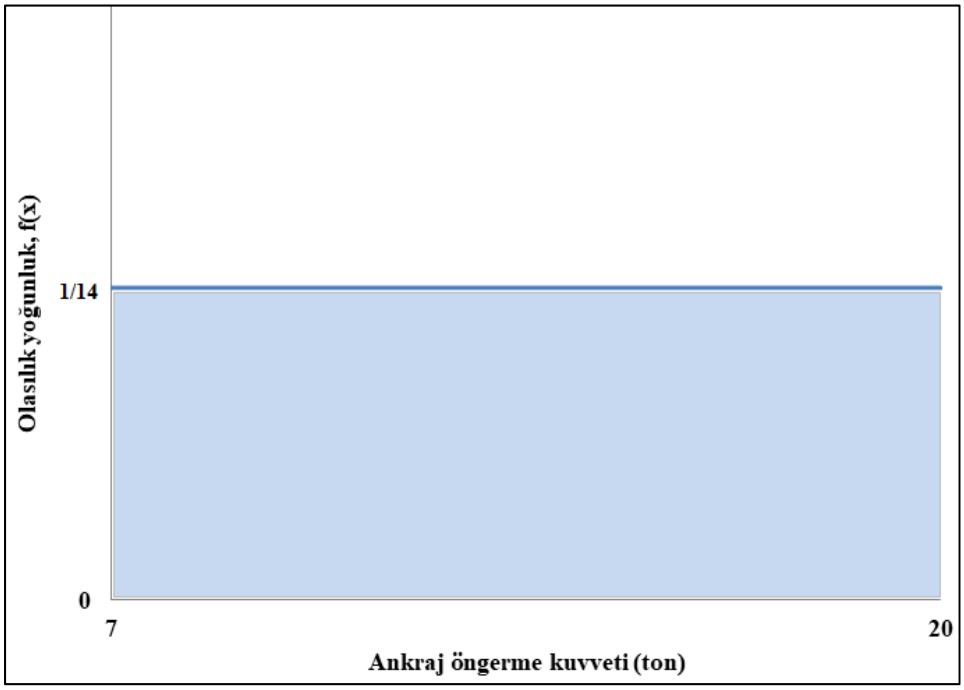
Sondaj No - *Boring No*	SK-1	Sayfa - *Page*	1/2
Sondaj Yeri/Mevkii - *Boring Location*	Kuvvet Santrali Binası	Başlama Tarihi - *Date of Start*	20.06.2014
Sondaj Derinliği (m) - *Boring Depth*	20,00	Bitiş Tarihi - *Date of Finish*	20.06.2014
Yeraltısuyu (m) - *Groundwater*	10,50	Sondaj Kotu(m) - *Elevation*	960
Sondör - *Driller*	Ali YILMAZ	Koordinat - *Coordinate*	X: 36T 499933 / Y: 4441158

Sondaj Derinliği *Boring Depth (m)*	Numune Cinsi *Sample Type*	Manevra Boyu (cm) *Maneuver Length*	STANDART PENETRASYON DENEYİ *Standard Penetration* — DARBE SAYISI *Number of Blows* 0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	N	GRAFİK *Graphic* 10 20 30 40 50 60	JEOTEKNİK TANIMLAMA *Geotechnical Description*	Profil *Profile*	Dayanımlık *Strength*	Ayrışma *Weathering*	Bozunma *Decomposition*	Kırık/30 cm *Fraction/30 cm*	Karot (%) *Core Recovery*	Sağlam Karot (%) *Solid Core*	Kaya Kalitesi *RQD (%)*
								0,00-0,30 m: Nebati Toprak								
1																
2	SPT-1		6	7	9	16		1,00-4,50 m: Açık kahverenkli, çok katı, siltli KİL								
3	UD-1															
	SPT-2		15	14	16	30										
4																
5	SPT-3		24	20	16	36		4,50-7,00 m: Çok katı-sert çakıllı, kumlu az siltli KİL								
6	UD-2															
	SPT-4		8	11	15	26										
7																
8	SPT-5		10	12	16	28		7,00-9,00 m: Çok katı, az kumlu, çakıllı KİL								
9	UD-3															
	SPT-6		13	32	24	56		9,00-12,00 m: orta sıkı-sıkı çakıllı KUM								
10																
11	SPT-7		11	10	11	21										
12																
	SPT-8		8	10	12	22		12,00-20,00 m: Yeşil, çok katı-sert KİL								
13																
14	SPT-9		12	16	24	40										
15																
	SPT-10		16	21	32	53										

Şekil 4.8. Ankara Kili örnek sondaj verileri (Akademi Etüt Proje laboratuvar verileri, 2014)

Ankraj deneylerinde yenilmenin gözlendiği testlerde uygulanan yükün 7-20 ton aralığında olduğu Ergun (1987)'de belirtilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde, Akademi Etüt Proje laboratuvar verileri (2014) kullanılarak kil birim içerisinde %15 ihtimalle mevcut olduğu tespit edilen kum-çakıl mercek bantlarında, Ergun (1987)'de yenilme yükü olarak kaydedilen 7-20 ton değer aralığının üniform dağılım sergilediği kabul edilmiş ve bu değerler ankraj öngerme yükü olarak sisteme etkitilmiştir.

Kum-çakıl mercek bantlarında kabul edilen sürekli üniform dağılıma ait olasılık yoğunluk fonksiyonu Şekil 4.9'da sunulmuştur.



Şekil 4.9. Kum-çakıl mercek bantlarında uygulanan öngerme kuvvetine ait kabul edilen olasılıksal dağılım fonksiyonu

Ankraj delim işleminin kum-çakıl mercek bandına denk gelmesi durumunda; öngerme kuvveti olarak kil birimlerde örnek vaka modelinde uygulanan 400 kN (Çalışan, 2009) yerine, sürekli üniform dağılım sergilediği kabul edilen 7-20 ton aralığından Python yazılımı vasıtasıyla rastgele bir fonksiyon aracılığıyla seçilecek bir değer, sonlu eleman analizlerinde ankrajlara uygulanmıştır.

4.4. Yenilme Olasılığının Tariflenmesi

Ankraj destekli derin kazı risk değerlendirmeleri kapsamında temel olarak üç yenilme mekanizması irdelenmelidir:

- Destek elemanı yenilmesi (fore kazık, diyafram duvar vb.)
- Ankraj kapasite aşımı
- Zemin bünyesinde yenilme

Önceki bölümlerde yenilme mekanizması geoteknik tasarıma esas elemanların tamamının yenilmesi olarak değil, yalnızca yükün direnç kuvvetlerini aşması veya limit koşulların aşılması olarak tanımlanmıştır. Ankraj destekli derin kazı modeline ait PLAXIS plastik analizleri sonucunda, sayısal analiz hatası veya 3 m kalınlığındaki yarma şevinde yenilme oluşmadığı takdirde analizler "tamamlanmış" olarak nitelendirilir ve plastik analiz parametresi, M_{stage} "1" değerini alır. Burada tamamlanmış ifadesi güvenilirlik kavramı ile ilişkilendirilmemekte, yenilme mekanizmasının limitler içerisinde olup olmadığını tespit etmek üzere gerçekleştirilen analiz sonuçlarına ait sonuç çıktılarının elde edilebildiği anlamına gelmektedir. Çalışmalar kapsamında sistem yenilmesi kazık yapısal kapasite aşımı, kazık yanal deplasman limitlerinin aşılması ve şev stabilitesi kaybı olarak kabul edilmiştir. İrdelenen yenilme parametrelerine ait sonlu eleman analiz sonuçları aşağıdaki basit denklemlerle (Eş. 4.1 ve Eş. 4.2) çözümlenmiştir:

$$P = \begin{cases} -1, & eğer\ plastik\ analizler\ başarısız\ ise\ \left(M_{stage} \neq 1\right) \\ 1, & eğer\ plastik\ analizler\ başarılı\ ise\ \left(M_{stage} = 1\right) \end{cases} \quad (4.1)$$

Burada P, analizlere esas derin kazı modeline ait yenilme mekanizmasını ifade eden bir fonksiyondur. Analizler kapsamında sayısal analiz hatası ve şev stabilite kaybı yenilmeleri birlikte değerlendirilmiştir. Yenilme mekanizmasını tanımlamak üzere irdelenen diğer iki başlık, kazık yapısal kapasitesi ve kazık yanal deplasman limit değerlerine ait eşitlikler ise aşağıdaki denklemler vasıtasıyla tespit edilmiştir:

$$P = \begin{cases} -1, & M_{maks} \geq M_{deterministik}\ x\ 1{,}5 \\ 1, & M_{maks} < M_{deterministik}\ x\ 1{,}5 \end{cases} \quad (4.2)$$

$$P = \begin{cases} -1, & \delta_{ymaks} \geq \%0{,}3\ H_{kazı} \\ 1, & \delta_{ymaks} < \%0{,}3\ H_{kazı} \end{cases} \quad (4.3)$$

Risk değerlendirmelerine esas vaka, geri analizler ile tekrar incelenmiş ve sahada inklinometre okumalarında tespit olunan 26 mm mertebelerindeki maksimum yanal kazık deplasmanı (δ_{ymaks}) elde edilerek sahada gerçek durumu yansıtan tasarım modellenerek deterministik yaklaşım çerçevesince maksimum kazık momenti ($M_{deterministik}$) hesaplanmıştır.

Gerçekleştirilen analizlerde ankraj destekli dayanma yapıları için aktif zemin itkisi tek yük kaynağı olarak kabul edilmiştir. AASHTO (2012) yük-direnç faktörleri ve TS500 (2000) standardı yük faktörleri, fore kazık kapasitesinin belirlenmesinde birlikte değerlendirilmiştir. Limit kazık yapısal kapasitesini belirlemeye yönelik olarak deterministik analiz sonucunda elde edilen moment kullanılarak kazık donatı hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve bu kapsamda donatı oranı limitlerinin aşıldığı değer dikkate alınarak hesaplanan deterministik moment değerinin 1,5 katı yenilme yükü olarak belirlenmiştir. Geoteknik tasarımlarda AASHTO (2012)'da önerilen yük-direnç faktörleri Çizelge 4.11'de sunulmuştur.

Çizelge 4.11. Ankrajlı dayanma yapıları geoteknik tasarım için yük ve direnç faktörleri (AASHTO, 2012)

Yük- Direnç	Sembol	Değer
Yatay Aktif Zemin İtkisi (EH)	γ_{EH}	1,50
Ankrajlı Dayanma Yapıları Görünür Zemin İtkisi (AEP)	γ_{p}	1,35
Hareketli Yük Sürşarj (LL)	γ_{LL}	1,75

Kazık yanal deplasman limiti ise Long (2001) ve Wang ve diğerleri (2008) kaynaklarından hareketle kazı derinliğinin %0,3'ü olarak dikkate alınmıştır. Bu değer aynı zamanda Çizelge 2.4'te yer alan Şangay temel tasarımı standardında (PSCG, 2000) önem derecesi 1 olarak tanımlanan derin kazılar için limit değerdir. Bölüm 4.5 kapsamında yer verilen analiz sonuçlarından hareketle gerçekleştirilen risk değerlendirmelerinde PSCG (2000)'de yer alan, önem derecesi 2 olarak tanımlanan destekli derin kazı maksimum yanal deplasman limiti olarak kaydedilen %1,4 $H_{kazı}$ değeri de ayrıca Bölüm 4.6 kapsamında belirtilmiştir. Bölüm başında yenilme mekanizmaları çerçevesinde belirtilen ankraj kapasite aşımı durumu, Ankara Kilinde sıklıkla rastlanan kum-çakıl bantlarda gerçekleştirilen ankraj delgilerinde görülen ankraj kapasite kaybının kazık yapısal kapasite ve kazık yanal deplasmanına etkisi dahilinde dolaylı olarak incelenmiştir. Birim içinde kum-çakıl mercek varlığı incelenen deneyler neticesinde %15 olarak tespit edilmiş (Bölüm 4.3) ve zemin bünyesine ait bu değişkenliğin sistem güvenilirliğine etkisi, ihtimalin analizlere rastgele bir matematiksel fonksiyon ile sürekli olasılık olarak dahil edilmesi vasıtasıyla tahlil edilmiştir.

4.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) Risk Analizleri

Derin kazı sistemi risk analizlerine esas zemin profili üç tabakalı olarak tanımlanmıştır. Risk analizlerinde de geri analizlerde olduğu gibi drenajlı parametreler kullanılmıştır. Dolgu ve Kil-2 olarak tanımlanan tabakalara zemin değişkenliği uygulanmamış, sadece ankrajların içerinde yer aldığı Kil-1 birimi için zemin bünyesel değişkenliği c′, ϕ′ ve E′ üzerinden modellenmiştir. Değişkenliğin tanımlandığı söz konusu drenajlı parametreler, literatürdeki korelasyonlar kullanılarak geri analizlerle belirlenmiştir. Çalışmalarda kulanılan korelasyonlar bu bölüm kapsamında açıklanmıştır.

Risk değerlendirmeleri kapsamında zemin bünyesel değişkenliğini vaka modeline yansıtmak üzere analizlerde kullanılan, log-normal dağılım sergilediği kabul edilen olasılıksal parametreler Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13 kapsamında sunulmuştur.

Çizelge 4.12. Risk analizlerinde kullanılan Kil-1 birime ait zemin değişkenleri

Kil-1 malzemesine ait değişkenlik katsayıları		
Parametre	c_u (kPa)	ϕ′ (°)
Ortalama, μ	200	25
Varyasyon, COV	23	13

Çizelge 4.13. Ankara Kilinde kum-çakıl mercek varlığı doğrultusunda uygulanan ankraj yükleri

Ankraj birimi	Uygulanan ankraj öngerme yükü (kN)	Birimin mevcudiyet olasılığı (%)
Kil	400	85
Kum-çakıl bant	70-200 (üniform dağılım)	15

Analizlerde Kil-1 olarak tanımlanan birim için kullanılan ortalama drenajsız kayma değeri, c_u = 200 kPa ve ortalama drenajlı içsel sürtünme açısı, ϕ′ = 25° geri analizler neticesinde belirlenmiştir. Drenajsız kayma dayanımına ait varyasyon katsayısı olan 23 değeri Akbaş ve Kulhawy (2010)'da yer alan, Ankara Kili drenajsız kayma dayanımı için sunulan ortalama değerdir. İçsel sürtünme açısına ait varyasyon katsayısı için ise Phoon ve Ching (2015)'te alt limit olarak sunulan 13 değeri kullanılmıştır.

Zemin değişkenliğinin dikkate alındığı, Kil-1 olarak tanımlı birime ait parametreleri tespit etmek ve iteratif analizleri gerçekleştirmek amacıyla literatürdeki korelasyonlardan faydalanılmıştır. Kil-1 birimine ait E_u/c_u limitleri Duncan ve Buchignani (1976) yöntemi ve Çalışan (2009)'da kullanılan parametrelerden faydalanılarak belirlenmiştir. Çalışan (2009)'da incelenen vaka kapsamında analizlerde kullanılan birimlerin malzeme parametreleri Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Ankara Kiline ait drenajsız ve drenajlı kayma dayanımı arasındaki ilişki Sorensen ve Okkels (2013) çalışmasında önerilen denklem kullanılarak Eş. 4.4 ile belirlenmiştir. Drenajlı elastisite modülünün tespitine yönelik olarak ise Craig (2004)'te önerildiği üzere Eş. 4.5 dikkate alınmıştır.

$$c' = c_u \text{ x } 0{,}1 \tag{4.4}$$

$$E' = E_u \text{ x } 0{,}75 \tag{4.5}$$

İteratif analizlerde kullanılan Kil-1 birime ait zemin parametrelerinin tespitinde kullanılan korelasyonlar Çizelge 4.14'te sunulmuştur.

Çizelge 4.14. Kil-1 birim parametrelerinin tespitinde kullanılan korelasyonlar

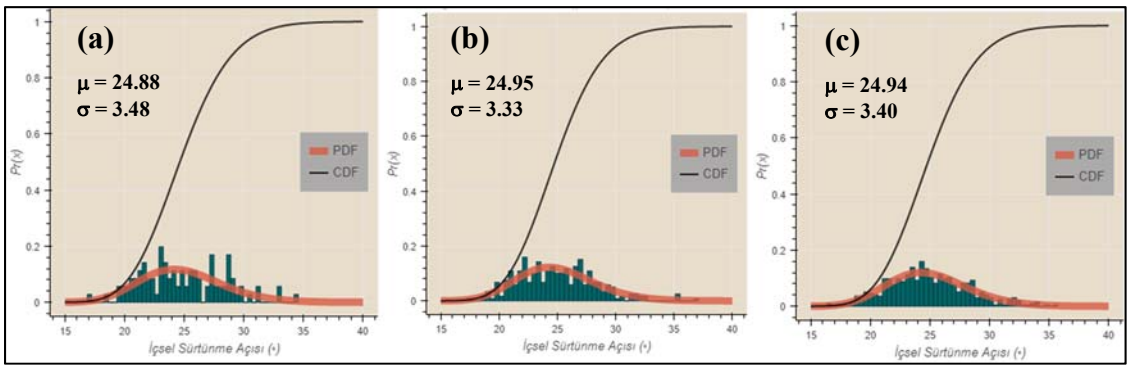
Parametre	Kil-1	Kaynak
E'	0,75 x E_u	Craig (2004)
E_u	375 x c_u	Duncan ve Buchignani (1976)
c'	c_u x 0,1	Sorensen ve Okkels (2013)

Çizelge 4.14'de sunulan korelasyonlar kullanılarak Çalışan (2009)'da tespit edilen drenajlı parametrelerle aynı mertebede değerler elde edilmiştir. Gerçekleştirilecek risk analizlerinde de kabul edilen olasılıksal dağılımı, değişkenlik parametreleri ve Çizelge 4.14'de verilen korelasyonlar kullanılarak Kil-1 birime ait zemin parametreleri iteratif olarak üretilmiştir. Risk değerlendirmelerine yönelik olarak gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri iki bölüm kapsamında incelenmiştir. İlk bölümde deterministik analizlerde kullanılan parametreler ortalama değer (μ) olmak üzere, mevcut literatürdeki varyasyon (COV) katsayıları kullanılarak yalnızca zemin bünyesindeki değişkenlik dikkate alınmıştır. İkinci bölümde ise zemin bünyesindeki değişkenliğe Ankara Kilinde sıklıkla rastlanan kum-çakıl mercek ihtivası da dahil edilerek Monte Carlo simülasyon yöntemi vasıtasıyla malzeme parametreleri sonlu eleman analiz modellerine tayin edilmiştir.

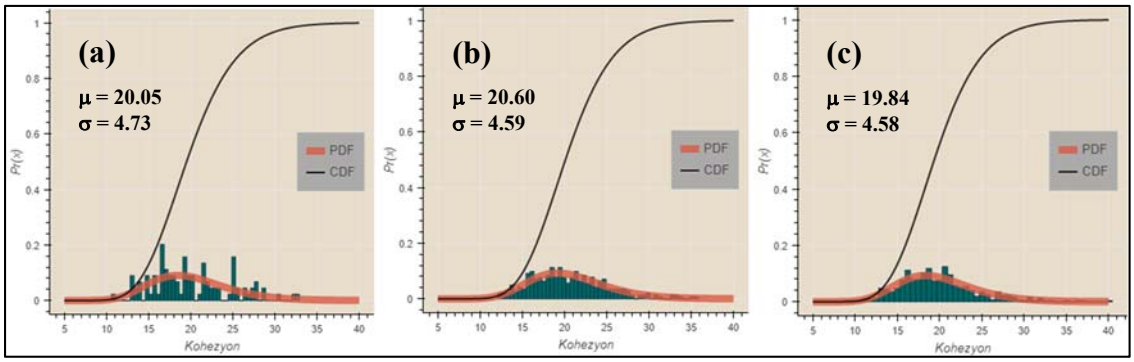
4.5.1. Ankara Kili bünyesindeki değişkenliğin güvenilirlik analizleri dahilinde incelenmesi

Gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinde zemin bünyesindeki mevcut değişkenliğin sistem güvenilirliğine etkisi incelenmiştir. Ankara Kili bünyesindeki mevcut değişkenliği modellemek üzere analizlerde kullanılan olasılıksal parametreler Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13 kapsamında sunulmuştur. Log-normal dağılım gösterdiği kabul edilen zemin parametreleri, Python yazılımı vasıtasıyla zemin değişkenlerine ait belirlenen varyasyon katsayıları ve ortalama değer olarak geri analizden elde edilen deterministik parametreler kullanılarak Monte Carlo simülasyon yöntemi ile rastgele olarak yeniden belirlenerek PLAXIS programına analiz sayısı kadar iteratif olarak atanmıştır. Elde edilen analiz sonuç çıktıları kullanılarak veri seti değişkenlerine ait olasılık yoğunluk fonksiyon (PDF) grafikleri çizilmiş ve Ahmed ve Soubra (2011)'de önerildiği şekilde (Bölüm 2.1) verilerin olasılıksal dağılımı yansıtabilirliği dikkate alınarak gerçekleştirilecek analiz sayısına karar verilmiştir.

Bu bölüm kapsamında zemin değişkenliği Kil-1 olarak tanımlı birime ait ϕ' ve c' parametreleri üzerinden modellenmiştir. Gerçekleştirilen analiz sayısına bağlı olarak zemin değişkenliğini modellemekte kullanılan, log-normal dağılım sergilediği kabul edilen verilere ait histogramlar Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de sunulmuştur.

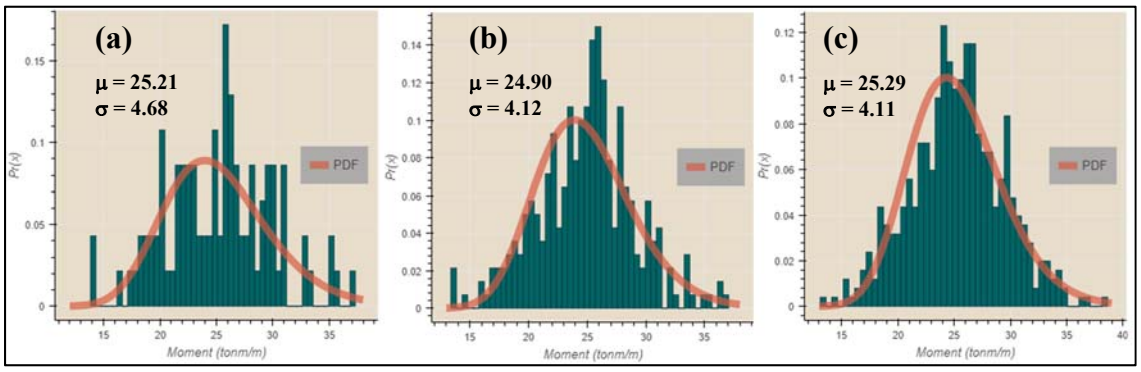


Şekil 4.10. M-C FEM yalnızca zemin değişkenliği, içsel sürtünme açısı histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz

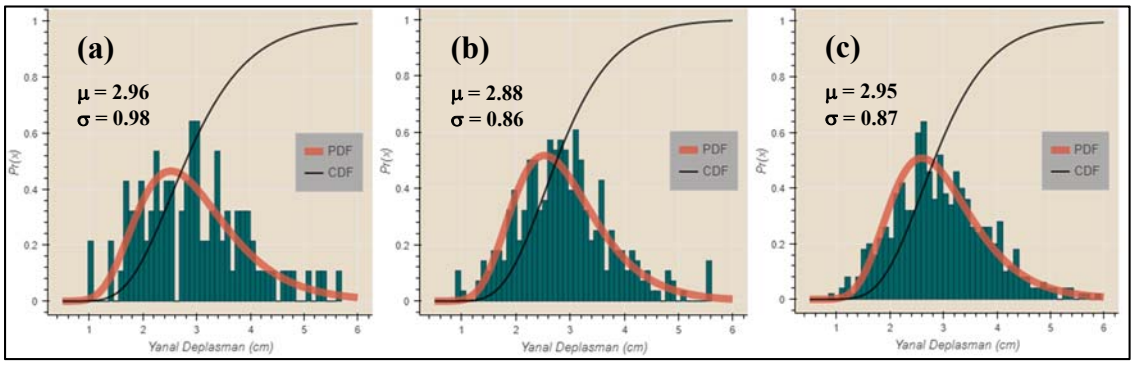


Şekil 4.11. M-C FEM yalnızca zemin değişkenliği, kohezyon histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz

Bölüm 4.5'te sunulan kil birime ait istatistiksel parametreler kullanılarak gerçekleştirilen risk değerlendirmeleri socunda elde edilen analiz çıktılarının (kazık yanal deplasmanı ve maksimum kazık momenti), analiz sayısına bağlı olarak değişimi Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te sunulmuştur.



Şekil 4.12. M-C FEM yalnızca zemin değişkenliği, kazık momenti histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz



Şekil 4.13. M-C FEM yalnızca zemin değişkenliği, kazık yanal deplasman histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz

Analiz sonuç çıktıları kullanılarak Bölüm 4.4 kapsamında sunulan sistem yenilme mekanizmasını belirleyen; kazık yapısal kapasite aşımı, kazık yanal deplasman limitlerinin üzerine çıkılması ve şev stabilitesi kaybı unsurlarına ait yenilme olasılıkları incelenmiştir. Bölüm 2.1 kapsamında Monte Carlo simülasyon yönteminde analiz sayısı artışının hesaplama süresinde yaratacağı dezavantaj üzerinde durulmuştur. Kullanılan veri setinin sonlu eleman analizlerinin gerçekleştirilmesi için gereken hesaplama süresini logaritmik olarak arttırdığı görülmüştür (Çizelge 4.15).

Çizelge 4.15. Yalnızca zemin değişkenliği dahilinde gerçekleştirilen FEM nümerik analizleri yaklaşık süresi

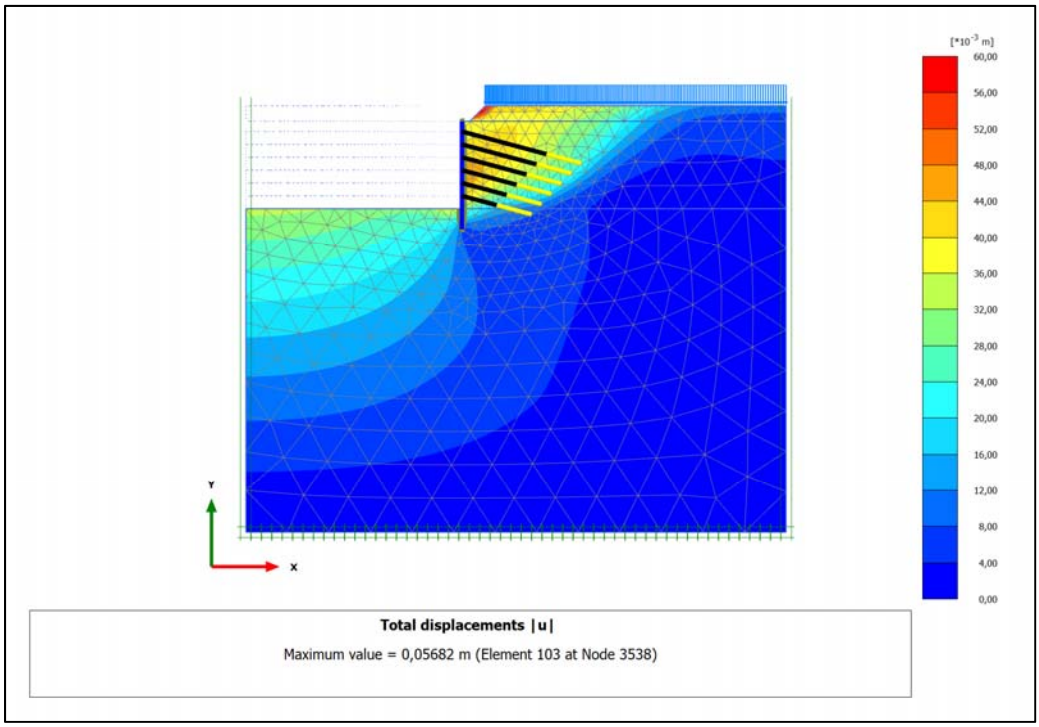
Analiz sayısı	Yaklaşık analiz süresi (saat)
100	2
300	10
500	24

Yalnız zemin değişkenliği dikkate alınarak gerçekleştirilen risk analizleri göstermektedir ki yenilme mekanizmasında baskın olan kriterler kazık yapısal yenilmesi ve yaklaşık 3 m kalınlığında yarma şevinde meydana gelen stabilite kaybıdır (Şekil 4.14). Analiz sonuçları Çizelge 4.16'da sunulmuştur.

Çizelge 4.16. Zemin değişkenliği dahilinde yenilme mekanizması

Toplam analiz sayısı (n)	Yenilen analiz adedi (n_f)		
	Kazık yapısal kapasite aşımı	Kazık yanal deplasman limiti aşımı	Şev stabilitesi kaybı
100	1	-	1
300	3	-	4
500	3	-	7

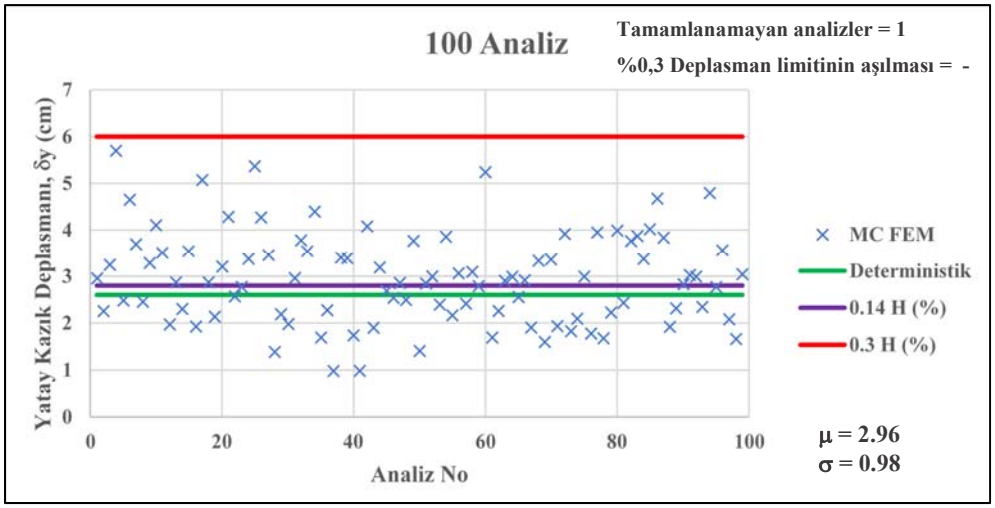
Yapının kısa dönemde (drenajsız koşullar dahilinde) görevini tamamlayacağı dikkate alındığında, yarma şevinde karşılaşılabilecek yenilmelere yerinde müdahale edilebileceği için risk değerlendirmeleri kapsamında bu yenilme mekanizmasının ihmal edilebilir düzeyde olduğu savunulabilir. Bu sebeple yalnızca zemin parametrelerindeki değişkenlik dikkate alındığında yapılan kabuller doğrultusunda sistem güvenilirliğini etkileyen tek husus, kazık yapısal kapasite aşımıdır. Analiz sonuç çıktılarının dağılımını gösteren tablolarda (Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20), yarma şevinde meydana gelen stabilite kaybı "Tamamlanamayan analizler" başlığı altında sunulmuştur.



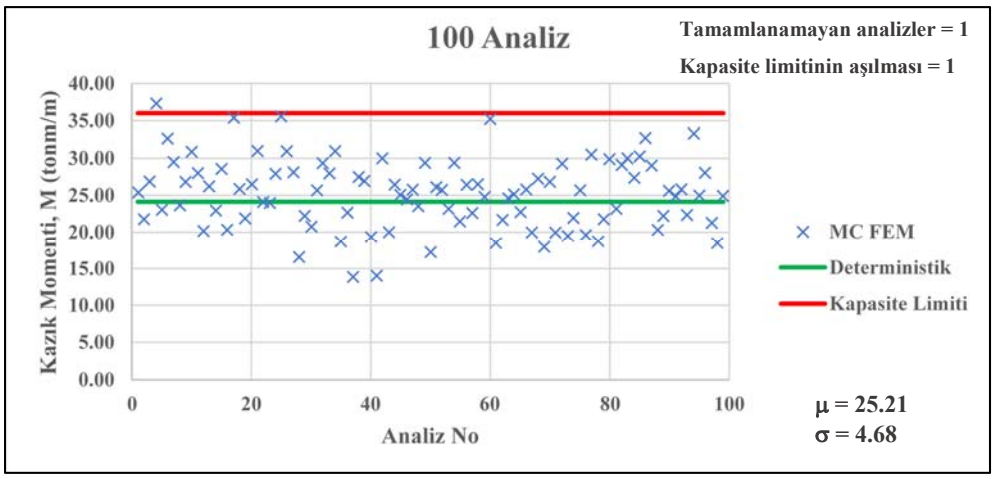
Şekil 4.14. PLAXIS analizi, yarma şevi yenilme mekanizması

Yerinde deterministik yöntemlerle teşkil edilen fore kazıkların donatı oranı dikkate alındığında, yalnız zemin bünyesindeki mevcut değişkenlik dahilinde gerçekleştirilen risk analizlerine göre Bölüm 4.4 kapsamında sunulan limit momentten daha yüksek tesir kuvvetleri izlenen analizlerde, yetersiz donatı oranı kaynaklı olarak yenilme ihtimali söz konusudur. Deterministik yaklaşım çerçevesinde kazık yapısal kapasite limitleri AASHTO (2012) yük-direnç faktörleri ve TS500 (2000) standardı yük faktörleri birlikte değerlendirilerek maksimum kazık momentinin 1,5 katı olarak belirlenmiş, yenilme koşulu olarak bu limitin üzerindeki değerler dikkate alınmıştır.

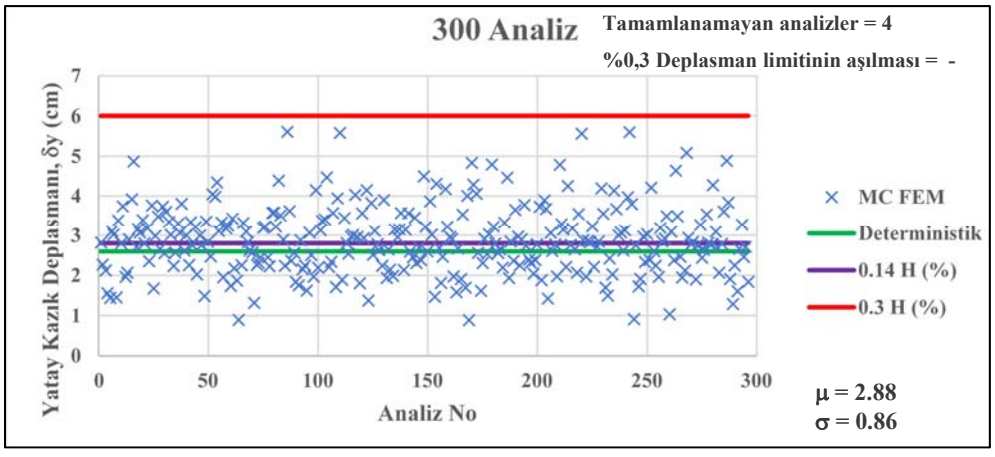
Kazık yanal deplasman limiti olarak Long (2001) ve Wang ve diğerleri (2008) kaynaklarında önerilen kazı derinliğinin %0,3'ü yenilme limiti olarak kabul edilmiş, yenilme mekanizmasını anlaşılır kılmak amacıyla sunulan grafiklerde ise PSCG (2000) kaynağından hareketle önem derecesi 1 ($\delta_{yanallimit}$ = %0,3 $H_{kazı}$) ve 2 ($\delta_{yanallimit}$ = %1,4 $H_{kazı}$) olarak tanımlanan derin kazılar için limit yanal deplasman değerleri, analiz sonuç çıktılarının dağılımını gösteren tablolar üzerinde belirtilmiştir (Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20). Grafiklerde "Deterministik" olarak ifade edilen sınır, geri analizlerle edilen maksimum kazık yanal deplaman ve maksimum kazık moment değerleridir.



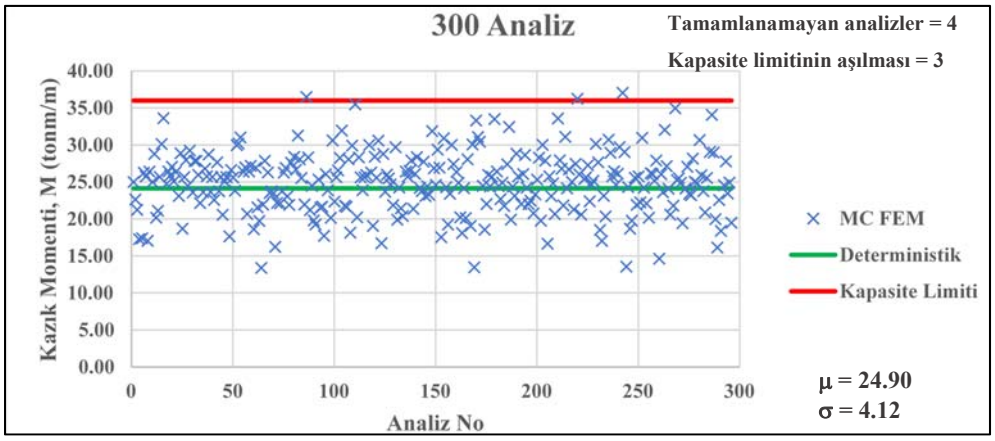
Şekil 4.15. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (100 analiz)



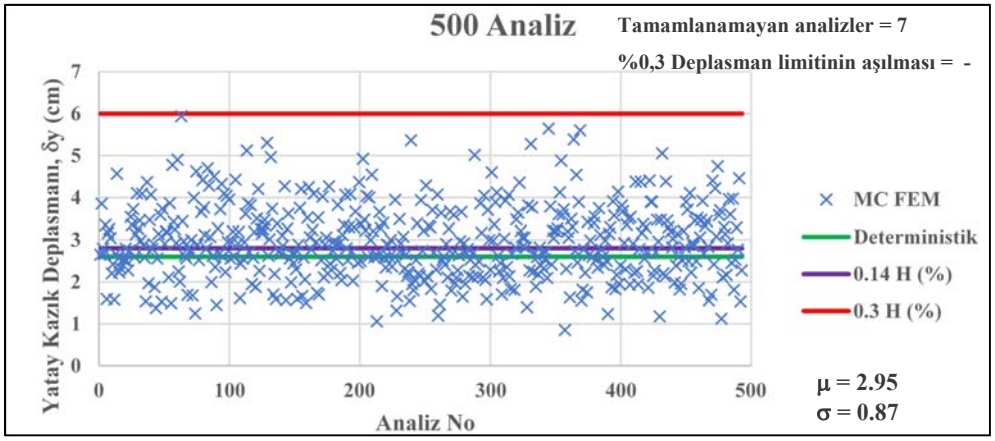
Şekil 4.16. FEM analizi kazı sonu maksimum kazık momenti dağılımı (100 analiz)



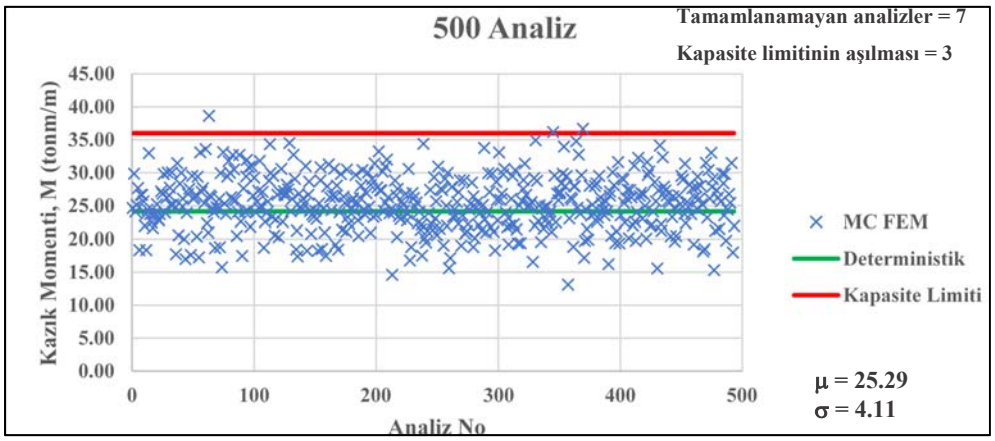
Şekil 4.17. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (300 analiz)



Şekil 4.18. FEM analizi kazı sonu maksimum kazık momenti dağılımı (300 analiz)



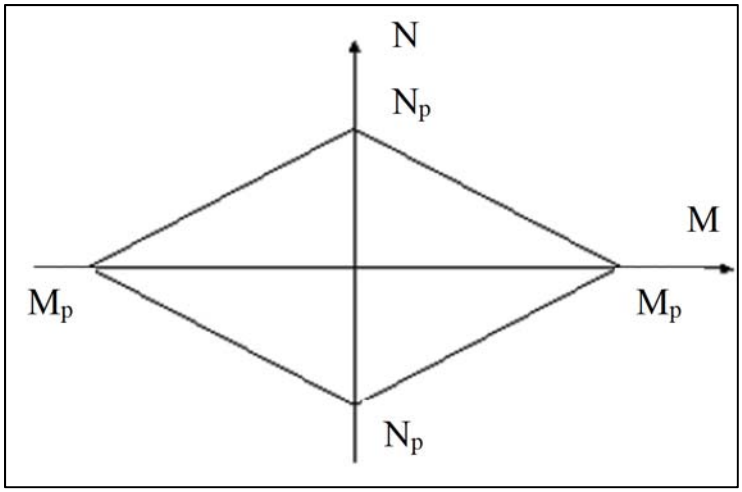
Şekil 4.19. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (500 analiz)



Şekil 4.20. FEM analizi kazı sonu maksimum kazık momenti dağılımı (500 analiz)

Elasto-plastik kazık davranışının risk analizlerine etkisinin incelenmesi:

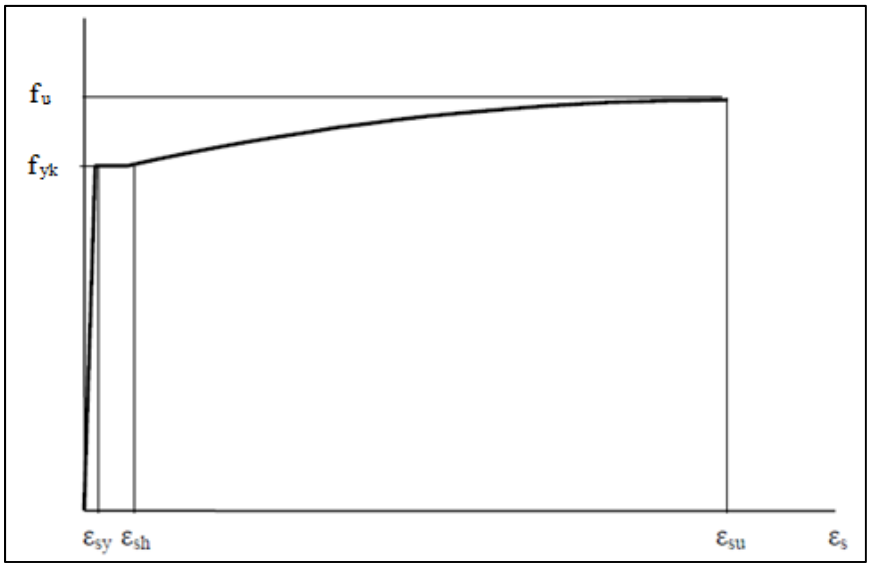
Ankara Kili bünyesindeki mevcut değişkenliği modellemek üzere Bölüm 4.5.1 kapsamında gerçekleştirilen analizlerde fore kazık elemanı hem eğilme hem de eksenel rijitliği olan, lineer elastik davranış sergilediği kabul edilen perde eleman olarak modellenmiştir. Elastik davranış kabulü ile perde elemana PLAXIS programı tarafından yüksek moment kapasitesi (M_p) ve eksenel kapasite (N_p) değerleri otomatik olarak atanmakta, böylece oluşan kesit tesirlerinden bağımsız olarak perde eleman her durumda elastik davranış sergilemektedir. M_p ve N_p arasındaki ilişki Şekil 4.21'de sunulmuştur.



Şekil 4.21. Maksimum eğilme momenti ve eksenel kuvvet kombinasyonu (PLAXIS 2D Material Models Manuals, 2018)

Şekil 4.21'de sunulan paralelkenar, malzemenin plastik davranışa geçtiği yük kombinasyonunu tanımlamaktadır. Paralelkenarın içerisinde yer alan yük kombinasyonları ise perde elemanda elastik deplasmana sebebiyet verecektir. M_p ve N_p kapasite limitleri aşıldığı takdirde ise plastik teoriye göre kalıcı deformasyonlar meydana gelecektir (PLAXIS 2D Material Models Manuals, 2018).

PLAXIS analizlerinde fore kazık donatı çeliği davranışı elasto-plastik olarak da modellenmiştir. Donatı çeliği elasto-plastik davranışı Şekil 4.22'de sunulmuş olup akma dayanımı (f_{yk}) ve kopma dayanımı ($f_{u)}$ şekil üzerinde gösterilmektedir.



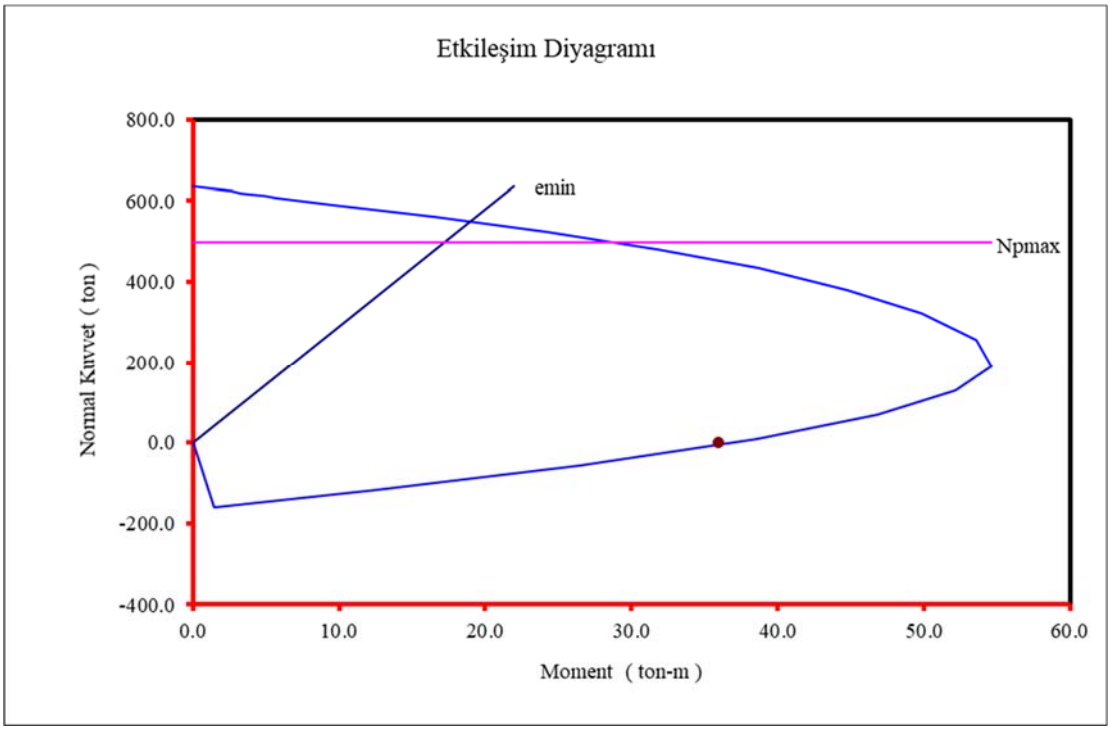
Şekil 4.22. Donatı çeliği davranışı (Yeniden düzenlenmiştir, orijinal kaynak: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007)

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007) dikkate alınarak N_p ve M_p limitleri Eş. 4.6 ve Eş. 4.7 ile tanımlanmıştır:

$$N_p = 0{,}85\, f_{ck}\, A_c + A_{st}\, f_{yk} \tag{4.6}$$

$$M_p = f\,(f_{ck},\, f_{yk}) \tag{4.7}$$

M_p, deterministik olarak elde edilen moment değeri dikkate alınarak donatılandırılan fore kazıklara ait etki diyagramı kullanılarak hesaplanmış olup Eş. 4.7'de fonksiyon olarak ifade edilmiştir. Burada A_c, ϕ65 cm çapındaki fore kazıklara kesit alanı; A_{st} ise kayma donatısı alanı olarak hesaplanmıştır. Fore kazıklara ait etki diyagramı Şekil 4.23'te sunulmuştur.



Şekil 4.23. Fore kazık N_p, M_p tespitinde kullanılan etki diyagramı

Risk değerlendirmeleri kapsamında fore kazık elemanı lineer elastik malzeme kabulü ile modellendiğinde gerçekleştirilen 500 adet analiz neticesinde, Şekil 4.20'den görüleceği üzere analiz no:34, 345 ve 369 dikkate alındığında, kazık donatı kapasitesinin (36 ton) üzerinde değerler hesaplanmıştır. Perde elemanlarda kullanılan malzeme modelinin bu analizlere etkisini incelemek üzere söz konusu üç analiz elasto-plastik malzeme kabulü ile modellenmiştir. Elasto-plastik analizlerde, fore kazık moment kapasitesi olarak belirlenen 36 ton değerinin üzerinde bir değere ulaşılmamıştır. Ayrıca deplasman limiti olarak öngörülen 6 cm değerinin altında deplasman değerleri elde edilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre elasto-plastik malzeme kabulü ile modellenen fore kazığa ait moment ve deplasman değerlerinin kabul edilen limitler dahilinde olduğu görülmüş olup elde edilen sonuçlar Çizelge 4.17'de sunulmuştur.

Çizelge 4.17. Elasto-plastik analiz sonuçları (500 analiz)

Analiz no	Kazık yanal deplasmanı, δ (cm)	Maksimum kazık momenti, M_{max} (kNm/m)
34	~6	355,1
345	~6	352,2
369	~6	353,5

Ankraj destekli derin kazı vakası kapsamında gerçekleştirilen analizlere göre Bölüm 4.2 kapsamında sunulan, geri analiz sonucunda elde edilen maksimum kazık momenti kullanılarak hesaplanan, sahada fore kazık imalatları için gereken kazık donatı oranının *kazık yapısal kapasitesi* sınırını belirlediği kabul edilmiştir. Lineer elastik malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilen risk analizlerine göre, bazı analizler tasarımda kullanılan donatı oranından daha yüksek mertebede donatı kullanılmasını gerektirmektedir (Şekil 4.20, analiz no:34, 345 ve 369). Geri analizle belirlenen moment değerinden daha yüksek moment tesirlerinin oluşması ve buna bağlı olarak tasarım donatı oranının aşılması durumunun, uygulamada görünür bir yenilmeye sebebiyet vermemesi muhtemeldir. Ancak yerinde imalatı gerçekleştirilen fore kazıkların, tasarım momentinden daha yüksek moment değerlerine maruz kalması durumunda yetersiz donatı imalatının gerçekleştirildiği savunulabilir. Yapılan kabuller doğrultusunda bu çalışma kapsamında fore kazık elemanı lineer elastik olarak modellendiğinde, deterministik olarak geri analizlerle hesaplanan kazık donatı oranının aşılması durumu, yenilme tanımına dahil edilmiştir.

4.5.2. Ankara Kili bünyesindeki değişkenliğin ve birim dahilinde kum-çakıl ihtivasının güvenilirlik analizleri dahilinde incelenmesi

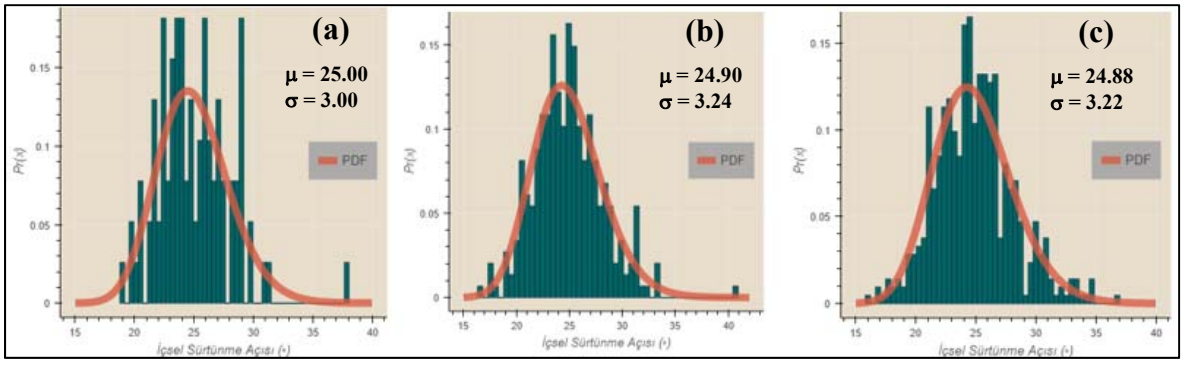
Risk değerlendirmelerine yönelik olarak gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinde zemin bünyesindeki mevcut değişkenliğe kum-çakıl mercek ihtivası dahil edilmiştir. Kum-çakıl mercek ihtivası Bölüm 4.3 kapsamında değerlendirilmiştir. Akademi Etüt Proje laboratuvarlarında Ankara Kilinde gerçekleştirilen 37 adet zemin sondajı kullanılarak, birim içinde kum-çakıl bant bulunma olasılığının %15 oranında olduğu görülmüştür. Sonlu eleman analizlerinde bu oran sürekli olasılık olarak rastgele bir matematiksek fonksiyon ile analizlere dahil edilmiştir. Rastgele işlev kum mercek varlığını %15 ihtimalle sistem malzeme bünyesindeki değişkenliğe dahil etmekte, %85 ihtimalle mercek mevcudiyetinin birimde söz konusu olmadığını dikkate almaktadır. Kum- çakıl ihtivası dahilinde modellenen zemin değişkenliğinin FEM sayısal analiz süresindeki etkisi Çizelge 4.18'de sunulmuştur.

Çizelge 4.18. Kum- çakıl ihtivası dahilinde zemin değişkenliği, gerçekleştirilen FEM nümerik analizleri yaklaşık süresi

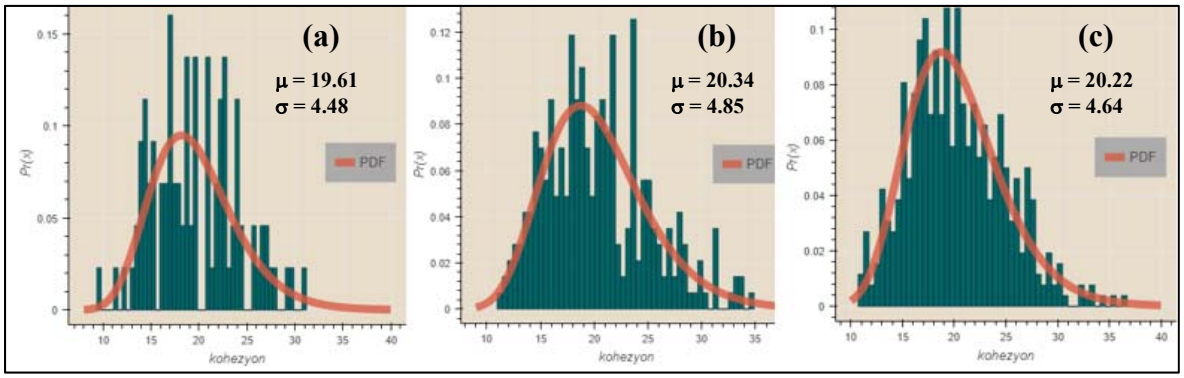
Analiz sayısı	Yaklaşık analiz süresi (saat)
100	3
300	16
500	32
1000	64

Gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinin, kabul edilen istatistiksel dağılımı temsil etme yetisinin analiz setindeki veri sayısının artışı ile arttığı Bölüm 4.5.1.'te belirtildiği gibi kum-çakıl mercek mevcudiyetinde zemin bünyesindeki değişkenliğin sistem güvenilirliğine etkisinin araştırıldığı analizlerde de görülmüştür. Bu bölüm kapsamında zemin değişkenliği; Kil-1 olarak tanımlı birime ait ϕ' ve c' parametreleri üzerinden modellenmiş, kum-çakıl bant varlığının etkisi ise kum bandı içermeyen kil birimlerde 400 kN olarak uygulanan ankraj öngerme kuvvetinin, 7-20 ton aralığı içinden herhangi bir değerin ankrajlara atanması ile sağlanmıştır. Her ankraj için %15 ihtimalle kum bant varlığı söz konusu olup üniform dağılım kabulüyle 7-20 ton aralığından rastgele seçilen bir değer öngerme kuvveti olarak Python arayüzü vasıtasıyla PLAXIS programına atanmıştır. İksa sistemine ait her ankraj için çift döngülü bir olasılıksal fonksiyon mekanizması oluşturulmuştur.

Gerçekleştirilen analiz sayısına bağlı olarak, zemin değişkenliğini modellemekte kullanılan ve log-normal dağılım sergilediği kabul edilen verilere ait histogramlar Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te sunulmuştur.

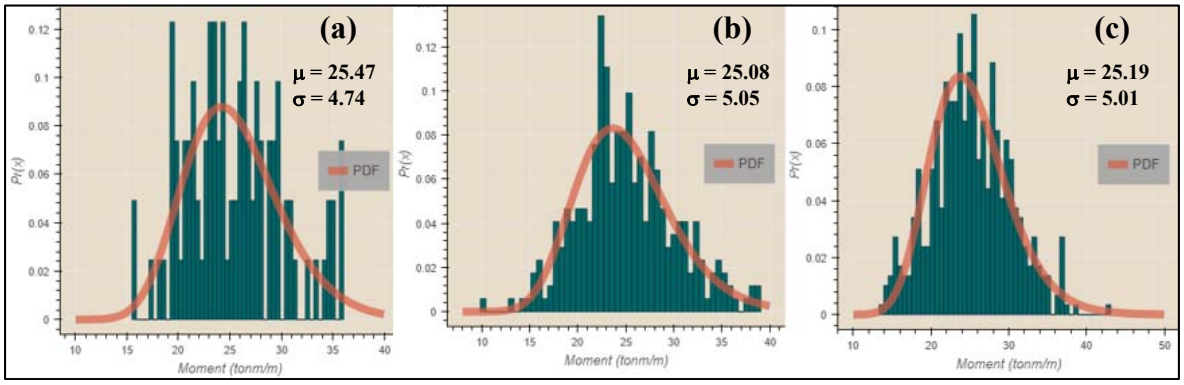


Şekil 4.24. M-C FEM zemin değişkenliği ve kum-çakıl ihtivası, içsel sürtünme açısı histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz

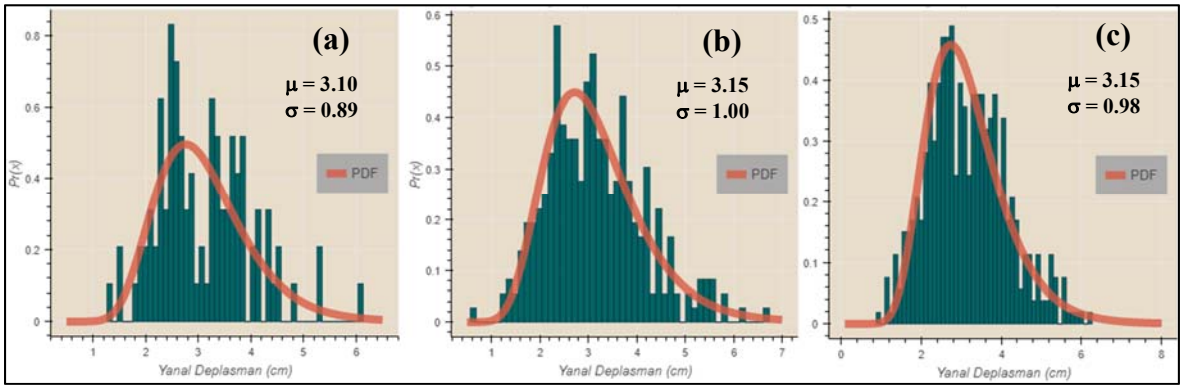


Şekil 4.25. M-C FEM zemin değişkenliği ve kum-çakıl ihtivası, kohezyon histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz

Kum-çakıl bant varlığı dikkate alınarak gerçekleştirilen risk değerlendirmeleri sonucunda elde edilen analiz çıktılarının (kazık yanal deplasmanı ve maksimum kazık momenti), analiz sayısına bağlı olarak değişimi Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de sunulmuştur.

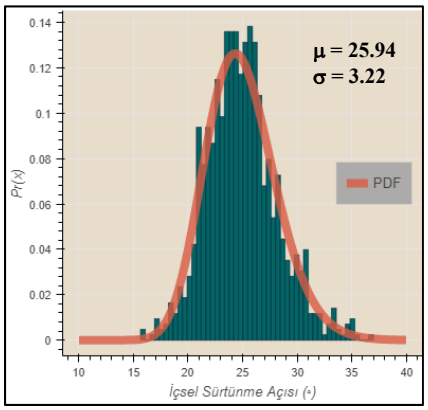


Şekil 4.26. M-C FEM zemin değişkenliği ve kum-çakıl ihtivası, kazık momenti histogramları: (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz

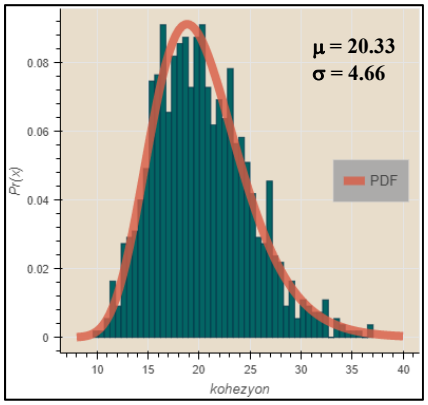


Şekil 4.27. M-C FEM zemin değişkenliği ve kum-çakıl ihtivası, kazık yanal deplasman histogramları: (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz

Risk değerlendirmelerinin hassasiyetini arttırmak üzere 1000 adet sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Ancak analiz adedi artışı, döngü içinde analiz süresinde logaritmik artışa, sonlu eleman analizlerinde sayısal hatalarda ise büyük oranda artışa sebebiyet verebileceği için analizler 500 adet olmak üzere iki set halinde gerçekleştirilmiş, veri seti analiz çıktıları birleştirilerek değerlendirilmiştir. Analiz verilerine ait histogramlar Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da sunulmuştur.

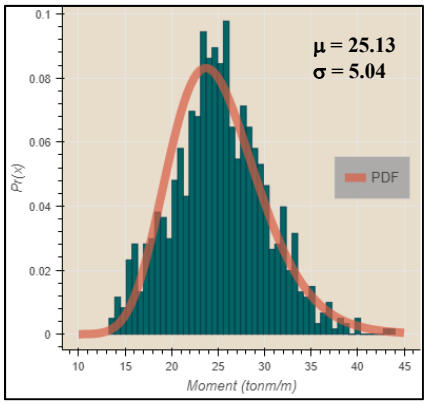


Şekil 4.28. M-C FEM zemin değişkenliği ve kum-çakıl ihtivası, içsel sürtünme açısı histogram (1000 analiz)

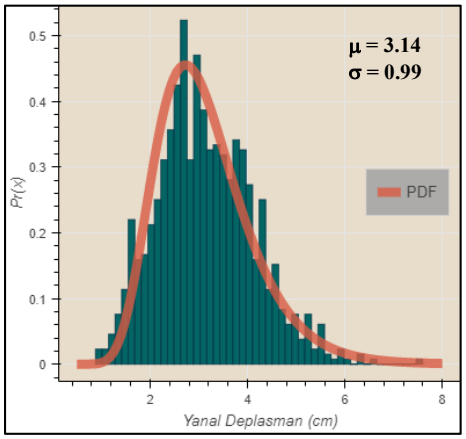


Şekil 4.29. M-C FEM zemin değişkenliği ve kum-çakıl ihtivası, kohezyon histogram (1000 analiz)

Risk değerlendirmeleri sonucunda elde edilen analiz çıktılarına (kazık yanal deplasmanı ve maksimum kazık momenti) ait histogramlar Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'de sunulmuştur.



Şekil 4.30. M-C FEM zemin değişkenliği ve kum-çakıl ihtivası, kazık momenti histogram (1000 analiz)



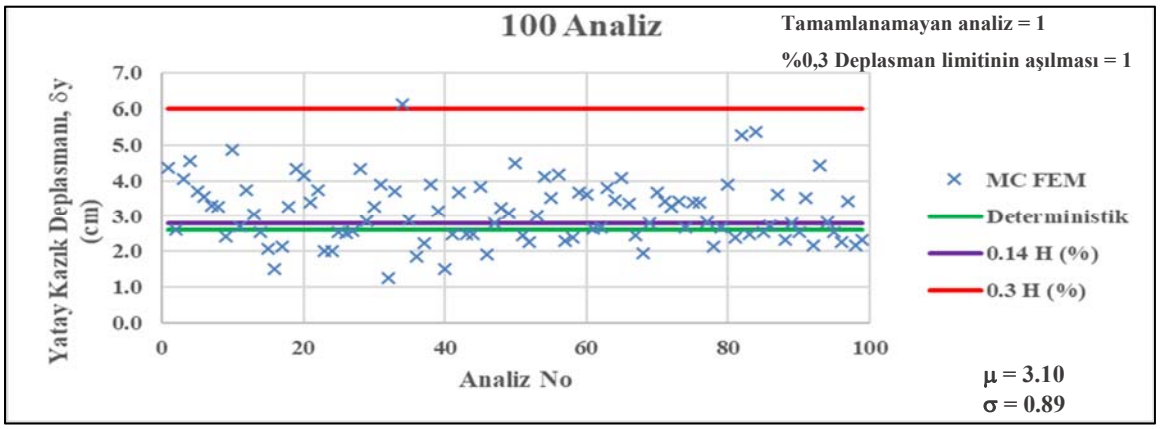
Şekil 4.31. M-C FEM zemin değişkenliği ve kum-çakıl ihtivası, kazık yanal deplasman histogram (1000 analiz)

Zemin değişkenliğine Ankara Kili bünyesinde mevcudiyet gösteren kum-çakıl mercek bantlarının etkisi dahil edilerek gerçekleştirilen risk analizleri göstermektedir ki yenilme mekanizmasında baskın olan kriter kazık yapısal kapasite aşımıdır. Bu bölüm kapsamında da yapının kısa dönemde (drenajsız koşullar dahilinde) görevini tamamlayacağı dikkate alındığında yarma şevinde karşılaşılabilecek yenilmelere yerinde müdahale edilebileceği için risk değerlendirmeleri kapsamında bu yenilme mekanizmasının ihmal edilebilir düzeyde olduğu savunulabilir. Bu sebeple kum çakıl mercek ihtivası dahilinde zemin parametrelerindeki değişkenlik dikkate alınarak gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerine göre yapılan kabuller doğrultusunda sistem güvenilirliğini etkileyen iki husus dikkate değerdir: kazık yapısal kapasite ve kazık yanal deplasman limitlerinin aşımı. Analiz sonuçları Çizelge 4.19'da sunulmuştur.

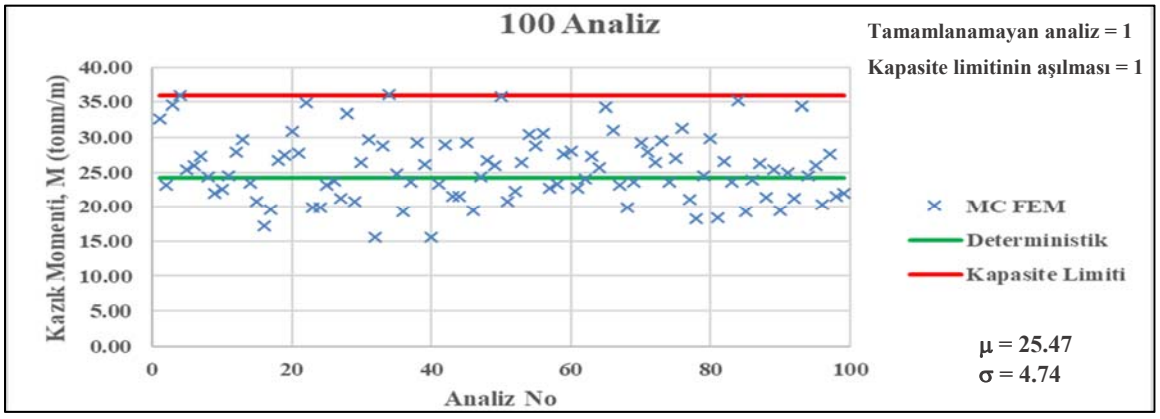
Çizelge 4.19. Kum-çakıl ihtivası dahilinde zemin değişkenliği yenilme mekanizması

Toplam analiz sayısı (n)	Yenilen analiz adedi (n_f)		
	Kazık yapısal kapasite aşımı	Kazık yanal deplasman limiti aşımı	Şev stabilitesi kaybı
100	1	1	1
300	6	2	6
500	13	2	6
1000	21	5	18

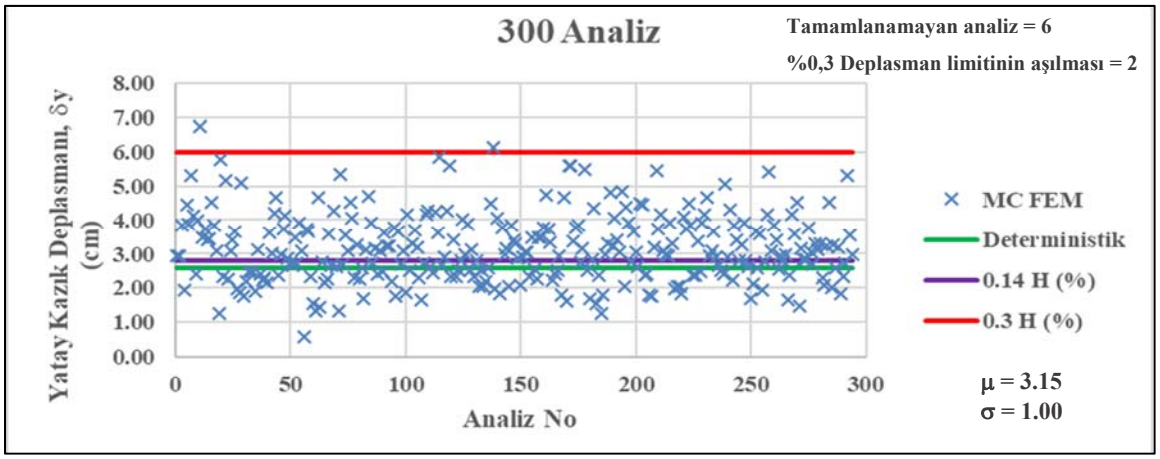
Bölüm 4.4 ve Bölüm 4.5.1'deki yenilme kriterleri dikkate alındığında analiz sonuçlarına ait dağılımlar Şekil 4.32, Şekil 4.33, Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36, Şekil 4.37, Şekil 4.38 ve Şekil 4.39'da sunulmuştur.



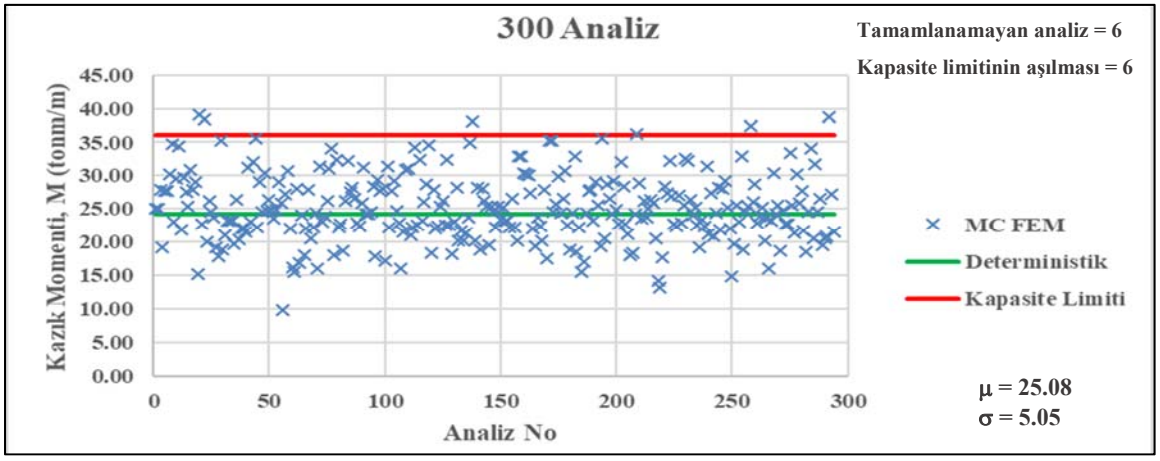
Şekil 4.32. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (100 analiz)



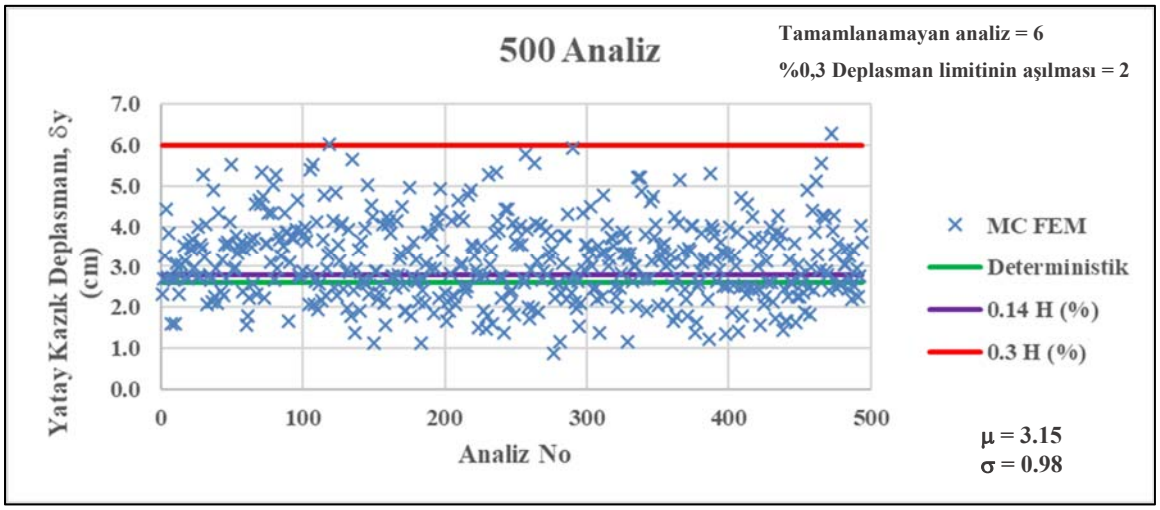
Şekil 4.33. FEM analizi kazı sonu maksimum kazık momenti dağılımı (100 analiz)



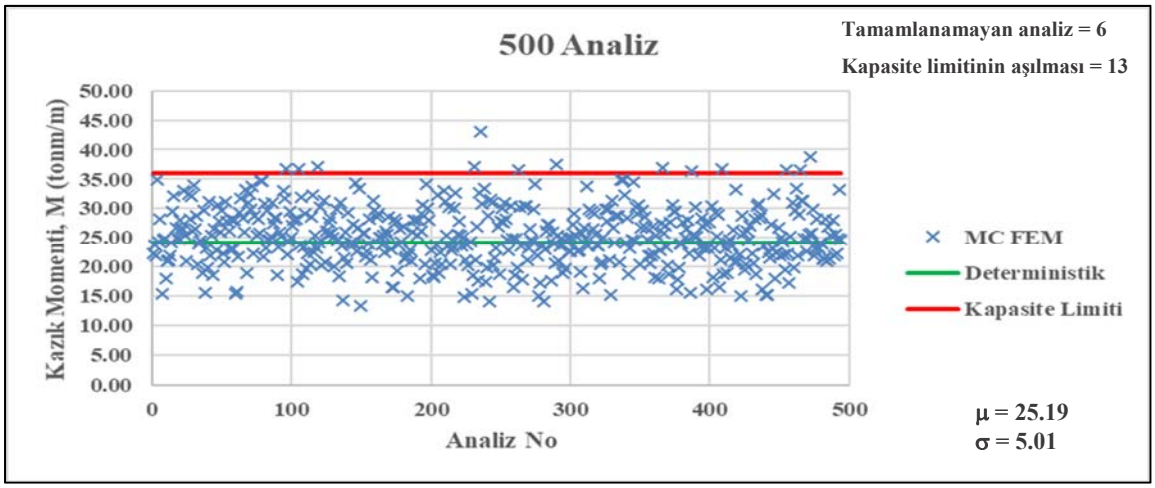
Şekil 4.34. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (300 analiz)



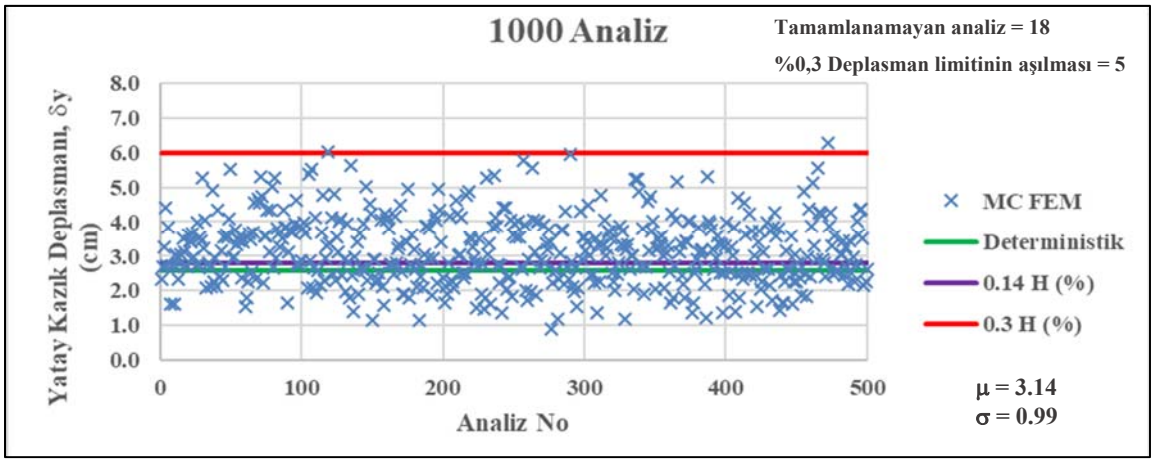
Şekil 4.35. FEM analizi kazı sonu maksimum kazık momenti dağılımı (300 analiz)



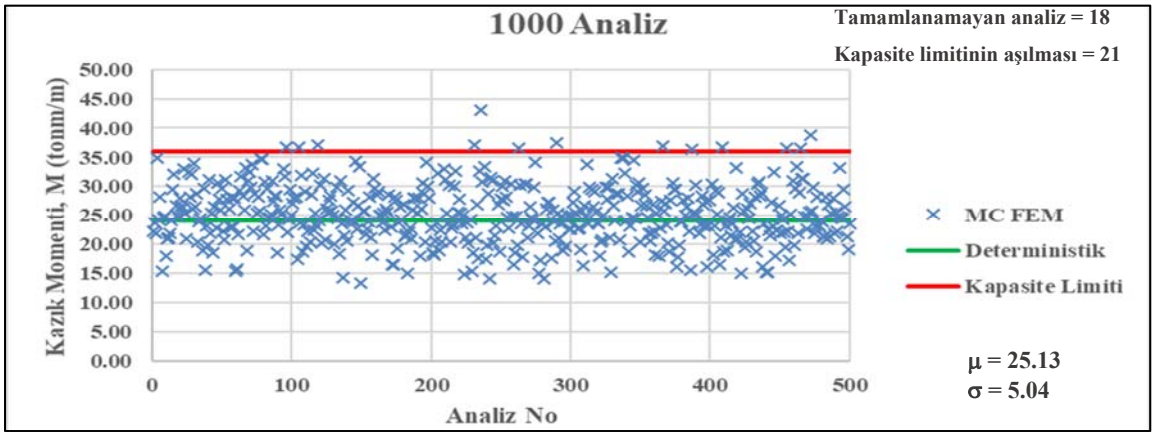
Şekil 4.36. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (500 analiz)



Şekil 4.37. FEM analizi kazı sonu maksimum kazık momenti dağılımı (500 analiz)



Şekil 4.38. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (1000 analiz)



Şekil 4.39. FEM analizi kazı sonu maksimum kazık momenti dağılımı (1000 analiz)

4.6. Sonlu Eleman Yöntemi (FEM) Sonuçlarının Risk Analizleri Kapsamında Değerlendirilmesi ve Deterministik Sonlu Eleman Yöntemi ile Karşılaştırılması

Destekli derin kazıların güvenilirliği, Ankara Kili bünyesindeki mevcut değişkenlik, örnek bir ankraj destekli iksa sistemi vakası kapsamında incelenmiştir. Deterministik analizlerle sahada 26 mm olarak ölçümü yapılan gerçek durum geri analizlerle belirlenmiştir. Hedef güvenilirlik endeksi olarak Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC 2014) şartnamesinde belirlenen en düşük güvenilirlik endeksi 2,3 değeri kıyas parametresi olarak kabul edilmiştir. Şev stabilitesinde meydana gelen yenilmeler yerinde çözümlenebileceği için yaklaşık 3 m kalınlığında yarma şevinde meydana gelen stabilite kaybının (Şekil 4.14) yenilme mekanizması üzerindeki etkisine yer verilmemiştir. Sonlu eleman analizlerine ait sonuçlar Çizelge 4.20 ve Çizelge 4.21'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.20. Yalnızca zemin değişkenliği dahilinde FEM analizleri, kazık limit yanal deplasman ile kazık kapasite aşma olasılığı ve karşılık gelen güvenilirlik endeksi değerleri

Analiz sayısı (n)	Kazık limit yanal deplasman ve kazık yapısal kapasite aşımı analiz adedi (n_f)	p_f (%)	β
100	1	1,0	2,3
300	3	1,0	2,3
500	3	0,6	2,5

Çizelge 4.21. Kum- çakıl ihtivası dahilinde zemin değişkenliği FEM analizleri, kazık limit yanal deplasman ile kazık kapasite aşma olasılığı ve karşılık gelen güvenilirlik endeksi değerleri

Analiz sayısı (n)	Kazık limit yanal deplasman ve kazık yapısal kapasite aşımı analiz adedi (n_f)	p_f (%)	β
100	2	2,0	2,05
300	8	2,7	1,93
500	15	3,0	1,88
1000	26	2,6	1,94

Elde edilen sonuçlara göre Ankara Kili zemin değişkenliğinin etkisi sonlu eleman analizlerinde dikkate alındığında; sistem güvenilirliğinin, kabul edilen limit güvenilirlik endeksi olan 2,3 değeri sınırında yer aldığı ve yeterli olduğu söylenebilir.

Ancak Ankara Kilindeki zemin değişkenliğine sıklıkla rastlanan kum-çakıl merceği ihtivası dahil edildiği takdirde güvenilirlik endeksi değerlerinin yaklaşık 1,9 olarak elde edildiği ve limitlerin altında olduğu tespit edilmiştir.

Monte Carlo yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde analiz sayısı artışının, veri setinin ve analiz çıktılarının histogramları dikkate alındığında olasılıksal dağılımı yansıtabilme yetisini büyük oranda etkilediği görülmüştür. Tasarım pratiğinde hesaplama süresinin önemi dikkate alındığında yenilme olasılığı veya güvenilirlik endeksi değerlerinin stabil hale geldiği tespit edildiğinde analizler nihayetlendirilmiştir.

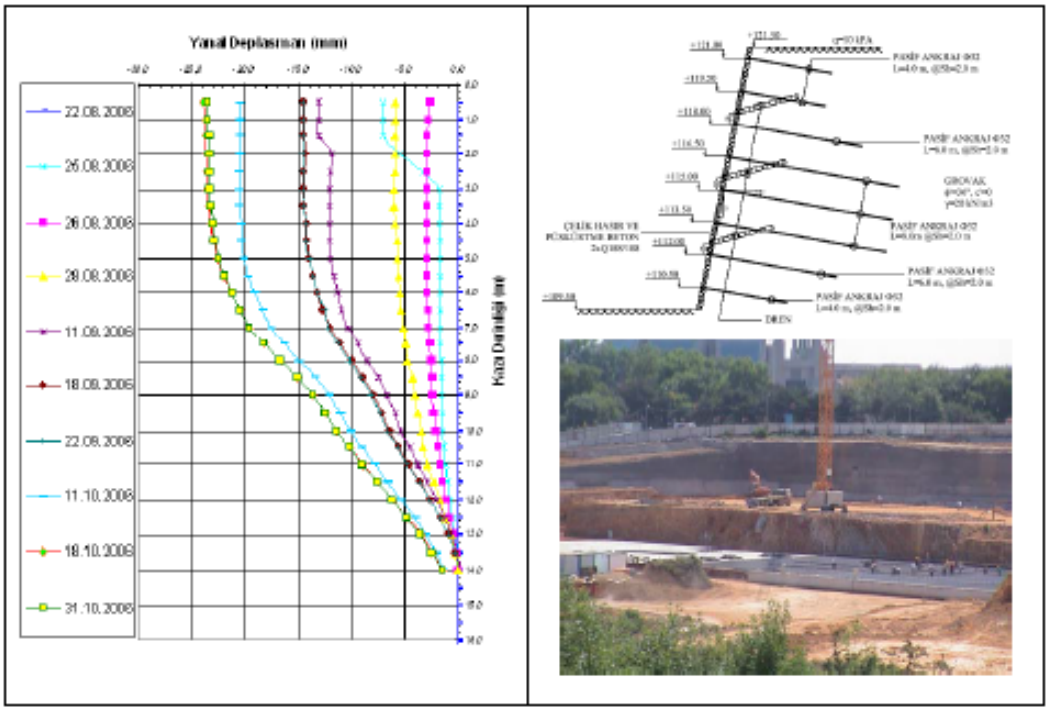
Görülmektedir ki Ankara Kili dahilinde kum-çakıl mevcudiyetinin ankraj kapasitesinde yarattığı değişkenlik (Kil birim: öngerme 400 kN; Kum-çakıl bant: öngerme 70-200 kN aralığı üniform dağılım kabulü ile rastgele değer) hem Python yazılımı ile PLAXIS sonlu elaman programına veri atama süresini etkilemekte hem de azalan ankraj öngerme kuvvetleri nedeniyle analiz süresi uzamaktadır. Bu sebeple sistem güvenilirlik endeksi değerleri düşmekte ve kabul edilen limit değerlerin altında değerler almaktadır.

5. SONLU ELEMAN ve MONTE CARLO SİMÜLASYON YÖNTEMLERİNİN ÇİVİ DESTEKLİ DERİN KAZI SİTEMLERİNDE KULLANIMI

5.1. Vaka İncelemesi

Zemin çivisi destekli iksa sistemlerinde belirli parametrelerdeki değişkenliğin performans ve risk değerlendirmeleri kapsamındaki etkilerini incelemek üzere Keserli (2016) tarafından kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada incelenen vaka ise Durgunoğlu ve diğerleri (2007) tarafından İstanbul'da İstinye Park kompleksi geçici kazı imalatları için gerçekleştirilen tasarım ve saha çalışmalarını temel almaktadır. Vakada tanımlı birim olan yumuşak kaya nitelikliğindeki grovak birimler, Trakya formasyonuna ait olup çeşitli derecelerde ayrışma gösteren kumtaşı, silttaşı ve kiltaşı seviyeler barındırmaktadır (Durgunoğlu ve diğerleri, 2007). Durgunoğlu ve diğerleri (2007) çalışmasında, grovak birime ait parametreler sismik deneyler ve Menard presiyometre testleri ile birlikte tespit edilmiştir. Bu çalışma sonuçlarına göre grovak birim içerisinde zayıf dayanımlı kayaca ait elastisite modülü (E_m) 50 MPa olarak söz konusu çalışmada kayıtlıdır.

Geçici kazıda kullanılan zemin çivili duvarın imalat aşamaları sırasında projede belirlenen yerlere inklinometre boruları yerleştirilmiş, sistemin performansı inklinometre ve diğer aletsel gözlem cihazlarıyla denetlenmiştir. İstinye Park vakasına ait saha inklinometre verileri ve tasarım geometrisi Şekil 5.1'de sunulmuştur.



Şekil 5.1. İstinye Park vakası, inklinometre No:4 okumaları, kesit ve görünüş (Durgunoğlu ve diğerleri, 2007)

Vaka verilerine göre inşaatın tamamlanmasının ardından sahada gerçekleştirilen inklinometre okumalarında (31.10.2006) iksa sisteminde meydana gelen maksimum yanal deplasmanın duvar üst kotunun 0,5 m altında 24,7 mm mertebelerinde olduğu kaydedilmiştir (Durgunoğlu ve diğerleri, 2007). Söz konusu çalışmaya ait özet Çizelge 5.1'de yer almaktadır.

Çizelge 5.1. Zemin çivisi destekli vakalara ait tasarım ve performans parametreleri (Durgunoğlu ve diğerleri, 2007)

Case 2: Istinye Park Complex, Istinye, Istanbul									
Inc. No.	H (m)	S (m^2)	L (m)	δ_h (mm)	η (m/m^2)	L_r	B_r	S_r (10^{-3})	P_r (10^{-3})
1	10,0	3,0	5,1	26,6	1,7	0,5	0,2	3,7	2,7
2	10,0	3,0	8,3	22,0	2,8	0,8	0,3	3,7	2,2
3	12,0	3,0	6,0	36,7	2,0	0,5	0,2	3,7	3,1
4	12,0	3,0	8,8	24,7	2,9	0,7	0,3	3,7	2,1
5	14,0	3,0	9,1	19,9	3,0	0,7	0,3	3,7	1,4
6	16,0	3,0	8,2	45,3	2,7	0,5	0,3	3,7	2,8
7	18,0	3,0	9,3	56,7	3,1	0,5	0,3	3,7	3,1
8	20,0	3,0	9,7	80,8	3,2	0,5	0,3	3,7	4,0
9	22,0	3,0	10,1	96,5	3,4	0,5	0,4	3,7	4,4

Keserli (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışma kapsamında sahada ölçümü yapılan hareketi modellemek, tasarım parametrelerindeki değişkenliğin (çivi boyu-çapı, duvar yüzü eğimi, püskürtme beton kalınlığı vb.) sistem performansı üzerindeki etkisini belirlemek ve tasarıma zemin parametrelerindeki değişkenliğin etkisini dahil ederek güvenilirlik analizleri gerçekleştirmek amacı ile çivi destekli sistem geri analize tabi tutulmuştur. Keserli (2016) analizlerinde Grovak birime ait parametreler, Mohr Coulomb yöntemi kullanılarak modellenmiştir. İnklinometre okumalarında tespit edilen 24,7 mm mertebelerindeki hareketin tespiti yapılmıştır. Keserli (2016) vaka geri analizleri Phase^2 sonlu eleman analizleri vasıtası ile gerçekleştirilmiş olup analizlerde kullanılan zemin, çivi ve püskürtme beton parametreleri Çizelge 5.2'de sunulmuştur. Model çalışmalarında (Keserli, 2016), kazı aynasına yerleştirilen 4 No'lu inklinometre okumaları ile Phase^2 yazılımından elde edilen yanal deplasman değerleri karşılaştırılmıştır.

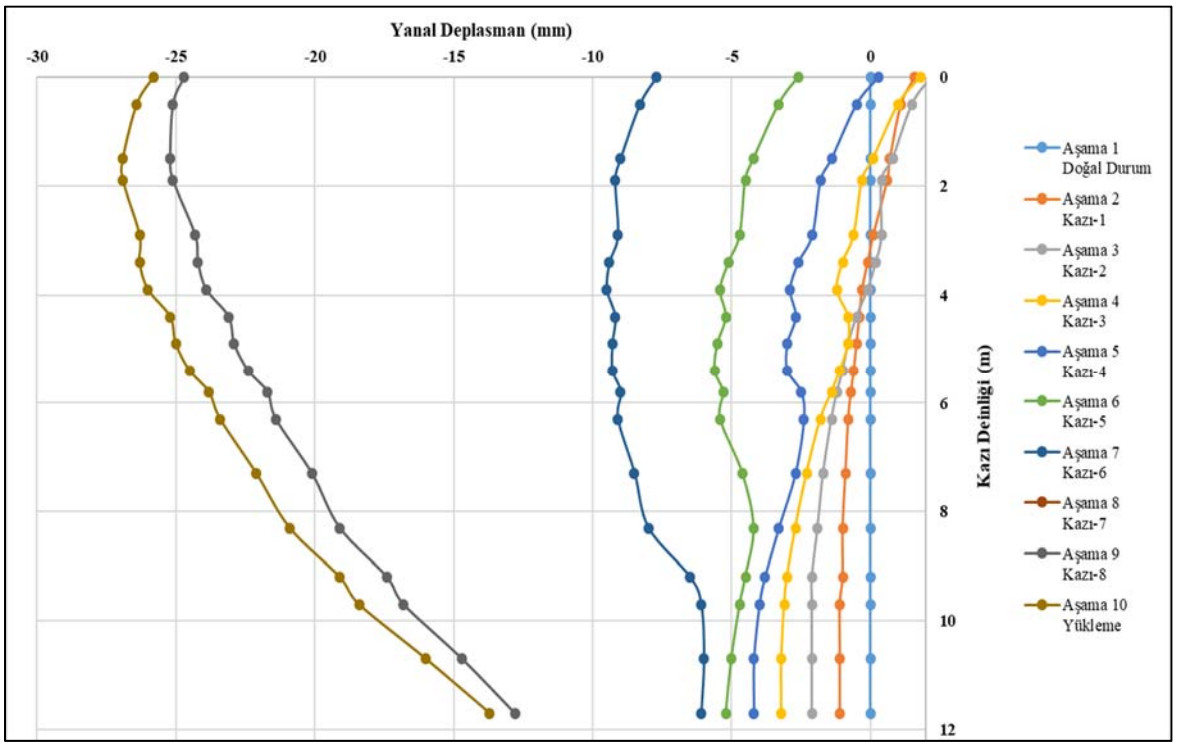
Çizelge 5.2. İstinye Park zemin çivili iksa yapısı geometrik ve parametrik özellikleri (Keserli, 2016)

Özellik	Değer (Ortalama)
Duvar (Şev) Yüksekliği	12 m
Çivi Malzemesi	Nervürlü STIIIa İnşaat Demiri
Maks. Çekme Yükü	330 kN
Çivi Uzunlukları (değişken)	4, 6, 8 m
Çivi Çapı	32 mm
Çivi Yatay Aralıkları	2,0 m
Çivi Düşey Aralıkları	1,5 m
Çivi Eğimi (α)	10°
Sürşarj Yükü	10 kPa
Zemin Birim Hacim Ağırlığı (γ)	20 kN/m^3
Kohezyon, c	0 kPa
İçsel Sürtünme Açısı (ϕ)	36°
Elastisite Modülü	50 MPa
Delik Çapı	105 mm
Püskürtme Kalınlığı	200 mm
Yüzey Betonu Sınıfı	M20

Keserli (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmaya ait Phase^2 analiz sonuçları Çizelge 5.3'te, sonuçlara ait grafik Şekil 5.2'de sunulmuştur.

Çizelge 5.3. Tüm kazı aşamalarında Phase2 modelinden elde edilen yanal deplasman değerlerinin derinliğe bağlı değişimi (Keserli, 2016)

	Aşama 1 Doğal Durum	Aşama 2 Kazı-1	Aşama 3 Kazı-2	Aşama 4 Kazı-3	Aşama 5 Kazı-4	Aşama 6 Kazı-5	Aşama 7 Kazı-6	Aşama 8 Kazı-7	Aşama 9 Kazı-8	Aşama 10 Yükleme
0	0	1,6	2,2	1,8	0,3	-2,6	-7,7	-15	-24,7	-25,8
0,5	0	1,1	1,5	1	-0,5	-3,3	-8,3	-15,5	-25,1	-26,4
1,5	0	0,7	0,8	0,1	-1,4	-4,2	-9	-15,9	-25,2	-26,9
1,9	0	0,6	0,4	-0,3	-1,8	-4,5	-9,2	-15,9	-25,1	-26,9
2,9	0	0,1	0,4	-0,6	-2,1	-4,7	-9,1	-15,5	-24,3	-26,3
3,4	0	-0,1	0,2	-1	-2,6	-5,1	-9,4	-15,6	-24,2	-26,3
3,9	0	-0,3	-0,1	-1,2	-2,9	-5,4	-9,5	-15,5	-23,9	-26
4,4	0	-0,4	-0,5	-0,8	-2,7	-5,2	-9,2	-14,9	-23,1	-25,2
4,9	0	-0,5	-0,8	-0,8	-3	-5,5	-9,3	-14,9	-22,9	-25
5,4	0	-0,6	-1	-1,1	-3	-5,6	-9,3	-14,7	-22,4	-24,5
5,8	0	-0,7	-1,2	-1,4	-2,5	-5,3	-9	-14,1	-21,7	-23,8
6,3	0	-0,8	-1,4	-1,8	-2,4	-5,4	-9,1	-14	-21,4	-23,4
7,3	0	-0,9	-1,7	-2,3	-2,7	-4,6	-8,5	-13,2	-20,1	-22,1
8,3	0	-1	-1,9	-2,7	-3,3	-4,2	-8	-12,7	-19,1	-20,9
9,2	0	-1	-2,1	-3	-3,8	-4,5	-6,5	-11,3	-17,4	-19,1
9,7	0	-1,1	-2,1	-3,1	-4	-4,7	-6,1	-10,8	-16,8	-18,4
10,7	0	-1,1	-2,1	-3,2	-4,2	-5	-6	-8,8	-14,7	-16
11,7	0	-1,1	-2,1	-3,2	-4,2	-5,2	-6,1	-7,9	-12,8	-13,7



Şekil 5.2. İstinye Park Kompleksi Phase^2 modeli, her bir aşamada hesaplanan yanal deplasmanlar

Keserli (2016) çalışması kapsamında incelenen İstinye Park vakasına ait sistem, zemin parametrelerindeki değişkenlik dikkate alınarak risk değerlendirmelerine tabi tutulmuştur. Güvenilirlik analizlerinde Tepki Yüzeyi Yöntemi (Response Surface Method, RSM) kullanılarak sistemin zemin değişkenliğini modellemek üzere kullanılan parametrelerin duyarlılığı araştırılmıştır. Araştırılmada kullanılan yönteme ait kapsamlı bilgi Keserli (2016) çalışmasında kayıtlıdır. Bu çalışma kapsamında yönteme ait detaylara yer verilmemiştir. Sistem stabilitesi üzerinde etkin olan zemin parametrelerine ait değişkenler, Üç Sigma Kuralı ile tespit edilmiş, Excel programı yardımıyla güvenilirlik analizleri geçekleştirilmiştir. Üç Sigma Kuralı ile sistem stabilitesinde etkin olan parametrelerin üst ve alt limitleri belirlenmiş, farklı girdi parametreleri hesaplamalara dahil edilerek regresyon analizleri yürütülerek sistemin yenilme fonksiyonu tanımlanmıştır. Analizlerde kullanılan, normal dağılım sergilediği kabul edilen rastsal değişkenlere ait istatistiksel parametreler Çizelge 5.4'te sunulmuştur.

Çizelge 5.4. Risk değerlendirmelerinde kullanılan rastsal değişkenlere ait istatistiksel özellikler (Keserli, 2016)

	İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	Birim hacim ağırlık, γ (kN/m^3)
Ortalama, μ	36,00	20
Standart sapma, σ	2,33	0,67
Varyasyon katsayısı, COV (%)	6,45	3,3

Hasofer Lind Güvenilirlik Endeksi (β) risk değerlendirmeleri kapsamında yine Excel ile çözümlenerek mevcut sistemin yenilme olasılığı değerlendirilmiştir. Keserli (2016) çalışması kapsamında, elastisite modülünün duvar yanal deplasmanı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla elastisite modülü ve içsel sürtünme açısı arasında olası en yüksek ve en düşük değerlerden yola çıkılarak sahaya özgü bir korelasyon oluşturmuştur. Çalışmada içsel sürtünme açısına ait olası maksimum ve minimum limitler, içsel sürtünme açısına bağlı olarak değiştiği kabul edilen elastisite modülü değerleri ve bu değişkenler kullanılarak hesaplanan korelasyon Çizelge 5.5'te sunulmuştur.

Çizelge 5.5. İçsel sürtünme açısı ve elastisite modülü arasındaki lineer korelasyon (Keserli, 2016)

		ϕ (°)	E (MPa)
Olası en büyük değer		42	70
Olası en küçük değer		28	30
Lineer Korelasyon	E=2,857ϕ - 50		

Söz konusu çalışmada içsel sürtünme açısı, birim hacim ağırlık, yatay itki katsayısı (K_h) ve elastisite modülü parametrelerine ait farklı kombinasyonlar kullanılarak regresyon analizleri ile tepki yüzeyi denklemi (f(y)) elde edilmiştir. Rastsal değişkenlere ait f(y) fonksiyonu ile maksimum yatay deplasman denklemi hesaplanarak güvenilirlik endeksi değerinin tespiti yapılmıştır.

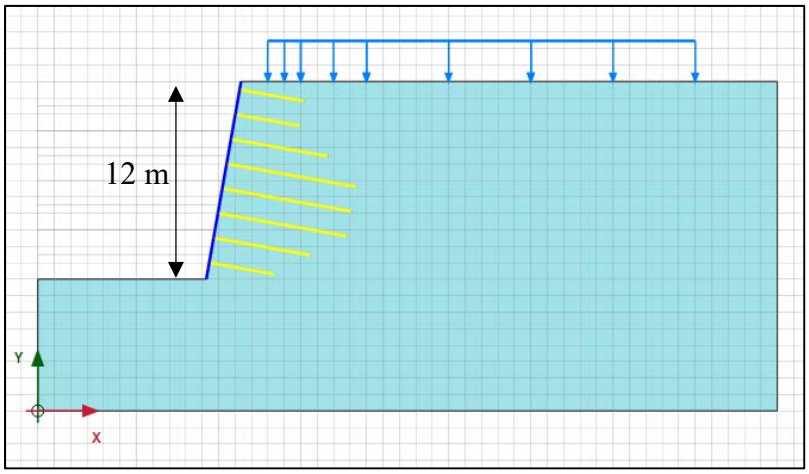
Keserli (2016) çalışması kapsamında çivi destekli iksa sistemi için hedef güvenilirlik endeksi limiti, FHWA (2015) standardında ince daneli zeminlerde kalıcı iksa sistemleri için maksimum yanal deplasmanın kazı yüksekliğine oranı olarak önerilen 1/333 değeri dikkate alınmıştır. Söz konusu vakanın 12 m kazı yüksekliğine haiz olduğu dikkate alındığında güvenilirlik endeksi, performans fonksiyonunu (G(x)) en küçük yapan değer Eş. 5.1 vasıtası ile tanımlanmıştır.

$$G(x) = 36 - f(x) \tag{5.1}$$

Keserli (2016) çalışmasında sunulan sonuçlara göre, zemin parametrelerindeki değişkenliğin duvar yanal deplasmanı üzerindeki etkisinin araştırıldığı risk analizleri neticesinde güvenilirlik endeksi değeri (β) 1,92 ve sistem yenilme olasılığı (p_f) %2,74 olarak tespit edilmiştir.

5.2. Risk Analizlerine Esas Modelin PLAXIS Yazılımı ile Geri Analizi

İstanbul semtinde İstinye Park kompleksi için gerçekleştirilen çivi destekli derin kazı tasarımına ait vaka, sahada ölçümü yapılan hareketi modellemek ve risk analizlerine temel oluşturacak yenilme mekanizmasını belirlemek amacıyla geri analizlere tabi tutulmuştur. Analizlerde Grovak birime ait parametreler Keserli (2016)'da kullanıldığı gibi Mohr Coulomb yöntemi ile modellenmiştir. Vakada kullanılan tip geometri Şekil 5.3'te sunulmuştur.



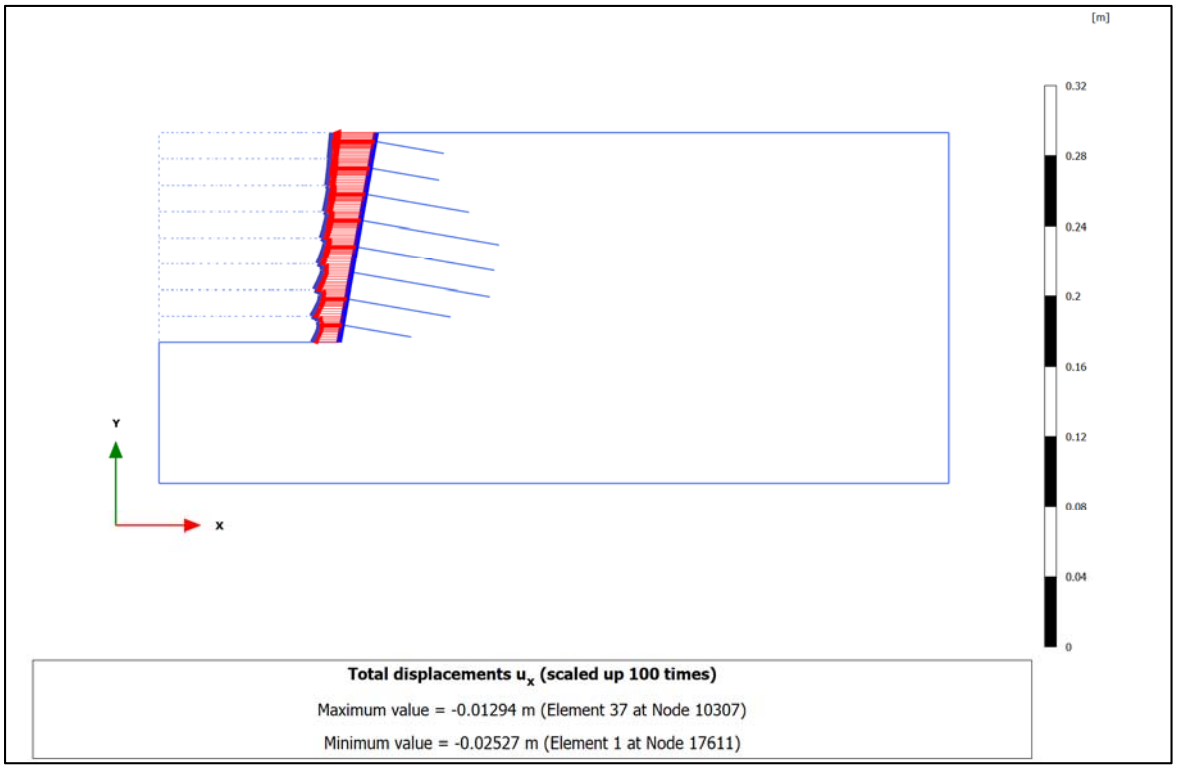
Şekil 5.3. Analizlere esas derin kazı geometrisi

Vaka geri analizlerinde (Keserli, 2016), Grovak olarak tanımlanan ayrışmış kayaç birime ait parametreler ile aynı değerler kullanılmış olup sahadaki hareketi gerçekçi bir şekilde modellemek üzere inklinometre grafiklerinde ölçümü yapılan 25 mm mertebelerindeki hedef deplasman değerine ulaşılmıştır. Çalışmalar çerçevesinde risk analizlerine temel oluşturacak malzeme parametreleri Çizelge 5.6'da sunulmuştur.

Çizelge 5.6. Vaka geri analizlerinde kullanılan parametreler

Parametre	Grovak	Birim
Malzeme Model	Mohr-Coulomb	-
Tip	Drenajlı	-
E'	50000	kN/m^2
c'_{ref}	1	kN/m^2
ϕ'	36	°

PLAXIS sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilen deterministik analizler sonucunda hesaplanan maksimum duvar yanal deplasman değeri 25 mm, Şekil 5.4'te sunulmuştur.

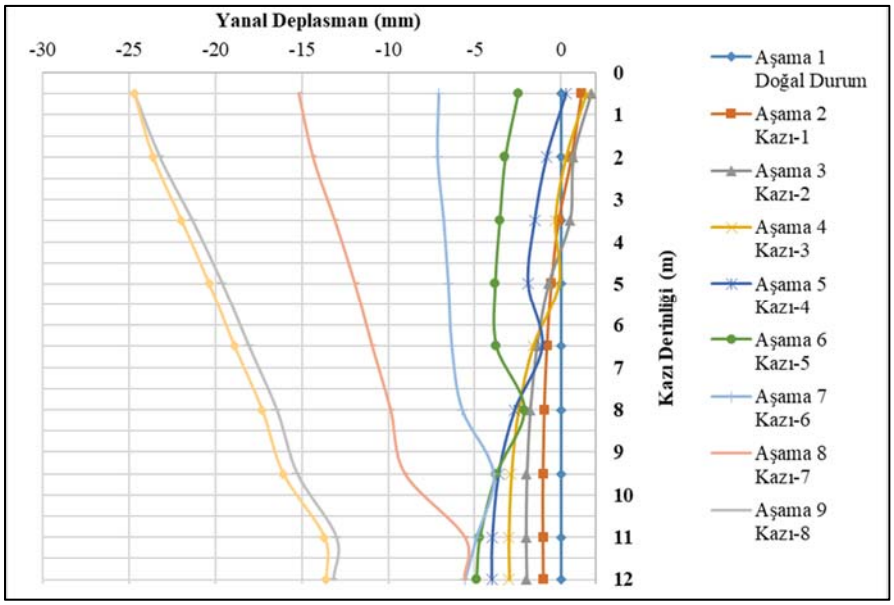


Şekil 5.4. Vaka geri analizi, duvar maksimum yanal deplasmanı ($\delta_{maksyanal} \cong 25$ mm)

PLAXIS sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilen vaka geri analizlerinde her kazı aşaması için hesaplanan maksimum yanal deplasman değerleri Çizelge 5.7'de, sonuç çıktılarına ait grafik ise Şekil 5.5'te sunulmuştur.

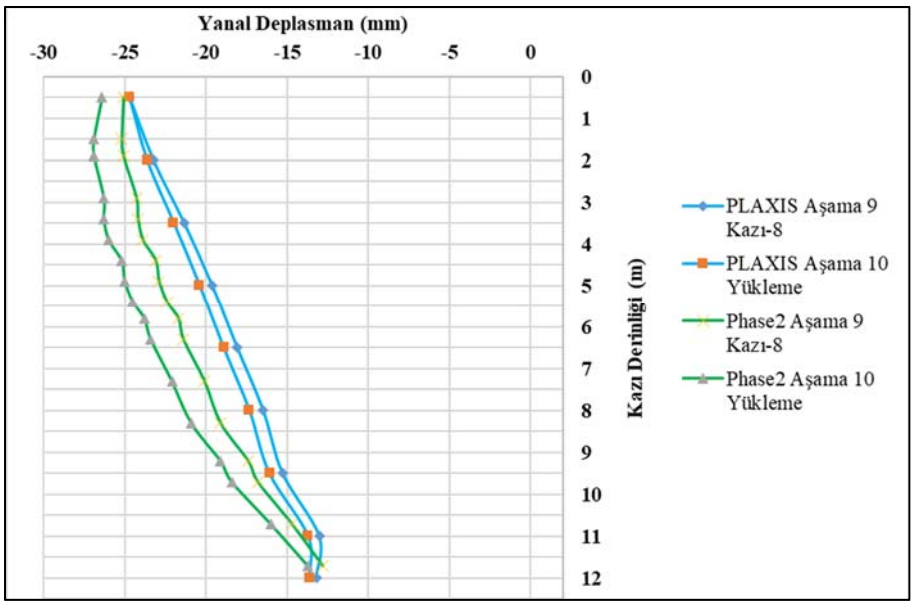
Çizelge 5.7. Tüm kazı aşamalarında PLAXIS modelinden elde edilen yanal deplasman değerlerinin derinliğe bağlı değişimi

	Aşama 1 Doğal Durum	Aşama 2 Kazı-1	Aşama 3 Kazı-2	Aşama 4 Kazı-3	Aşama 5 Kazı-4	Aşama 6 Kazı-5	Aşama 7 Kazı-6	Aşama 8 Kazı-7	Aşama 9 Kazı-8	Aşama 10 Yükleme
0,5	0	1,20	1,74	1,45	0,29	-2,49	-7,05	-15,20	-24,69	-24,72
2	0	0,62	0,71	0,28	-0,84	-3,23	-7,13	-14,38	-23,22	-23,63
3,5	0	-0,12	0,51	-0,35	-1,53	-3,56	-6,77	-13,11	-21,33	-21,98
5	0	-0,54	-0,73	-0,13	-1,91	-3,82	-6,51	-11,95	-19,60	-20,38
6,5	0	-0,80	-1,41	-1,64	-1,09	-3,76	-6,31	-10,94	-18,07	-18,91
8	0	-0,95	-1,80	-2,47	-2,67	-2,14	-5,72	-9,88	-16,46	-17,32
9,5	0	-1,02	-1,99	-2,89	-3,60	-3,76	-3,91	-9,05	-15,28	-16,09
11	0	-1,02	-2,04	-3,03	-3,97	-4,71	-4,89	-5,58	-13,02	-13,70
12	0	-1,00	-2,00	-3,01	-4,01	-4,91	-5,55	-5,62	-13,20	-13,60



Şekil 5.5. İstinye Park Kompleksi PLAXIS modelinde her bir aşamada hesaplanan yanal deplasmanlar

Vaka geri analizleri çerçevesinde PLAXIS yazılımı ile gerçekleştirilen analizler ile Keserli (2016) çalışmalarında kullanılan Phase^2 yazılımı sonlu eleman analizleri benzer çıktılar vermiştir. Yazılım sonuçları Şekil 5.6'da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Her iki çalışmanın da temel alınan ana çalışma olan Durgunoğlu ve diğerleri (2007)'de sunulan saha inklinometreleri verileri ile tespiti yapılan hareketi yansıttığı söylenebilir.



Şekil 5.6. PLAXIS ve Phase^2 sonlu eleman yöntemleri ile gerçekleştirilen geri analize ait karşılaştırma

5.3. Yenilme Olasılığının Tariflenmesi

Çivi destekli derin kazı risk değerlendirmeleri kapsamında temel olarak üç yenilme mekanizması irdelenmelidir:

- Destek elemanı yenilmesi (püskürtme beton vb.)
- Zemin çivisi kapasite aşımı
- Zemin bünyesinde yenilme

Sistem yenilmesi Keserli (2016) çalışması ile kıyas gerçekleştirmeye yönelik olarak yalnızca duvar yanal deplasman limitlerinin aşılması olarak kabul edilmiştir. Zemin çivisi destekli derin kazı modeline ait PLAXIS plastik analizleri sonucunda, zemin yenilmesi veya plastik limitlerin aşımı söz konusu olmadığı takdirde analizler başarılı olarak nitelendirilir ve PLAXIS analizlerine ait sonuç ekranında başarılı ibaresi ("CalculationResult: OK") yer alır. Burada başarı ifadesi güvenilirlik kavramı ile ilişkilendirilmemekte, yenilme mekanizmasının limitler içerisinde olup olmadığını tespit etmek üzere gerçekleştirilen analiz sonuçlarına ait sonuç çıktılarının elde edilebildiği anlamına gelmektedir. Ancak analiz adımında plastik limitlerin aşımı veya zemin yenilmesi meydana geldiği takdirde sonuç ekranında zemin yenilmesi ("soil collapse") veya yük aşımı ("load advancement") uyarıları sistemin yenilmeye uğradığını belirten hata kodları olarak görünür. Zemin yenilmesi ve plastik limitlerin aşılması kaynaklı yenilmelerin iteratif analizler boyunca ayrıca depolanabilmesi gerekmektedir. İrdelenen yenilme parametrelerine ait sonlu eleman analiz sonuçları aşağıdaki basit denklemlerle (Eş. 5.2 ve Eş. 5.3) çözümlenmiştir:

$$P = \begin{cases} -1, & son\ adım\ analizler\ başarılı\ (\ Analiz\ başarılı\ (\text{“}CalculationResult: OK\text{”})) \\ 1, & son\ adım\ analizler\ başarısız\ \big(Yenilme\ (Error\ message)\big) \end{cases} \tag{5.2}$$

Burada P, analizlere esas derin kazı modeline ait yenilme mekanizmasını ifade eden bir fonksiyondur. Analizler kapsamında plastik limitlerin aşımı analiz hatası ve zemin yenilmeleri programda sonuç çıktısı olarak verilen hata koduna göre ayrı ayrı tespit edilmiştir. Yenilme mekanizmasını tanımlamak üzere irdelenen duvar yanal deplasman limitinin belirlenmesine ait eşitlikler ise aşağıdaki denklemler vasıtasıyla tespit edilmiş, hesaplamalarda FHWA (2015) standardında ince daneli zeminlerde kalıcı iksa sistemleri

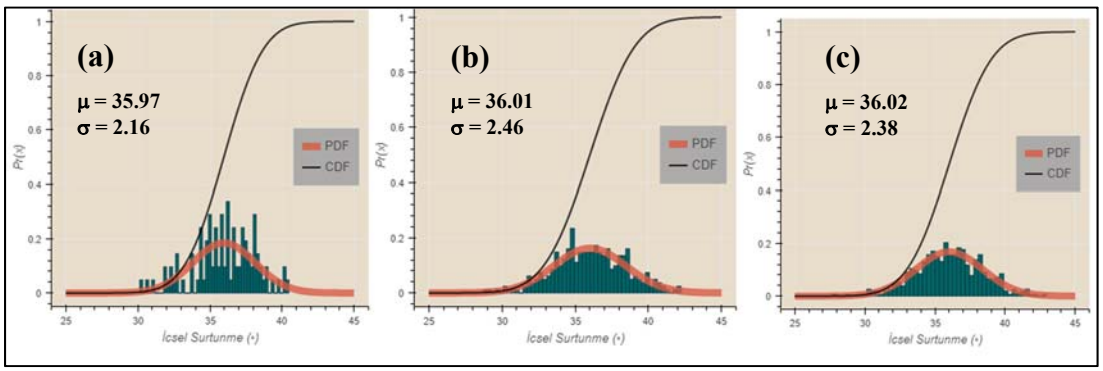
için maksimum yanal deplasmanın kazı yüksekliğine oranı olarak önerilen 1/333 değeri dikkate alınmıştır:

$$P = \begin{cases} -1, & \delta_{ymaks} \geq 1/333 \ * \ H_{kazı} \\ 1, & \delta_{ymaks} < 1/333 * H_{kazı} \end{cases} \tag{5.3}$$

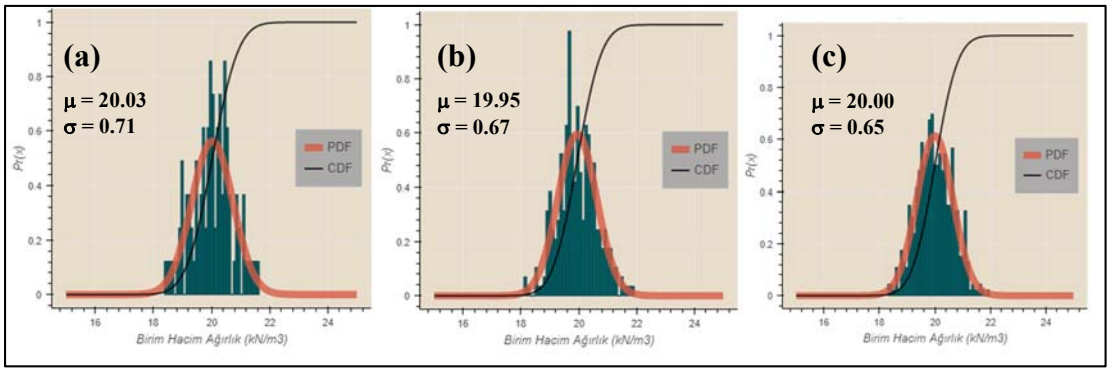
Risk değerlendirmeleri, sahada inklinometre okumalarında tespit edilen 25 mm mertebelerindeki maksimum yanal duvar deplasmanın (δ_{ymaks}) PLAXIS geri analizleri ile elde edildiği model baz alınarak gerçekleştirilmiştir.

5.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) Risk Analizleri

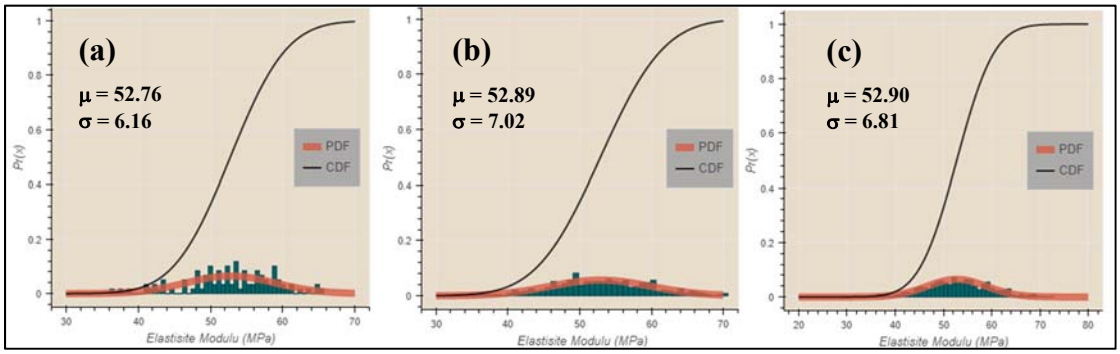
Gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinde zemin bünyesindeki mevcut değişkenliğin sistem güvenilirliğine etkisi incelenmiştir. Grovak birim bünyesindeki mevcut değişkenliği modellemek üzere analizlerde Keserli (2016) çalışmasında sunulan istatistiksel parametreler (Bkz. Çizelge 5.4) kullanılmıştır. Bu çalışmada temel alınan Keserli (2016) çalışmasında normal dağılım sergilediği kabul edilen zemin parametreleri, zemin değişkenlerine ait belirlenen varyasyon katsayıları ve ortalama değerler kullanılarak Monte Carlo simülasyon yöntemi ile yeniden belirlenmiş, Python yazılımı vasıtasıyla PLAXIS programına analiz sayısı kadar iteratif olarak atanmıştır. Elde edilen analiz sonuç çıktıları kullanılarak veri seti değişkenlerine ait olasılık yoğunluk fonksiyon (PDF) grafikleri çizilerek verilerin istatistiksel dağılımı yansıtabilme oranı dikkate alınarak gerçekleştirilecek analiz sayısına karar verilmiştir (Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9).



Şekil 5.7. M-C FEM yalnızca zemin değişkenliği, içsel sürtünme açısı histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz

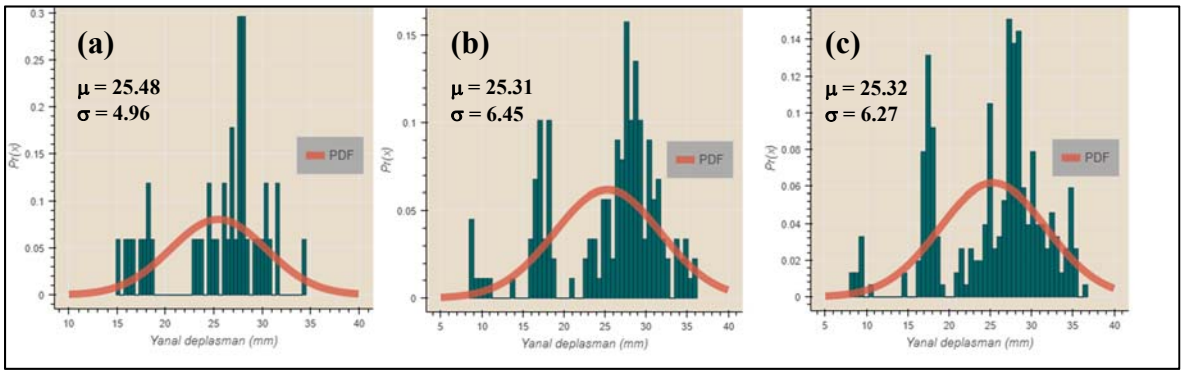


Şekil 5.8. M-C FEM yalnızca zemin değişkenliği, birim hacim ağırlık histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz



Şekil 5.9. M-C FEM yalnızca zemin değişkenliği, elastisite modülü histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz

Analiz sonuç çıktıları kullanılarak Bölüm 5.3 kapsamında sunulan, sistem yenilme mekanizmasını belirleyen duvar yanal deplasman limitlerinin üzerine çıkılması durumu risk değerlendirmeleri kapsamında incelenmiş olup analizler sonucunda hesaplanan maksimum duvar yanal deplasman değerlerine ait histogramlar Şekil 5.10'da sunulmuştur.



Şekil 5.10. M-C FEM yalnızca zemin değişkenliği, duvar yanal deplasman histogramları. (a)100 analiz; (b)300 analiz ve (c)500 analiz

Önceki bölümlerde M-C simülasyon yönteminde analiz sayısı artışının hesaplama süresinde yaratacağı dezavantaj üzerinde durulmuştur. Zemin çivisi destekli iksa sistemi güvenilirlik değerlendirmesi kapsamında gerçekleştirilen analizlere ait hesaplama süresi Çizelge 5.8'de, analiz sonuçları Çizelge 5.9'da sunulmuştur.

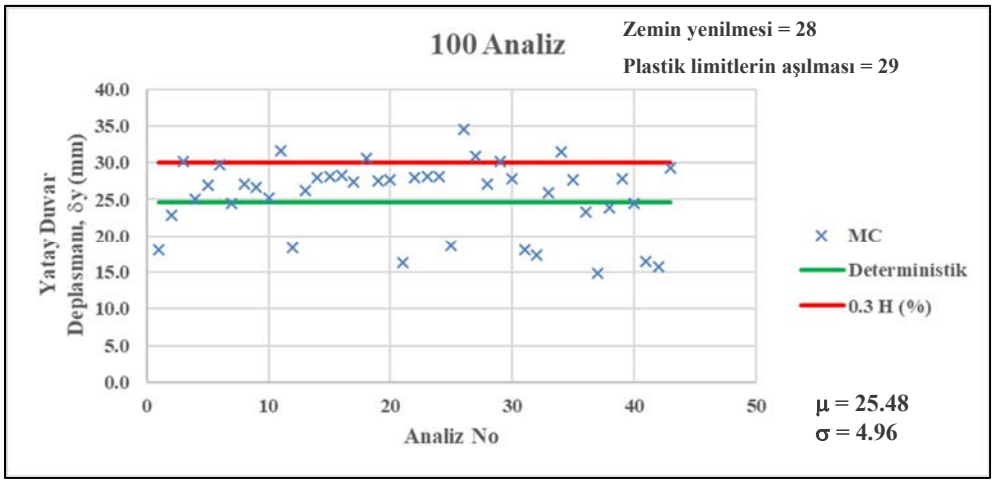
Çizelge 5.8. Gerçekleştirilen FEM nümerik analizleri yaklaşık süresi

Analiz sayısı	Yaklaşık analiz süresi (saat)
100	1,5
300	3
500	7

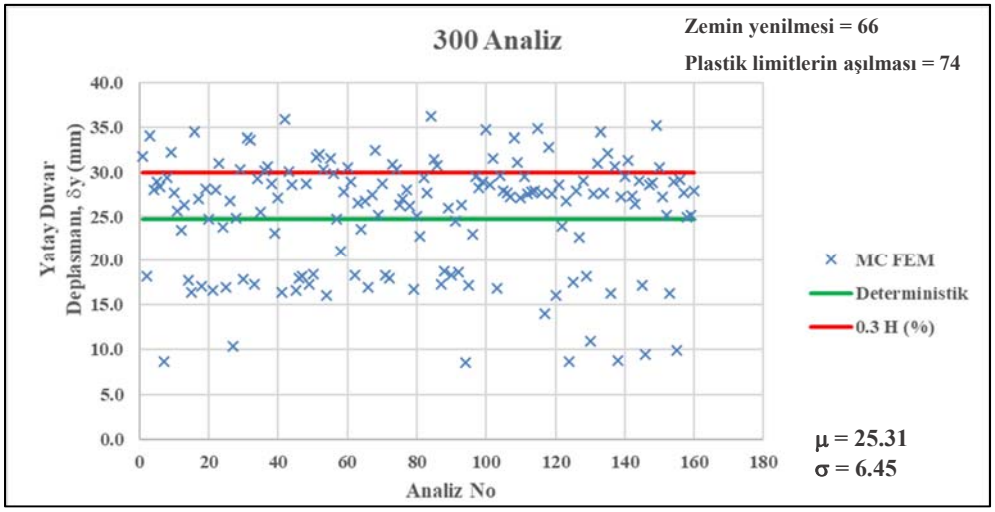
Çizelge 5.9. Zemin değişkenliği dahilinde yenilme mekanizması

Toplam analiz sayısı (n)	Yenilen analiz adedi (n_f)		
	Duvar yanal deplasman limiti aşımı	Zemin yenilmesi	Plastik limitlerin aşılması
100	7	28	29
300	36	66	74
500	58	108	128

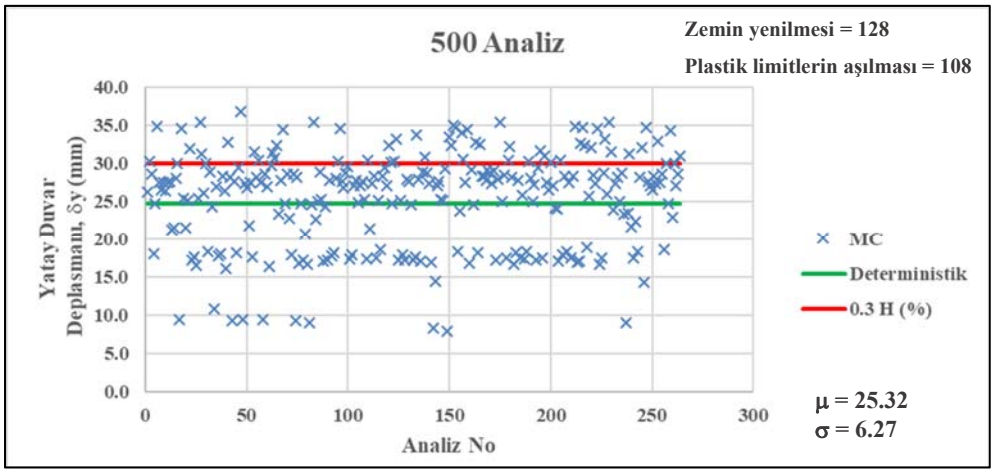
Sahada geçekleştirilen inklinometre okumaları ve yapının kısa dönemde (drenajsız koşullar dahilinde) yapını deplasman kaynaklı büyük ölçekli bir yenilmeye uğramadan görevini tamamladığı dikkate alındığında, risk değerlendirmeleri kapsamında zemin yenilmesi ve plastik limitlerin aşılması hataları görülen analizlerin ihmal edilebileceği savunulabilir. Keserli (2016) çalışması RSM analizleri ile karşılaştırma yapabilmek amacıyla geçekleştirilen bu çalışmada, yapılan kabuller doğrultusunda sistem güvenilirliğini etkileyen tek husus, duvar yanal deplasman limitinin aşımı olarak dikkate alınmıştır. PLAXIS analizlerinde duvar yanal deplasman limiti olarak Keserli (2016) çalışmasında dikkate alınan, FHWA (2015) standardında önerilen kazı derinliğinin %0,3'ü limit yenilme değeri olarak kabul edilmiştir. Analiz sonuç çıktılarının dağılımını gösteren tablolar Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te yer almaktadır.



Şekil 5.11. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (100 analiz)



Şekil 5.12. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (300 analiz)



Şekil 5.13. FEM analizi kazı sonu maksimum yatay kazık deplasmanı dağılımı (500 analiz)

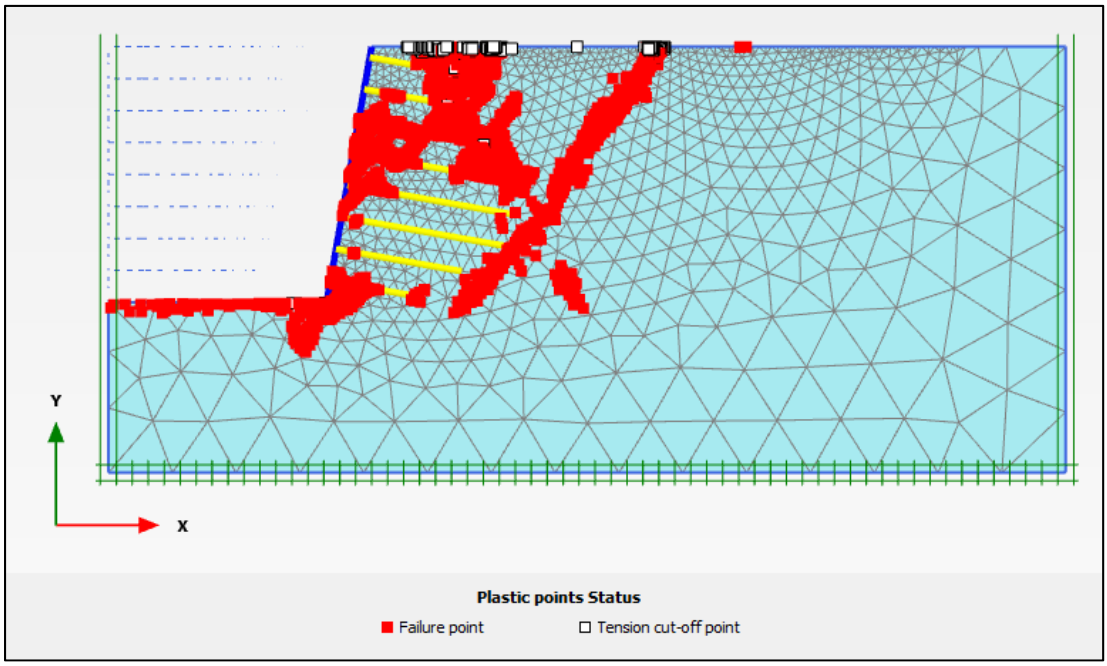
5.5. M-C FEM Sonuçlarının Risk Analizleri Kapsamında Değerlendirilmesi ve RSM-FEM ile Karşılaştırılması

Destekli derin kazıların güvenilirliği, analizlere temel oluşturan önceki çalışmalarda Grovak olarak tanımlanan ayrışmış kayaç bünyesindeki mevcut değişkenlik dikkate alınarak çivi destekli bir iksa sistemi vakası kapsamında incelenmiştir. Deterministik analizlerle sahada 25 mm mertebelerinde ölçümü yapılan deplasman değerine geri analizlerle ulaşılmış olup aynı model risk değerlendirmeleri kapsamında çok sayıda iteratif analize tabi tutulmuştur. Hedef güvenilirlik endeksi olarak Keserli (2016) çalışmasında dikkate alınan, FHWA (2015) standardında önerilen 1/333 değeri kıyas parametresi olarak kabul edilmiştir. PLAXIS sonlu eleman analizlerine ait sonuçlar Çizelge 5.10'da sunulmaktadır.

Çizelge 5.10. Zemin değişkenliği dahilinde PLAXIS FEM analizleri, duvar limit yanal deplasman aşma olasılığı ve karşılık gelen güvenilirlik endeksi değerleri

Analiz sayısı (n)	Duvar limit yanal deplasman aşımı analiz adedi (n_f)	p_f (%)	β
100	7	7,0	1,48
300	36	12,0	1,18
500	58	11,6	1,20

Zemin çivili iksa sistemi sonlu eleman analizlerinde plastik limitlerin aşılması ve zemin yenilmesi kaynaklı hata kodları görülmüş, söz konusu analizlerde sistem yenilmeye uğramıştır. Sonlu eleman yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerin model kısıtlamaları bulunmaktadır. Bu sebeple bazı analizlerde gerçekçi olmayan yenilme mekanizmaları ile karşılaşılması muhtemeldir. Keserli (2016) çalışması sonlu eleman analizlerinde, plastik limitlerin aşıldığı durumlara analiz sayısının azlığı sebebiyle rastlanmamıştır. Zemin çivili iksa sistemine ait hata kodu veren analizlerde oluşan plastik noktaların görünümü Şekil 5.14'te sunulmuştur.



Şekil 5.14. PLAXIS analizinde oluşan plastik noktalar

Monte Carlo simülasyon metodu kullanılarak gerçekleştirilen PLAXIS analizleri neticesinde zemin çivisi destekli derin kazı vakası için β değerinin 1,20 mertebelerine yakınsadığı tespit edilmiştir. Keserli (2016) çalışmasında aynı vakanın güvenilirlik seviyesinin, Tepki Yüzeyi Yöntemi (RSM) kullanılarak gerçekleştirilen Phase^2 analizleri sonucunda 1,92 mertebelerinde olduğu kaydedilmiştir. Çalışma kapsamında her ne kadar kullanılan yöntem, yazılım ve analiz sayısı farklılık gösterse de sistem güvenilirlik seviyesinin iki çalışmada dikkate değer ölçüde farklılık gösterdiği görülmüştür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Destekli kazı risk değerlendirmeleri kapsamında sistem performansını etkileyen temel faktörler destek elemanı yenilmesi (fore kazık, diyafram duvar vb.), ankraj-çivi kapasite aşımı ve zemin bünyesinde gerçekleşen yenilmelerdir. Sistem performansını etkileyen bu unsurlar PLAXIS 2016 sonlu elemanlar yazılımı ile değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar daha önce örnek vaka kapsamında sunulan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonlu eleman analizi programlarının olasılıksal dağılımları temsil etmesi bakımından kısıtlarının bulunması sebebiyle PLAXIS 2017 analizleri, Python 3.4 yazılımı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlara göre:

1) Geleneksel yöntemlerle tasarlanan derin kazıların geleneksel güvenlik katsayılarını sağlıyor olması tasarımın güvenli olduğu anlamına gelmemektedir. Çünkü geleneksel yöntemler kullanılarak hazırlanan tasarımlar dikkate alınamayan pek çok belirsizlik unsurunu taşır ve bu husus tasarımcıyı yenilme koşullarını tespit etmeye yönelik olarak olasılıksal analizler gerçekleştirmeye teşvik etmelidir.
2) Ankara Kilinde yalnız mevcut zemin değişkenliği risk analizleri örnek vaka kapsamında değerlendirildiğinde tasarımın yönergelerde önerilen güvenilirlik endeksi limitleri dahilinde olduğu görülmüştür.
3) Ankara Kilinde mevcut literatürde sıklıkla var olduğu tespit edilen kum-çakıl mercek ihtivasının zemin bünyesel değişkenliğine etkisi dahil edildiğinde ise gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre sistem güvenilirliğinin limit değer altında olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlendirme ankraj kapasitelerinin test edilmediği kabulüne dayanmaktadır.
4) Ankara Kilinde gerçekleştirilecek derin kazılarda, kum-çakıl bantlarda gerçekleştirilen ankraj delgilerinde görülen ankraj kapasite kaybının sistem yenilme mekanizmasına etkisi tasarımlarda göz ardı edilmemelidir. Kapsamlı bir saha ve laboratuvar çalışması gerçekleştirilerek kum-çakıl bant varlığı tespit edilmeli, sahada ankraj testleri gerçekleştirilerek tasarımın teyidi sağlanmalıdır.
5) Zemin çivisi destekli derin kazı vakası kapsamında gerçekleştirilen risk analizlerine göre sistem güvenilirlik seviyesi üzerinde kullanılan yöntem, yazılım ve analiz

sayısının belirleyici bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Daha önceki çalışmada (Keserli, 2016) Tepki Yüzeyi Yöntemi (RSM) kullanılarak gerçekleştirilen Phase^2 analizlerine kıyasla Monte Carlo Yöntemi ile gerçekleştirilen PLAXIS analizleri neticesinde oldukça düşük güvenilirlik endeksi değerleri elde edilmiştir.

6) Monte Carlo yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde analiz sayısı artışının, veri seti ve analiz çıktılarına ait histogramlar dikkate alındığında istatistiksel dağılımı yansıtabilme yetisini büyük oranda etkilediği görülmüştür. Bu durum analiz süresinde dezavantaj yaratmakta olsa dahi güvenilirlik analizlerini doğru yorumlayabilmek için yeterli sayıda analizin gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Analiz sayısına karar vermek üzere analiz sonuç çıktıları kullanılmalı, belirlenen yenilme mekanizmasına ait güvenilirlik endeksi değerlerindeki değişimin stabil hale geldiği değer tespit edilerek analizler nihayetlendirilmelidir.
7) PLAXIS analizlerinde perde elemanı olarak tanımlanan fore kazık dayanma yapılarının, elastik veya elasto-plastik malzeme kabulleri ile modellenmesinin risk analizlerine etkisi ayrıca incelenmiştir. Ankraj destekli derin kazı vakası kapsamında fore kazıklar için elasto-plastik malzeme modelli kullanılması analiz sonuçlarını değiştirmekte olup donatı çeliği akmaya uğradığında, analiz sonucunda elde edilen kazık moment ve deplasman değerlerinin kabul edilen limitler içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Ancak bu çalışma kapsamında fore kazık ve duvar elemanları örnek alınan vaka modelleriyle aynı şekilde, lineer elastik malzeme modeli kabulü ile modellenmiş olup sistem güvenilirliğine ait değerlendirmeler bu kabul çerçevesinde sunulmuştur.
8) Günümüz koşullarında yalnızca geleneksel yöntemler vasıtasıyla tasarlanan yapıların sistem bütününe ait belirsizliklerin etkisini göz ardı ederek yetersiz tasarımlar ortaya çıkarabileceği savunulabilir. Sisteme ait tüm belirsizlikleri dikkate almak beraberinde yüksek tasarım maliyetlerini ve projelendirme aşamasında hesaplama süresini uzatarak uygulama pratiğine aykırı sonuçlar doğurabilir. Ancak tasarımların emniyet-maliyet dengesini sağlanmalıdır. Bu kapsamda güvenilirliğe dayalı tasarımın ülkemizde yaygınlaşması, daha çok veri ve vaka tahlili ile yerel standart ve yönetmeliklere katkı koyabilmek önem taşımaktadır.
9) Çalışma sırasında gösterildiği üzere, literatürde rastlanan hedef güvenilirlik seviyeleri arasında oldukça büyük farklar mevcut olabilmektedir. Bu sebeple, geçici ve kalıcı kazıların hedef güvenilirliklerinin, mevcut tasarımların olasılıksal değerlendirmeleri ve talep edilen risk düzeyleri çerçevesinde mümkün olduğunca standart hale getirilmesini sağlayacak araştırma çalışmaları ivedilikle tamamlanmalıdır.

6.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

İleriki çalışmalarda üç boyut etkisi, zemin yatay ve düşey yöndeki heterojenliği analizlerde dikkate alınarak rastsal sonlu eleman analizleri ile kıyas gerçekleştirilmelidir. Ayrıca, özellikle zemin parametrelerine ait rastsal değişkenlerin normal veya log-normal dışındaki olasılık dağılımlarına sahip olması şartları değerlendirilmeli, parametreler arasındaki korelasyonlar analizlerde detaylı biçimde dikkate alınmalıdır. Risk değerlendirmeleri kapsamında gerçekleştirilen PLAXIS sonlu eleman analizlerinde, plastik yenilme noktalarının konumu tespit edilerek yenilme mekanizması eleman bazında incelenebilir ve gerçekçi olmayan yenilmeler tahkik edilebilir.

KAYNAKLAR

AASHTO. (2012). *LRFD Bridge Design Specifications.* Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Ahmed, A., ve Soubra, A. (2011). Subset Simulation and Its Application to a Spatially Random Soil. *GeoRisk 2011: Geotechnical Risk Assessment and Management* (s. 209). Atlanta, ABD: 2011 American Society of Civil Engineers.

Akademi Etüt Proje. (2014). *DHMİ Esenboğa Havalimanı Jeolojik ve Jeoteknik Raporu.* Ankara.

Akbas, S. O. (2007). *Deterministic and probabilistic assessment of settlements of shallow foundations in cohesionless soils.* Doktora Tezi, Cornell University, Ithaca, New York.

Akbaş, B. (2015). *Probabilistic Slope Stability Analysis Using Limit Equilibrium, Finite Element And Random Finite Element Methods.* Yüksek Lisans Tezi. Middle East Technical University.

Akbaş, S. O., ve Kulhawy, F. H. (2010). Characterization and estimation of geotechnical variability in Ankara Clay: A case history. *Geotechnical and Geological Engineering, 28*(5), 619-631.

Ameratunga, J., Sivakugan, N., ve Das, B. M. (2016). *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering.* India: Springer .

Baecher, G. B. (1987). *Geotechnical risk analysis: user's guide.* Federal Highway Administration.

Baecher, G. B. (1987). Optimization of structural and mechanical systems. FHWA/RD-87-011. *Federal Highway Administration*, 110.

Baecher, G. B., ve Christian, J. T. (2003). *Reliability and statistics in geotechnical engineering.* Cornwall: John Wiley ve Sons Inc.

Baecher, G. B., ve Ladd, C. C. (1997). *Formal observational approach to staged loading.* Research Record 1582. Transportation Research Board.

Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (2007). *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik.* Ankara: Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.

Brinkgreve, R., Kumarswamy, S., ve Swolfs, W. (2016). *Plaxis Material models manual.* Chapter 6. Plaxis bv.

Craig, R. F. (2004). *Craig's Soil Mechanics 7th Edition.* Londra: Taylor ve Francis Group.

Cushing, A. G., Withiam, J. L., Szwed, A., ve Nowak, A. S. (2003). Reliability Analysis of Anchored and Cantilevered Flexible Retaing Structures. Phoon, Honjo, ve Gilbert (Editörler). World Scientific Publishing Company.

Çalışan, O. (2009). Ankara Kilinde Yapılan 20 m Derinliğinde Bir Kazının Geri Analizi. *Prof. İsmet Ordemir'i Anma Toplantısı ve 5. Odtü Geoteknik Mühendisliği Sempozyumu*. Ankara : METU, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 1-12.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. (2007). Ankara: Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.

Duncan, J. M., ve Buchignani, A. L. (1976). *An engineering manual for settlement studies.* Berkeley: Dept. of Civil Eng. Univ. of California.

Duncan, J. M., ve Chang, C. Y. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of the soil mechanics and foundations division, 63*(5), 1629-1653.

Durgunoğlu, H. T., Keskin, H. B., Kulaç, H. F., İkiz, S., ve Karadayılar, T. (2007). Performance of very deep temporary soil nailed walls in Istanbul. *17th Ground Improvement Workshop.* Madrid.

Ergun, U. (1987). Ankara Zeminlerinde Yapılan Bazı Ankraj Deneyleri. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği İkinci Ulusal Kongresi*,. İstanbul, 489-495.

Fishman, G. S. (1996). *Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications.* Springer.

Goh, A. T., ve Kulhawy, F. H. (2005). Reliability assessment of serviceability performance of braced retaining walls using a neural network approach. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 29*, 627-642.

Harr, M. E. (1984). Reliability-based design in civil engineering. *1984 Henry M. Shaw Lecture.* Raleigh, N.C.: Department of Civil Engineering, North Carolina State University.

Helton, J. C. (1997). Uncertainty and sensitivity analysis in the presence of stochastic and subjective uncertainty. *Journal of Statistical Computation and Simulation, 57*, 3-76.

Huber, M. (2013). *Soil variability and its consequences in geotechnical engineering.* Stuttgart, Germany: Institute of Geotechnical Engineering of Stuttgart University.

Janssen, J. J. (2016). *Research on the safety level of a diaphragm wall in river dikes, using a Monte Carlo analysis.* Yüksek Lisans Tezi. Delft University of Technology.

Keserli, A. S. (2016). *Zemin Çivileriyle Güçlendirilmş İksa Yapılarında Sistem Performansını ve Güvenilirliğini Etkileyen Faktörlerin Vaka Analizleri ile Araştırılması.* Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.

Kondner, R. L. (1963). A hyperbolic stress-strain formulation for sands. *Northwestern University*.

Kulhawy, F. H. (1992). On the evaluation of soil properties. *ASCE Geotechnical Special Publications, 31*, 95-115.

Lacasse, S., ve Nadim, F. (1996). Uncertainties in characterizing soil properties. C. D. Shackelford, P. P. Nelson, ve M. S. Roth (Editörler), *Conference, Uncertainty in the geologic environment: from theory to practice.* ASCE, *1(58)*, 9-75.

Lacasse, S., ve Nadim, F. (1998). Risk and reliability in geotechnical engineering. St. Louis, 1172-1192.

Limpert, E., Stahel, A. W., ve Abbt, M. (2001, May). Log-normal Distributions across the Sciences: Keys and Clues. *Bio Science, 51*(5), 341-352.

Long, M. (2001, March). Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations. *J Geotech Geoenviron Eng, 127*(3), 203-224.

Mortensen, D. (1993). Safety requirements for foundation structures determined by economical considerations. *Int. Symposium on Limit State Design in Geotechnical Eng.*, *3*, 683-686.

NumPy community. (2016). *NumPy Reference.*

Phoon, K. K., ve Ching, J. (2015). *Risk and Reliability In Geotechnical Engineering.* CRC Press Taylor ve Francis Group.

Phoon, K. K., ve Kulhawy, F. H. (1999a). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal, 36*(4), 612-624.

Phoon, K. K., ve Kulhawy, F. H. (1999b). Evaluation of geotechnical property variability. *Canadian Geotechnical Journal, 36*(4), 625-639.

Phoon, K. K., Kulhawy, F. H., ve Grigoriu, M. D. (1995). *Reliability-based design of foundations for transmission line structures.* Palo Alto CA: Electric Power Research Institute.

PLAXIS 2D (Software). (2017). *PLAXIS BV*. Delft, The Netherlands: P.O. Box 572, 2600 AN.

PLAXIS 2D Material Models Manuals. (2018). *PLAXIS BV*. Delft, The Netherlands: P.O. Box 572, 2600 AN.

PSCG. (2000). *Specification for excavation in Shanghai metro construction.* Shanghai, China: Professional Standards Compilation Group.

Python version 3 (Programing Language). The Python Software Foundation.

Rippi, A. (2015). *Structural reliability analysis of a dike with a sheet pile wall-Coupling Reliability methods with Finite Elements.* Yüksek Lisans Tezi. Delft University of Technology.

Rippi, A., Nuttall, J., Teixeira, A., ve Schweckendiek, T. (2016). Uncertainty asseessment of a dike with an anchored sheet pile wall using FEM. *3rd European Conference on Flood Risk Management.*

Schanz, T., Vermeer, P., ve Bonnier, P. (1999). The hardening soil model: formulation and verification. *Beyond 2000 in computational geotechnics*, 281-296.

Schweckendiek, T. (2006). *Structural Reliability Applied To Deep Excavations: Coupling Reliability Methods With Finite Elements.* Delft: Delft University of Technology.

Schweiger, H. F., ve Peschl, G. M. (2005). Reliability analysis in geotechnics with the random set finite element method. *Computers and Geotechnics, 32*, 422-435.

SciPy community. (2013). *SciPy Reference Guide.*

Sorensen, K. K., ve Okkels , N. (2013). Proceedings of the 18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering. *Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clays*, Paris, 423-428.

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.

Tang, Y. G. (2011). Probabilistic Analysis of the Deflection of Retaining Wall in Deep Excavation. *GeoRisk 2011: Geotechnical Risk Assessment and Management*. Atlanta, ABD: 2011 American Society of Civil Engineers, 963.

Betonarme Yapilarin Tasarim ve Yapim Kurallari (2000). Türk Standardları Enstitüsü (TSE). Bakanlıklar/Ankara.

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., Osorio, J., ve Cañón, J. (2017). Reliability-based designs procedure of earth retaining walls in geotechnical engineering. *Obras y Proyectos, 22*, 50-60.

Wang, R., Liu, G. B., Liu, D. P., ve Ma, Z. Z. (2008). Discussion on design method for retaining structures of metro station deep excavations in Shanghai. *Proceedings of the 6th International Symposium (IS-SHANGHAI 2008).* Shanghai, China.

Wang, Y., Au, S. K., ve Kulhawy, F. H. (2011a). Expanded reliability-based design approach for drilled shafts. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137*(2), 140-149.

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.

Wes McKinney ve PyData Development Team. (2018). *pandas: powerful Python data analysis toolkit.*

Zhang, L. M., Liu, J. L., ve Zhang, Z. M. (2003). The Chinese Limit State Design Code for Building Pile Foundations JGJ 94-94: A Comparative Study. *Limit State Design in*

Geotechnical Engineering Practice - The International Workshop LSD2003. World Scientific Publishing Company.

Zhu, G., Yin, J.-H., ve Graham, J. (2001). Consolidation modeling of soils under the test embankment at Chek Lap Kok Inter-national Airport in Hong Kong using a simplified finite element model. *Canadian Geotechnical Journal, 38*(2), 349-363.

EKLER

EK-1. PLAXIS – Python harici kontrol kodlamaları, ankraj destekli derin kazı vakası

```
import imp
from math import pi
from math import log
from math import sqrt
from math import pow
from math import sin
import random
import numpy as np

# Python-Plaxis Bağlantısı
localhostport_input = 10000
localhostport_output = 10001
plaxis_path = r"C:\\Program Files (x86)\Plaxis\PLAXIS 2017.01\PLAXIS 2D\python\Lib\site-packages"
found_module = imp.find_module('plxscripting', [plaxis_path])
plxscripting = imp.load_module('plxscripting', *found_module)
from plxscripting.easy import *

s_i, g_i = new_server('localhost', localhostport_input, password = '123123')
s_o, g_o = new_server('localhost', localhostport_output, password = '123123')

# Geometri,Mesh ve İmalat Aşamalarının Oluşturulması
g_i.SoilContour.initializerectangular(-42, -63, 63, 63)
g_i.setproperties(
   "Title", "DerinkaziRev_500",
   "Comments", "",
   "UnitForce", "kN",
   "UnitLength", "m",
   "UnitTime", "day",
   "WaterWeight", 10,
   "ModelType", "PlaneStrain",
   "ElementType", "15-Noded")
```

EK-1. (devam) PLAXIS – Python kodlamaları, ankraj destekli derin kazı vakası

```
g_i.gotostructures()
g_i.polygon((-42, 20), (63, 20), (63, -63), (-42, -63))
g_i.plate(0, 17, 0, -4)
g_i.neginterface(0, 17, 0, -4)
g_i.posinterface(0, 17, 0, -4)
g_i.geogrid(16.42, 10.6, 23.18, 8.79)
g_i.geogrid(14.49, 8.62, 21.25, 6.81)
g_i.geogrid(12.56, 6.64, 19.32, 4.82)
g_i.geogrid(10.63, 4.65, 17.39, 2.84)
g_i.geogrid(8.69, 2.67, 15.45, 0.86)
g_i.geogrid(6.76, 0.69, 13.52, -1.12)
g_i.n2nanchor(0, 15, 16.42, 10.6)
g_i.n2nanchor(0, 12.5, 14.49, 8.62)
g_i.n2nanchor(0, 10, 12.56, 6.64)
g_i.n2nanchor(0, 7.5, 10.63, 4.65)
g_i.n2nanchor(0, 5, 8.69, 2.67)
g_i.n2nanchor(0, 2.5, 6.76, 0.69)
g_i.line((-42, 15), (0, 15))
g_i.line((-42, 12.5), (0, 12.5))
g_i.line((-42, 10), (0, 10))
g_i.line((-42, 7.5), (0, 7.5))
g_i.line((-42, 5), (0, 5))
g_i.line((-42, 2.5), (0, 2.5))
g_i.line((-42, 2.5), (0, 2.5))
g_i.line((-42, 0), (0, 0))
g_i.line((-42, 17), (1.5, 17))
g_i.line((1.5, 17), (4.5, 20))
g_i.line((1.5, 17), (63, 17))
g_i.line((0, 0), (63, 0))
g_i.lineload((4.5, 20), (63, 20), ("qy_start", -10))

# Zeminin Tabakalara Ayrılması
```

EK-1. (devam) PLAXIS – Python kodlamaları, ankraj destekli derin kazı vakası

```
g_i.cutpoly ((-42, 17), (63, 17))
g_i.cutpoly ((-42, 0), (63, 0))

# Plate Malzemelerinin Tanımlanıp Atanması
material_plate = g_i.platemat()
material_plate.setproperties(
    "MaterialName", "C25 D=65cm Sh=100cm",
    "MaterialNumber", 0,
    "Elasticity", 0,
    "IsIsotropic", True,
    "IsEndBearing", False,
    "ElastoplasticMK", "M-K diagram",
    "ElastoplasticMKTable", "[0, 0, 1, 1]",
    "NonSoilSpecificHeatCapacity", 0,
    "ThermalConductivity", 0,
    "Density", 0,
    "ThermalExpansion", 0,
    "EA", 9949999.99999999,
    "EA2", 9949999.99999999,
    "EI", 263000,
    "nu", 0.15,
    "d", 0.563192622153594,
    "w", 5.31,
    "Mp", 1.00000000000000000E+015,
    "Np", 1.00000000000000000E+010,
    "Np2", 1.00000000000000000E+010,
    "RayleighAlpha", 0,
    "RayleighBeta", 0,
    "Gref", 7681362.97662991)

g_i.Plates[0].Material = material_plate
```

EK-1. (devam) PLAXIS – Python kodlamaları, ankraj destekli derin kazı vakası

```
# Geogrid Malzemelerinin Tanımlanıp Atanması
material_geogrid = g_i.geogridmat()
material_geogrid.setproperties(
    "MaterialName", "KOK",
    "Colour", 65535,
    "MaterialNumber", 0,
    "Elasticity", 0,
    "IsIsotropic", True,
    "EA1", 126000,
    "EA2", 126000)
for j in range(len(g_i.Geogrids)):
    g_i.Geogrids[j].Material = material_geogrid

# Nodetonodeanchor Malzemelerinin Tanımlanıp Atanması
material_node2nodeanchor = g_i.anchormat()
material_node2nodeanchor.setproperties(
    "MaterialName", "HALAT Sh=2m",
    "Lspacing", 2,
    "EAPerLength", 72500)

for k in range(len(g_i.NodeToNodeAnchors)):
    g_i.NodeToNodeAnchors[k].Material = material_node2nodeanchor

# Degisken Olmayan Zemin Malzemelerinin Tanımlanıp Atanması
g_i.gotostructures()
# Dolgu Birimin Tanımlanıp Atanması
material_dolgu = g_i.soilmat()
cohesion = 3
phi = 25
material_dolgu.setproperties(
    "MaterialName", "Dolgu",
    "SoilModel", 3,  # Hardening Soil
```

EK-1. (devam) PLAXIS – Python kodlamaları, ankraj destekli derin kazı vakası

```
    "UserDefinedIndex", 0,
    "DrainageType", "Drained",
    "K0Determination", 1,
    "K0PrimaryIsK0Secondary", True,
    "gammaUnsat", 18,
    "gammaSat", 18,
    "E50Ref", 12000,
    "EoedRef", 12000,
    "EurRef", 36000,
    "powerm", 0.5,
    "cref", cohesion,
    "phi", phi,
    "psi", 0,
    "InterfaceStrength", 1,
    "Rinter", 0.7,
    "K0nc", 1 - sin(phi * pi / 180),
    "K0Primary", 1 - sin(phi * pi / 180),
    "K0Secondary", 1 - sin(phi * pi / 180))
g_i.Soils[0].Material = material_dolgu

# Alt Tabaka Kil-2 Birimin Tanımlanıp Atanması
material_kil2 = g_i.soilmat()
cohesion = 25
phi = 25
material_kil2.setproperties(
    "MaterialName", "Kil_2",
    "SoilModel", 3,  # Hardening Soil
    "UserDefinedIndex", 0,
    "DrainageType", "Drained",
    "K0Determination", 1,
    "K0PrimaryIsK0Secondary", True,
    "gammaUnsat", 18,
```

EK-1. (devam) PLAXIS – Python kodlamaları, ankraj destekli derin kazı vakası

```
    "gammaSat", 18,
    "E50Ref", 110000,
    "EoedRef", 110000,
    "EurRef", 330000,
    "powerm", 0.5,
    "cref", cohesion,
    "phi", phi,
    "psi", 0,
    "InterfaceStrength", 1,
    "Rinter", 0.8,
    "K0nc", 1 - sin(phi * pi / 180),
    "K0Primary", 1 - sin(phi * pi / 180),
    "K0Secondary", 1 - sin(phi * pi / 180))
g_i.Soils[2].Material = material_kil2

# Mesh Tanımlanması
g_i.gotomesh()
g_i.mesh(0.06)

output_port = g_i.selectmeshpoints()
g_o.addcurvepoint('node', (0, -4))
g_o.update()

#İmalat aşamalarının tanımlanması
# İlk Aşamanın Tanımlanması
g_i.gotostages()
g_i.set(g_i.InitialPhase.Identification, "Baslangic")
g_i.set(g_i.InitialPhase.DeformCalcType, "K0 procedure")
for s in range(len(g_i.Soils)):
    g_i.Soils[s].Active[g_i.InitialPhase] = True

# 1. Aşamanın Tanımlanması
```

EK-1. (devam) PLAXIS – Python kodlamaları, ankraj destekli derin kazı vakası

```
Phase_1 = g_i.phase(g_i.Phases[0])
g_i.set(g_i.Phase_1.Identification, "Pile")
g_i.LineLoad_1_1.Active[g_i.Phase_1] = True
g_i.Soil_1_1.Active[g_i.Phase_1] = False
for m in range(len(g_i.Plates)):
    g_i.Plates[m].Active[g_i.Phase_1] = True
for n in range(len(g_i.Interfaces)):
    g_i.Interfaces[n].Active[g_i.Phase_1] = True

# 2. Aşamanın Tanımlanması
Phase_2 = g_i.phase(g_i.Phases[1])
g_i.set(g_i.Phase_2.Identification, "E1")
g_i.Soil_2_1.Active[g_i.Phase_2] = False
g_i.NegativeInterface_1_1.Active[g_i.Phase_2] = False
g_i.set(g_i.Phase_2.Deform.UseDefaultIterationParams, False)
g_i.set(g_i.Phase_2.Deform.ToleratedError, 0.03)

# 3. Aşamanın Tanımlanması
Phase_3 = g_i.phase(g_i.Phases[2])
g_i.set(g_i.Phase_3.Identification, "A1")
g_i.Geogrids[0].Active[g_i.Phase_3] = True
g_i.NodeToNodeAnchors[0].Active[g_i.Phase_3] = True
g_i.NodeToNodeAnchor_1_1.AdjustPrestress[g_i.Phase_3] = True

# 4. Aşamanın Tanımlanması
Phase_4 = g_i.phase(g_i.Phases[3])
g_i.set(g_i.Phase_4.Identification, "E2")
g_i.Soil_2_2.Active[g_i.Phase_4] = False
g_i.NegativeInterface_1_2.Active[g_i.Phase_4] = False
g_i.set(g_i.Phase_4.Deform.UseDefaultIterationParams, False)
g_i.set(g_i.Phase_4.Deform.ToleratedError, 0.03)
```

EK-1. (devam) PLAXIS – Python kodlamaları, ankraj destekli derin kazı vakası

```
# 5. Aşamanın Tanımlanması
Phase_5 = g_i.phase(g_i.Phases[4])
g_i.set(g_i.Phase_5.Identification, "A2")
g_i.Geogrids[1].Active[g_i.Phase_5] = True
g_i.NodeToNodeAnchors[1].Active[g_i.Phase_5] = True
g_i.NodeToNodeAnchor_2_1.AdjustPrestress[g_i.Phase_5] = True

# 6. Aşamanın Tanımlanması
Phase_6 = g_i.phase(g_i.Phases[5])
g_i.set(g_i.Phase_6.Identification, "E3")
g_i.Soil_2_3.Active[g_i.Phase_6] = False
g_i.NegativeInterface_1_3.Active[g_i.Phase_6] = False
g_i.set(g_i.Phase_6.Deform.UseDefaultIterationParams, False)
g_i.set(g_i.Phase_6.Deform.ToleratedError, 0.03)

# 7. Aşamanın Tanımlanması
Phase_7 = g_i.phase(g_i.Phases[6])
g_i.set(g_i.Phase_7.Identification, "A3")
g_i.Geogrids[2].Active[g_i.Phase_7] = True
g_i.NodeToNodeAnchors[2].Active[g_i.Phase_7] = True
g_i.NodeToNodeAnchor_3_1.AdjustPrestress[g_i.Phase_7] = True

# 8. Aşamanın Tanımlanması
Phase_8 = g_i.phase(g_i.Phases[7])
g_i.set(g_i.Phase_8.Identification, "E4")
g_i.Soil_2_4.Active[g_i.Phase_8] = False
g_i.NegativeInterface_1_4.Active[g_i.Phase_8] = False
g_i.set(g_i.Phase_8.Deform.UseDefaultIterationParams, False)
g_i.set(g_i.Phase_8.Deform.ToleratedError, 0.03)

# 9. Aşamanın Tanımlanması
Phase_9 = g_i.phase(g_i.Phases[8])
```

EK-1. (devam) PLAXIS – Python kodlamaları, ankraj destekli derin kazı vakası

```
g_i.set(g_i.Phase_9.Identification, "A4")
g_i.Geogrids[3].Active[g_i.Phase_9] = True
g_i.NodeToNodeAnchors[3].Active[g_i.Phase_9] = True
g_i.NodeToNodeAnchor_4_1.AdjustPrestress[g_i.Phase_9] = True

# 10. Aşamanın Tanımlanması
Phase_10 = g_i.phase(g_i.Phases[9])
g_i.set(g_i.Phase_10.Identification, "E5")
g_i.Soil_2_6.Active[g_i.Phase_10] = False
g_i.NegativeInterface_1_5.Active[g_i.Phase_10] = False
g_i.set(g_i.Phase_10.Deform.UseDefaultIterationParams, False)
g_i.set(g_i.Phase_10.Deform.ToleratedError, 0.03)

# 11. Aşamanın Tanımlanması
Phase_11 = g_i.phase(g_i.Phases[10])
g_i.set(g_i.Phase_11.Identification, "A5")
g_i.Geogrids[4].Active[g_i.Phase_11] = True
g_i.NodeToNodeAnchors[4].Active[g_i.Phase_11] = True
g_i.NodeToNodeAnchor_5_1.AdjustPrestress[g_i.Phase_11] = True

# 12. Aşamanın Tanımlanması
Phase_12 = g_i.phase(g_i.Phases[11])
g_i.set(g_i.Phase_12.Identification, "E6")
g_i.Soil_2_7.Active[g_i.Phase_12] = False
g_i.NegativeInterface_1_6.Active[g_i.Phase_12] = False
g_i.set(g_i.Phase_12.Deform.UseDefaultIterationParams, False)
g_i.set(g_i.Phase_12.Deform.ToleratedError, 0.03)

# 13. Aşamanın Tanımlanması
Phase_13 = g_i.phase(g_i.Phases[12])
g_i.set(g_i.Phase_13.Identification, "A6")
g_i.Geogrids[5].Active[g_i.Phase_13] = True
```

EK-1. (devam) PLAXIS – Python kodlamaları, ankraj destekli derin kazı vakası

```
g_i.Geogrids[6].Active[g_i.Phase_13] = True
g_i.NodeToNodeAnchors[5].Active[g_i.Phase_13] = True
g_i.NodeToNodeAnchor_6_1.AdjustPrestress[g_i.Phase_13] = True

# 14. Aşamanın Tanımlanması
Phase_14 = g_i.phase(g_i.Phases[13])
g_i.set(g_i.Phase_14.Identification, "E7")
g_i.Soil_2_8.Active[g_i.Phase_14] = False
g_i.NegativeInterface_1_7.Active[g_i.Phase_14] = False
g_i.set(g_i.Phase_14.Deform.UseDefaultIterationParams, False)
g_i.set(g_i.Phase_14.Deform.ToleratedError, 0.03)

#Plaxis Dosyasının Kaydedilmesi
save_path = "C:\\Users\\user\\Desktop\\KUMLU500\Plaxis\Derin Kazi 500"
g_i.save (save_path)

# Ankraj Yükünün Tanımlanması (İterasyon Başlangıç)
Iterasyon = 501
sayacdeplasman =[]
sayacmoment =[]
sayacıcselsurtunme =[]
sayacc =[]
data = 1
while data < Iterasyon:
    g_i.gotosoil()
    dataongerme = []
    for l in range(len(g_i.NodeToNodeAnchors)):
        choices = ['Kil', 'Kum']
        weights = [0.85, 0.15]
        rnd = np.random.choice(choices, p=weights)
        if rnd == 'Kil':
            ongermekuvvet = 400
```

EK-1. (devam) PLAXIS – Python kodlamaları, ankraj destekli derin kazı vakası

```
        else:
            choices2 = [70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200]
            weights2 = [1.0/14.0, 1.0/14.0, 1.0/14.0, 1.0/14.0, 1.0/14.0, 1.0/14.0, 1.0/14.0,
1.0/14.0, 1.0/14.0, 1.0/14.0, 1.0/14.0, 1.0/14.0, 1.0/14.0, 1.0/14.0]
            rnd2 = np.random.choice(choices2, p=weights2)
            ongermekuvvet = rnd2
        dataongerme.append(ongermekuvvet)
    print(dataongerme)
    # Degisken Zemin Malzemelerinin Tanımlanıp Atanması
    material_kil1 = g_i.soilmat()
    cohesion = 200
    cov_cohesion = 23
    cohesion = random.lognormvariate(log(cohesion) - 0.5 * pow(sqrt(log(1 +
pow(cov_cohesion / 100.0, 2))), 2),
                                     sqrt(log(1 + pow(cov_cohesion / 100.0, 2))))
    print("kohezyon:" + ("{:.2f}".format(cohesion*0.1)))
    phi = 25
    cov_phi = 13
    phi = random.lognormvariate(log(phi) - 0.5 * pow(sqrt(log(1 + pow(cov_phi / 100.0,
2))), 2),
                                sqrt(log(1 + pow(cov_phi / 100.0, 2))))
    print("icsel surtunme:" + ("{:.2f}".format(phi)))
    sayacc.append(cohesion*0.1)
    sayacıcselsurtunme.append(phi)
    material_kil1.setproperties(
        "MaterialName", "Kil_1_" + str(data),
        "SoilModel", 3,
        "DrainageType", 0,
        "K0Determination", 1,
            "K0PrimaryIsK0Secondary",True,
        "gammaUnsat", 18,
        "gammaSat", 18,
```

EK-1. (devam) PLAXIS – Python kodlamaları, ankraj destekli derin kazı vakası

```
    "E50ref", 262.5 * cohesion,
    "Eoedref", 262.5 * cohesion,
    "Eurref", 787.5* cohesion,
    "cref", cohesion * 0.1,
    "phi", phi,
    "psi", 0,
    "InterfaceStrength", 1,
    "rinter", 0.7,
          "K0nc", 1-sin(phi*pi/180),
       "K0Primary", 1-sin(phi*pi/180),
       "K0Secondary", 1-sin(phi*pi/180))
g_i.Soils[1].Material = material_kil1

# İmalat Aşamalarının Revizyonu
g_i.gotostages()

# 3. Aşama Öngerme
g_i.NodeToNodeAnchor_1_1.PrestressForce[g_i.Phase_3] = dataongerme[0]

# 5. Aşama Öngerme
g_i.NodeToNodeAnchor_2_1.PrestressForce[g_i.Phase_5] = dataongerme[1]

# 7. Aşamanın Tanımlanması
g_i.NodeToNodeAnchor_3_1.PrestressForce[g_i.Phase_7] = dataongerme[2]

# 9. Aşamanın Tanımlanması
g_i.NodeToNodeAnchor_4_1.PrestressForce[g_i.Phase_9] = dataongerme[3]

# 11. Aşamanın Tanımlanması
g_i.NodeToNodeAnchor_5_1.PrestressForce[g_i.Phase_11] = dataongerme[4]

# 13. Aşamanın Tanımlanması
```

EK-1. (devam) PLAXIS – Python kodlamaları, ankraj destekli derin kazı vakası

```
g_i.NodeToNodeAnchor_6_1.PrestressForce[g_i.Phase_13] = dataongerme[5]

# Analiz
g_i.gotostages ()
for i in range (len(g_i.Phases)):
    g_i.set(g_i.Phases[i].ShouldCalculate, True)
g_i.calculate()

# Hata kodu veren Phase tespiti
if g_i.Phase_14.Reached.SumMstage == 1:
    g_i.view(g_i.Phase_14)

    # Kazık geometrik koşullarının tanımlanması:
    x_left = 0

    # Kazık imalatından itibaren (Phase_1) maks. deplasman ve momentin tespiti
    momentlist = []
    yanaldeplasmanlist = []
    for phase in g_o.Phases[1:]:
        # Kıyas parametelerinin belirlenmesi:
        maxM = 0.0
        minM = 0.0

        maxUx = 0.0
        minUx = 0.0

        # Sonuc dosyalarına ulasılması
        plateX = g_o.getresults(phase, g_o.ResultTypes.Plate.X, 'node')
        plateM = g_o.getresults(phase, g_o.ResultTypes.Plate.M2D, 'node')
        plateUx = g_o.getresults(phase, g_o.ResultTypes.Plate.Ux, 'node')

        # Maks. momentin tespiti
```

EK-1. (devam) PLAXIS – Python kodlamaları, ankraj destekli derin kazı vakası

```
        for x, M in zip(plateX, plateM):
            if abs(x - x_left) < 1E-5:
                if M > maxM:
                    maxM = M
                    xAtMaxM = x
                momentlist.append(maxM)
                if M < minM:
                    minM = M
                    xAtMinM = x
                momentlist.append(abs(minM))

        # Maks. deplasmanın tespiti
        for x, Ux in zip(plateX, plateUx):
            if abs(x - x_left) < 1E-5:
                if Ux > maxUx:
                    maxUx = Ux
                    xAtMaxUx = x
                yanaldeplasmanlist.append(maxUx)
                if Ux < minUx:
                    minUx = Ux
                    xAtMinUx = x
                yanaldeplasmanlist.append(abs(minUx))
    print("Mmax = {:.2f} kNm/m ".format(max(momentlist)))
    print("Uxmax = {:.2f} m ".format(max(yanaldeplasmanlist)))
    sayacmoment.append(max(momentlist))
    sayacdeplasman.append(max(yanaldeplasmanlist))
    g_o.close()
    print (data)
else:
    print("Mmax = NA")
    print("Uxmax = NA")
    sayacmoment.append("NA")
```

EK-1. (devam) PLAXIS – Python kodlamaları, ankraj destekli derin kazı vakası

```
        sayacdeplasman.append("NA")
    data += 1


#Sonucların yazdırılması
k = 0
for k in range(len(sayacc)):
    with open("Kohezyon.xls", 'a') as output:
        output.write(str(sayacc[k]) + '\n')
        k += 1
l = 0
for l in range(len(sayacıcselsurtunme)):
    with open("Icselsurtunme.xls", 'a') as output:
        output.write(str(sayacıcselsurtunme[l]) + '\n')
        l += 1
m = 0
for m in range (len(sayacdeplasman)):
    with open ("Yanaldeplasman.xls", 'a') as output:
        output.write (str (sayacdeplasman[ m ]) + '\n')
        m += 1
j=0
for j in range (len(sayacmoment)):
    with open ("Maksmoment.xls", 'a') as output:
        output.write (str (sayacmoment[ j ]) + '\n')
        j += 1
```

EK-2. PLAXIS – Python kodları, çivi destekli derin kazı vakası

```
import imp
from math import pi
from math import log
from math import sqrt
from math import pow
from math import sin
import random

# Python-Plaxis Bağlantısı
localhostport_input = 10000
localhostport_output = 10001
plaxis_path = r"C:\\Program Files (x86)\Plaxis\PLAXIS 2017.00\PLAXIS 2D"
found_module = imp.find_module('plxscripting', [plaxis_path])
plxscripting = imp.load_module('plxscripting', *found_module)
from plxscripting.easy import *

s_i, g_i = new_server('localhost', localhostport_input)
s_o, g_o = new_server('localhost', localhostport_output)

# Geometri,Mesh ve İmalat Aşamalarının Oluşturulması
g_i.SoilContour.initializerectangular(0, 0, 45, 20)
g_i.setproperties(
   "Title", "Soil Nailed Wall_500",
   "Comments", "",
   "UnitForce", "kN",
   "UnitLength", "m",
   "UnitTime", "day",
   "WaterWeight", 10,
   "ModelType", "PlaneStrain",
   "ElementType", "15-Noded")
g_i.gotostructures()
g_i.polygon((0, 0), (0, 20), (45, 20), (45, 0))
```

EK-2. (devam) PLAXIS – Python kodları, çivi destekli derin kazı vakası

```
g_i.plate(12.372, 20, 10.2561, 8)

g_i.geogrid ((12.2838, 19.5), (16.2231, 18.8054))
g_i.geogrid ((12.0193, 18), (15.9586, 17.3054))
g_i.geogrid ((11.7548, 16.5), (17.6637, 15.4581))
g_i.geogrid ((11.4903, 15), (19.3688, 13.6108))
g_i.geogrid ((11.2258, 13.5), (19.1043, 12.1108))
g_i.geogrid ((10.9614, 12), (18.8398, 10.6108))
g_i.geogrid ((10.6969, 10.5), (16.6057, 9.4581))
g_i.geogrid ((10.4324, 9), (14.3716, 8.3054))

g_i.line ((0, 18.5071761109438), (12.108777827762164, 18.5071761109438))
g_i.line ((0, 17), (11.843025, 17))
g_i.line ((0, 15.5), (11.5785375, 15.5))
g_i.line ((0, 14), (11.31405, 14))
g_i.line ((0, 12.5), (11.0495625, 12.5))
g_i.line ((0, 11), (10.785074999999999, 11))
g_i.line ((0, 9.5), (10.5205875, 9.5))
g_i.line ((0, 8), (10.2561, 8))

g_i.point ((13.9, 20), (15.22, 20), (16.32, 20), (17.56, 20),(20.82, 20), (23.38, 20), (31.82,
20), (42.48, 20) )

g_i.lineload((14, 20), (40, 20), ("qy_start", -10))

# Plate Malzemelerinin Tanımlanıp Atanması
material_plate = g_i.platemat()
material_plate.setproperties(
    "MaterialName", "Puskurtme Beton",
    "MaterialNumber", 0,
    "Elasticity", 0,
    "IsIsotropic", True,
```

EK-2. (devam) PLAXIS – Python kodları, çivi destekli derin kazı vakası

```
    "IsEndBearing", False,
    "EA", 4.00E+06,
    "EA2", 4.00E+06,
    "EI", 1.33E+04,
    "nu", 0.2,
    "d", 0.2,
    "w", 2.8,
    "Mp", 1.00000000000000000E+015,
    "Np", 1.00000000000000000E+010,
    "Np2", 1.00000000000000000E+010,
    "RayleighAlpha", 0,
    "RayleighBeta", 0,
    "Gref", 8333333.333)
g_i.Plates[0].Material = material_plate

# Geogrid Malzemelerinin Tanımlanıp Atanması
material_geogrid = g_i.geogridmat()
material_geogrid.setproperties(
    "MaterialName", "NAIL",
    "Colour", 65535,
    "MaterialNumber", 0,
    "Elasticity", 0,
    "IsIsotropic", True,
    "EA1", 103989,
    "EA2", 103989)
for j in range(len(g_i.Geogrids)):
    g_i.Geogrids[j].Material = material_geogrid

# Mesh Tanımlanması
g_i.gotomesh()
g_i.mesh(0.06)
output_port = g_i.selectmeshpoints()
```

EK-2. (devam) PLAXIS – Python kodları, çivi destekli derin kazı vakası

```
g_o.addcurvepoint('node', (10.2561, 8))
g_o.update()



# İmalat Aşamalarının Tanımlanması
# İlk Aşamanın Tanımlanması
g_i.gotostages()
g_i.set(g_i.InitialPhase.Identification, "Baslangic")
g_i.set(g_i.InitialPhase.DeformCalcType, "K0 procedure")

# 1. Aşamanın Tanımlanması
Phase_1 = g_i.phase(g_i.Phases[0])
g_i.set(g_i.Phase_1.Identification, "E1")
g_i.Soil_1_1.Active[g_i.Phase_1] = False
g_i.Geogrids[1].Active[g_i.Phase_1] = True
m = 1
for m in range(2):
    g_i.Plates[m].Active[g_i.Phase_1] = True
g_i.set(g_i.Phase_1.Deform.UseDefaultIterationParams, False)
g_i.set(g_i.Phase_1.Deform.ToleratedError, 0.03)

# 2. Aşamanın Tanımlanması
m = 3
Phase_2 = g_i.phase(g_i.Phases[1])
g_i.set(g_i.Phase_2.Identification, "E2")

g_i.Soil_1_2.Active[g_i.Phase_2] = False
g_i.Geogrids[3].Active[g_i.Phase_2] = True
for m in range(4):
    g_i.Plates[m].Active[g_i.Phase_2] = True

# 3. Aşamanın Tanımlanması
```

EK-2. (devam) PLAXIS – Python kodları, çivi destekli derin kazı vakası

```
m = 5
Phase_3 = g_i.phase(g_i.Phases[2])
g_i.set(g_i.Phase_3.Identification, "E3")
g_i.Soil_1_3.Active[g_i.Phase_3] = False
g_i.Geogrids[5].Active[g_i.Phase_3] = True
for m in range(6):
    g_i.Plates[m].Active[g_i.Phase_3] = True

# 4. Aşamanın Tanımlanması
m = 7
Phase_4 = g_i.phase(g_i.Phases[3])
g_i.set(g_i.Phase_4.Identification, "E4")
g_i.Soil_1_4.Active[g_i.Phase_4] = False
g_i.Geogrids[7].Active[g_i.Phase_4] = True
for m in range(8):
    g_i.Plates[m].Active[g_i.Phase_4] = True

# 5. Aşamanın Tanımlanması
m = 9
Phase_5 = g_i.phase(g_i.Phases[4])
g_i.set(g_i.Phase_5.Identification, "E5")
g_i.Soil_1_5.Active[g_i.Phase_5] = False
g_i.Geogrids[9].Active[g_i.Phase_5] = True
for m in range(10):
    g_i.Plates[m].Active[g_i.Phase_5] = True

# 6. Aşamanın Tanımlanması
m = 11
Phase_6 = g_i.phase(g_i.Phases[5])
g_i.set(g_i.Phase_6.Identification, "E6")
g_i.Soil_1_6.Active[g_i.Phase_6] = False
g_i.Geogrids[10].Active[g_i.Phase_6] = True
```

EK-2. (devam) PLAXIS – Python kodları, çivi destekli derin kazı vakası

```
for m in range(m + 1):
    g_i.Plates[m].Active[g_i.Phase_6] = True
g_i.set(g_i.Phase_6.Deform.UseDefaultIterationParams, False)
g_i.set(g_i.Phase_6.Deform.ToleratedError, 0.03)

# 7. Aşamanın Tanımlanması
m = 13
Phase_7 = g_i.phase(g_i.Phases[6])
g_i.set(g_i.Phase_7.Identification, "E7")
g_i.Soil_1_7.Active[g_i.Phase_7] = False
g_i.Geogrids[12].Active[g_i.Phase_7] = True
for m in range(14):
    g_i.Plates[m].Active[g_i.Phase_7] = True
g_i.set(g_i.Phase_7.Deform.UseDefaultIterationParams, False)
g_i.set(g_i.Phase_7.Deform.ToleratedError, 0.04)

# 8. Aşamanın Tanımlanması
m = 15
Phase_8 = g_i.phase(g_i.Phases[7])
g_i.set(g_i.Phase_8.Identification, "E8")
g_i.Soil_1_9.Active[g_i.Phase_8] = False
g_i.Geogrids[14].Active[g_i.Phase_8] = True
for m in range(16):
    g_i.Plates[m].Active[g_i.Phase_8] = True
g_i.set(g_i.Phase_8.Deform.UseDefaultIterationParams, False)
g_i.set(g_i.Phase_8.Deform.ToleratedError, 0.05)

# 9. Aşamanın Tanımlanması
Phase_9 = g_i.phase(g_i.Phases[8])
g_i.set(g_i.Phase_9.Identification, "L")
for s in range(len(g_i.LineLoads)):
    g_i.LineLoads[s].Active[g_i.Phase_9] = True
```

EK-2. (devam) PLAXIS – Python kodları, çivi destekli derin kazı vakası

```
g_i.set(g_i.Phase_9.Deform.UseDefaultIterationParams, False)
g_i.set(g_i.Phase_9.Deform.ToleratedError, 0.05)

# Plaxis Dosyasının Kaydedilmesi
save_path = "C:\\Users\\user\\Desktop\\Vaka Tez500\Plaxis\Soil Nailed Wall_500"
g_i.save(save_path)

# Degisken Zemin Tanımlanması (İterasyon Başlangıç)
Iterasyon = 501
sayacemodulus = []
sayacıcselsurtunme = []
sayacgamma = []
sayacdeplasman = []
sayacxcoord =[]
sayacycoord =[]
data = 1
while data < Iterasyon:
    print(data)
    # Degisken Zemin Malzemelerinin Tanımlanıp Atanması
    g_i.gotostructures()
    material_grovak = g_i.soilmat()
    cohesion = 1
    gamma = 20
    cov_gamma = 3.3
    gamma = random.normalvariate(gamma, gamma * cov_gamma / 100)
    print("gamma:" + ("{:.2f}".format(gamma)))

    phi = 36
    cov_phi = 6.48
    phi = random.normalvariate(phi, phi * cov_phi / 100)
```

EK-2. (devam) PLAXIS – Python kodları, çivi destekli derin kazı vakası

```
    print("içsel sürtünme:" + ("{:.2f}".format(phi)))

    emodulus = (2.857 * phi - 50) * 1000
    print("Emodulus:" + ("{:.2f}".format(emodulus)))

    sayacgamma.append(gamma)
    sayacıcselsurtunme.append(phi)
    sayacemodulus.append(emodulus)
    material_grovak.setproperties(
        "MaterialName", "Grovak_" + str(data),
        "SoilModel", 2,
        "DrainageType", 0,
        "K0Determination", 1,
        "K0PrimaryIsK0Secondary", True,
        "gammaUnsat", gamma,
        "gammaSat", gamma,
        "nu", 0.25,
        "Gref", 0.4 * emodulus,
        "cref", cohesion,
        "phi", phi,
        "psi", 0,
        "K0Primary", 1 - sin(phi * pi / 180),
        "K0Secondary", 1 - sin(phi * pi / 180))
    g_i.Soils[0].Material = material_grovak

    # Mesh Tanımlanması
    g_i.gotomesh()
    g_i.mesh(0.06)

    # Analiz
    g_i.gotostages()
    for i in range(len(g_i.Phases)):
```

EK-2. (devam) PLAXIS – Python kodları, çivi destekli derin kazı vakası

```
        g_i.set(g_i.Phases[i].ShouldCalculate, True)
    g_i.calculate()

    # Hata Kodu Veren Phase Tespiti
    yazi = g_i.echo(g_i.Phases[-1].CalculationResult)
    if yazi == "Phase_9.CalculationResult: OK (1)":
        g_i.view(g_i.Phase_8)
        # Kazık Geometrik Koşullarının Tanımlanması:
        x_down = 10
        x_up = 12.5
        y_down = 8
        y_up = 20.1
        minUx = 0.0
        xAtMinUx = 0.0
        yAtMinUx = 0.0

        # Son Kazı ve Çivi İmalatından İtibaren (phase_8) Maks. Deplasman tespiti
        for phase in g_o.Phases[8:]:
            # Sonuc dosyalarına ulasılması
            plateX = g_o.getresults(phase, g_o.ResultTypes.Plate.X, 'node')
            plateY = g_o.getresults(phase, g_o.ResultTypes.Plate.Y, 'node')
            plateUx = g_o.getresults(phase, g_o.ResultTypes.Plate.Ux, 'node')
            # Maks. deplasmanın tespiti
            for x, y, Ux in zip(plateX, plateY, plateUx):
                if x_down < x < x_up:
                    if y_down < y < y_up:
                        if Ux < minUx:
                            minUx = Ux
                            xAtMinUx = x
                            yAtMinUx = y
        sayacdeplasman.append(minUx)
        sayacxcoord.append(xAtMinUx)
```

EK-2. (devam) PLAXIS – Python kodları, çivi destekli derin kazı vakası

```
        sayacycoord.append(yAtMinUx)
        print (sayacdeplasman [data-1])
        print("Maximum lateral displacement: ux={:.3f} m at (X, Y)=({:.2f}, {:.2f}
)".format(minUx, xAtMinUx, yAtMinUx))
        g_o.close()
    else:
        collapse = 0
        for p in range(len(g_i.Phases)):
            phase_num = g_i.Phases[p]
            phase_loginfo = g_i.echo(phase_num.LogInfo)
            error = phase_loginfo.find('Soil')
            print(error)
            if error > 0:
                collapse = collapse + 1
            else:
                collapse = collapse
            p += 1
        if collapse == 1:
            sayacdeplasman.append("Soil Collapse")
            print("Soil Collapse")
        else:
            sayacdeplasman.append("Load Advancement")
            print("Load Advancement")
    print(len(sayacdeplasman))
    data += 1
# Sonucların Yazdırılması
k = 0
for k in range(len(sayacemodulus)):
    with open("Emodulus.xls", 'a') as output:
        output.write(str(sayacemodulus[k]) + '\n')
        k += 1
l = 0
```

EK-2. (devam) PLAXIS – Python kodları, çivi destekli derin kazı vakası

```
for l in range(len(sayacıcselsurtunme)):
    with open("Icselsurtunme.xls", 'a') as output:
        output.write(str(sayacıcselsurtunme[l]) + '\n')
        l += 1
m = 0
for m in range(len(sayacgamma)):
    with open("Gamma.xls", 'a') as output:
        output.write(str(sayacgamma[m]) + '\n')
        m += 1
n = 0
for n in range(len(sayacdeplasman)):
    with open("Yanaldeplasman.xls", 'a') as output:
        output.write(str(sayacdeplasman[n]) + '\n')
        n += 1
```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BOZKURT, Sinem
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 18.05.1990, Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 255 21 92
e-mail : sinem.bozkurt@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2013
Lise	Gazi Anadolu Lisesi	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2015-Halen	Akademi Etüt Proje Mühendislik	Proje Mühendisi
2014-2015	NDA Mimarlık Mühendislik	Proje Mühendisi
2013-2014	Yolsu Mühendislik Hizmetleri Ltd. Şti.	Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Bozkurt, S., Akbas, S. O. (2018, 14-16 Kasım). *Geoteknik risk analizinde sonlu elemanlar teorisinin kullanımı: Ankraj destekli derin kazılar için bir uygulama.* International Congress on Engineering and Architecture (ENAR– 2018), Alanya.

Hobiler

Tiyatro, Yüzme

GAZİ GELECEKTİR...