

**T.C.**  
**İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**TEMEL OTURMALARININ RASTGELE ALAN ZEMİN  
PARAMETRELERİ İLE ANALİZİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Ahmet Can MERT**

**1101010004**

**Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Program: GEOTEKNİK**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan YAZICI**

**OCAK, 2023**

T.C.  
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TEMEL OTURMALARININ RASTGELE ALAN ZEMİN  
PARAMETRELERİ İLE ANALİZİ

DOKTORA TEZİ  
Ahmet Can MERT  
1101010004

Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
Program: GEOTEKNİK

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan YAZICI  
İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hadi KHANBABAZADEH  
Juri Üyeleri: Dr. Öğr. Üyesi Erdal COŞKUN  
Doç. Dr. Havvanur KILIÇ  
Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN  
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Rifat KAHYAOĞLU

OCAK, 2023



*Aileme ve Açelya'ya*

## ÖNSÖZ

Tez sürecinde beni en iyi şekilde yönlendiren ve tecrübelerini aktaran danışmanlarım Dr. Öğr. Üyesi Gökhan YAZICI ve Dr. Öğr. Üyesi Hadi KHANBABAZADEH ile, bu süreçteki izleme raporlarındaki katkılarıyla çalışmayı geliştiren jüri üyeleri Doç. Dr. Havvanur KILIÇ ve Dr. Öğr. Üyesi Erdal COŞKUN' a saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez savunma sınavındaki katkıları için jüri üyeleri Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Rifat KAHYAOĞLU' na teşekkür ederim.

Lisans eğitimimden itibaren iyi bir Geoteknik Mühendisi olarak yetiştirme konusunda engin tecrübe ve bilgilerini benden esirgemeyen, beni "Risk ve Güvenilirlik" alanına yönlendirip bu konuda gelişmemi sağlayan yüksek lisans tez danışmanım Doç. Dr. Ersin AREL ve değerli hocam Prof. Dr. Akın ÖNALP' e, birlikte asistanlık yaptığımız süreçte sayısal modelleme konusundaki tecrübelerini benden esirgemeyen Dr. İlhan Burak DURAN' a ve beni bugünlere kadar büyütüp zahmetlere katlanan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, çalışma kapsamında tamamlanan proje ve konferanslarda destek sağlayan İstanbul Kültür Üniversitesi (İKÜ) Teknoloji Proje Destek Birimi ile İKÜ Bilimsel Araştırma Proje Koordinasyon Birimi' ne teşekkürlerimi sunarım.

Ocak, 2023

Ahmet Can MERT

<b>İÇİNDEKİLER</b>	
<b>ÖNSÖZ</b> .....	i
<b>KISALTMALAR</b> .....	iii
<b>TABLO DİZİNİ</b> .....	iii
<b>ŞEKİL DİZİNİ</b> .....	iv
<b>SİMGELER</b> .....	vi
<b>ÖZET</b> .....	viii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Amaç .....	1
1.2. Literatür Araştırması.....	1
1.3. Hedeflenen Katkı .....	3
1.4. Hipotez ve Hedef.....	5
1.5. Yöntem .....	7
1.6. Analiz Parametreleri.....	7
1.7. Planlanan İnceleme ve Değerlendirmeler .....	8
<b>2. RASTGELE ALAN TEORİSİ</b> .....	8
2.1. Rastgele Sonlu Elemanlar Analizi.....	10
2.2. Rastgele Alanın Ayrıklaştırılması ( <i>Random Field Discretization</i> ).....	14
2.3. Rastgele Alan ve Sonlu Eleman Ağlarının Oluşturulması.....	18
2.4. Olasılık Tabanlı Sonlu Elemanlar Matrisinin ve Malzeme Modelinin Formülasyonu.....	18
<b>3. SAYISAL MODEL BİLGİLERİ</b> .....	21
3.1. Model Sınırları ve Geometrik Boyutların Belirlenmesi.....	23
3.2. Eleman Bilgileri ve Zemin-Temel Ara Yüzey Özellikleri.....	24
3.3. Yükleme Sınırlarının Belirlenmesi .....	29
3.4. Parametreler için Belirlenen Limit Değerler ve Hasar Sınırları .....	30
3.5. Rastgele Alanların Oluşturulması .....	33
3.6. Model Doğrulama Çalışmaları.....	43
3.7. Sayısal Analiz Modellerinin Kurulumu .....	47
<b>4. ANALİZ SONUÇLARI VE BULGULAR</b> .....	51
4.1. Toplam Oturma için Tehlike Eğrileri .....	54
4.2. Açısal Dönmeğe göre Tehlike Eğrileri.....	61
4.3. Tehlike Eğrilerinin Geçerliliğinin Doğrulanması.....	64
4.4. Önerilen Kil Tehlike Eğrileri için Örnek Problem Çözümü.....	68
4.5. Önerilen Kum Tehlike Eğrileri için Örnek Problem Çözümü.....	71
<b>5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA</b> .....	75
5.1. Tamamlanan, Devam Eden ve Planlanan Çalışmalar .....	76
<b>KAYNAKÇA</b> .....	78
<b>EKLER</b> .....	86
EK. A. Rastgele Alan Üretiminde Kullanılan MATLAB Kod Satırları .....	87
EK. B. Toplam Oturma Tehlike Eğrileri.....	92
EK. C. Açısal Dönme Tehlike Eğrileri .....	99
EK. D. Birinci Dereceden Güvenilirlik Yöntemi (FORM) Çözümü .....	106
EK. E. Tamamlanmış ve Devam Eden Çalışma Özetleri .....	109

## KISALTMALAR

CDF	: Yığılımlı dağılım fonksiyonu ( <i>cumulative distribution function</i> )
COV	: Değişme katsayısı ( <i>coefficient of variation</i> )
CPT	: Koni penetrasyon deneyi ( <i>cone penetration test</i> )
DD	: Ölü yük ( <i>dead load</i> )
FE	: Sonlu elemanlar (finite elements)
FEM	: Sonlu elemanlar yöntemi ( <i>finite element method</i> )
FKN	: Normal rijitlik oranı ( <i>normal stiffness factor</i> )
FORM	: Birinci dereceden güvenilirlik yöntemi ( <i>first order reliability method</i> )
KL	: Karhunen-Loeve
LL	: Hareketli yük ( <i>live load</i> )
MC	: Mohr-Coulomb
OLE	: <i>Optimal linear estimation</i>
EOLE	: <i>Expansion optimal linear estimation</i>
PDF	: Olasılık yoğunluk fonksiyonu ( <i>probability density function</i> )
RBD	: Güvenilirliğe dayalı tasarım ( <i>reliability-based design</i> )
RC	: Güvenilirlik sınıfı ( <i>reliability class</i> )
RF	: Rastgele alan
RFEM	: Rastgele sonlu elemanlar yöntemi ( <i>random finite element method</i> )
SE	: Seri açılımı ( <i>series expansion</i> )
SFEM	: Stokastik sonlu elemanlar yöntemi ( <i>stochastic finite element method</i> )
SLS	: Hizmet görülebilirlik sınır durumu ( <i>serviceability limit state</i> )

## TABLO DİZİNİ

Tablo 3.1. Sabit parametre değerleri .....	30
Tablo 3.2. Kil modeller için değişken parametre değerleri.....	31
Tablo 3.3. Kum modeller için değişken parametre değerleri.....	31
Tablo 3.4. Korelasyon uzunlukları.....	32
Tablo 3.5. Hasar sınırları için deformasyon limitleri.....	32
Tablo 3.6. Kil modellerin eşdeğer normal dağılım parametreleri.....	34
Tablo 3.7. Kum modeller için eşdeğer normal dağılım parametreleri.....	35
Tablo 3.8. Doğrulama analizi karşılaştırmalı sonuçları .....	46
Tablo 4.1. Kil modeller için yenilme olasılıkları .....	56
Tablo 4.2. Kum modeller için yenilme olasılıkları .....	58
Tablo 4.3. TX-CPTU veri tabanı rastgele alan parametrelerinin istatistikleri .....	65
Tablo 4.4. SC-CPTU veri tabanı rastgele alan parametrelerinin istatistikleri.....	67
Tablo 4.5. Örnek temel boyutlandırmanın farklı yöntemlerle karşılaştırılması.....	71
Tablo 4.6. Farklı zemin değişkenliğinde boyutlandırma sonuçlarının karşılaştırılması .....	71
Tablo 4.7. Temel boyutlandırmasının analitik ve olasılık tabanlı yöntemlerle karşılaştırılması .....	73
Tablo 4.8. Farklı değişkenlik seviyeleri için temel tasarımlarının karşılaştırılması ..	74

## ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 1.1. Rastgele sonlu elemanlar yöntemi akış şeması.....	6
Şekil 1.2. Temsili hipotez tehlike eğrileri .....	7
Şekil 2.1. Bir değişkenin farklı korelasyon durumlarında rastgele alandaki değişimi (Baecher ve Christian, 2003) .....	12
Şekil 2.2. Bir değişkenin farklı $\theta$ değerlerinde rastgele alandaki değişimi (Griffiths ve Fenton, 2007) .....	13
Şekil 2.3. Temsili iki boyutlu bir rastgele alan gerçekleşimi (Griffiths ve Fenton, 2007) .....	13
Şekil 2.4. RFEM ayrıklaştırma adımları .....	15
Şekil 2.5. Doğrusal elasto-plastik modelde gerilme- birim şekil değiştirme davranışı (Kohnke, 2009) .....	20
Şekil 2.6. Mohr-Coulomb yenilme yüzeyi (Kohnke, 2009).....	21
Şekil 3.1. Temsili kil modeli .....	22
Şekil 3.2. Temsili kum modeli .....	23
Şekil 3.3. a) Kil, b) kum modeli sınırları ve deformasyon konturları .....	24
Şekil 3.4. SOLID187- 10 düğüm noktalı düzgün dörtyüzlü katı cisim (Kohnke, 2009) .....	25
Şekil 3.5. ANSYS ara yüzey tanımlama .....	26
Şekil 3.6. CONTA174- üç boyutlu 8 düğüm noktalı yüzeyden yüzeye temas cisim (Kohnke, 2009) .....	26
Şekil 3.7. ANSYS' te temas algılama noktaları (Kohnke, 2009) .....	27
Şekil 3.8. TARGE170- Üç boyutlu hedef cisim (Kohnke, 2009) .....	28
Şekil 3.9. ANSYS ara yüzey modeli (Kohnke, 2009).....	29
Şekil 3.10. a) Kil, b) Kum modeller için yükleme sınırları .....	30
Şekil 3.11. KİL1 modelin düşük değişkenlik durumu için temsili $c$ , $\phi$ , $E_d$ rastgele alanları.....	38
Şekil 3.12. KİL7 modelin orta değişkenlik durumu için temsili $c$ , $\phi$ , $E_d$ rastgele alanları .....	39
Şekil 3.13. KİL12 modelin yüksek değişkenlik durumu için temsili $c$ , $\phi$ , $E_d$ rastgele alanları.....	40
Şekil 3.14. KUM1 modelin düşük değişkenlik durumu için temsili $\phi$ , $E_d$ rastgele alanları.....	41
Şekil 3.15. KUM6 modelin orta değişkenlik durumu için temsili $\phi$ , $E_d$ rastgele alanları .....	42
Şekil 3.16. KUM10 modelin yüksek değişkenlik durumu için temsili $\phi$ , $E_d$ rastgele alanları.....	43
Şekil 3.17. a) Kil, b) kum modeli için iyileştirilmiş sonlu eleman ağı .....	44
Şekil 3.18. a) Kil, b) kum modeli için farklı mesh ayarları ile yük-deformasyon grafiği .....	45
Şekil 3.19. Literatürdeki temsili E rastgele alanı (Yue ve Yao, 2020) .....	45
Şekil 3.20. Referans modeldeki parametreler kullanılarak çalışmadaki yöntemle oluşturulan rastgele alan gerçekleştirmeleri .....	46
Şekil 3.21. Hesaplanan ve referans çalışma için toplam oturma PDF' leri .....	47
Şekil 3.22. Kil sayısal analiz modelleri.....	48
Şekil 3.23. Kum sayısal analiz modelleri.....	49
Şekil 3.24. Çalışmanın ana akışı .....	50
Şekil 4.1. Temeldeki maksimum oturma ve açılma dönme.....	51
Şekil 4.2. Temsili bir model için toplam oturma sonuç dağılımı ve lognormal PDF 52	

Şekil 4.3. Temsili bir model için açısıl dönme sonuç dağılımı ve gama PDF .....	52
Şekil 4.4. a) Kil modeller ve b) kum modeller için temsili test tehlike eğrileri.....	54
Şekil 4.5. Kil 4 orta değişkenlik kategorisi için kullanılan temsili CDF .....	55
Şekil 4.6. Kil modellerden toplam oturma durumu için temsili bir tehlike eğrisi .....	60
Şekil 4.7. Kum modellerden toplam oturma durumu için temsili bir tehlike eğrisi ..	61
Şekil 4.8. Kum 3 yüksek değişkenlik kategorisi için kullanılan temsili CDF .....	62
Şekil 4.9. Kil modellerden temel açısıl dönmesi için temsili bir tehlike eğrisi.....	63
Şekil 4.10. Kum modellerden temel açısıl dönmesi için temsili bir tehlike eğrisi....	63
Şekil 4.11. CPT veritabanı ile kil tehlike eğrilerinin doğrulanması.....	66
Şekil 4.12. CPT veri tabanı ile kum tehlike eğrilerinin doğrulanması.....	68
Şekil 4.13. Kil örneğindeki yapının geometrisi .....	69
Şekil 4.14. Örnekte kullanılan kil tehlike eğrisi.....	70
Şekil 4.15. Kum örneğindeki yapının geometrisi.....	73
Şekil 4.16. Örnekte kullanılan kum tehlike eğrisi.....	74
Şekil B.1. $\theta_h/\theta_v=2$ oranı için kil düşük değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri ..	93
Şekil B.2. $\theta_h/\theta_v=2$ oranı için kil orta değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri.....	93
Şekil B.3. $\theta_h/\theta_v=2$ oranı için kil yüksek değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri.	94
Şekil B.4. $\theta_h/\theta_v=10$ oranı için kil düşük değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri	94
Şekil B.5. $\theta_h/\theta_v=10$ oranı için kil orta değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri....	95
Şekil B.6. $\theta_h/\theta_v=10$ oranı için kil yüksek değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri .....	95
Şekil B.7. $\theta_h/\theta_v=2$ oranı için kum düşük değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri	96
Şekil B.8. $\theta_h/\theta_v=2$ oranı için kum orta değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri...	96
Şekil B.9. $\theta_h/\theta_v=2$ oranı için kum yüksek değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri .....	97
Şekil B.10. $\theta_h/\theta_v=8$ oranı için kum düşük değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri .....	97
Şekil B.11. $\theta_h/\theta_v=8$ oranı için kum orta değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri.	98
Şekil B.12. $\theta_h/\theta_v=8$ oranı için kum yüksek değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri .....	98
Şekil C.1. $\theta_h/\theta_v=2$ oranı için kil düşük değişkenlik açısıl dönme tehlike eğrileri...100	100
Şekil C.2. $\theta_h/\theta_v=2$ oranı için kil orta değişkenlik açısıl dönme tehlike eğrileri.....	100
Şekil C.3. $\theta_h/\theta_v=2$ oranı için kil yüksek değişkenlik açısıl dönme tehlike eğrileri...101	101
Şekil C.4. $\theta_h/\theta_v=10$ oranı için kil düşük değişkenlik açısıl dönme tehlike eğrileri...101	101
Şekil C.5. $\theta_h/\theta_v=10$ oranı için kil orta değişkenlik açısıl dönme tehlike eğrileri.....102	102
Şekil C.6. $\theta_h/\theta_v=10$ oranı için kil yüksek değişkenlik açısıl dönme tehlike eğrileri..102	102
Şekil C.7. $\theta_h/\theta_v=2$ oranı için kum düşük değişkenlik açısıl dönme tehlike eğrileri..103	103
Şekil C.8. $\theta_h/\theta_v=2$ oranı için kum orta değişkenlik açısıl dönme tehlike eğrileri....103	103
Şekil C.9. $\theta_h/\theta_v=2$ oranı için kum yüksek değişkenlik açısıl dönme tehlike eğrileri.104	104
Şekil C.10. $\theta_h/\theta_v=8$ oranı için kum düşük değişkenlik açısıl dönme tehlike eğrileri.104	104
Şekil C.11. $\theta_h/\theta_v=8$ oranı için kum orta değişkenlik açısıl dönme tehlike eğrileri...105	105
Şekil C.12. $\theta_h/\theta_v=8$ oranı için kum yüksek değişkenlik açısıl dönme tehlike eğrileri.....105	105
Şekil D.1. Kil modeller için FORM çözümü kısmi hesap tablosu.....	108

## SİMGELER

$\beta$	: Güvenilirlik indisi
$\beta_{\text{Hedef}}$	: Hedef güvenilirlik indisi
$\delta$	: Oturma farkı
$\varepsilon, \varepsilon^e, \varepsilon^p$	: Toplam, elastik ve plastik birim şekil değiştirme
$\phi$	: Zemin kayma direnci açısı
$\gamma$	: Birim hacim ağırlık
$\lambda$	: Plastik çarpan
$\lambda_i$	: Rastgele alan özdeğerleri
$\lambda_{i+1}$	: Lagrange çarpanı
$\mu$	: Ortalama, normal dağılım ortalaması
$\mu^{\text{LN}}$	: Lognormal değişkenin eşdeğer normal dağılım ortalaması
$\nu$	: Poisson oranı
$\Omega_e, \Omega$	: Sonlu eleman, Gauss rastgele değişken tanım kümesi
$\psi$	: Zemin kabarma açısı
$\rho$	: Korelasyon fonksiyonu
$\sigma$	: Standart sapma
$\sigma^2$	: Varyans
$\{\sigma\}$	: Gerilme vektörü
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	: Asal gerilmeler
$\sigma_{v0}$	: Düşey toplam gerilme
$\sigma'_{v0}$	: Düşey efektif gerilme
$\theta, \theta_h, \theta_v$	: Korelasyon uzunluğu, yatay ve düşey korelasyon uzunluğu
$\Theta_h$	: Boyutsuz yatay korelasyon uzunluğu
$\tau$	: İki rastgele değişken arası mesafe
$\xi_i(\theta)$	: Standart normal değişken
$B$	: Temel genişliği
$\mathbf{B}$	: Bünye matrisi
$c, c_u$	: Zemin kohezyonu, drenajsız kayma direnci
$\mathbf{D}$	: Elastisite matrisi
$D_f$	: Temel gömme derinliği
$d_c, d_q, d_\gamma$	: Temel derinlik faktörleri
$E, E_d$	: Elastisite modülü, Zemin deformasyon modülü
$\mathbf{F}$	: Yük vektörü
$F_i$	: Rastgele alan matrisi
$F_y$	: Yenilme yüzeyi
$f_i$	: Rastgele alan gerçekleşimi
$f(\mathbf{x}, \theta)$	: Rastgele alan fonksiyonu
$\hat{f}(\mathbf{x}, \theta)$	: Ayrıklaştırılmış rastgele alan fonksiyonu
$g_i(\mathbf{x})$	: Rastgele alan özfonksiyonu
$H$	: Sayısal model yüksekliği
$I_c$	: Zemin tipi davranış indisi
$i_c, i_q, i_\gamma$	: Yük eğim faktörleri
$\mathbf{K}$	: Global rijitlik matrisi
$\mathbf{K}_0$	: Ortalama rijitlik matrisi
$K_r$	: Temel rijitliği
$K_n$	: Rijitlik oranı
$\mathbf{k}^e$	: Sonlu eleman rijitlik matrisi

$L$	: Sayısal model uzunluğu
$L_1, L_2, L_3, L_4$	: Üç boyutlu sonlu eleman normalize uzunlukları
$M$	: Plastik uygunluk matrisi
$N_i(\mathbf{x})$	: Rastgele alan biçim fonksiyonu
$N_c, N_q, N_\gamma$	: Taşıma gücü faktörleri
$\mathbf{n}$	: Eşdeğer standart normal değişken vektörü
$P$	: Basınç
$P_f$	: Yenilme olasılığı
$p_0$	: Temel eşdeğer örtü yükü
$Q$	: Plastik potansiyel
$q$	: Deviator gerilme
$q_c$	: Koni uç direnci
$q_u$	: Temel son taşıma gücü
$\mathbf{R}$	: Korelasyon matrisi
$r_0$	: Temel eşdeğer yarıçapı
$S_c, S_q, S_\gamma$	: Temel şekil faktörleri
$S_{maks}, S_{min}$	: Temel maksimum ve minimum oturması
$s, t$	: İki boyutlu sonlu eleman normalize koordinatları
$t_{Temel}$	: Temel kalınlığı
$\mathbf{U}$	: Yer değiştirme vektörü
$u_n$	: Düğüm noktası yer değiştirmesi
$u, v, w$	: Sonlu elemanın üç eksenindeki ötelenmeler
$\mathbf{x}$	: Rastgele değişken vektörü
$x_i$	: Rastgele değişken

Enstitü : Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği  
Programı : Geoteknik  
Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Gökhan Yazıcı  
İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Hadi Khanbabazadeh  
Tez Türü ve Tarihi : Doktora- 2023

## ÖZET

### TEMEL OTURMALARININ RASTGELE ALAN ZEMİN PARAMETRELERİ İLE ANALİZİ

Ahmet Can MERT

Geoteknik Mühendisliği açısından temel tasarımındaki en önemli adım zemin parametrelerinin doğru seçimidir. Zemindeki doğal değişkenliğin bu seçimde göz önüne alınması gerçeğe yakın çözüme ulaşmada önemli rol oynamaktadır. Tez çalışmasındaki temel amaç, zemin parametrelerinde meydana gelen değişkenliği rastgele alan teorisi (*random field theory*) ile tanımlayarak yüzeysel temel hareketlerini olasılık tabanlı incelemektir. Böylece, zemin parametrelerindeki değişim göz önüne alınarak, yüzeysel temel boyutlandırma yol gösteren tehlike eğrileri (*hazard curve*) oluşturulması hedeflenmiştir. Mohr-Coulomb yenilme kriteri ile elasto-plastik zemin davranışı rastgele sonlu elemanlar yöntemine (RFEM-*Random finite element method*) uyarlanmış, zemin deformasyon modülü ( $E_d$ ), kohezyon ( $c$ ) ve kayma direnci açısı ( $\phi$ ) parametreleri iki boyutlu rastgele alan olarak tanımlanmıştır. İnce ve iri daneli zeminlere oturan yüzeysel temellerdeki oturma ve açısız dönmeler, parametrelerin uzamsal değişimi (*spatial variation*) ile ele alınarak yük-deformasyon davranışındaki etki araştırılmıştır. Zeminin yatay ve düşeydeki uzamsal değişkenliği, rastgele alanda korelasyon uzunluklarının (*correlation length*,  $\theta_v$ ,  $\theta_h$ ) değişimi ile temsil edilmiştir. Başlıca parametrelerle ( $E_d$ ,  $\theta_v$  ve  $\theta_h$ ) birlikte zemin kayma direnci parametreleri ( $c$  ve  $\phi$ ) rastgele alan olarak tanımlanmış, böylece tüm parametrelerin yüzeysel temel hareketlerine etkisi incelenmiştir. MATLAB ile rastgele alanlar üretilmiş ve sonlu elemanlar analizinde tekrarlı çözümlerle toplam oturma için lognormal, temel açısız dönme değerleri için gama olasılık yoğunluk fonksiyonlarına (*PDF-Probability Density Function*) uyan sonuçlar elde edilmiştir. Oluşturulan PDF'lerle, belirlenen hasar sınırları için yenilme olasılıkları ( $P_f$ ) hesaplanmıştır. Tüm parametrelerdeki değişiminin etkileriyle, temel hareketleri için tehlike eğrileri (*hazard curve*) önerilmiştir. Bu tehlike eğrileri, Uluslararası Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Birliğinin TC304 numaralı risk değerlendirme teknik komitesi koni penetrasyon deneyi veri tabanları ile test edilmiştir. Bu sayede zemin değişkenliğinin etkisiyle, temel oturmaları ve temelin açısız dönmelerine yönelik güvenilirliğe dayalı tasarımda pratik kullanılabilecek geçerli bir yöntem geliştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Rastgele Sonlu Elemanlar Yöntemi, Zemin-Yapı Etkileşimi, Yenilme Olasılığı, Tehlike Eğrileri, Güvenilirliğe Dayalı Tasarım, Hizmet Görebilirlik Sınır Durumu, Yüzeysel Temel Hareketleri

University : İstanbul Kültür University  
Institute : Institute of Graduate Education  
Department : Civil Engineering  
Programme : Geotechnics  
Supervisor : Assist. Prof. Dr. Gökhan Yazıcı  
Second Supervisor : Assist. Prof. Dr. Hadi Khanbabazadeh  
Degree Awarded and Date : Ph.D. - 2023

## ABSTRACT

### ANALYSIS OF FOUNDATION SETTLEMENTS WITH RANDOM FIELD SOIL PARAMETERS

Ahmet Can MERT

In Geotechnical Engineering, the most important step in foundation design is the correct determination of soil parameters. Considering the inherent variation in the soil at the stage of parameter determination plays an essential role to reach a realistic solution. The main purpose of this thesis study is to investigate the probabilistic movements of shallow foundation by defining soil parameters with random field theory. Thus, it is aimed to create series of hazard curves for guidance to shallow foundation design by taking the variation of soil parameters into account. Soil deformation modulus ( $E_d$ ), cohesion ( $c$ ), and angle of shearing resistance ( $\phi$ ) were defined as two-dimensional random field considering the elasto-plastic soil behavior with Mohr-Coulomb failure criterion adapted into random finite element method (RFEM). The effect of spatial variation of the parameters on the load-deformation behavior were investigated with reference to settlement and rotation of the shallow foundations resting on fine and coarse-grained soils. The spatial variation of soil in horizontal and vertical directions were represented with the change of correlation lengths ( $\theta_v$ ,  $\theta_h$ ) in the random field. Shear strength parameters ( $c$  and  $\phi$ ) together with the main parameters ( $E_d$ ,  $\theta_v$  and  $\theta_h$ ) were defined as random fields in order that the effect of all parameters on the foundation movements were investigated. The random fields were generated by using MATLAB, and iteratively solved by finite element analysis. The outputs of total settlement fitted lognormal, and the outputs of angular rotation for the foundation fitted gamma probability density functions (PDF). Failure probabilities ( $P_f$ ) were calculated for hazard limits using the acquired PDF's for total settlement and rotation. Hazard curves for foundation movements have been proposed by considering the effects of changes in all the parameters. These hazard curves have been validated using cone penetration databases of TC304, Risk Assessment Technical Committee of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Thus, a valid method was developed for the reliability based design of shallow foundations in terms of settlement and angular rotation with the effect of soil spatial variability.

**Keywords** : Random Finite Element Method, Soil-Structure Interaction, Probability of Failure, Hazard Curves, Reliability Based Design, Serviceability Limit States, Shallow Foundation Movements

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Amaç

Tüm mühendislik yapılarında temellerin analizi ve tasarımı, proje sürecinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Geoteknik mühendisliği açısından temel tasarımında en önemli adım zemin parametrelerinin doğru seçimidir. Böylece, temel hareketleri (oturma ve açılma dönme) gerçeğe yakın tahmin edilerek optimum temel tasarımı gerçekleştirilebilmektedir. Bununla birlikte, zeminin doğal değişkenliği (*inherent soil variability*) göz önüne alındığında, herhangi bir parametrenin tek bir doğru değeri ile analiz yapılamayacağı açıktır. Zemin doğal değişkenliğinin analizlerde göz önüne alınması ve temel tasarımına uyarlanması gerekli bir yöntem olarak görülmektedir. Buradan hareketle çalışmadaki temel amaç, zemin parametrelerindeki değişkenliği rastgele alan teorisi (*random field theory*) ile tanımlayarak yüzeysel temel hareketlerini olasılık tabanlı incelemek ve etkili tüm parametreleri göz önüne alan yöntemlerle temel tasarımında kullanılacak geçerli bir araç geliştirmektir.

## 1.2. Literatür Araştırması

Temel tasarımında son taşıma gücüne ve deformasyon limitlerine göre boyutlandırma yaklaşımları kullanılmaktadır. Genel olarak deformasyon limitlerine göre tasarım kriteri, son taşıma gücüne ulaşmadan önce aşıldığından yaygın kullanımdadır. Bu amaçla, kullanılan birçok tasarım yönetmeliği temel tasarımda belirli deformasyon limitleri belirlemiştir. Örneğin, Avrupa ülkelerinde geçerli Eurocode' a göre hizmet görebilirlik sınır durumunda (SLS- *Serviceability Limit State*) yüzeysel tekil temeller için 25 mm maksimum toplam oturma sınırı verilmiştir (EN-1997-1, 2004). Bu değer dışında, şartnamelerde ayrıca farklı oturma ve dönme limitlerine göre tasarım kriterleri de önerilmektedir. Yönetmeliklerde verilmiş sınırlara göre tasarımda, zeminin değişkenliği oldukça etkili bir unsurdur. Bu çerçevede, şartnameler parametrelerin değişimini göz önüne alan olasılık tabanlı analizleri geçerli bir çözüm yöntemi olarak kabul etmektedir. Güvenilirliğe dayalı tasarım (*Reliability-based Design*) olarak ifade edilen yöntem, parametrelerin tek bir değer alınması yerine olasılık dağılımları ile ifade edilmesini önermekte ve Eurocode, ISO gibi standartlarda yer almaktadır (EN-1990:2002, 2002a; ISO-2394:2015, 2015).

Rastgele alan teorisi, zemin değişkenliğini gerçeğe yakın yansıtan yaygın kullarımdaki yöntemler arasındadır. Bir rastgele değişkenin uzaydaki konumuna bağlı olarak değişimini gösteren rastgele alan yöntemi, zeminin bir, iki veya üç boyuttaki değişiminden doğan belirsizliğin ifadesinde etkili olmaktadır (Vanmarcke, 1977).

Temel hareketlerini incelemede kullanılan yöntemler arasında sonlu elemanlar analizi yaygın kullarımdadır. Analiz girdilerinin rastgele alan teorisiyle tanımlanması ve bu girdilerin sonlu elemanlar analizine ilk uyarlanması, stokastik (rastlantısal) sonlu elemanlar yöntemi (SFEM-*Stochastic Finite Elements Method*) adı ile temel oturmalarının hesabında kullanılmıştır (Baecher ve Ingra, 1981). Taylor seri açılımı kullanılarak uygulanan SFEM’ de, karmaşık matematiksel formüllerin çözümü gerektiğinden konuyla ilgili yeni yöntem arayışları olmuştur. Bu çerçevede, her bir rastgele alan gerçekleşimi (*realization*) ile tekrarlı çözüm yapılarak deformasyonların olasılık dağılımlarının oluşturulduğu rastgele sonlu elemanlar yöntemi (RFEM-*Random Finite Element Method*) geliştirilmiştir. Griffiths ve Fenton’ un yaptığı çalışma, özellikle yüksek dereceden değişkenlik durumunda RFEM çözümlerinin SFEM’ den daha güvenilir sonuçlar verdiğini göstermiştir (Griffiths ve Fenton, 2009). Bu yöntemin uygulandığı çalışmalarda düzlem deformasyon durumunda tekil temel oturmaları (Ahmed ve Soubra, 2012; Fenton ve Griffiths, 2008; Paice vd., 1996), düzlem deformasyon durumunda farklı oturma (Ahmed ve Soubra, 2014; Fenton ve Griffiths, 2002) ve üç boyutlu tekil temel toplam ve farklı oturmaları (Fenton ve Griffiths, 2005, 2008) incelenmiştir. Düşey yük altında analiz yapılan bu çalışmaların yanı sıra eksantrik ve eğik yükleme koşulları için yapılan çalışmalar da mevcuttur (Al-Bittar ve Soubra, 2014; Simões vd., 2020). Verilen çalışmalardaki analizlerin amacı, zemindeki belirsizliği yansıtmaktır. Zemindeki uzamsal değişkenlikten (*spatial variability*) doğan belirsizlikler, yüzeysel temellerin yenilme modu ve taşıma gücünü önemli ölçüde etkilemektedir. Yapılan bir çalışmada deterministik hesaplanan yüzeysel temel taşıma gücünün, uzamsal değişkenliğin göz önüne alındığı duruma göre %20 ile %30 daha yüksek olabileceği gösterilmiştir (Griffiths ve Fenton, 2001). Bunun yanı sıra, yüzeysel temellerdeki ortalama taşıma gücünün, zemin dayanımındaki yüksek değişkenlikle azaldığı vurgulanmıştır (Cassidy vd., 2013). Buradan yola çıkarak deterministik analizle tasarlanan temellerde, uzamsal değişkenliğin göz önüne alındığı analizlere göre aşırı boyutlandırma (*over-design*)

ihtimali yüksektir. Literatürde konuyla ilgili tüm çalışmalar, zemin uzamsal değişkenliğinin önemini vurgular niteliktedir.

### 1.3. Hedeflenen Katkı

Yakın zamandaki birçok çalışmada elastik zemin üzerine oturan temellerin hareketleri incelenmiştir (Ching ve Hu, 2017; Kenarsari ve Jamshidi Chenari, 2015; Yue ve Yao, 2020). Bu durumda, zeminin uzamsal değişkenliği doğru şekilde analize aktarılmasına rağmen zeminin gerçek gerilme-şekil değiştirme davranışı göz ardı edilmiş olmaktadır. Ahmed ve Soubra tarafından yapılan çalışmalarda, zeminin doğrusal olmayan davranışı Mohr-Coulomb (MC) yenilme kriteri kullanılarak tanımlanmış ve rastgele alan zemin elastisite modülü (E) ile tekil şerit temel toplam oturması (Ahmed ve Soubra, 2012) ve iki komşu temel farklı oturması için hesaplamalar yapılmıştır (Ahmed ve Soubra, 2014). Al-Bittar ve Soubra tarafından gerçekleştirilen farklı bir çalışmada, MC kriteri ile birlikte E ve zemin Poisson oranı ( $\nu$ ) da rastgele alan olarak tanımlanmıştır (Al-Bittar ve Soubra, 2014). Johari ve Sabzi'nin 2017 yılındaki çalışmasında da E ve  $\nu$  değerleri rastgele alan olarak tanımlanmış ve iki parametrenin birbiriyle korelasyonu da göz önüne alınarak şerit temel oturmaları için RFEM çözümü yapılmıştır (Johari ve Sabzi, 2017). Aynı araştırmacılar 2019 yılında, E rastgele alan girdisiyle SFEM kullanarak iki komşu şerit temelin farklı oturma analizini gerçekleştirmiştir (Johari vd., 2019). Tez yazarının önceki bir çalışmasında, RFEM ile temel oturmaları gerçek ölçümlerden edinilen deformasyon modülü ( $E_d$ ) kullanılarak çözülmüştür (Arel ve Mert, 2021). Özellikle SLS durumundaki araştırmalarda, rijitlik parametrelerinin rastgele alan olarak tanımlanması gerekliliği önceki çalışmalarda vurgulanmıştır (Winkelmann vd., 2022). Ancak literatürdeki rijitlik parametreleriyle ilgili incelemeler, kayma direnci parametrelerini rastgele alan olarak tanımlamamış ve sabit girdiler olarak ele almıştır. Bu durumda zeminin plastik bölgedeki davranışı göz önüne alınamamaktadır.

Kayma direnci parametrelerinin rastgele alan olarak tanımlandığı çalışmalar ağırlıklı olarak temel taşıma gücünü inceleyen araştırmalardır. Bu incelemelerde genelde yalnızca zeminin kayma direncini göz önüne alınmış, ancak deformasyon davranışı incelenmemiştir (Jha, 2016; Mendoza ve Hurtado, 2022; Suchomel ve Mašin, 2011; Wu vd., 2020). Bir çalışmada, gerçek zemin ölçümleriyle edinilen ve model deneylerden alınan sonuçlarda tekil temel yük-oturma davranışı incelenmiş

ancak bu araştırma da taşıma gücüne vurgu yaparak zeminin yalnızca drenajsız kayma direncini ( $c_u$ ) rastgele alan olarak tanımlamıştır (Stuedlein vd., 2012b). Öte yanda, temel hareketlerinin incelendiği çalışmalar da kayma direnci parametrelerindeki değişimi göz önüne almamışlardır. Yakın zamanda yapılmış bir inceleme, kazıklı-yayıllı temeller için hem kayma direnci hem de rijitlik parametrelerini rastgele alan olarak göz önüne almış ve zemini MC yenilme kriteri ile tanımlayarak çözüme gitmiştir (Johari ve Talebi, 2021). Ancak literatürde buna benzer bir çalışmanın yüzeysel temeller için uyarlanması bulunamamıştır. Bu çalışmadaki analizlerde, elasto-plastik zemin davranışı ile zemin deformasyon modülü ( $E_d$ ) ve kayma direnci parametrelerinin ( $c$  ve  $\phi$ ) rastgele alan olarak tanımlanması hedeflenmiştir. Böylece, zeminin hem dayanım hem de rijitlik parametrelerindeki değişiminin birlikte kullanıldığı modeller ile sonuca gidilmiştir.

Bu çalışma ile hedeflenen bilimsel katkı, zemin parametrelerindeki değişimi göz önüne alarak, temel boyutlandırma yol gösterecek tehlike eğrileri (*hazard curve*) oluşturmaktır. Mevcut literatürde, bu konuda yapılan kapsamlı bir çalışmada temel taşıma gücü için eğriler oluşturulmuş ancak analizlerde Tresca yenilme kriteri ile yalnızca kayma direnci parametresinin etkisi göz önüne alınmıştır (Popescu vd., 2005). Yakın zamanda Pouya vd. tarafından yapılmış olan bir çalışmada ise kayma direnci parametreleri ( $c$  ve  $\phi$ ) rastgele alan olarak tanımlanmış, parametrelerin birbiriyle korelasyonu ve hem yatay hem de düşey yöndeki değişkenlikleri ile inceleme yapılarak, temel boyutuna bölünen boyutsuz değişkenlik ölçeği ile taşıma gücü için tehlike eğrileri önerilmiştir (Pouya vd., 2014). Konuyla ilgili çalışmalarda rijitlik parametresi, doğrudan rastgele alan formunda tanımlanmamıştır. Jamshidi Chenari ve Alaie' nin bir araştırmasında ise yatay ve düşey değişkenliğin (anizotropi) etkisiyle kayma direnci rastgele alan olarak tanımlanmış ve rijitlik parametresi dirence bağlı korelasyonla ele alınarak heyelan analizlerinde kullanılmak üzere tehlike eğrileri önerilmiştir (Jamshidi Chenari ve Alaie, 2015). Benzer bir çalışma yüzeysel temeller için literatüre girmemiş, ayrıca tüm olasılık tabanlı temel analizlerinde pratik mühendislik çözümlerine katkıda bulunacak bir yöntem bulunamamıştır. Son yıldaki bir çalışma, zemin değişkenliğinin yapı-zemin etkileşimine önemini vurgulamış ve temel dönmesine göre tehlike eğrileri önermiştir (Stuedlein vd., 2022). Ancak, araştırmada yalnızca  $c_u$  değerindeki yatay değişkenlik göz önüne alınmış, rijitlik parametreleriyle ilgili bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Güncel literatürde hem etkili

tüm parametreleri içeren hem de temel hareketleri için pratik tasarıma yönelik bir yöntem bulunamamıştır.

Bu çalışma kapsamında, Mohr-Coulomb yenilme kriteri ile elasto-plastik zemin davranışı göz önüne alınarak, etkili tüm parametrelerle ve tasarım şartnamelerindeki deformasyona dayalı yenilme kriterlerine uygun şekilde, yüzeysel temel oturma ve açılma için tehlike eğrileri oluşturulması hedeflenmektedir. Böylece, hem zemin uzamsal değişkenliğinin etkisi güvenilirliğe dayalı tasarımda göz önüne alınmış hem de tasarımda pratik olarak kullanılacak bir yöntem geliştirilmiştir.

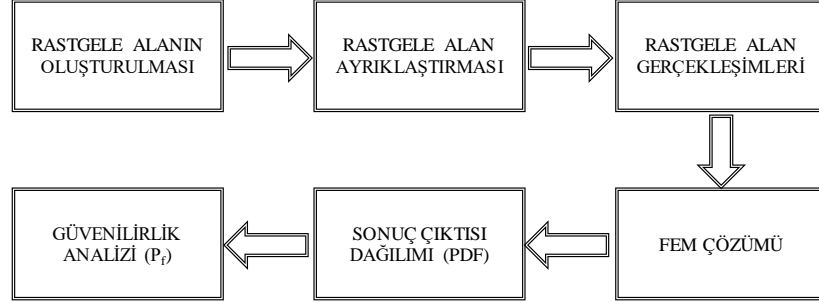
#### **1.4. Hipotez ve Hedef**

Literatürdeki tehlike eğrileri ile ilgili çalışmalara ilave olarak, temel hareketlerine etkili zemin rijitlik ve kayma direnci parametrelerinin rastgele alan ile tanımlanması ve edinilen sonuçların, yüzeysel temel tasarımına yönelik tehlike eğrilerinde kullanılması hedeflenmektedir.

Çalışmada, zeminin uzamsal değişkenliğinin düşey yük altındaki yüzeysel temellerin ötelenmesine nasıl etki edeceği sorusundan yola çıkılmıştır. Bu çerçevede, başlıca parametreler zemin deformasyon modülü ( $E_d$ ), kohezyon ( $c$ ) ve kayma direnci açısı ( $\phi$ ) iki boyutlu rastgele alan olarak tanımlanmıştır. Bu durumda, ince ve iri daneli zeminlere oturan çizgisel yüke maruz yüzeysel temellerde oluşacak oturma ve açılma dönmeler ile temelin yük-deformasyon davranışındaki değişimin ne ölçüde olacağı araştırılmıştır.

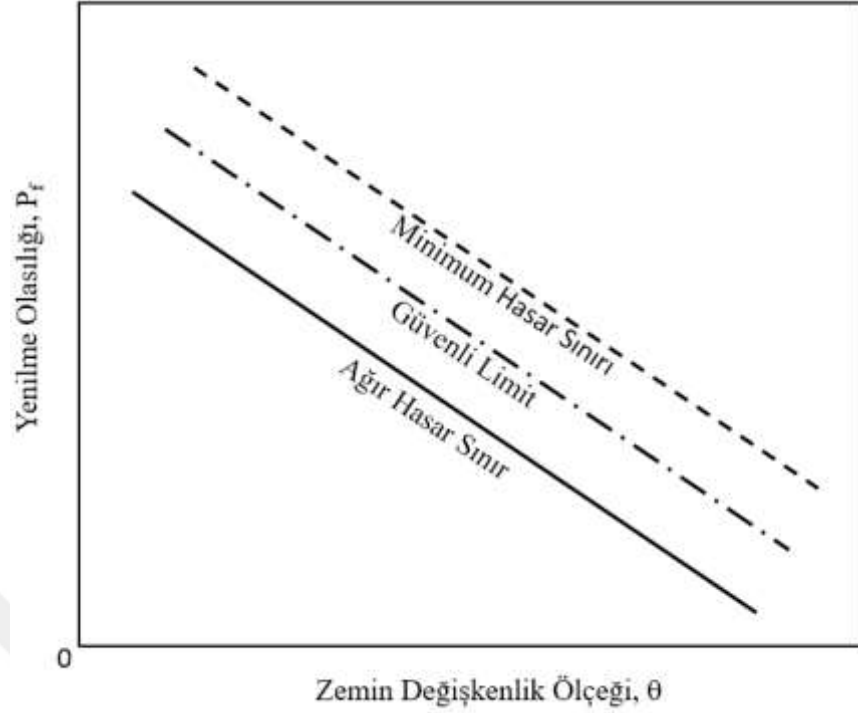
Araştırmanın yola çıkış sorusundan hareketle, temel hareketlerinin rastgele alan zemin parametreleri ile analizi gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM-*Finite Element Method*) ile oluşturulan modelde, zemin parametreleri rastgele alan olarak tanımlanmıştır. Tüm parametrelerle temel hareketlerindeki değişim, her bir rastgele alan gerçekleşimi için tekrarlı çözümle bir olasılık yoğunluk fonksiyonuna (PDF-*Probability Density Function*) uyan dağılımlar halinde elde edilmiştir. Böylece, deterministik analizlerdeki sabit girdili çözümlerden edinilen sabit çıktılardan aksine değişken olarak tanımlanan girdiler ile sonuç çıktılarının olasılık dağılımlarının elde edilmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen yöntem ile, temel hareketleri için yenilme olasılığı ( $P_f$ - *Probability of failure*) tahmin edilerek güvenilirliğe dayalı tasarım

çerçevesinde yüzeysel temel boyutlandırma ve olasılık tabanlı değerlendirme yapılabilmektedir. Çalışmadaki adımlar Şekil 1.1’ de verilen bir akış şemasıyla özetlenmiştir.



Şekil 1.1. Rastgele sonlu elemanlar yöntemi akış şeması

Akış şemasındaki tüm adımlar, rastgele alan teorisi bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır. Hedeflenen tehlike eğrilerinin düşey ekseninde, yaygın kullanılan yenilme olasılığı yer almaktadır.  $P_f$  hesaplanırken, temel oturmaları ve temelin açısız dönme değerleri için şartname ve literatürden önerilen limit değerlerin aşılma olasılıkları baz alınmıştır. Bu limitlere göre hem temel oturmaları hem de temelin açısız dönmesi için ayrı kategorilerde hasar sınırları belirlenmiştir: Minimum Hasar, Güvenli Limit veya Orta Hasar ve Ağır Hasar. Tehlike eğrisinin yatay eksenini ise rastgele alan teorisinde parametrenin değişkenlik göstergesi olan korelasyon uzunluğu ( $\theta$ - *correlation length*) değerleri oluşturmaktadır. Ayrıca, her bir yenilme olasılığına karşılık gelen güvenilirlik indisi ( $\beta$ ) değerleri sayesinde zemin değişkenliği etkisinde, temel hareketlerine yönelik güvenilirliğe dayalı tasarımda kullanılmak üzere hem  $P_f$  hem de  $\beta$  değerlendirme göz önüne alınabilmektedir. Hedeflenen tehlike sınırlarına bir örnek teorik olarak verilmiştir (Şekil 1.2).  $\theta$  değerinin artması, zemindeki değişkenliğin azaldığını ve üniform zemin özelliklerine yaklaşıldığını göstermektedir. Bu durumda yenilme olasılığında azalma olacağı beklenmektedir. Şekil 1.2, çalışmanın temel hipotezini ortaya koymaktadır. Tüm hasar sınırlarının temel oturma ve açısız dönmesi için değerleri, sayısal model bilgileri bölümünde detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 1.2. Temsili hipotez tehlike eğrileri

### 1.5. Yöntem

Çalışmadaki tüm analizler, rastgele sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Tüm parametreler önce rastgele alan formunda sürekli fonksiyon şeklinde tanımlanmıştır. Ardından, sonlu elemanlar yönteminde kullanılabilmesi için rastgele alanın ayrıklaştırma işlemi (*random field discretization*) gerçekleştirilmiş ve rastgele alan parametreleri MATLAB yazılımıyla üretilmiştir. Sonlu elemanlar modeli ise ANSYS yazılımı ile tanımlanmıştır. Oluşturulan modeller, rastgele alan zemin parametreleri ile tekrarlı çözümlenerek temel hareket ve açıl dönme değerleri kaydedilmiştir. Tüm sonuçlar ile temel oturma ve açıl dönme için PDF' ler oluşturulmuş, belirlenen minimum, güvenli veya orta ve ağır hasar sınırları için yenilme olasılıkları hesaplanmıştır. Tüm korelasyon uzunlukları için bu olasılıklar noktalanarak, tehlike eğrileri oluşturulmuştur. Tüm adımlardaki teorik altyapı 2. Bölüm' de detaylı şekilde açıklanmıştır.

### 1.6. Analiz Parametreleri

Analizlerde “değişken” ve “sabit” olmak üzere başlıca iki grup parametre bulunmaktadır. Temel boyutları (Genişlik B ve kalınlık  $t_{\text{Temel}}$ ), temelin gömme

derinliği ( $D_f$ ), temele gelen çizgisel yük ile zemin Poisson oranı ( $\nu$ ) sabit alınan parametrelerdir. Değişken kabul edilen parametreler ise  $E_d$ ,  $c$  ve  $\phi$  değerleri ile rastgele alan yatay ve düşey korelasyon uzunluklarıdır ( $\theta_h$  ve  $\theta_v$ ).

### 1.7. Planlanan İnceleme ve Değerlendirmeler

Çalışmada zemin rijitliği ve dayanımındaki değişimin temel hareketlerine etkileri incelenmiştir. Rastgele zemin parametrelerinin düşük, orta ve yüksek değişkenlik gösterdiği temsili değerler ile analiz yapılarak, zemindeki değişkenliğin etkisi detaylı olarak irdelenmiştir. Ayrıca, her bir zemin parametresinin rastgele alandaki değişkenliği, korelasyon uzunluklarındaki değişimle değerlendirilmiştir. Zeminin hem yatay hem de düşeydeki değişiminin incelenmesiyle, anizotropi (eşynszlk) etkisi değerlendirmede göz önüne alınmıştır.

## 2. RASTGELE ALAN TEORİSİ

Bu bölümde, analizde kullanılan yöntemde izlenen tüm adımların teorik altyapısı detaylı olarak verilmiştir. Temel oturmalarının hesaplanmasında belirleyici olan parametrelerin başında zeminin deformasyon modülü ve kayma direnci parametreleri gelmektedir. Bir diğer ifadeyle, sayısal analizlerdeki başlıca girdiler  $E_d$ ,  $c$  ve  $\phi'$  dir. Birçok durumda bu parametreler, yapılan belirli sayıda ölçümden veya deneylerden elde edilen değerler doğrultusunda deterministik olarak belirlenmektedir. Ancak bunun sonucunda, belirsizlikler göz ardı edilmektedir. Geoteknik parametrelerindeki değişkenlikteki karmaşık durum birçok farklı belirsizlikler kaynağından sonuçlanmaktadır. Geoteknik parametrelerindeki ana belirsizlikler başlıca üç kategoride açıklanmıştır; zeminin doğal değişkenliğinden kaynaklı belirsizlikler (*inherent soil variability*), ölçüm hatalarından kaynaklanan belirsizlikler (*measurement error*) ve deneysel korelasyonlar ile yapılan dönüşümlerden oluşabilecek belirsizlikler (*transformation uncertainty*) (Phoon ve Kulhawy, 1999a, 1999b). Araştırmacılar bu belirsizliklerin, parametrelerin değişme katsayısı (*COV-Coefficient of Variation*) ile ifade edilerek göz önüne alınması gerektiğini vurgulamıştır. Burada, lm hataları test sayısının artırılmasıyla giderilebilmekte ve

dönüşüm belirsizlikleri ise kullanılan parametreye uygun korelasyonlarla azaltılabilmektedir. Doğal değişkenlik, zeminin çeşitli jeolojik, çevresel ve fiziksel-kimyasal süreçlerin bir kombinasyonu ile oluşturulmuş karmaşık bir mühendislik malzemesi olmasından kaynaklanmaktadır. Bunların büyük kısmının devam eden süreçler olması zeminin arazideki özelliklerini değiştirmektedir. Bu doğal süreçler nedeniyle, arazideki tüm zemin özellikleri düşey ve yatay yönde uzamsal değişkenlik adını alan değişime maruz kalmaktadır. Zeminin düşeyde ve yatayda gösterdiği uzamsal değişkenliğin tanımlanması, belirsizliklerin göz önüne alınmasında büyük ölçüde önemli rol oynamaktadır. Deformasyon analizlerinde temel zeminin uzamsal değişkenliğinin yansıtılması, çözümlerin gerçek zemin davranışına yakın sonuçlar vermesine olanak sağlamaktadır. Düzensizliğin derecesi yeterince büyük olduğunda, deterministik modellerden ziyade olasılık tabanlı modellerin kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda en yaygın kullanılan seçeneklerden biri, uzamsal değişkenliği yansıtılacak parametrelerin rastgele alan olarak tanımlanmasıdır. Rastgele alanlar metodolojisi, farklı ölçeklerde meydana gelebilecek olaylara uygulanabilmektedir. İdeal modellenmiş bir rastgele alan, minimum sayıda fiziksel olarak anlamlı ve ölçülebilir parametrelerle, karmaşık bir rastgele olayı esas özellikleri ile yansıtabilmektedir (Vanmarcke, 2010).

Karmaşık stokastik olayların rastgele alan modelleri, başlıca aşağıda sıralanan amaçlara yöneliktir (Vanmarcke, 2010):

- düzensiz sistemlerin (*disordered systems*) verimli bir şekilde karakterize edilmesi amacıyla oluşturulan yöntemlerin, stokastik açıdan tanımlanması,
- düzensiz sistemlerin analizinde sonuç çıktılarını (davranış, performans) tahminde baz alınabilecek bir altyapı oluşturmak,
- düzensiz sistemleri içeren karar analizlerinde (tasarım, veri toplama, kalite-kontrol gibi) alternatif seçeneklerin etkisini değerlendirmek.

Rastgele alan türleri arasındaki farklar, esas olarak stokastik ortamın doğasından kaynaklanan gerekliliğe ve analiz edilecek sistemdeki problem türüne göre değişmektedir. Rastgele bir ortamın özelliklerindeki belirsizlik esasen pasif karakterlidir. Bir başka ifadeyle, bir parametre deterministik olarak belirli konumda bulunabilir ancak değeri, doğru bir şekilde ölçülene kadar kesin bir şekilde

bilinmemektedir (*unknown/ uncertain*). Teoride ancak muhtemel tüm konumlardan numune alındığında her noktadaki parametrenin değeri bilinmekte fakat genellikle bu durum pratik ve ekonomik olmaktadır. Ayrıca, oluşabilecek ölçüm ve test hataları da edinilen bilginin değerini azaltıcı yöndedir. Bu nedenle tahmin, analiz ve karar verme süreçleri genellikle ortam hakkında eksik bilgilere dayanarak ilerlemekte, bu da rastgele alan modellemesini anlamlı hale getirmektedir (Vanmarcke, 2010).

Bir rastgele alan  $f(\mathbf{x}, \theta)$  (*random field*),  $\mathbf{x} \in \Omega$  tanım kümesindeki parametrelerden oluşan bir rastgele değişkenler topluluğu şeklinde tanımlanmaktadır. Verilen bir  $x_i$  değişkeni için  $f(x_i, \theta)$  değerleri, rastgele alan içindeki bir rastgele değişkeni ifade etmektedir. Tam tersi ifadeyle, verilen  $\theta_i$  parametresi için ise  $f(\mathbf{x}, \theta_i)$ , rastgele alanın bir gerçeğidir (*realization*). Bir rastgele alan,  $\mathbf{x}$  noktasına bağlı  $f(\mathbf{x}, \theta)$  değerinin rastgele değişken veya rastgele vektör olmasına bağlı olarak sırasıyla, “tek değişkenli” (*univariate*) veya “çok değişkenli” (*multivariate*) olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca bu rastgele alan,  $\mathbf{x}$ ’ in boyutuna bağlı olarak ise tek veya çok-boyutlu (*one- or multidimensional*) olarak isimlendirilmektedir. Pratik olarak tek değişkenli çok-boyutlu rastgele alanlar kullanılmaktadır. Buna zemin parametrelerinde elastisite modülü, yenilme gerilmesi veya Poisson oranı gibi istatistik olarak bağımsız değişkenler örnek verilebilir (Sudret ve Der Kiureghian, 2000). Teorik altyapının gerekliliklerinden hareketle, bir rastgele değişkenin uzaydaki herhangi bir konumda değişiminin göz önüne alınabildiği rastgele alan teorisi, zeminin değişimindeki belirsizliğin ifade edilmesinde etkili olmaktadır. Bu bağlamda, deterministik yaklaşımın verimli olmadığı ve geleneksel istatistiksel çözümün yetersiz olduğu durumlarda rastgele alan teorisi ile karmaşık modellemeler yapılabilmektedir (Vanmarcke, 2010). Ayrıca, saha gözlemlerinden çıkarımlar yapmak için kullanılacak güçlü istatistiksel sonuçların sağlanması ve güvenilirlik incelemelerinde uzamsal değişkenliği göz önüne alması ile rastgele alan teorisi, mühendislik modellerinde kullanılan önemli bir araçtır (Baecher ve Christian, 2003).

## 2.1. Rastgele Sonlu Elemanlar Analizi

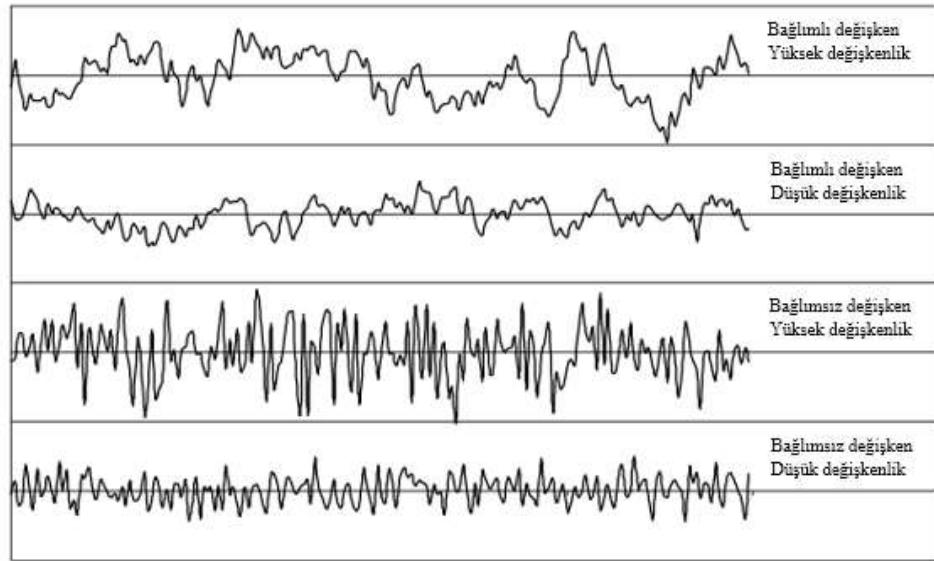
Rastgele alan teorisi ile sonlu elemanlar analizinde ilk adım, parametrelerin belirsizliğini temsil edecek rastgele alanı tanımlamaktır. Rastgele alanın bir olasılık dağılımına uyması, alanı ifade eden değişken fonksiyonunun temsilini kolaylaştırmaktadır. Örnek olarak,  $f(\mathbf{x}, \theta)$   $\mathbf{x} \in \Omega$ , olmak üzere  $\Omega$  tanım kümesinde bir

Gauss rastgele alanını gösterirse, bu alan ortalama fonksiyonu  $\mu(\mathbf{x})$ , varyans fonksiyonu  $\sigma^2(\mathbf{x})$  ve oto-korelasyon fonksiyonu veya kısaca korelasyon fonksiyonu (*correlation function*)  $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$  kullanılarak temsil edilmektedir (Sudret ve Der Kiureghian, 2000).  $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ , alandaki her bir rastgele değişken  $\mathbf{x}'$  in kendinden önceki veya sonraki  $\mathbf{x}$  ile arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Burada ayrıca, bir Gauss rastgele alanının  $\mu(\mathbf{x})$  ve  $\sigma^2(\mathbf{x})$  fonksiyonları uzaydaki konuma bağlı değişim göstermiyor ve  $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$  fonksiyonu yalnızca ardışık iki değişken arası mesafeye ( $\mathbf{x} - \mathbf{x}'$ ) bağlıysa bu alana, “homojen” (*homogeneous*) veya “sabit/ durağan” (*stationary*) rastgele alan adı verilmektedir (Sudret ve Der Kiureghian, 2000). Bu durumu sağlamayan durumlar, yani değişken ortalama ve varyansa sahip rastgele alanlar ise “sabit/ durağan olmayan” (*non-stationary*) olarak adlandırılmaktadır. Bir başka önemli husus, özellikle geoteknik açıdan zemindeki değişkenliğin yöne bağımlı (eşyönsüz) olması durumunu ifade eden “anizotropi” dir. Bir zemin parametresinin rastgele alan olarak tanımlanması durumunda  $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ , yalnızca yönden bağımsız ( $\mathbf{x} - \mathbf{x}'$ ) mesafesinin bir fonksiyonu ise rastgele alan “izotrop” (*isotropic*) olmaktadır. Eğer korelasyon aynı zamanda bu mesafenin yönüne de bağlı ise bu durum, “anizotrop rastgele alan” (*anisotropic random field*) adını almaktadır. Zemin özelliklerindeki jeolojik süreçler sonucu gelişen anizotropi etkisi, yatay ve düşey yöndeki değişkenlik ile anizotrop rastgele alan ile tanımlanabilmektedir (Baecher ve Christian, 2003).

Bir rastgele alanın özelliklerini ifade eden son terim ise “döngelik” (*ergodicity*) adını almaktadır. Buna göre döngel (*ergodic*) rastgele alanda, değişkenin dağılımı ile ilgili bilgi yalnızca tek bir gerçekleştirmeden çıkarımla elde edilebilmektedir. Eğer rastgele alandaki değişkenin dağılım bilgileri için belirli sayıda gerçekleştirime ihtiyaç duyuluyorsa bu durumda rastgele alan döngel değildir (*non-ergodic random field*). Teorik olarak, sonsuz sayıda örnekleme alınmadıkça tek bir gerçekleştirimle geoteknik parametrelerinin dağılımı tahmin edilemez (Baecher ve Christian, 2003). Mevcut çalışmada; durağan, anizotrop ve döngel olmayan Gauss rastgele alanları (*stationary anisotrop non-ergodic random fields*) kullanılmıştır. Parametrelerin alandaki ortalama ve varyansları sabit, korelasyonu ise yatay ve düşeyde farklı değişim göstermektedir. Ayrıca, parametrelerin dağılımı ile ilgili değerlendirme için birden fazla gerçekleştirim ile analiz yapılmıştır.

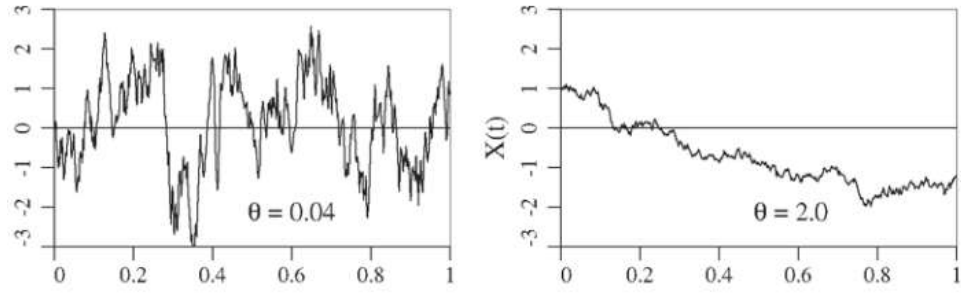
Rastgele alan teorisinin pratik uygulamalarında ölçek sorunu çok önemli bir yer tutmaktadır. Deterministik görünen bir özellik, mikro ölçekte yüksek değişkenlikte

yapılanmış atomlardan veya moleküllerden oluşabilmekte, bu da makro ölçekte olasılık tabanlı inceleme gerektiren değişken özellikler sergileyebilmektedir. Başka bir ifadeyle, genellikle rastgele alan boyutları arasında pratik olarak anlamlı alt ve üst sınır aralığı olmaktadır. Bu ölçek rastgele alanda, korelasyon fonksiyonu ile tamamen korelasyon uzunluğu veya dalgalanma ölçeği (*scale of fluctuation*) olarak isimlendirilen  $\theta$  değerine bağlıdır (Vanmarcke, 2010). Bu değer değişimi, rastgele alan formunda tanımlanan değişkenin, konuma bağlı olarak ne kadar sıklıkta değiştiğini göstermektedir. Şekil 2.1, herhangi bir rastgele değişkenin farklı korelasyon durumlarındaki değişimine örnek oluşturmaktadır.



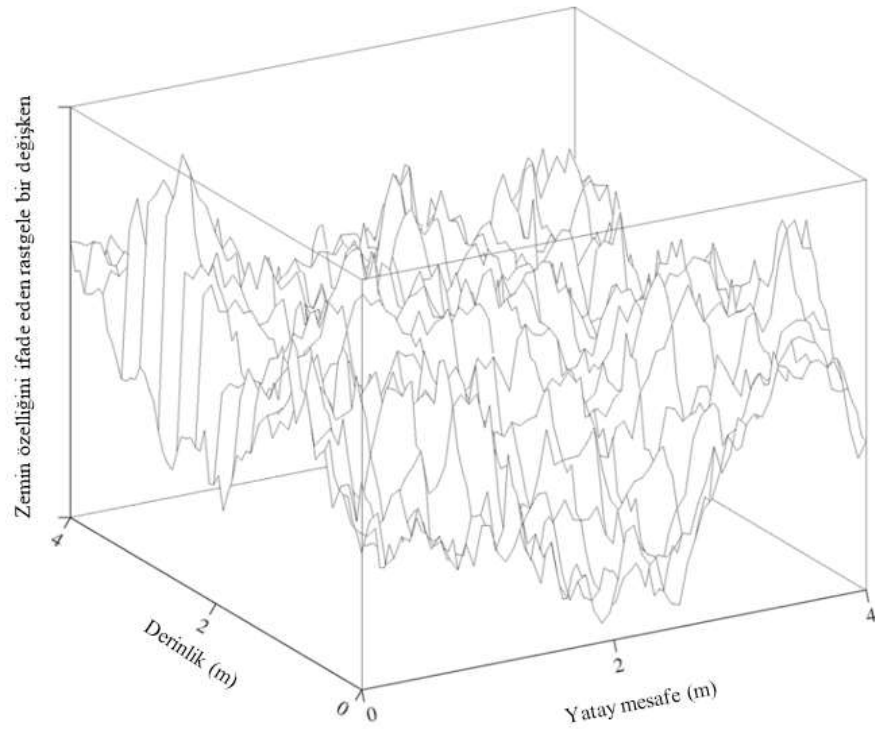
Şekil 2.1. Bir değişkenin farklı korelasyon durumlarında rastgele alandaki değişimi (Baecher ve Christian, 2003)

Genel olarak  $\theta$ , rastgele değişkenlerin önemli ölçüde birbiriyle ilişkili olduğu (*correlated*) mesafeyi ifade etmektedir. Tersine ifadeyle ise  $\theta$  mesafesi ötesinde, rastgele değişkenler birbiriyle büyük oranda ilişkili değildir (*uncorrelated*). Matematiksel olarak  $\theta$ , korelasyon fonksiyonunun ( $\rho$ ) altında kalan alanı ifade etmektedir (Griffiths ve Fenton, 2007; Vanmarcke, 2010). Bir değişkenin rastgele alandaki durumu,  $\theta$ ' ya bağlı korelasyon fonksiyonu ile belirlenmektedir. Örnek olarak Şekil 2.2' de, düşük korelasyon uzunluğunda ( $\theta= 0.04$ ) herhangi bir değişken parametrenin rastgele alanda çok hızlı değiştiği; yüksek olması durumunda ise ( $\theta= 2.00$ ) daha yumuşak geçişlerle değişkenlik olduğu gösterilmiştir (Griffiths ve Fenton, 2007).



Şekil 2.2. Bir değişkenin farklı  $\theta$  değerlerinde rastgele alandaki değişimi (Griffiths ve Fenton, 2007)

Çok boyutlu rastgele alanlarda ise rastgele değişken, tek boyutta değil birden fazla boyutta değişim göstermektedir. Örneğin bir  $f(\mathbf{x}, \theta)$  rastgele değişkeni tek bir doğrultuda değil koordinat düzleminde iki yönde değişkenlik gösterirse, iki boyutlu rastgele alan halini almaktadır. Bir zemin özelliğinin derinlikle ve yatay mesafedeki değişimi, iki boyutlu rastgele alana örnektir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Temsili iki boyutlu bir rastgele alan gerçekleştirimi (Griffiths ve Fenton, 2007)

Rastgele alanı tanımlayan ve yaygın kullanılan korelasyonlar; parazit (*white noise*), doğrusal, üstel, kareli üstel ve kuvvet fonksiyonlarıdır (Ahmed ve Soubra, 2018). Mevcut çalışmada, üstel korelasyon fonksiyonu kullanılmıştır ve iki boyutlu

bir Gauss rastgele alanı için Denklem 2.1' deki ifade ile korelasyon fonksiyonu tanımlanmıştır (Vanmarcke, 2010).

$$\rho(\tau) = \exp\left(-\frac{|\tau|}{\theta_h} - \frac{|\tau|}{\theta_v}\right) \quad (2.1)$$

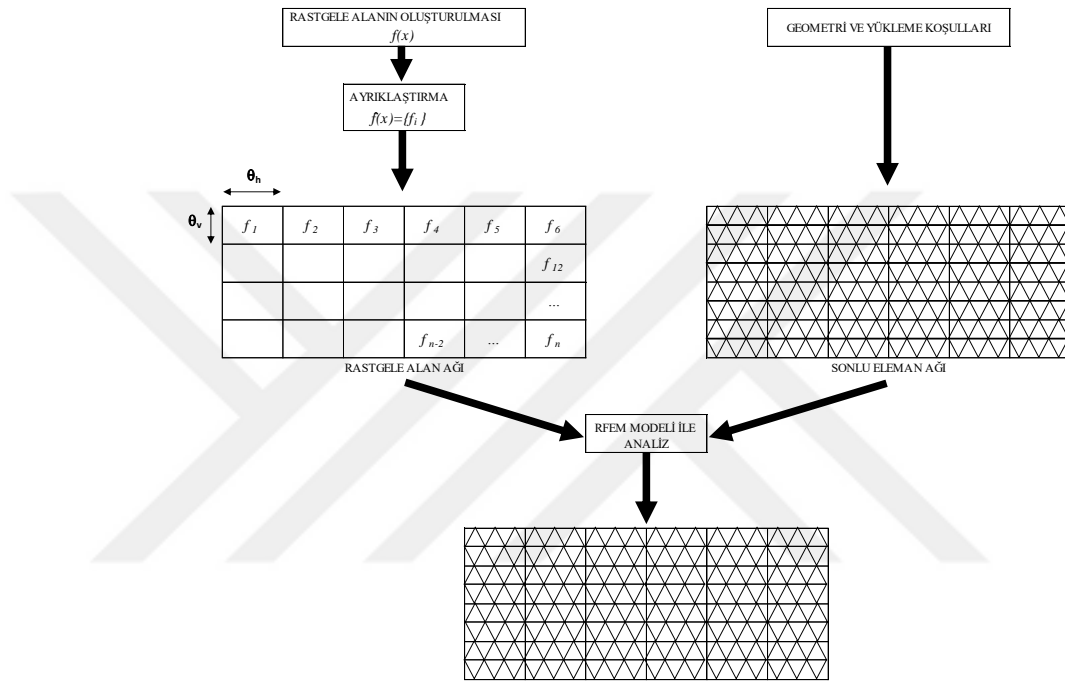
Burada,  $\tau$  iki rastgele değişken arası uzaklığı,  $\theta_h$  ve  $\theta_v$  ise sırasıyla yatay ve dikey korelasyon uzunluklarını ifade etmektedir. Denklem 2.1' deki eşitlik,  $\tau$ ' nun artan değerleri için azalan üstel bir fonksiyondur. Başka bir ifade ile, rastgele alan parametresinin bir noktadaki değeri, kendinden uzakta bir noktadaki değerden en az etkilenmektedir.

## 2.2. Rastgele Alanın Ayırıklaştırılması (*Random Field Discretization*)

Rastgele alanı sürekli fonksiyon olarak tanımladıktan sonra, bu alanı sonlu elemanlar analizinde kullanıma uygun hale getirmek gerekmektedir. FEM' de gerilme ve şekil değiştirmeler, bünye denklemlerinden türetilen kısmi diferansiyel denklemler kullanılarak geometrik bölünmüş sonlu eleman ağı (*mesh*) sisteminin çözümüne dayanmaktadır. RFEM' de ise geometrik sonlu eleman ağına ilave olarak, parametrenin alandaki değişimini gösteren rastgele alan ağının (*random field mesh*) tanımlanması gerekmektedir. Sürekli fonksiyon olarak tanımlanan rastgele alanın, sonlu sayıda rastgele değişken içeren bir vektör kümesine dönüştürülmesi işlemi ayırıklaştırma (*discretization*) olarak isimlendirilmektedir. Bu işlem, rastgele alan ağı üzerindeki her elemanın içine veya düğüm noktasına, parametrenin o konumdaki değerinin yerleştirilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Bu durumda,  $f(\mathbf{x}, \theta)$  olarak ifade edilen Gauss rastgele alanı ayırıklaştırılarak  $\hat{f}(\mathbf{x}, \theta) = \{f_i\}$  kümesine dönüşmektedir. Örneğin, lognormal dağılıma uyan bir girdi, eşdeğer normal dağılım parametrelerinin kullanımıyla Gauss rastgele alanına dönüştürülerek ayırıklaştırma işlemi uygulanabilmektedir. Özellikle Gauss dağılımının tercih edilmesindeki başlıca neden, bu dağılımın ayırıklaştırma yönteminde doğrusal dönüşümler kullanılmasıdır. Böylece, Gauss rastgele alanı ayırıklaştırma sonrası Gauss olarak kalmaktadır (Li ve Der Kiureghian, 1993).

Rastgele alan ve sonlu elemanlar analizinin birlikte kullanılması sonucu çözüm için gerekli iki mesh oluşmaktadır; birincisi, geometri ve yükleme durumlarına

bağlı sonlu eleman ağı ve ikincisi ise rastgele alandaki değişkenliğinin ifadesi olan korelasyon uzunluğuna bağlı rastgele alan ağıdır. İki ağın seçim ölçütleri birbirinden tamamen farklı olduğundan, yapılan her olasılık tabanlı FE analizinde bu iki ağın kullanılması gerekmektedir (Der Kiureghian ve Ke, 1988). Analizlerin gerçekleştirildiği ve deformasyon sonuçlarının edinildiği temel dayanak, oluşturulan sonlu eleman ağıdır. Rastgele alan ağı, tamamen parametrelerin alandaki değişimini gösteren bir kılavuz görevindedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. RFEM ayrıklaştırma adımları

Literatürde uygulanan en basit rastgele alan ayrıklaştırma yöntemi, orta-nokta metodu (*midpoint method*) olarak adlandırılmıştır (Der Kiureghian ve Ke, 1988). Bu yöntemde göre, rastgele alan ağına tanım kümesi  $\Omega_e$  olan her bir eleman içerisinde değer sabittir ve Denklem 2.2' de verildiği gibi elemanın merkezindeki değere ( $\mathbf{x}_c$ ) eşittir:

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}_c) \quad \mathbf{x} \in \Omega_e \quad (2.2)$$

Diğer bir yöntemde rastgele alan, her bir eleman içerisinde Denklem 2.3' te verilen yerel ortalama (*local average*) alınarak ayrıklaştırılmaktadır (Fenton ve Vanmarcke, 1990; Vanmarcke, 2010):

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \frac{\int_{\Omega_e} f(\mathbf{x}) d\Omega}{\int_{\Omega_e} d\Omega} \quad (2.3)$$

Liu ve diğ. (1986), rastgele alan ağındaki bir eleman içerisinde düğüm noktalarındaki değerler ve ilgili biçim/ şekil fonksiyonu (*shape function*) kullanarak ayrıklaştırma uygulamıştır.  $N_i(\mathbf{x})$ , i-inci biçim fonksiyonu ve elemandaki düğüm noktası sayısı  $n$  olmak üzere rastgele alan, Denklem 2.4' teki ifade ile ayrıklaştırılabilmektedir (Liu vd., 1986):

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n N_i(\mathbf{x}) f(\mathbf{x}_i) \quad (2.4)$$

Açıklanan orta nokta ve yerel ortalama yöntemlerinde her bir rastgele alan gerçekleşimi, eleman sınırlarında süreksiz parçalı fonksiyonlar olarak tanımlanmaktadır. Biçim fonksiyonu yönteminin üstün yanı ise ayrıklaştırma sonrası rastgele alan vektörünün, eleman sınırları dahil sürekli fonksiyon ile ifade edilebilmesidir.

Rastgele alan ayrıklaştırmada önemli nokta, yöntemlerin verimli olarak rastgele alan üretebilmesidir. Bunun ölçütü ise rastgele alanı, mümkün olan en az sayıda değişken ile tanımlayabilmektir. Li ve Der Kiureghian (1993) çalışmalarında, ayrıklaştırma yöntemlerinin verimliliğini incelemiş ve geliştirdikleri OLE (*Optimal Linear Estimation*) ve EOLE (*Expansion Optimal Linear Estimation*) adı verilen yöntemler ile mevcut yöntemleri karşılaştırmışlardır. OLE ve EOLE' nin, orta-nokta, yerel ortalama ve biçim fonksiyonu yönteminden daha verimli sonuç verdiği gösterilmiştir. Ancak, seri açılımı (*SE-Series Expansion*) olarak bilinen yöntemin kesin özdeğer (*eigenvalue*) ve özfonksiyon (*eigenfunction*) çözümleri elde edilmesi halinde en verimli rastgele alan ayrıklaştırma yöntemi olduğu ve EOLE yönteminin, sadece bu çözümlerin elde edilemediği belirli durumlarda daha etkili olduğu vurgulanmıştır (Li ve Der Kiureghian, 1993).

Çalışmada oluşturulan rastgele alanların ayrıklaştırılması, seri açılımı yöntemi (*SE-Series Expansion Method*) ile gerçekleştirilmiştir. SE yönteminin ilk kullanımlarında araştırmacılar, Karhunen-Loeve (KL) teoremi yardımıyla korelasyon fonksiyonunu spektral ayrışım (*spectral decomposition*) formunda ifade ederek

rastgele alanı ayrıklaştırmışlardır (Lawrence, 1987; Spanos ve Ghanem, 1989). Rastgele alan fonksiyonunun SE ile ifadesi Denklem 2.5' te verilmektedir (Sudret ve Der Kiureghian, 2000):

$$f(\mathbf{x}, \theta) = \mu(\mathbf{x}) + \sigma \sum_{i=1}^{\infty} \xi_i(\theta) \sqrt{\lambda_i} g_i(\mathbf{x}) \quad (2.5)$$

Burada;  $\xi_i(\theta)$ , rastgele alandaki bir değerin konumunu  $\theta$  parametresiyle tanımlayan standart normal değişken,  $\lambda_i$  ve  $g_i(\mathbf{x})$  sırasıyla korelasyon yapısının (*correlation structure*) özdeğeri ile özfonksiyonlarıdır ve Denklem 2.6' daki integralin çözümü ile elde edilmektedir (Li ve Der Kiureghian, 1993):

$$\int_{\Omega} \rho(\mathbf{x}, \mathbf{x}') g_i(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' = \lambda_i g_i(\mathbf{x}) \quad (2.6)$$

Böylece rastgele alan, sonsuz sayıda  $\xi_i$  rastgele değişkeni ile ifade edilmiş olur. Ancak, yalnızca en yüksek özdeğere sahip terimlerin önemi fazla olduğundan  $r$  sayıda terimle sonlu çözüme gidildiğinde hata ihmal edilebilmektedir (Huang vd., 2001). Bu durumda, ayrıklaştırılmış rastgele alan Denklem 2.7' deki biçime dönüşmektedir (Sudret ve Der Kiureghian, 2000):

$$\hat{f}(\mathbf{x}, \theta) = \mu(\mathbf{x}) + \sigma(\mathbf{x}) \sum_{i=1}^r \xi_i(\theta) \sqrt{\lambda_i} g_i(\mathbf{x}) \quad (2.7)$$

Özellikle çok boyutlu rastgele alanlarda, Denklem 2.6' daki integralin kesin çözümü yapılamamaktadır. Bu durumda, çözüm için bazı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlardan birinde ayrık integrasyon kuralı ile integral problem bir matris özdeğer problemine çevrilmiştir (Mirfendereski, 1990). Diğer bir yöntemde ise Galerkin tipi yaklaşım ile problemin çözümü gerçekleştirilmektedir. Bu durumda,  $g_i(\mathbf{x})$  özfonksiyonları  $\Omega$  tanım kümesinde, baz fonksiyonlar (*basis function*) kümesi ve ilgili katsayılar kümesi cinsinden tanımlanarak integral problemi bir matris özdeğer problemine dönüştürülmüştür. Araştırmacılar, bu yaklaşım ile parçalı polinom baz fonksiyonları kullanarak seri açılımı yöntemiyle rastgele alan ayrıklaştırması uygulamışlardır (Ghanem ve Spanos, 1991; Phoon vd., 2002). Yapılan bu çalışmada rastgele alan ayrıklaştırması, KL seri açılımı kullanılarak yapılmıştır. Özdeğer problem, matris formuna dönüştürülmüş ve MATLAB yazılımı ile “randomfield”

isimli kod kullanılarak çözülmüş, rastgele alan gerçekleştirmeleri üretilmiştir (Constantine, 2020).

### 2.3. Rastgele Alan ve Sonlu Eleman Ağlarının Oluşturulması

RFEM’ de göz önüne alınması gerekli diğer bir konu, sonlu eleman ve rastgele alan ağı boyutlarının seçimidir. Sonlu eleman ağı, deterministik olarak geometriye ve yükleme durumlarına bağlı olarak seçilebilmektedir. Olasılık tabanlı analiz için uygulanacak sonlu elemanda ise rastgele alan ağının boyutu ön plandadır. Rastgele elemanların boyutunu kontrol eden başlıca parametre korelasyon uzunluğudur. Sonlu elemanlar ağına daha hassas eleman boyutu (*fine mesh*) kullanmak hesap süresi dışında bir hataya yol açmazken,  $\theta'$  nın yüksek olması durumunda hassas seçilen rastgele alan ağı sayısal dengesizliklere neden olabilmektedir. Böyle bir durumda, ayrıklaştırılmış rastgele alanın korelasyon matrisi tekil (*singular*) olmaya eğilimli olduğundan çözüm elde edilememektedir. Sonlu eleman ağı ve rastgele alan ağının oluşturulmasındaki koşullar birbirinden farklı olduğundan, iki ağın birbiriyle uyuşması teorik olarak gerekli değildir. Bu nedenle, analizlerde iki ayrı ağın göz önüne alınması önerilmiştir (Der Kiureghian ve Ke, 1988). Pratik olarak, geometrik koşulları sağlayan ve korelasyon uzunluğuna uyumlu bir sonlu eleman ağı seçildikten sonra, bu eleman boyutlarına eşit veya daha kaba (*coarse mesh*) seçilen rastgele alan ağları ile analiz yapıldığında mümkün olan en az sayıda rastgele değişken kullanılarak doğru bir şekilde çözüme gidilebilmektedir (Liu ve Der Kiureghian, 1991). Çalışmada da literatürdeki öneriye uyulmuş ve geometrik koşullara uygun sonlu eleman ağı oluşturulduktan sonra, korelasyon uzunluklarına uyumlu ve sonlu eleman ağı boyutuna eşit büyüklükte rastgele alan ağları tanımlanmıştır. Bir başka ifade ile, çalışmadaki değişen korelasyon uzunluklarının rastgele alan ağı boyutuna oranı 1 olarak alınmıştır.

### 2.4. Olasılık Tabanlı Sonlu Elemanlar Matrisinin ve Malzeme Modelinin Formülasyonu

FEM çözümlerinde başlıca sonuç çıktıları, düğüm noktalarındaki (*nodes*) yer değiştirmelerdir. Bu yer değiştirmeler, yükleme koşulu ve rijitlik matrisinin oluşturduğu denklem takımının çözümü ile hesaplanmaktadır. Elastik bir sistem ele

alınırsa yer değiştirmeler,  $A \times A$  serbestlik dereceli doğrusal cebirsel denklem takımı ile Denklem 2.8 yardımıyla çözülebilmektedir (Sudret ve Der Kiureghian, 2002):

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (2.8)$$

Burada;  $\mathbf{F}$  deterministik yük vektörü,  $\mathbf{K}$  global rijitlik matrisi ve  $\mathbf{U}$  yer değiştirme vektörüdür. Her bir sonlu eleman rijitlik matrisi  $\mathbf{k}^e$ ' nin toplanması ile  $\mathbf{K}$  global rijitlik matrisi elde edilmektedir. Eleman rijitlik matrisi, her bir elemanın tanım alanı  $\Omega_e$  üzerinden Denklem 2.9 ile hesaplanmaktadır (Sudret ve Der Kiureghian, 2002):

$$\mathbf{k}^e = \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{B} d\Omega_e \quad \mathbf{K} = \bigcup_e \mathbf{k}^e \quad (2.9)$$

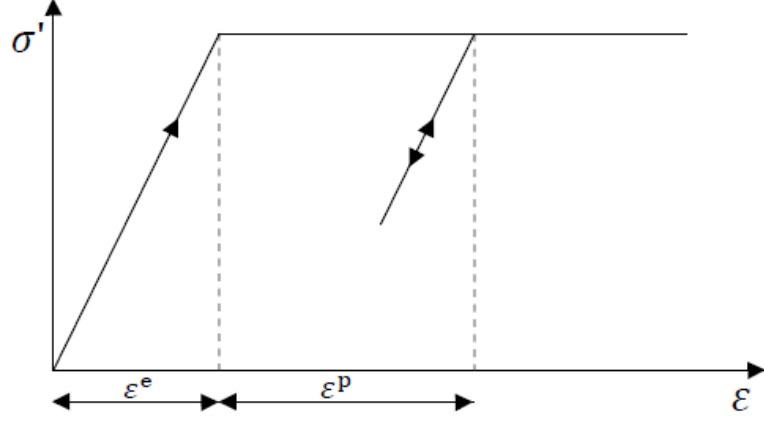
Denklem 2.9' da verilen eleman rijitlik matrisinin ifadesinde  $\mathbf{D}$  elastisite matrisi ve  $\mathbf{B}$  birim Şekil değiştirmeler ile düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler arasındaki ilişkiyi ifade eden bünye matrisidir. Burada, Elastisite modülünün rastgele alan olarak tanımlanması halinde  $\mathbf{D}$  matrisi bu alanın gerçekteşimlerini içereceğinden,  $\mathbf{K}$  matrisi olasılık tabanlı olmaktadır. Rastgele alan, m terim kullanılarak KL seri açılımı ile ifade edilmişse,  $\mathbf{K}$  matrisi Denklem 2.10' daki biçimde yazılabilmektedir (Sudret ve Der Kiureghian, 2002):

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_0 + \sum_{i=1}^m \mathbf{K}_i \xi_i(\theta) \quad (2.10)$$

$\mathbf{K}_0$  ortalama değeri ifade ederken ikinci terim, rijitlikteki değişkenliği göstermektedir. m terim ile global rijitlik matrisi ve  $\mathbf{F}$  yük vektörü ile çözümlenerek  $\mathbf{U}$  yer değiştirme vektörü olasılık tabanlı hesaplanabilmektedir. Problemin doğrusal olmayan malzeme modelleri ile çözümlenmesi halinde  $\mathbf{B}$  matrisinin içerdeği birim Şekil değiştirmelerin elastik ( $\varepsilon^e$ ) ve plastik ( $\varepsilon^p$ ) olmak üzere iki bileşeni olmaktadır. Örneğin, Mohr-Coulomb yenilme kriteri için analiz yapılmışsa yenilme yüzeyini oluşturan parametrelerin (c ve  $\phi$ ) rastgele alan olması durumunda  $\mathbf{B}$  matrisi de Denklem 2.10' da verilen  $\mathbf{K}$  matrisine benzer Şekilde olasılık tabanlı olmaktadır. Bu durumda birim Şekil değiştirmeler Denklem 2.11' deki gibi ifade edilmelidir (Kohnke, 2009):

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (2.11)$$

Temel hareketlerinin incelendiği bu çalışma kapsamındaki analizlerde, doğrusal elasto-plastik (Mohr-Coulomb-MC) zemin modeli ile rastgele sonlu elemanlar yöntemi uygulanmıştır. Bu durumda gerilme-birim deformasyon ekseninde Denklem 2.11’ de verilen iki farklı birim şekil değiştirme bileşeni bulunmaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Doğrusal elasto-plastik modelde gerilme- birim şekil değiştirme davranışı (Kohnke, 2009)

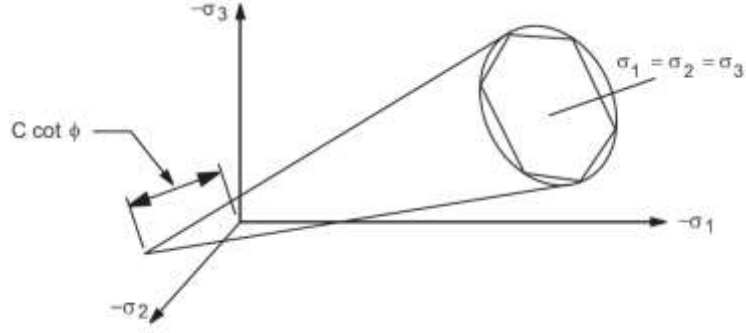
Doğrusal elastik bölgede Hooke yasası geçerlidir ve Denklem 2.12’ de verilen gerilme (σ) ve şekil değiştirmenin elastik bileşeni (ε<sup>e</sup>) arasındaki ilişkiyi ifade eden eşitliğe göre hesaplama yapılmaktadır (Kohnke, 2009).

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^e\} \quad (2.12)$$

Plastik bölgede ise MC yenilme yüzeyi belirgin rol oynamaktadır. Bu kritere göre, Coulomb’ un sürtünme yasasının genel gerilme halindeki ifadesi ile yenilme yüzeyi belirlenmekte ve malzemedeki sonlu elemanların her bir yüzeyinde bu yasaya uyulduğu kabulüyle hesaplama yapılmaktadır. MC yenilme yüzeyi (F<sub>y</sub>) Denklem 2.13’ te verilen ifadeye göre zeminin kohezyon (c) ve kayma direnci açısı (φ) ile tanımlanmaktadır (Kohnke, 2009).

$$F_y = \frac{6 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \cdot \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \sqrt{\frac{1}{2} \{q\}^T [M] \{q\}} \leq 0 \quad (2.13)$$

Burada, q deviyör gerilme, M ise plastik uygunluk matrisidir (*plastic compliance matrix*). Böylece üç eksenli gerilme uzayında MC yenilme yüzeyi Şekil 2.6’ deki gibi ifade edilmektedir.



Şekil 2.6. Mohr-Coulomb yenilme yüzeyi (Kohnke, 2009)

Elastik bölge ve yenilme arasındaki plastik deformasyonlar ise Denklem 2.14' deki ifadeye göre tanımlanmaktadır (Kohnke, 2009).

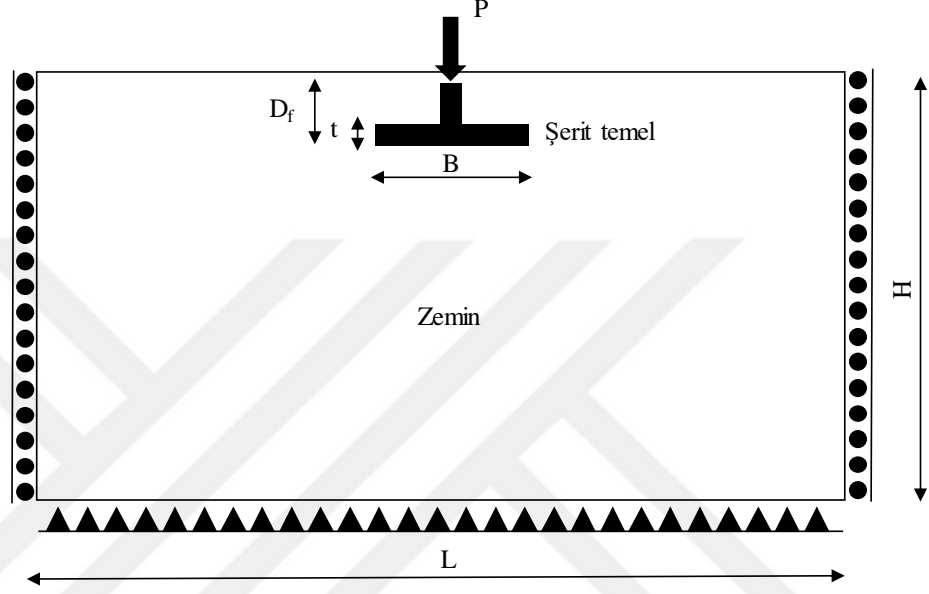
$$\{d\varepsilon^p\} = \lambda \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \quad (2.14)$$

Burada, Q plastik bölgedeki birim deformasyonların yönünü tayin eden plastik potansiyel (*plastic potential*) adını alır ve MC yenilme kriterinin üçüncü parametresi olan kabarma açısına ( $\psi$ ) bağlıdır,  $\lambda$  ise plastik deformasyonların miktarını belirleyen bir çarpandır (*plastic multiplier*). Akma kuralına göre,  $Q=F$  ise plastik birim şekil değiştirmenin yönü, yenilme yüzeyine dik (*associative flow rule*),  $Q \neq F$  ise dik değildir (*non-associative flow rule*). Bu durumlar zeminin kabarma (*dilation*) veya daralma (*contraction*) eğilimine göre değişim göstermektedir. Çalışmada kum modeller için kabarma etkisi göz önüne alınmış, kil modellerde  $\psi=1$ , yani kabarma olmadığı kabul edilmiştir. Malzeme modeli formülasyonları için çalışmada kullanılan yazılımın teori referansından yararlanılmıştır (Kohnke, 2009).

### 3. SAYISAL MODEL BİLGİLERİ

Bu bölümde, çalışmadaki değerlendirmelerde kullanılan sayısal analiz modellerinin oluşturulması detaylı olarak açıklanmıştır. Düşey çizgisel yük etkisindeki bir şerit temelin düzlem deformasyon durumunda (*plane strain condition*) olasılık tabanlı oturma analizinin yapıldığı çalışmada, RFEM ile hesaplanan sonuçlar değerlendirilmiştir. Sınır koşulları düzlem deformasyon durumunu sağlayacak şekilde

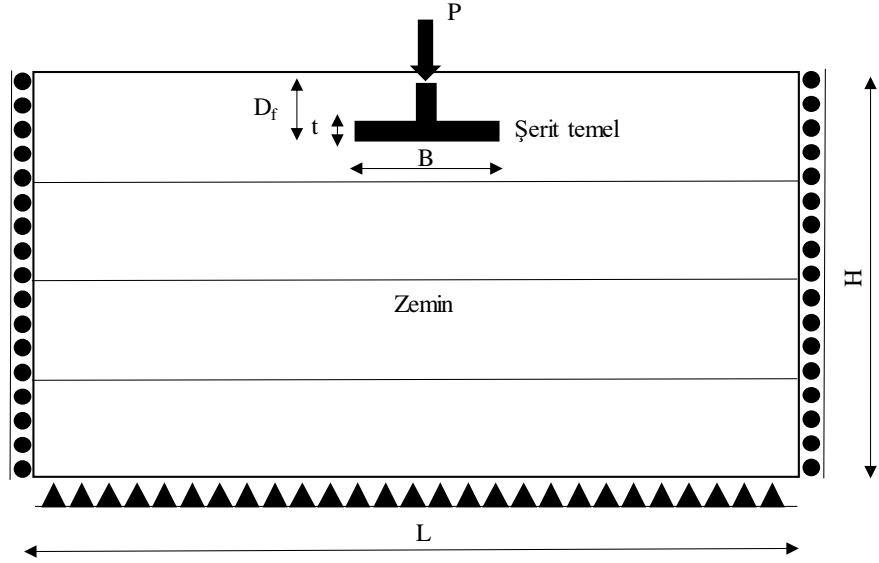
modellenmiştir. Buna göre, model tabanı tamamen ankastre, kenarlar x ve z eksenlerinde tutulu ve model ön- arka yüzleri ise z ekseninde tutulu olarak tanımlanmıştır. Analizdeki parametreler, başlıca iki tip zemine göre oluşturulan ayrı modellerle tanımlanmıştır. İnce daneli zeminleri temsilen kullanılan kil modeli ve iri daneli zemin davranışını temsil eden kum modeli olmak üzere iki ana sayısal model oluşturulmuştur. Kil modelinin temsili Şekil 3.1’ de sunulmaktadır.



Şekil 3.1. Temsili kil modeli

Zemindeki uzamsal değişkenlik, rijitlik ( $E_d$ ) ve dayanım parametrelerinin ( $c$  ve  $\phi$ ) rastgele alan olarak tanımlanmasıyla yansıtılmıştır. Model sınırı ( $H$  ve  $L$ ), temel boyutları ( $B$ ,  $t_{\text{Temel}}$  ve  $D_f$ ), temele uygulanan yük ile zeminin diğer tüm parametreleri sabit alınmıştır. Yeraltı su seviyesinin, temel hareketlerini etkilemeyecek kadar aşağıda olduğu drenajlı durum incelenmiştir.

Kum tipi modellerde, değişken tanımlanan zemin parametrelerinin derinlikle artışının göz önüne alınması gerekmektedir. Her iki tip model için  $40 \times 20$  m model boyutu kullanılmasına karşın, kum modellerde derinlik 5 m’ lik şeritlere bölünerek tanımlanmıştır (Şekil 3.2). Her bir şerit için kum zemin parametrelerinin ( $E_d$  ve  $\phi$ ) ortalamaları derinlikle artırılarak rastgele alanlar oluşturulmuştur. Böylece kum zemindeki uzamsal değişkenliğin yanı sıra, iri daneli zeminlerde direnç ve dayanımın derinlikle artışı hesaba katılmıştır.



Şekil 3.2. Temsili kum modeli

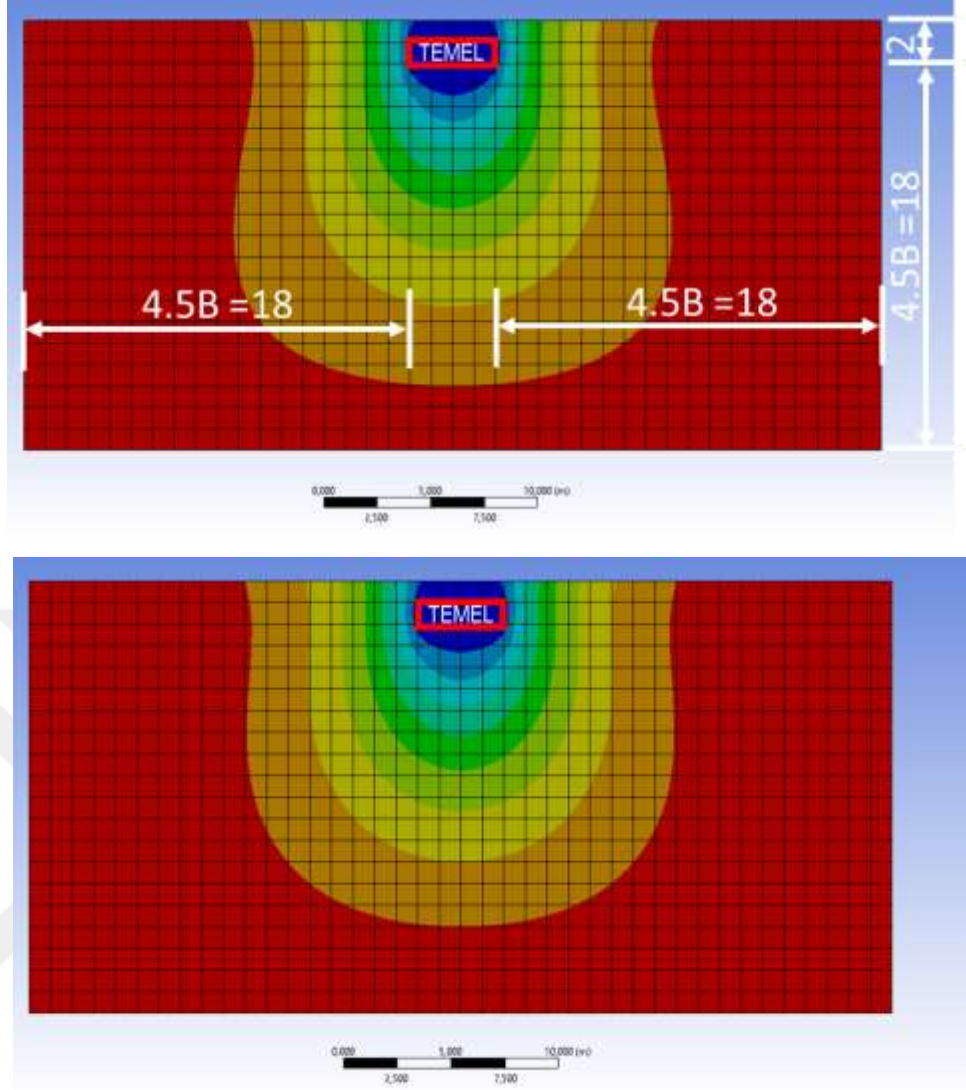
### 3.1. Model Sınırları ve Geometrik Boyutların Belirlenmesi

Analizlerdeki model sınırları, deformasyon konturlarını etkilemeyecek düzeyde seçilmiştir. Hem kil hem de kum modeli için kullanılan boyutlar ve deformasyon konturlarının sınırlara ulaşmadığı Şekil 3.3’ te sunulmuştur.

Temel genişliği tipik yüzeysel temel boyutları arasında kalınarak 4 m alınmıştır. Temel kalınlığı ise  $t_{Temel} = B/4$  olacak şekilde 1 m alınmıştır. Buna göre, Denklem 3.1’ de verilen eşitlik ile temel rijitliği hesaplanmıştır (Budhu, 2008):

$$K_r = \frac{E_{temel}(1 - \nu_{zemin}^2)}{E_{zemin}} \left( \frac{t_{Temel}}{r_0} \right)^3 \quad (3.1)$$

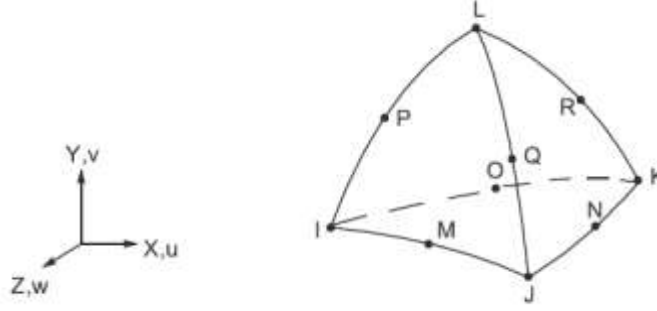
Kil model için temel rijitliği 26, kum modeli için 14 bulunmuştur. Her iki durumda  $K_r > 10$  koşulu sağlandığından rijit temel kabulü ile çözüm yapılmıştır (Budhu, 2008). Temel gömme derinliği ( $D_f$ ), minimum donma derinliği göz önüne alınarak 2 m alınmış, Poisson oranı ( $\nu$ ) ise kum için 0.35, kil için 0.25 tipik değer kabul edilmiştir. RFEM modelleri, 1 metre kalınlıkta üç boyutlu katı elemanlar (*solid*) halinde modellenmiş ve sınır koşulları düzlem deformasyon durumunu sağlayacak şekilde tanımlanmıştır. Buna göre, model tabanı tamamen ankastre, kenarlar x ve z eksenlerinde tutulu ve model ön-arka yüzleri ise z ekseninde tutulu olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.3. a) Kil, b) kum modeli sınırları ve deformasyon konturları

### 3.2. Eleman Bilgileri ve Zemin-Temel Ara Yüzey Özellikleri

Tüm modellerde zemin ve temel kütleleri 10 düğüm noktalı düzgün dörtyüzlü katı cisim (SOLID187) olarak tanımlanmıştır. Temel elemanı içerisine beton malzeme, zemin içerisine MC yenilme kriterine sahip doğrusal elasto-plastik malzeme özellikleri atanmıştır. SOLID187, ikinci dereceden yer değiştirme davranışına sahip ve düzensiz sonlu eleman ağlarını modellemeye uygun bir eleman tipidir. Eleman, 10 düğüm noktası ve her bir düğümde üç serbestlik derecesine sahiptir: üç eksendeki yer değiştirmeler (Şekil 3.4). SOLID187 ile elasto-plastisite içeren malzeme modelleri kullanılabilir (Kohnke, 2009).



Şekil 3.4. SOLID187- 10 düğüm noktalı düzgün dörtyüzlü katı cisim (Kohnke, 2009)

Düğümlere ek olarak, eleman girdileri ortotropik veya anizotropik malzeme özelliklerini içerebilmektedir. Eleman yüzeyinde tanımlanan yükleme durumu, her bir düğüm noktasına tekil yük olarak aktarılmaktadır. Düğüm yüklerinin oluşturduğu ötelenmeler, global rijitlik matrisine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Eleman bazında hesaplanan rijitlikler ve girilen yükün oluşturduğu ötelenme, her bir ekseninde Denklem 3.2’ de verilen şekil fonksiyonlarının integrasyonu ile çözümlenmektedir (Kohnke, 2009):

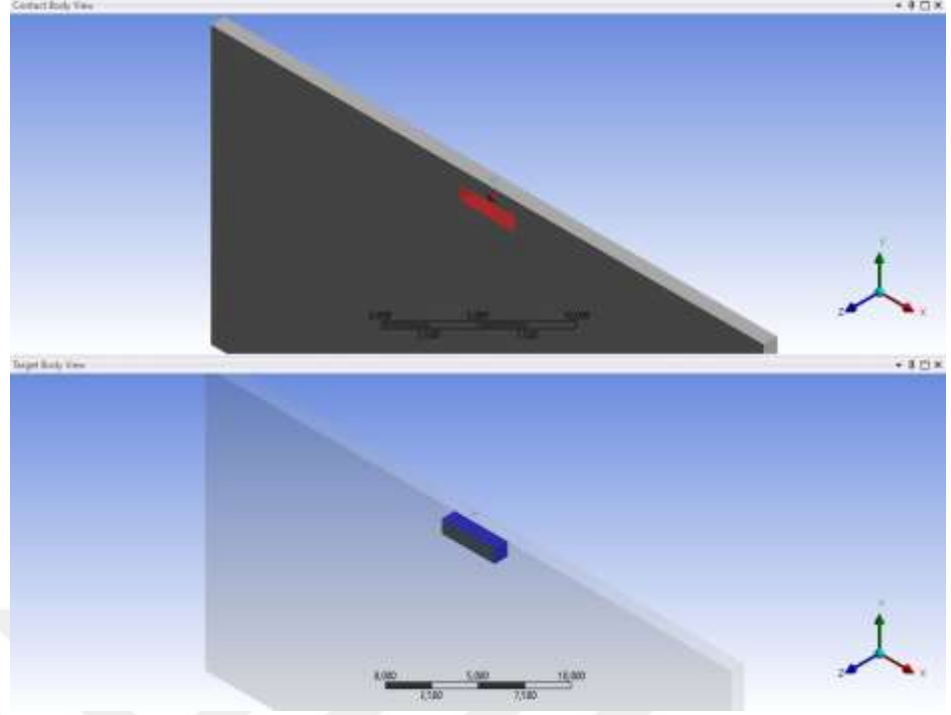
$$u = u_I(2L_1 - 1)L_1 + u_J(2L_2 - 1)L_2 + u_K(2L_3 - 1)L_3 + u_L(2L_4 - 1)L_4 + 4u_M L_1 L_2 + u_N L_2 L_3 + u_O L_1 L_3 + u_P L_1 L_4 + u_Q L_2 L_4 + u_R L_3 L_4 \quad (3.2a)$$

$$v = v_I(2L_1 - 1)L_1 + v_J(2L_2 - 1)L_2 + v_K(2L_3 - 1)L_3 + v_L(2L_4 - 1)L_4 + 4v_M L_1 L_2 + v_N L_2 L_3 + v_O L_1 L_3 + v_P L_1 L_4 + v_Q L_2 L_4 + v_R L_3 L_4 \quad (3.2b)$$

$$w = w_I(2L_1 - 1)L_1 + w_J(2L_2 - 1)L_2 + w_K(2L_3 - 1)L_3 + w_L(2L_4 - 1)L_4 + 4w_M L_1 L_2 + w_N L_2 L_3 + w_O L_1 L_3 + w_P L_1 L_4 + w_Q L_2 L_4 + w_R L_3 L_4 \quad (3.2c)$$

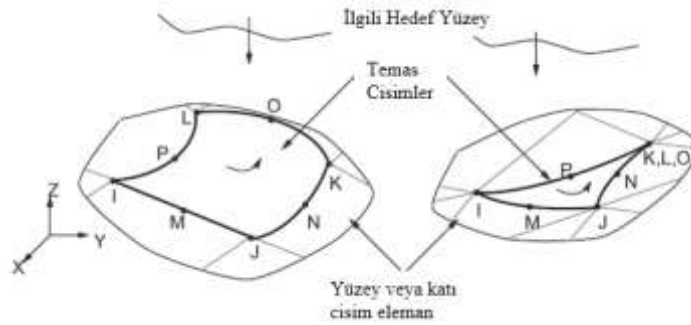
Burada; u, v ve w ilgili eksenlerdeki ötelenmeler,  $L_1$ - $L_4$  ise sonlu elemanın konumunu orijine göre ifade eden normalize koordinatlarıdır.

Sayısal analizlerde, modelin iki veya daha fazla tipte farklı malzeme içermesi durumunda bu malzemelerin temas yüzeyi boyunca oluşan değişimin göz önüne alınması gerekmektedir. Bu çerçevede, tüm analiz modellerinde temel çevresinde zemin- temel ara yüzeyi tanımlanmıştır (Şekil 3.5). Yazılımda iki farklı cisim olarak tanımlanan malzemelerde otomatik olarak ara yüzey (*contact*) tanımlanmaktadır. Ara yüzey, üç boyutlu 8 düğüm noktalı yüzeyden yüzeye temas cisim (CONTA174-*contact body*) ve benzer geometrik özellikleri paylaşan üç boyutlu hedef cisim (TARGET170-*target body*) olmak üzere iki elemandan oluşmaktadır. Burada hedef cisim betonarme temeli, temas cisim ise zemin kitlesini temsil etmektedir.



Şekil 3.5. ANSYS ara yüzey tanımlama

CONTA174, 3 boyutlu hedef yüzeyler ile bu eleman tarafından tanımlanan şekil değiştiren bir yüzey arasındaki teması ve kaymayı temsil etmek için kullanılmaktadır. Eleman, üç boyutlu katı cisim veya kabuk elemanlarının yüzeylerinde bulunmaktadır ve bağlı olduğu eleman ile aynı geometrik özelliklere sahiptir. Dörtgen veya üçgen sonlu eleman ağı durumlarına göre formülasyonu değişmektedir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. CONTA174- üç boyutlu 8 düğüm noktalı yüzeyden yüzeye temas cisim (Kohnke, 2009)

Sonlu eleman ağının dörtgen olması durumunda Denklem 3.3' teki üç serbestlik derecesindeki ötelenmeler ile çözüm yapılmaktadır (Kohnke, 2009):

$$u = \frac{1}{4} \left( u_I(1-s)(1-t)(-s-t-1) + u_J(1-s)(1-t)(s-t-1) \right. \\ \left. + u_K(1-s)(1-t)(s-t-1) + u_L(1-s)(1-t)(-s-t-1) \right) \\ + \frac{1}{2} \left( u_M(1-s^2)(1-t) + u_N(1+s)(1-t^2) \right) \\ + \frac{1}{2} \left( u_O(1-s^2)(1+t) + u_P(1-s)(1-t^2) \right) \quad (3.3a)$$

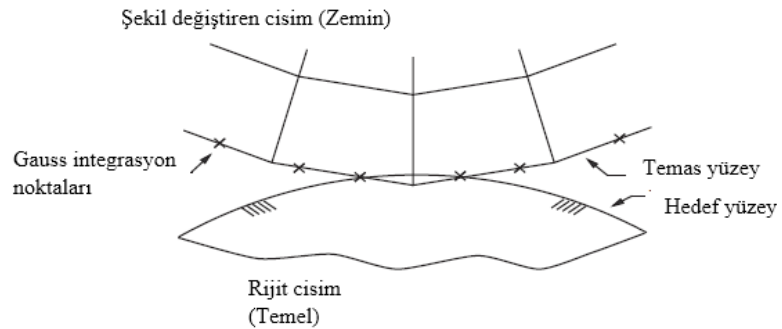
$$v = \frac{1}{4} \left( v_I(1-s)(1-t)(-s-t-1) + v_J(1-s)(1-t)(s-t-1) \right) \\ \left. + v_K(1-s)(1-t)(s-t-1) + v_L(1-s)(1-t)(-s-t-1) \right) \\ + \frac{1}{2} \left( v_M(1-s^2)(1-t) + v_N(1+s)(1-t^2) \right) \\ + \frac{1}{2} \left( v_O(1-s^2)(1+t) + v_P(1-s)(1-t^2) \right) \quad (3.3b)$$

$$w = \frac{1}{4} \left( w_I(1-s)(1-t)(-s-t-1) + w_J(1-s)(1-t)(s-t-1) \right) \\ \left. + w_K(1-s)(1-t)(s-t-1) + w_L(1-s)(1-t)(-s-t-1) \right) \\ + \frac{1}{2} \left( w_M(1-s^2)(1-t) + w_N(1+s)(1-t^2) \right) \\ + \frac{1}{2} \left( w_O(1-s^2)(1+t) + w_P(1-s)(1-t^2) \right) \quad (3.3c)$$

Burada, s ve t eleman yüzeyinin kenar boyutlarına göre normalize koordinatlarını ifade etmektedir. Ağın üçgen sonlu elemanlardan oluşması durumunda ise Denklem 3.4' te verilen şekil fonksiyonları kullanılır (Kohnke, 2009):

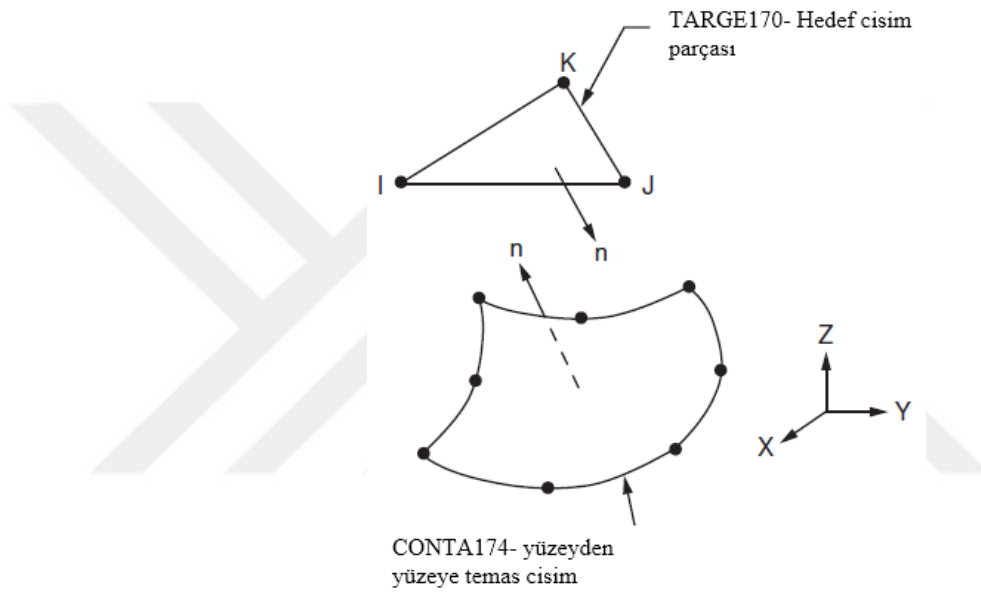
$$u = u_I(2L_1 - 1)L_1 + u_J(2L_2 - 1)L_2 + u_K(2L_3 - 1) \\ + u_L(4L_1L_2) + u_M(4L_2L_3) + u_N(4L_3L_1) \quad (3.4a) \\ v = v_I(2L_1 - 1)L_1 + v_J(2L_2 - 1)L_2 + v_K(2L_3 - 1) \\ + v_L(4L_1L_2) + v_M(4L_2L_3) + v_N(4L_3L_1) \\ w = w_I(2L_1 - 1)L_1 + w_J(2L_2 - 1)L_2 + w_K(2L_3 - 1) \\ + w_L(4L_1L_2) + w_M(4L_2L_3) + w_N(4L_3L_1)$$

Temas, eleman yüzeyi ilgili bir hedef yüzeye penetrasyon olduğunda meydana gelmektedir. Bu durumun algılanması, düğüm noktalarında veya Gauss noktalarında bulunan integrasyon noktaları ile gerçekleşmektedir. Yazılımda temas cisim, integrasyon noktalarında hedef yüzeye içine ötelenmeye karşı sınırlandırılmıştır. Bununla birlikte, hedef yüzey prensip olarak temas yüzeyine penetre olabilmektedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. ANSYS' te temas algılama noktaları (Kohnke, 2009)

TARGE170, ilgili temas elemanlar için çeşitli üç boyutlu hedef yüzeyleri temsil etmek için kullanılmaktadır. Temas cisim, deforme olabilen bir katı cismin sınırını kaplar ve TARGE170 tarafından tanımlanan hedef yüzeyle potansiyel olarak temas halindedir. Hedef cisim, bir veya daha fazla temas elemanın bir hedef segmente penetrasyonunu algılayan ve buna göre yanıt veren basit bir geometrik özelliktir (Şekil 3.8). Hedef yüzey, bir dizi hedef segment aracılığıyla modellenmektedir ve birkaç hedef segment bir hedef yüzeyin tamamını oluşturmaktadır. Rijit cisim üzerindeki hedef yüzeyin reaksiyon kuvveti, ilgili temas elemanlarının düğüm kuvvetlerinin toplamı ile elde edilmektedir (Kohnke, 2009).

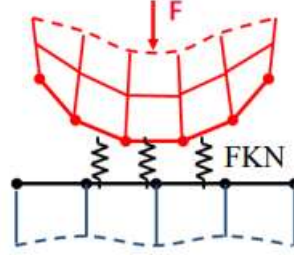


Şekil 3.8. TARGE170- Üç boyutlu hedef cisim (Kohnke, 2009)

Zemine temas eden farklı malzemeler için ara yüzeydeki rijitlik ve direncin, maksimum dayanıma oranı 0.60- 0.80 olduğu belirtilmiştir (Bowles, 1997). Buna göre, genel olarak kabul edilen aralıkta kalınarak rijitlik oranı (*stiffness factor*), tüm modellerdeki ara yüzeylerde 0.67 alınmıştır. ANSYS yazılımında ara yüzeyde genel rijitlikten farklı rijitliğe sahip yaylar olduğu varsayımıyla hesap yapılmaktadır. Yazılımdaki *normal stiffness factor* (FKN) girdisi bu yayın rijitlik sabitini ifade etmektedir (Şekil 3.9). Temas cisim üzerine gelen toplam F yükünün oluşturacağı P basıncı, hedef ve temas cisim arasındaki sıkışmaya bağlı tariflenmektedir. Çalışmada, ara yüzeydeki yer değiştirmeyi tekrarlı çözerek bulan Genişletilmiş Lagrange Yöntemi (*Augmented Lagrangian Method*) kullanılmıştır (Denklem 3.5) (Kohnke, 2009):

$$P = \begin{cases} 0, & u_n > 0 \\ K_n u_n + \lambda_{i+1}, & u_n \leq 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

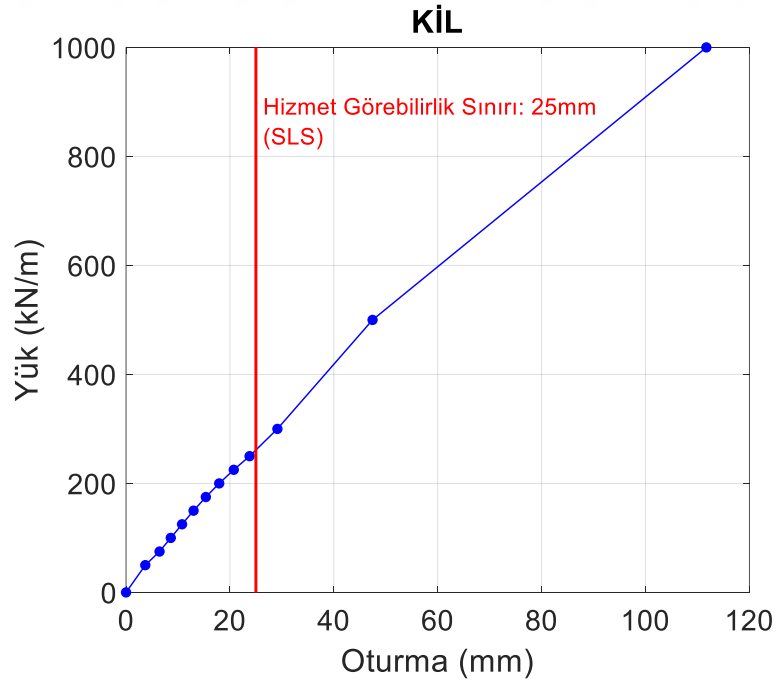
Burada;  $K_n$  rijitlik oranını (yazılımdaki FKN girdisi),  $u_n$  ara yüzeydeki boşluk mesafesini (ötelenme) ve  $\lambda_{i+1}$  ise Lagrange çarpanını ifade etmektedir.

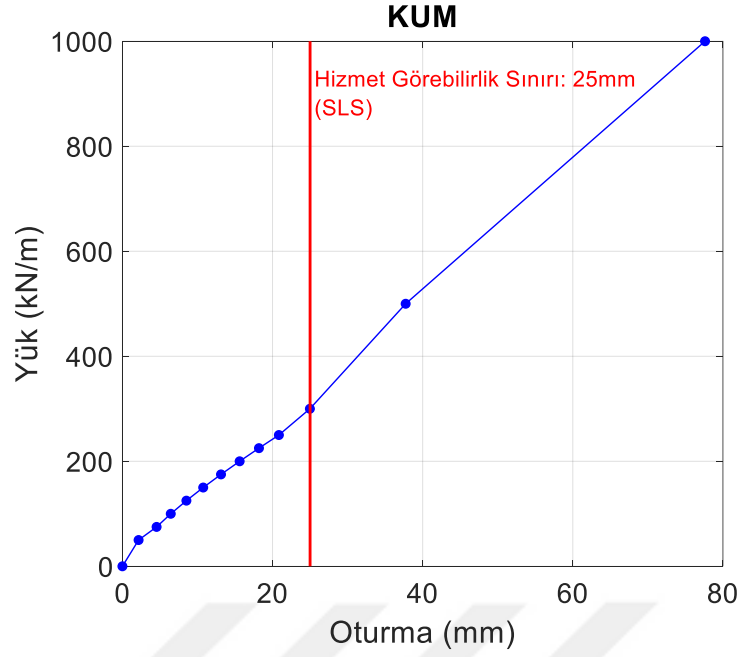


Şekil 3.9. ANSYS ara yüzey modeli (Kohnke, 2009)

### 3.3. Yükleme Sınırlarının Belirlenmesi

Modellerdeki şerit temeller çizgisel yüklenmiş ve değeri deterministik olarak belirlenmiştir. Tipik deformasyon limiti olan 25 mm oturmaya karşılık gelen yük değerleri her bir model için ayrıca sunulmuştur (Şekil 3.10).





Şekil 3.10. a) Kil, b) Kum modeller için yükleme sınırları

Buna göre kil modeli için 250 kN/m, kum modeli için ise 300 kN/m çizgisel yük belirlenmiştir.

### 3.4. Parametreler için Belirlenen Limit Değerler ve Hasar Sınırları

Tüm sabit parametreler ve seçimleri ile ilgili koşul ve açıklamalar Tablo 3.1’ de özetlenmiştir. Rastgele alan olarak tanımlanan değişken parametrelerin ortalamaları, literatürde kabul görmüş tipik değerlere göre seçilmiştir (Bowles, 1997; Budhu, 2010). Parametrelerdeki değişimin incelenmesi amacıyla ayrıca, değişkenlerin COV (*Coefficient of variation*- Değişme katsayısı) değerleri düşük, orta ve yüksek değişkenlik gösterecek şekilde üç kategoride sunulmuştur. Kil modeller için değişken parametreler Tablo 3.2’ de verilmiştir.

Tablo 3.1. Sabit parametre değerleri

Parametre	Değer
Temel Genişliği, B (m)	4
Temel Kalınlığı, $t_{\text{Temel}}$ (m)	B/4 (1.00) Kil $K_r= 26 \Rightarrow K_r>10$ Rijit Kum $K_r= 14 \Rightarrow K_r>10$ Rijit
Gömme Derinliği, $D_f$ (m)	$\max(t_{\text{Temel}}, \text{min. don derinliği}) < D_f \leq B$ $D_f=2$ alındığında tüm koşullar sağlanmaktadır.
Poisson Oranı, $\nu$	Kil için 0.35 Kum için 0.25
Çizgisel Yük (kN/m)	Kil için 250 Kum için 300

Tablo 3.2. Kil modeller için değişken parametre değerleri

Ortalama Değerler ( $\mu$ )			
$\mu_E = 15 \text{ MPa}$	$\mu_c = 5 \text{ kPa}$	$\mu_\phi = 20^\circ$	Değişkenlik
COV= 0.6 (2-83 MPa)	COV= 0.3 (2-13 kPa)	COV= 0.10 (14-28°)	Düşük
COV= 0.7 (2-103 MPa)	COV=0.4 (1-17 kPa)	COV= 0.15 (12-33°)	Orta
COV= 0.8 (1-126 MPa)	COV= 0.5 (1-22 kPa)	COV= 0.20 (10-38°)	Yüksek

Kum modeller, kayma direnci ve rijitlik parametrelerinin derinlikle değişimi göz önüne alındığından ayrı tabloda sunulmuştur. Modeller 0- 5 m, 5- 10 m, 10- 15 m ve 15- 20 m aralıklara bölünmüş ve parametre ortalamaları her bir derinlik aralığı için arttırılmıştır (Tablo 3.3).

Tablo 3.3. Kum modeller için değişken parametre değerleri

Ortalama Değerler ( $\mu$ )				
<b>z= 0- 5 m</b>	<b><math>\mu_E = 25 \text{ MPa}</math></b>	*Kumda sayısal denge için kohezyon 1 kPa alınmıştır.	<b><math>\mu_\phi = 25^\circ</math></b>	<b>Değişkenlik</b>
	COV= 0.2 (14-43 MPa)		COV= 0.10 (19-33°)	Düşük
	COV= 0.3 (10-55 MPa)		COV= 0.12 (18-35°)	Orta
	COV= 0.4 (8-70 MPa)		COV= 0.15 (16-38°)	Yüksek
<b>z= 5- 10 m</b>	<b><math>\mu_E = 30 \text{ MPa}</math></b>	*Kumda sayısal denge için kohezyon 1 kPa alınmıştır.	<b><math>\mu_\phi = 30^\circ</math></b>	<b>Değişkenlik</b>
	COV= 0.2 (17-52 MPa)		COV= 0.10 (23-40°)	Düşük
	COV= 0.3 (13-67 MPa)		COV= 0.12 (21-42°)	Orta
	COV= 0.4 (9-84 MPa)		COV= 0.15 (19-45°)	Yüksek
<b>z= 10- 15 m</b>	<b><math>\mu_E = 35 \text{ MPa}</math></b>	*Kumda sayısal denge için kohezyon 1 kPa alınmıştır.	<b><math>\mu_\phi = 35^\circ</math></b>	<b>Değişkenlik</b>
	COV= 0.2 (20-60 MPa)		COV= 0.10 (26-46°)	Düşük
	COV= 0.3 (15-78 MPa)		COV= 0.12 (25-49°)	Orta
	COV= 0.4 (11-98 MPa)		COV= 0.15 (23-53°)	Yüksek
<b>z= 15- 20 m</b>	<b><math>\mu_E = 40 \text{ MPa}</math></b>	*Kumda sayısal denge için kohezyon 1 kPa alınmıştır.	<b><math>\mu_\phi = 37^\circ</math></b>	<b>Değişkenlik</b>
	COV= 0.2 (22-69 MPa)		COV= 0.10 (28-49°)	Düşük
	COV= 0.3 (17-89 MPa)		COV= 0.12 (26-52°)	Orta
	COV= 0.4 (13-112 MPa)		COV= 0.15 (24-56°)	Yüksek

Tüm kil ve kum modelleri için üretilen parametrelerin sınır değerleri Tablo 3.2 ve Tablo 3.3' te parantez içinde verilmiştir. Tüm değişkenliklerde parametreler, tipik aralıklar içinde kalmıştır.

Rastgele alandaki diğer önemli değişken olan korelasyon uzunlukları, yataydaki değerler için temel boyutu cinsinden ( $\Theta_h$ ), düşeydeki değerler için ise anizotropi derecesini yansıtan yatay korelasyon uzunluğuna oran şeklinde boyutsuz verilmiştir. Belirlenen değerler Tablo 3.4' te özetlenmiş ve korelasyon uzunlukları literatürdeki tipik sınırlar içinde kalmıştır (Kulhawy vd., 1995; Lloret-Cabot vd., 2014).

Tablo 3.4. Korelasyon uzunlukları

Parametre	Değer (Kil Modeller)
$\Theta_h = \theta_h / B$	0.25 0.5 1 2.5 5 10 ( $\theta_h = 1- 40$ m)
$\theta_h / \theta_v$	2 10 ( $\theta_v = 0.1- 20$ m)
Parametre	Değer (Kum Modeller)
$\Theta_h = \theta_h / B$	0.25 0.5 1.25 2.5 5 10 ( $\theta_h = 1- 40$ m)
$\theta_h / \theta_v$	2* 8 ( $\theta_v = 0.125- 5$ m)

\*Kum modeller 5x40m şeritlere ayrıldığından  $\Theta_h = 5$  ve 10 için bu oran uygulanmamıştır.

Çalışmanın sonunda oluşturulması planlanan tehlike eğrileri, minimum hasar, orta hasar, güvenli limit ve ağır hasar sınırı olmak üzere üç limit için ve toplam oturma ve açılmal dönme kriterlerine göre oluşturulmuştur. Bu çerçevede, literatürde yaygın kullanılan limitler baz alınarak (Coduto, 2015; Das, 2010) kil ve kum modelleri için Tablo 3.5' te belirlenen deformasyon limitleri özetlenmiştir.

Tablo 3.5. Hasar sınırları için deformasyon limitleri

Kriter		Limit Değer		
		Kil		Kum
Toplam Oturma (mm)	Güvenli Limit	25	Minimum Hasar	15
	Orta Hasar	35	Orta Hasar	20
	Ağır Hasar	50	Güvenli Limit	25
Açılmal Dönme ( $\delta/B$ )	Minimum Hasar	1/1000	Minimum Hasar	1/2000
	Güvenli Limit	1/500	Orta Hasar	1/1000
	Ağır Hasar	1/250	Güvenli Limit	1/500

### 3.5. Rastgele Alanların Oluşturulması

Çalışma, zeminin uzamsal değişkenliğinin düşey yük altındaki yüzeysel temellerin deformasyonlarına nasıl etki edeceği sorusundan yola çıkmıştır. Bu çerçevede, başlıca parametreler zemin deformasyon modülü ( $E_d$ ), kohezyon ( $c$ ) ve kayma direnci açısı ( $\phi$ ) iki boyutlu rastgele alan olarak tanımlanırsa, temelde oluşabilecek oturma ve dönmeler ile temelin yük-deformasyon davranışındaki değişimin ne ölçüde olacağı araştırılmıştır. Buradan hareketle, temel hareketlerinin rastgele alan zemin parametreleri ile analizi hedeflenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi (*FEM-Finite Element Method*) ile oluşturulan modelde, zemin parametreleri rastgele alan olarak tanımlanmış ve tüm parametreler modellere aktarılmıştır. Analizler, Mohr-Coulomb zemin modeli ile düzlem deformasyon koşulunda sonlu elemanlar yazılımı ANSYS ile yapılmıştır. Deformasyon analizlerindeki başlıca parametrelerden  $E_d$ ,  $c$  ve  $\phi$  rastgele alan olarak tanımlanmıştır. Ancak Poisson oranı, RFEM çözümünde etkisinin ihmal edilebilir olması nedeniyle sabit alınmıştır (Fenton ve Griffiths, 2002). Rastgele alan parametreleri MATLAB açık kaynak fonksiyonu “*randomfield*” ile üretilmiştir (Constantine, 2020). Fonksiyon, tanımlanan mesh ve korelasyon yapısı (*corr*) bilgileri ile standart Gauss rastgele alan gerçekleştirimi (*realization*) üretmektedir. Rastgele alan ağı bilgisi, analizde kullanılan model boyutuna ve korelasyon uzunluğuna uygun olarak seçilmiştir. Korelasyon yapısındaki gerekli girdiler, korelasyon fonksiyonunun tipi (*corr.name*), rastgele alan korelasyon uzunluğu (*corr.c0*) ve rastgele alanın standart sapmasıdır (*corr.sigma*). Tüm parametreler için üstel korelasyon fonksiyonu ‘*exp*’ seçilmiştir. Negatif değerlerin elenmesi amacıyla rastgele alan parametreleri lognormal dağılım varsayılmıştır. Bu durumda Gauss rastgele alanın kullanılabilmesi için parametrelerin ortalama ( $\mu$ ) ve standart sapması ( $\sigma$ ), Denklem 3.6’ daki bağıntılar kullanılarak eşdeğer normal dağılım ortalama ( $\mu^{LN}$ ) ve standart sapmasına ( $\sigma^{LN}$ ) dönüştürülmüştür (Griffiths vd., 2007):

$$\sigma^{LN} = \sqrt{\ln(1 + COV^2)} \quad \mu^{LN} = \ln(\mu) - 0.5(\sigma^{LN})^2 \quad (3.6)$$

Tablo 3.4’ te verilen korelasyon uzunlukları ile modeller oluşturulmuştur. Her bir modelin Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’ te belirtilen ortalama ve COV değeri kullanılarak, Denklem 3.6 yardımıyla eşdeğer normal dağılım parametreleri hesaplanmıştır (Tablo

3.6 ve Tablo 3.7). Kum modeller için ortalamalar derinlikle arttığından, eşdeğer normal dağılım parametreleri derinlikle değişim gösterecek şekilde verilmiştir. Ayrıca kil modelden farklı olarak kum modeller,  $c'$  nin değişimini içermemektedir.

Tablo 3.6. Kil modellerin eşdeğer normal dağılım parametreleri

Model	$\theta_h$ (m)	$\theta_v$ (m)	Değişim	$\sigma_E^{IN}$	$\mu_E^{IN}$	$\sigma_c^{IN}$	$\mu_c^{IN}$	$\sigma_\phi^{IN}$	$\mu_\phi^{IN}$
KİL1	1	0.5	Düşük	0.555	2.554	0.294	1.566	0.100	2.991
			Orta	0.632	2.509	0.385	1.535	0.149	2.985
			Yüksek	0.703	2.461	0.472	1.498	0.198	2.976
KİL2	2	1	Düşük	0.555	2.554	0.294	1.566	0.100	2.991
			Orta	0.632	2.509	0.385	1.535	0.149	2.985
			Yüksek	0.703	2.461	0.472	1.498	0.198	2.976
KİL3	4	2	Düşük	0.555	2.554	0.294	1.566	0.100	2.991
			Orta	0.632	2.509	0.385	1.535	0.149	2.985
			Yüksek	0.703	2.461	0.472	1.498	0.198	2.976
KİL4	10	5	Düşük	0.555	2.554	0.294	1.566	0.100	2.991
			Orta	0.632	2.509	0.385	1.535	0.149	2.985
			Yüksek	0.703	2.461	0.472	1.498	0.198	2.976
KİL5	20	10	Düşük	0.555	2.554	0.294	1.566	0.100	2.991
			Orta	0.632	2.509	0.385	1.535	0.149	2.985
			Yüksek	0.703	2.461	0.472	1.498	0.198	2.976
KİL6	40	20	Düşük	0.555	2.554	0.294	1.566	0.100	2.991
			Orta	0.632	2.509	0.385	1.535	0.149	2.985
			Yüksek	0.703	2.461	0.472	1.498	0.198	2.976
KİL7	1	0.1	Düşük	0.555	2.554	0.294	1.566	0.100	2.991
			Orta	0.632	2.509	0.385	1.535	0.149	2.985
			Yüksek	0.703	2.461	0.472	1.498	0.198	2.976
KİL8	2	0.2	Düşük	0.555	2.554	0.294	1.566	0.100	2.991
			Orta	0.632	2.509	0.385	1.535	0.149	2.985
			Yüksek	0.703	2.461	0.472	1.498	0.198	2.976
KİL9	4	0.4	Düşük	0.555	2.554	0.294	1.566	0.100	2.991
			Orta	0.632	2.509	0.385	1.535	0.149	2.985
			Yüksek	0.703	2.461	0.472	1.498	0.198	2.976
KİL10	10	1	Düşük	0.555	2.554	0.294	1.566	0.100	2.991
			Orta	0.632	2.509	0.385	1.535	0.149	2.985
			Yüksek	0.703	2.461	0.472	1.498	0.198	2.976
KİL11	20	2	Düşük	0.555	2.554	0.294	1.566	0.100	2.991
			Orta	0.632	2.509	0.385	1.535	0.149	2.985
			Yüksek	0.703	2.461	0.472	1.498	0.198	2.976
KİL12	40	4	Düşük	0.555	2.554	0.294	1.566	0.100	2.991
			Orta	0.632	2.509	0.385	1.535	0.149	2.985
			Yüksek	0.703	2.461	0.472	1.498	0.198	2.976

Tablo 3.7. Kum modeller için eşdeğer normal dağılım parametreleri

Model No.	$\theta_h$ (m)	$\theta_v$ (m)	Parametre	z=0-5m			z=5-10m			z=10-15m			z=15-20m		
				Değişkenlik			Değişkenlik			Değişkenlik			Değişkenlik		
				Düşük	Orta	Yüksek	Düşük	Orta	Yüksek	Düşük	Orta	Yüksek	Düşük	Orta	Yüksek
KUM1	1	0.5	$\sigma_E^{IN}$	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853
			$\mu_E^{IN}$	3.1993	3.1758	3.1447	3.3816	3.3581	3.3270	3.5357	3.5123	3.4811	3.6693	3.6458	3.6147
			$\sigma_\theta^{IN}$	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492
			$\mu_\theta^{IN}$	3.2139	3.2117	3.2078	3.3962	3.3940	3.3901	3.5504	3.5482	3.5442	3.6059	3.6038	3.5998
KUM2	2	1	$\sigma_E^{IN}$	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853
			$\mu_E^{IN}$	3.1993	3.1758	3.1447	3.3816	3.3581	3.3270	3.5357	3.5123	3.4811	3.6693	3.6458	3.6147
			$\sigma_\theta^{IN}$	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492
			$\mu_\theta^{IN}$	3.2139	3.2117	3.2078	3.3962	3.3940	3.3901	3.5504	3.5482	3.5442	3.6059	3.6038	3.5998
KUM3	5	2.5	$\sigma_E^{IN}$	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853
			$\mu_E^{IN}$	3.1993	3.1758	3.1447	3.3816	3.3581	3.3270	3.5357	3.5123	3.4811	3.6693	3.6458	3.6147
			$\sigma_\theta^{IN}$	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492
			$\mu_\theta^{IN}$	3.2139	3.2117	3.2078	3.3962	3.3940	3.3901	3.5504	3.5482	3.5442	3.6059	3.6038	3.5998
KUM4	10	5	$\sigma_E^{IN}$	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853
			$\mu_E^{IN}$	3.1993	3.1758	3.1447	3.3816	3.3581	3.3270	3.5357	3.5123	3.4811	3.6693	3.6458	3.6147
			$\sigma_\theta^{IN}$	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492
			$\mu_\theta^{IN}$	3.2139	3.2117	3.2078	3.3962	3.3940	3.3901	3.5504	3.5482	3.5442	3.6059	3.6038	3.5998
KUM5	1	0.125	$\sigma_E^{IN}$	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853
			$\mu_E^{IN}$	3.1993	3.1758	3.1447	3.3816	3.3581	3.3270	3.5357	3.5123	3.4811	3.6693	3.6458	3.6147
			$\sigma_\theta^{IN}$	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492
			$\mu_\theta^{IN}$	3.2139	3.2117	3.2078	3.3962	3.3940	3.3901	3.5504	3.5482	3.5442	3.6059	3.6038	3.5998

Tablo 3.7 (Devamı)

Model No.	$\theta_h$ (m)	$\theta_v$ (m)	Parametre	z=0-5m			z=5-10m			z=10-15m			z=15-20m		
				Değişkenlik			Değişkenlik			Değişkenlik			Değişkenlik		
				Düşük	Orta	Yüksek	Düşük	Orta	Yüksek	Düşük	Orta	Yüksek	Düşük	Orta	Yüksek
KUM6	2	0.25	$\sigma_E^{IN}$	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853
			$\mu_E^{IN}$	3.1993	3.1758	3.1447	3.3816	3.3581	3.3270	3.5357	3.5123	3.4811	3.6693	3.6458	3.6147
			$\sigma_\phi^{IN}$	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492
			$\mu_\phi^{IN}$	3.2139	3.2117	3.2078	3.3962	3.3940	3.3901	3.5504	3.5482	3.5442	3.6059	3.6038	3.5998
KUM7	5	0.625	$\sigma_E^{IN}$	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853
			$\mu_E^{IN}$	3.1993	3.1758	3.1447	3.3816	3.3581	3.3270	3.5357	3.5123	3.4811	3.6693	3.6458	3.6147
			$\sigma_\phi^{IN}$	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492
			$\mu_\phi^{IN}$	3.2139	3.2117	3.2078	3.3962	3.3940	3.3901	3.5504	3.5482	3.5442	3.6059	3.6038	3.5998
KUM8	10	1.25	$\sigma_E^{IN}$	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853
			$\mu_E^{IN}$	3.1993	3.1758	3.1447	3.3816	3.3581	3.3270	3.5357	3.5123	3.4811	3.6693	3.6458	3.6147
			$\sigma_\phi^{IN}$	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492
			$\mu_\phi^{IN}$	3.2139	3.2117	3.2078	3.3962	3.3940	3.3901	3.5504	3.5482	3.5442	3.6059	3.6038	3.5998
KUM9	20	2.5	$\sigma_E^{IN}$	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853
			$\mu_E^{IN}$	3.1993	3.1758	3.1447	3.3816	3.3581	3.3270	3.5357	3.5123	3.4811	3.6693	3.6458	3.6147
			$\sigma_\phi^{IN}$	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492
			$\mu_\phi^{IN}$	3.2139	3.2117	3.2078	3.3962	3.3940	3.3901	3.5504	3.5482	3.5442	3.6059	3.6038	3.5998
KUM10	40	5	$\sigma_E^{IN}$	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853	0.1980	0.2936	0.3853
			$\mu_E^{IN}$	3.1993	3.1758	3.1447	3.3816	3.3581	3.3270	3.5357	3.5123	3.4811	3.6693	3.6458	3.6147
			$\sigma_\phi^{IN}$	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492	0.0998	0.1196	0.1492
			$\mu_\phi^{IN}$	3.2139	3.2117	3.2078	3.3962	3.3940	3.3901	3.5504	3.5482	3.5442	3.6059	3.6038	3.5998

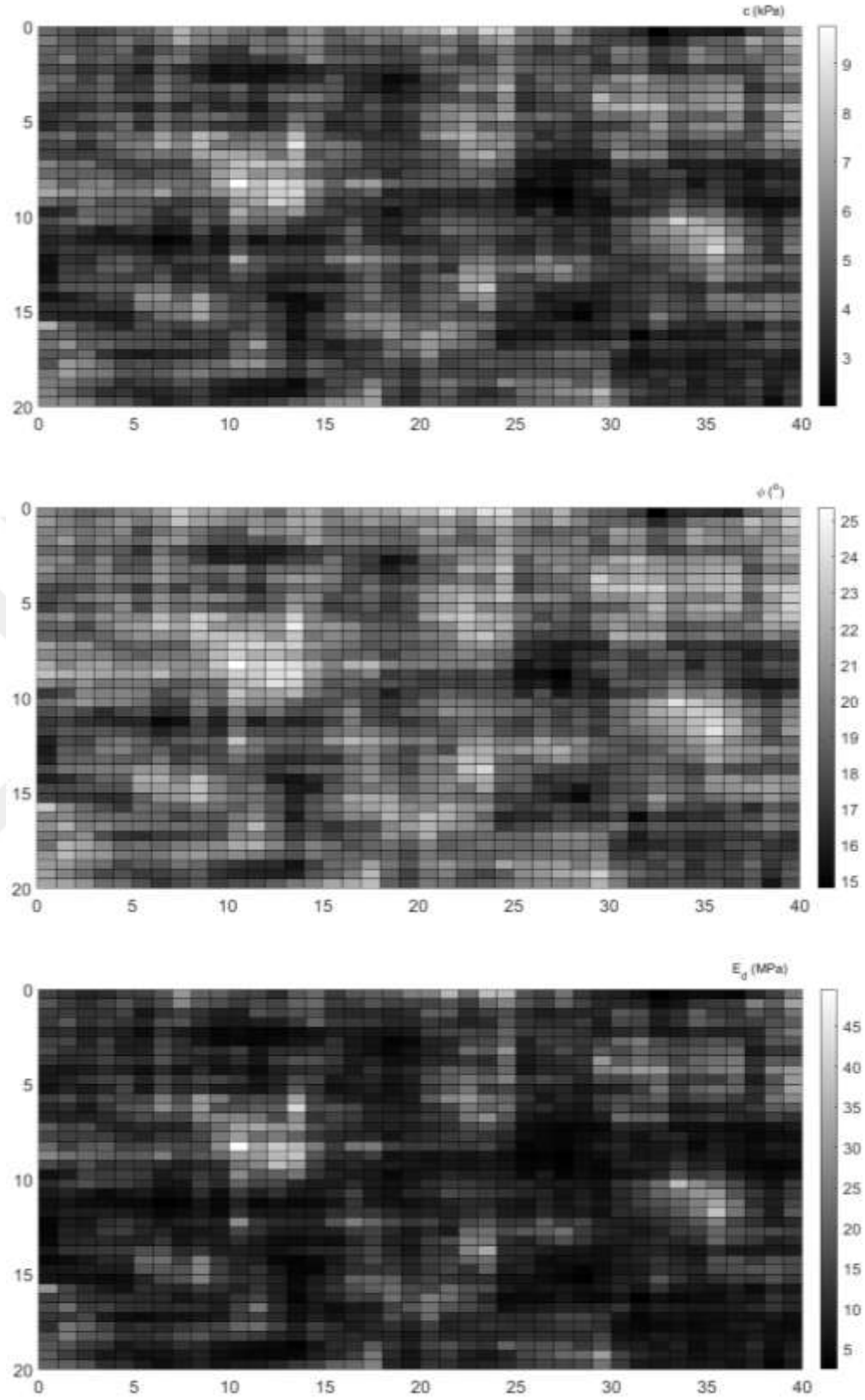
Örnek olarak KİL2 modelinin düşük değişkenlik için (COV= 0.60)  $E_d$  rastgele alanı oluşturulduğunda, ilk olarak MATLAB fonksiyonu ile verilen geometri ve korelasyon bilgilerini kullanarak  $\mu = 0$ ,  $\sigma = 1$  olan bir standart Gauss rastgele alanı ( $g_i$ ) üretilmiştir:

```
>>corr.name= 'exp';  
>>corr.c0=[2 1];  
>>corr.sigma=1;  
>> x=linspace(1,39,20);  
>> y=linspace(0.5,19.5,20);  
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);  
>>mesh=[X(:) Y(:)];  
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

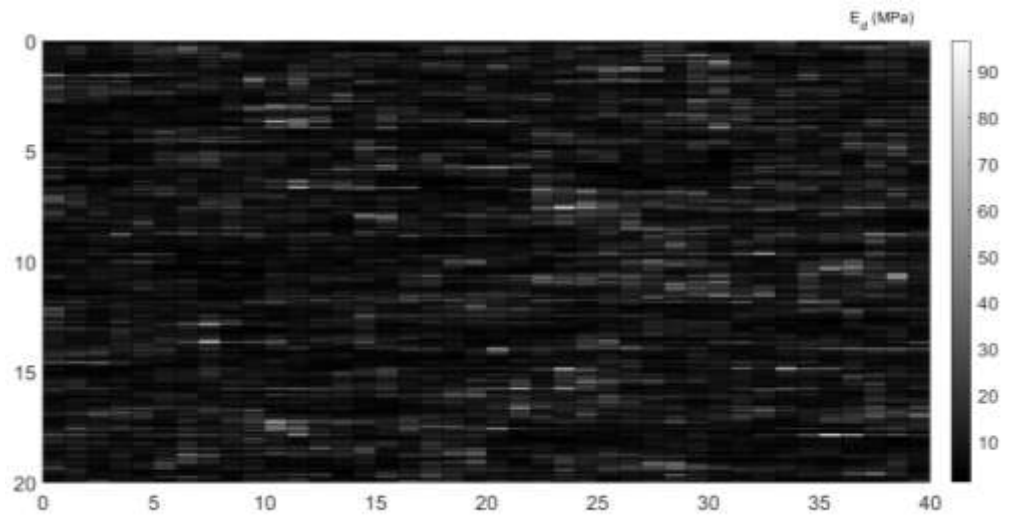
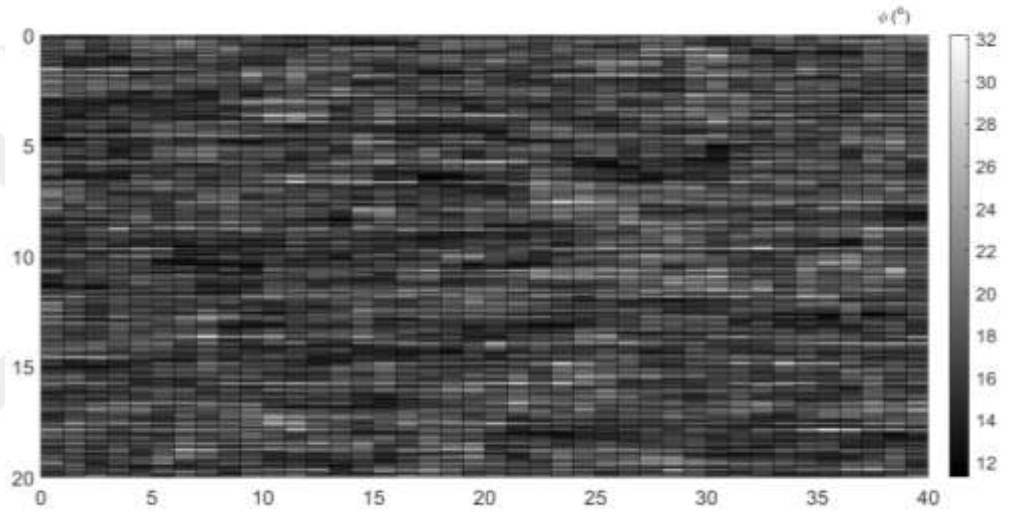
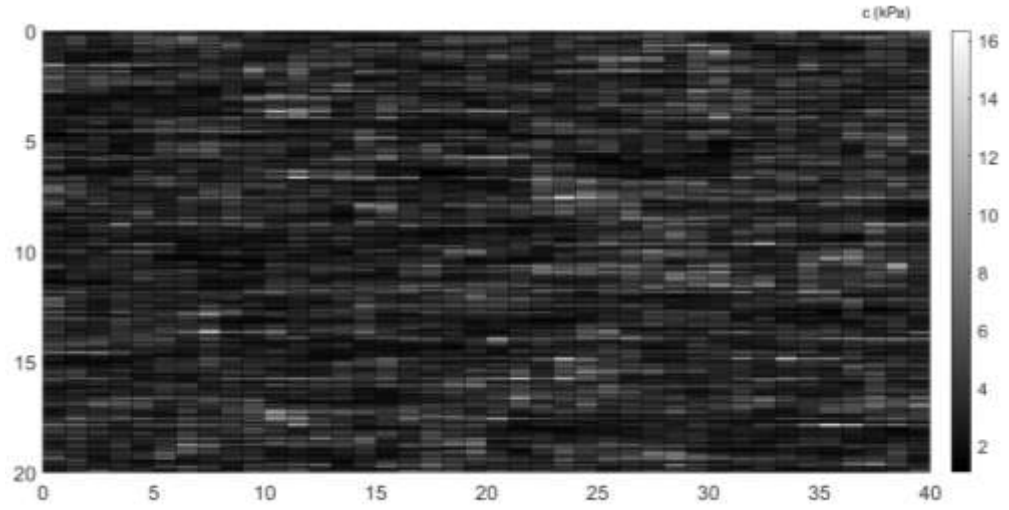
Kod takımının son satırındaki F matrisinin (*Field Matrix*) her bir sütunu, tanımlanan korelasyon ve mesh bilgilerine göre üretilen standart Gauss rastgele alan gerçekleştirmelerini içermektedir. `linspace` komutları, üretilen gerçekleştirmelerdeki değerlerin rastgele alan ağındaki her bir elemanın ortasına atanması için kullanılmış, `nsamples` komutu ise birden fazla gerçekleştirim üretmek için girilmiştir ve analizlerde 1000 iterasyon belirlenmiştir. KL yapısı, seri açılımı ile ayrıklaştırılan alan için hesaplanmış olan baz fonksiyon katsayıları ve özdeğerler matrisini içermektedir. Üretilen standart Gauss rastgele alanının ardından, Denklem 3.7' de verilen ifade ile dönüşüm yapılmaktadır (Fenton ve Griffiths, 2005; Griffiths vd., 2007):

$$F_i = \exp(\mu^{LN} + \sigma^{LN} \cdot g_i) \quad (3.7)$$

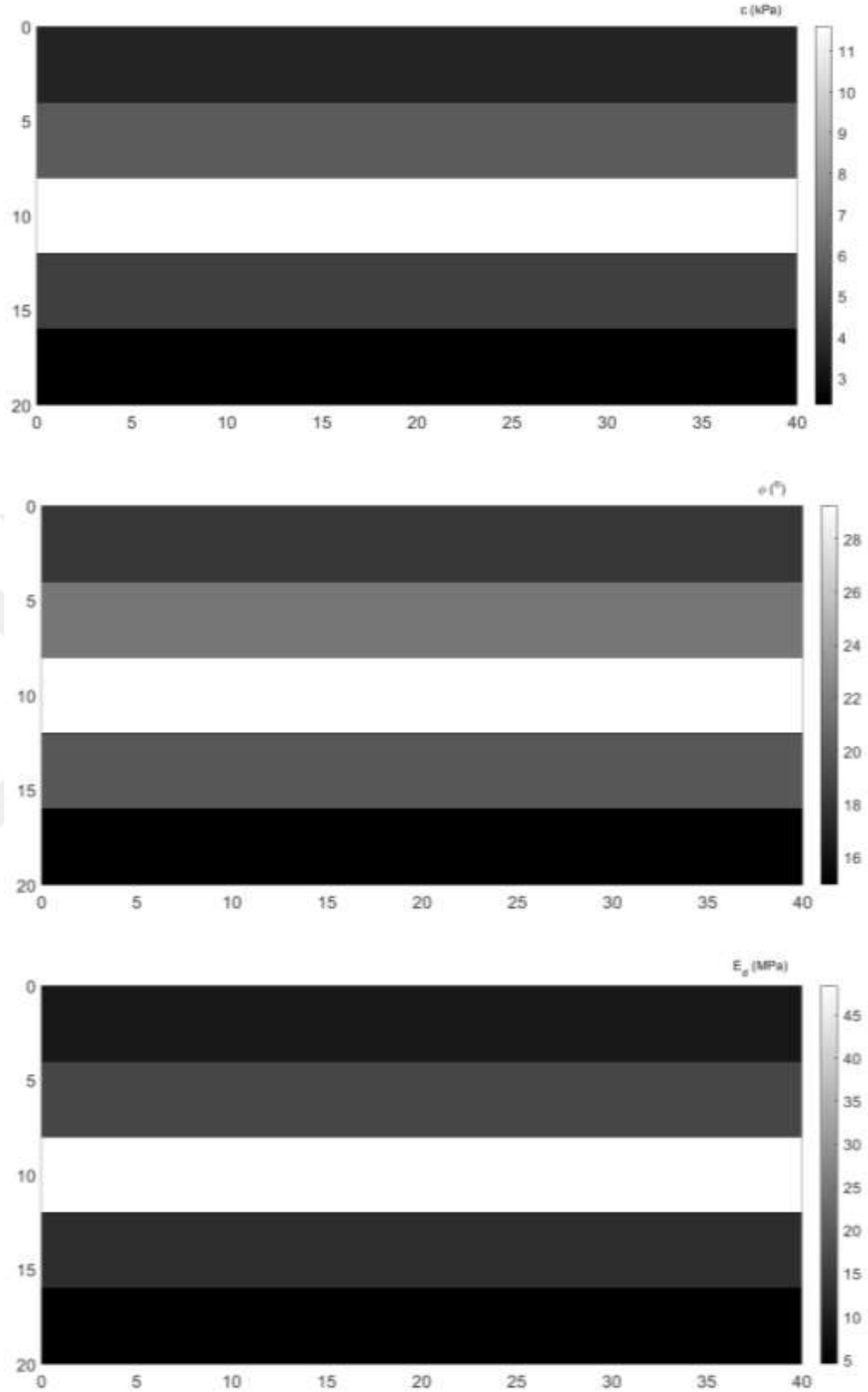
KİL2 modeli için düşük değişkenlik kategorisindeki  $\sigma_E^{LN}$  ve  $\mu_E^{LN}$  değerleri Tablo 3.6' dan alınarak Denklem 3.7' ye girildiğinde:  $F_i = \exp(2.5543 + 0.5545 \cdot g_i)$  bulunmuştur. Benzer işlem kil modellerde  $c$  ve  $\phi$  için tekrarlanmıştır. Bir başka ifade ile, her bir kil modeli için  $c$ ,  $\phi$  ve  $E_d$  olmak üzere üç rastgele alan için düşük, orta ve yüksek değişkenlik kategorisinde toplam 9 adet alan üretilmiştir. Toplam 12 adet kil modeline atanmak üzere 108 rastgele alan üretilmiştir. Her bir rastgele alan, analiz iterasyonları için 1000 gerçekleştirim içermektedir. Seçilen kil modellerden  $c$ ,  $\phi$  ve  $E_d$  parametrelerinin düşük, orta ve yüksek değişkenliklerini temsilen birer iterasyon Şekil 3.11- Şekil 3.13 arasında verilmiştir.



Şekil 3.11. KİL1 modelin düşük değişkenlik durumu için temsili  $c$ ,  $\phi$ ,  $E_d$  rastgele alanları

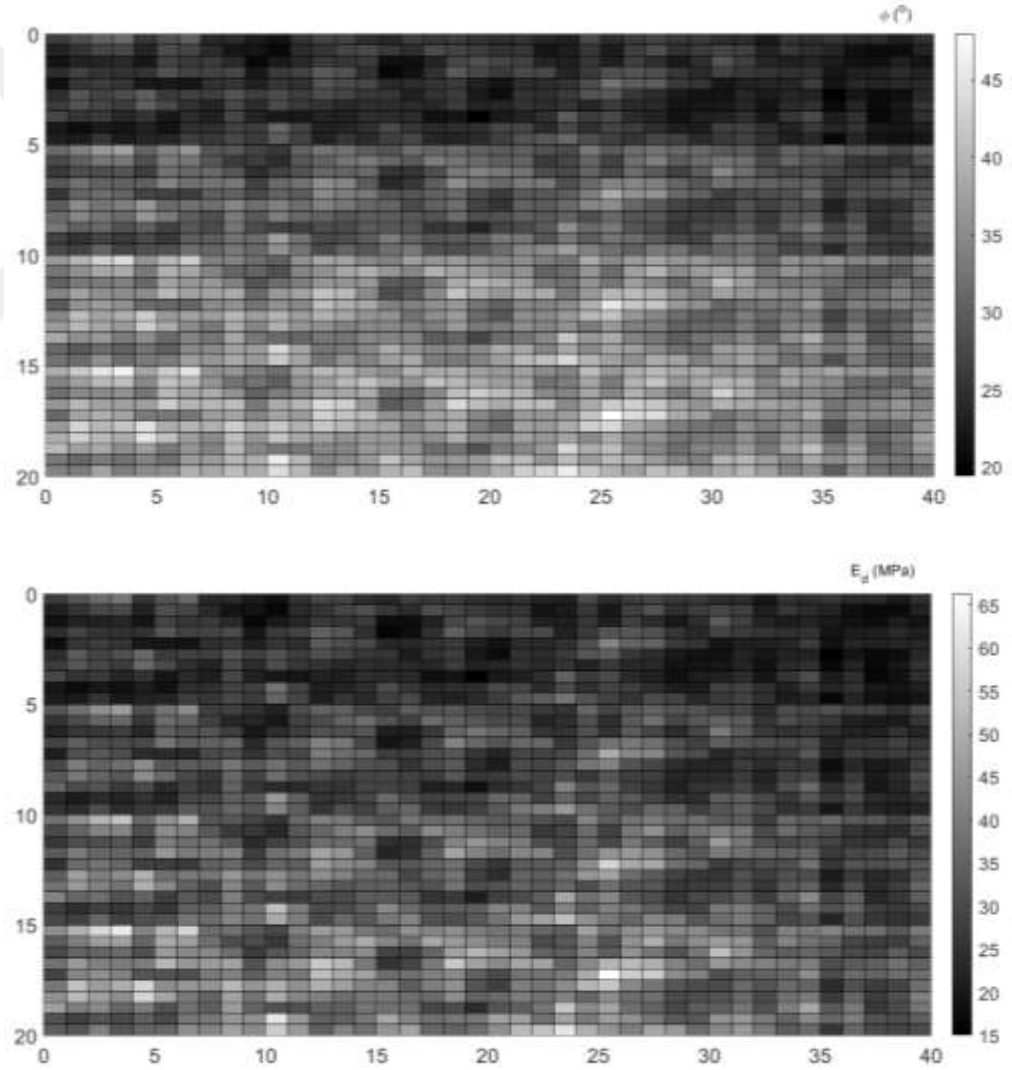


Şekil 3.12. KİL7 modelin orta değişkenlik durumu için temsili  $c$ ,  $\phi$ ,  $E_d$  rastgele alanları



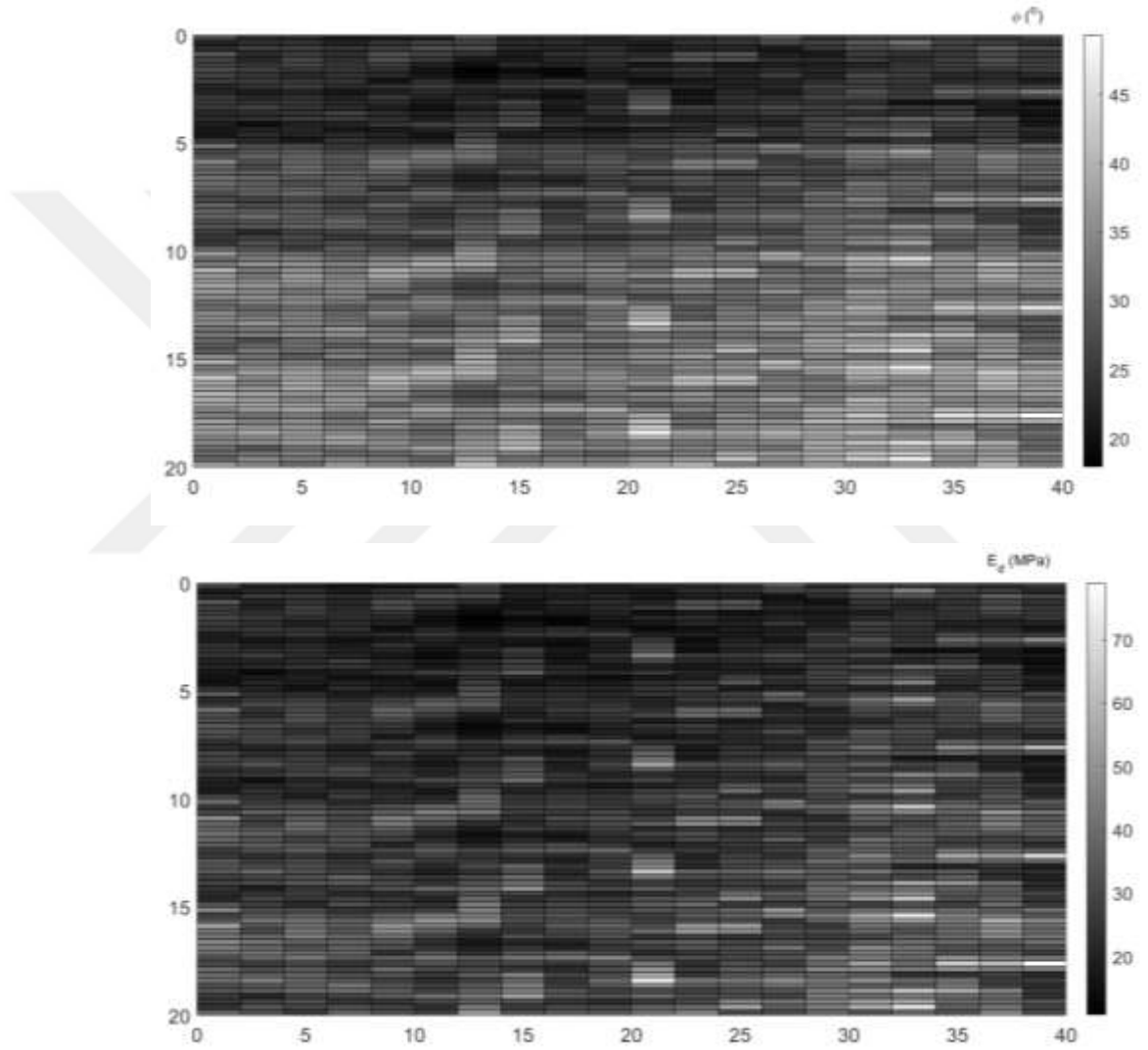
Şekil 3.13. KİL12 modelin yüksek değişkenlik durumu için temsili  $c$ ,  $\phi$ ,  $E_s$  rastgele alanları

Kum modelleri için her bir 5 m derinlikte ortalamalar artırılarak rastgele alan parametreleri oluşturulmuştur. Tablo 3.7' den alınan eşdeğer normal parametreler ile Denklem 3.7 yardımıyla tüm kum modellerinin rastgele alanları tanımlanmıştır. Kil modellerden farklı olarak, kum modellerde  $E_d$  ve  $\phi$ ' nin değişimi incelenmiştir. Kohezyon, yalnızca sayısal denge için 1 kPa alınmıştır. İlave olarak, kum modellerde kayma direncinin önemli bir parametresi olan kabarma açısı  $\psi$ , rastgele alan olarak tanımlanan  $\phi$  değerlerine göre değişkenlik göstermektedir. Buna göre,  $\phi \leq 30^\circ$  koşulunda  $\psi = 1^\circ$ ;  $\phi > 30^\circ$  durumunda ise  $\psi = \phi - 30^\circ$  alınmıştır. Kil modellerde kabarma açısı sabit ve 1 derece alınmıştır. Seçilen kum modellerden  $\phi$  ve  $E_d$  parametrelerinin düşük, orta ve yüksek değişkenliklerini temsilen birer iterasyon Şekil 3.14- Şekil 3.16 arasında verilmiştir.

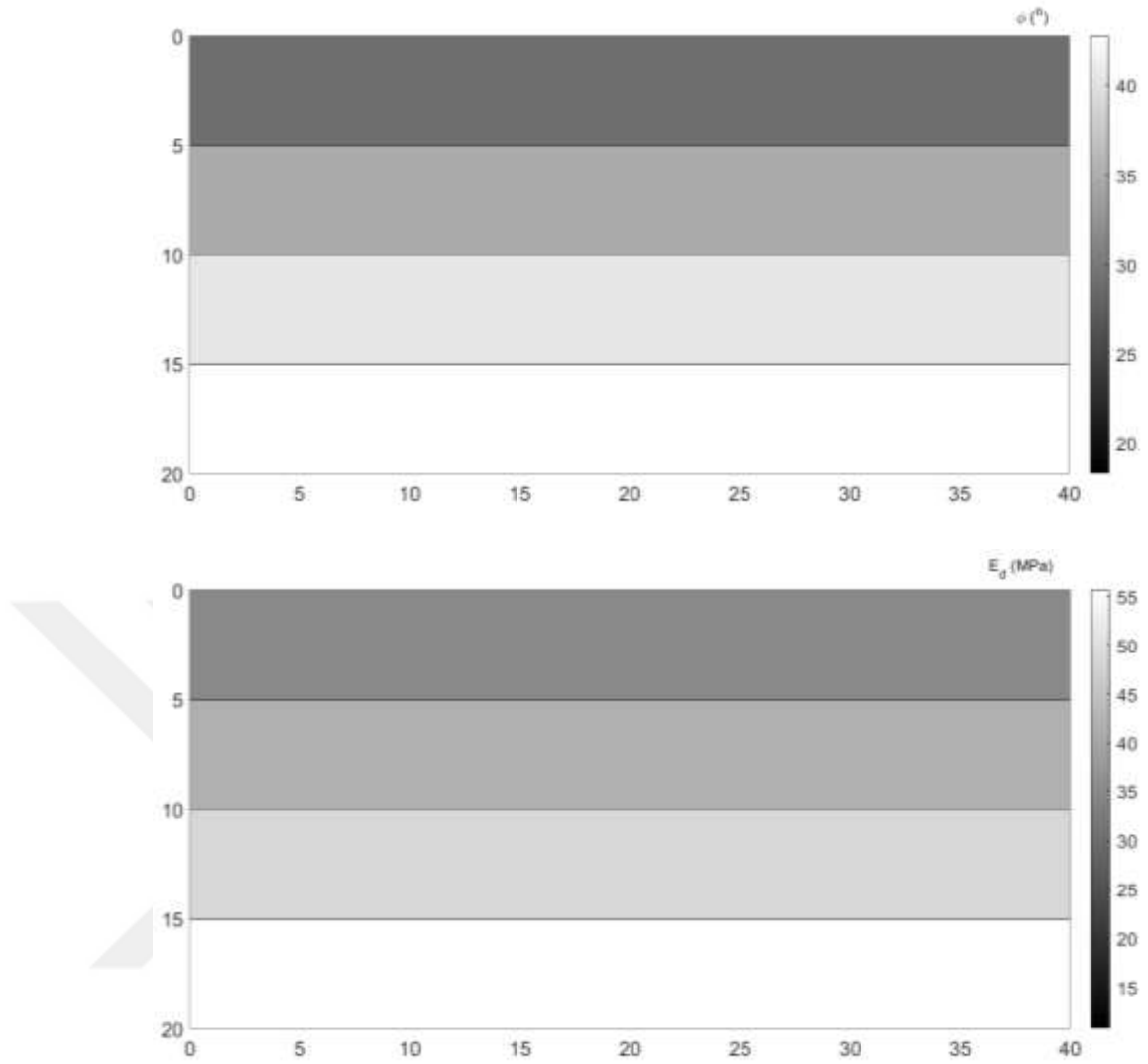


Şekil 3.14. KUM1 modelin düşük değişkenlik durumu için temsili  $\phi$ ,  $E_d$  rastgele alanları

Her bir kum modeli için  $\phi$  ve  $E_d$  olmak üzere iki rastgele alan için düşük, orta ve yüksek değişkenlik kategorisinde toplam 6 adet alan üretilmiştir. Her 5 m derinlikte bu 6 alan, artan ortalamalarla tekrar edileceğinden bir model için toplam 24 alan vardır. 10 adet kum modeli için toplam 240 rastgele alan üretilmiştir. Her bir rastgele alan, analiz iterasyonları için 1000 gerçekleştirim içermektedir. Kum modellerinin rastgele alan örneklerinde tüm parametrelerin derinlikle artışı görülmektedir. Rastgele alan üretiminde kullanılan tüm kodlar EK. A' da sunulmuştur.



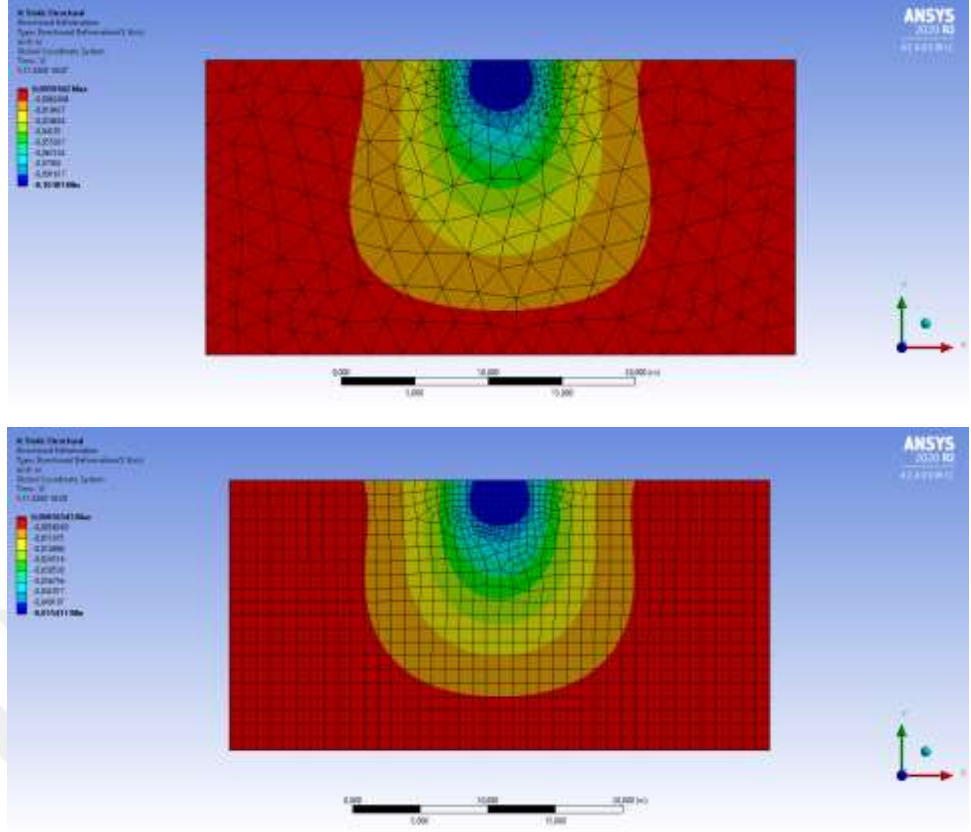
Şekil 3.15. KUM6 modelin orta değişkenlik durumu için temsili  $\phi$ ,  $E_d$  rastgele alanları



Şekil 3.16. KUM10 modelin yüksek değişkenlik durumu için temsili  $\phi$ ,  $E_d$  rastgele alanları

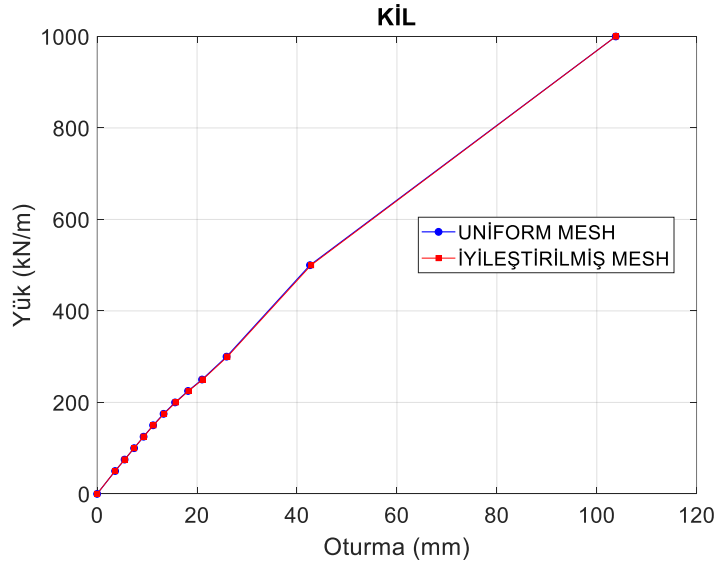
### 3.6. Model Doğrulama Çalışmaları

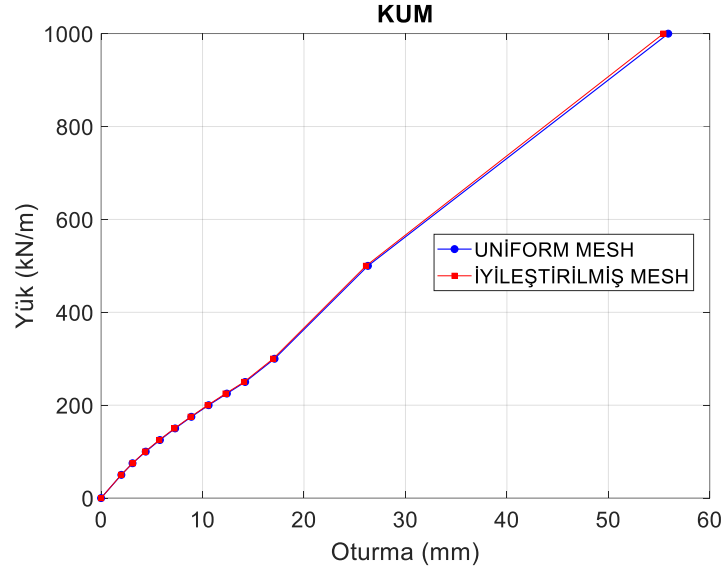
Analizde kullanılan tüm yöntemler ve oluşturulan modeller, literatürdeki bir model ile doğrulanmıştır. Bu bölümde tüm doğrulama çalışmaları aktarılmıştır. Kullanılan sonlu eleman ağı ayarlarındaki değişimin, temel hareketlerine etkisi incelenmiştir. Kil ve kum modellerinde önce üniform mesh, ardından temele yakın bölgede iyileştirilmiş sonlu eleman boyutu ile ağ oluşturulmuştur. Tüm yöntemlerin görülmesi amacıyla, iyileştirilmiş mesh için kil modelde üçgen, kum modelde ise dörtgen ağırlıklı mesh geometrisi kullanılmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. a) Kil, b) kum modeli için iyileştirilmiş sonlu eleman ağı

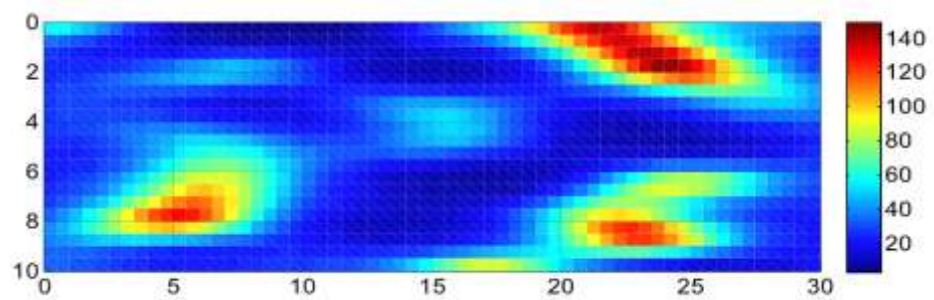
Verilen modellerde ayrıca, yük-deformasyon davranışı üniform ve iyileştirilmiş sonlu eleman ağları için karşılaştırılmıştır. Her iki model için mesh ayarlarının değişmesi, deformasyon sonuçlarını etkilememiştir (Şekil 3.18). Kurulan modellerde, sonlu eleman ağı boyutlarının rastgele alan ağı ile uyumlu seçilmesi koşuluyla herhangi bir geometriyle oluşturulmasının sonuçları etkilemediği doğrulanmıştır.





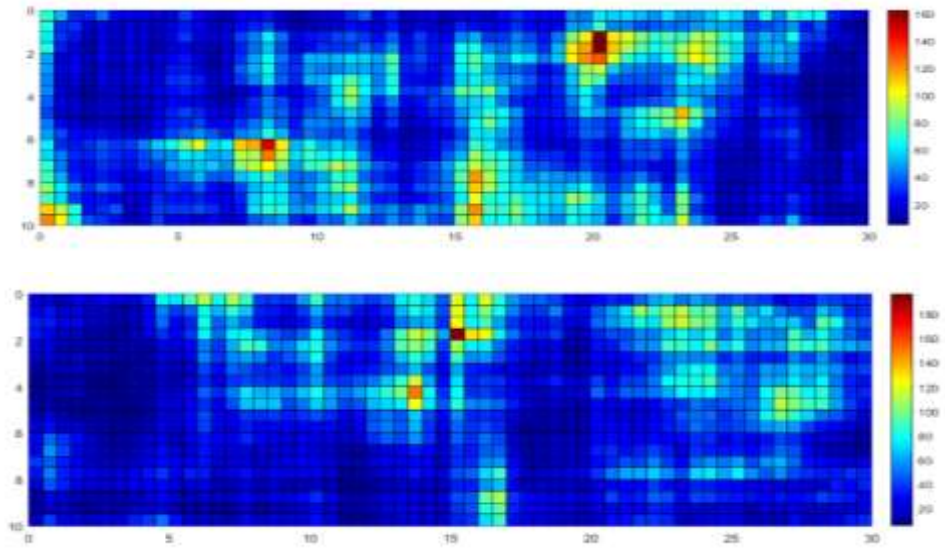
Şekil 3.18. a) Kil, b) kum modeli için farklı mesh ayarları ile yük-deformasyon grafiği

Çalışmada kullanılan rastgele alan gerçekleştirmelerinin üretildiği yöntem, literatürde geçerli bir rastgele alan temel analizine uyarlanmıştır. Bu bağlamda, doğrulama modeli zemin elastisite modülünün rastgele alan olarak tanımlanmasını içermektedir (Yue ve Yao, 2020). Ortalama ve standart sapması 40 MPa olan ve lognormal dağılıma uyan E rastgele alanı için  $\theta=3$  m ile temsili bir gerçekleştirim, belirtilen çalışmada Şekil 3.19' te verilmiştir.



Şekil 3.19. Literatürdeki temsili E rastgele alanı (Yue ve Yao, 2020)

Tez çalışmadaki yöntem ile referans çalışmadaki rastgele alan parametreleri kullanılarak gerçekleştirimler oluşturulmuş ve yöntemi doğrular nitelikte rastgele alan örnekleri elde edilmiştir (Şekil 3.20).

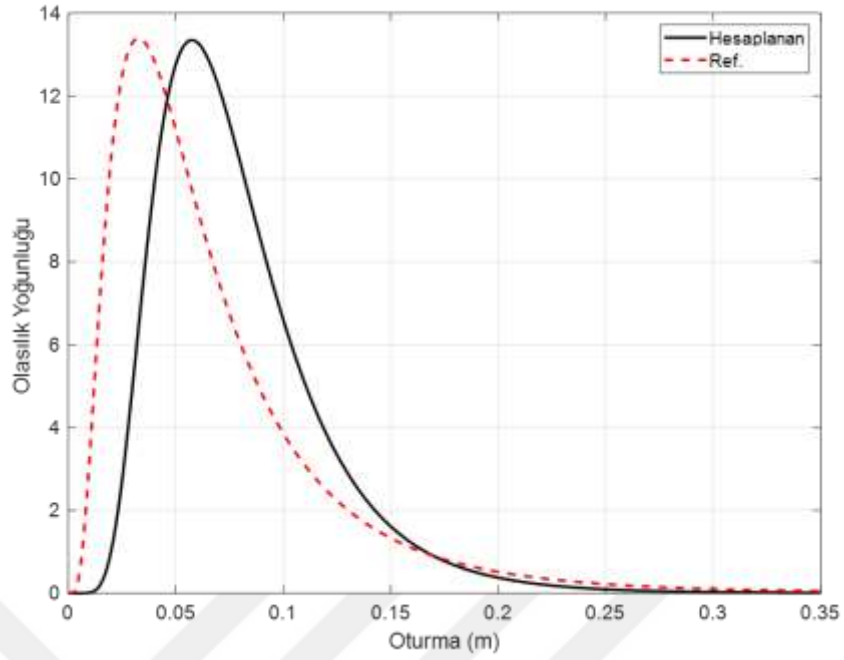


Şekil 3.20. Referans modeldeki parametreler kullanılarak çalışmadaki yöntemle oluşturulan rastgele alan gerçekleştirmeleri

Oluşturulan rastgele alanların analizinde izlenen yöntemin doğrulanması amacıyla, rastgele alan oluşturma yönteminde referans alınan çalışma kullanılmıştır. Referans çalışmaya uyularak oluşturulan modelde 5000 gerçekleştirim ile RFEM çözümü yapılmış ve toplam oturma için histogram elde edilmiştir. Referans çalışma ile karşılaştırma amacıyla, toplam oturma için hesaplanan PDF' ler aynı figürde gösterilmiştir (Şekil 3.21). Doğrulama çalışmasında edinilen sonuçlar ve referans ile arasındaki fark Tablo 3.8 ile özetlenmiştir. Buna göre, referans analizle hesaplanan deterministik ve RFEM sonuçlarına yakın değerler elde edilmiş ve analiz yönteminin geçerliliği doğrulanmıştır.

Tablo 3.8. Doğrulama analizi karşılaştırmalı sonuçları

	<b>Deterministik Oturma (mm)</b>	<b>Rastgele Alan Oturma (mm)</b>	
		<b>Ortalama</b>	<b>Std. Sapma</b>
Hesaplanan	38.7	79.7	39.2
Referans (Yue ve Yao, 2020)	36.7	69.5 (-%13)	56.2 (+%30)

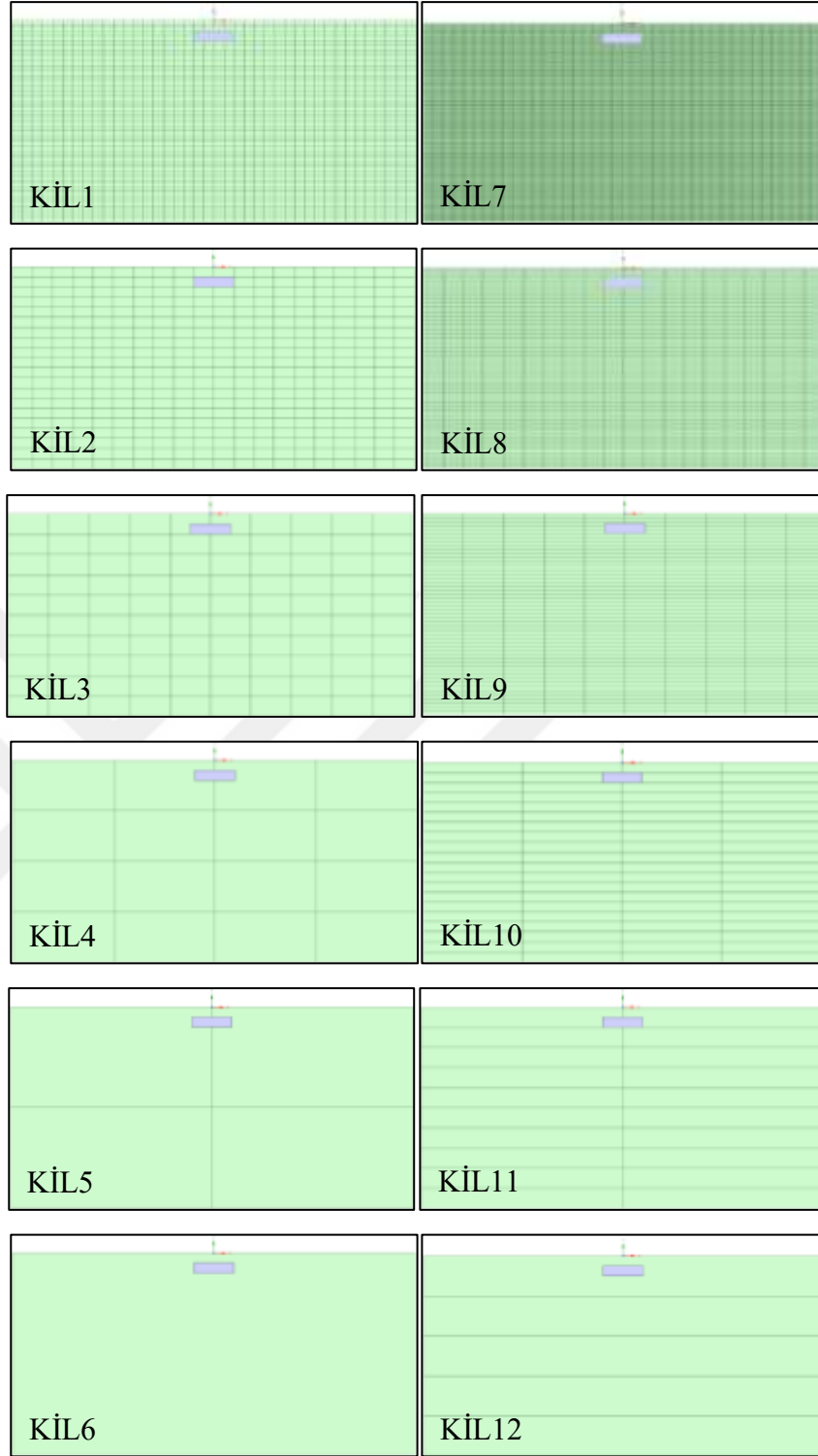


Şekil 3.21. Hesaplanan ve referans çalışma için toplam oturma PDF' leri

### 3.7. Sayısal Analiz Modellerinin Kurulumu

Rastgele alanların üretiminin ardından Tablo 3.6 ve Tablo 3.7' deki tüm modeller ANSYS yazılımıyla tanımlanmıştır. Tüm korelasyon uzunluklarına uygun oluşturulan rastgele alan ağları içerisinde, Şekil 3.11- Şekil 3.16' da temsili verilen rastgele alan gerçekleştirmeleri atanmıştır. Her bir kil modeli  $c$ ,  $\phi$  ve  $E_d$  rastgele alanlarını aynı anda içermektedir. Bu parametrelerin düşük, orta ve yüksek değişkenlikleri için her bir modelde 1000 iterasyon yapılmak üzere parametrik analiz ayarları oluşturulmuştur. Böylece bir kil modelinde, tüm değişkenlikler için 3000 iterasyon ile analiz yapılmıştır. Toplam 12 model için 36000 tekrarlı çözüm gerçekleştirilmiştir.

Benzer şekilde kum modelleri ise  $\phi$  ve  $E_d$  rastgele alanlarını aynı anda içermektedir. İlave olarak kum modellerde  $\psi$  parametresi de  $\phi$ ' ye bağlı değişken olarak alınmıştır. Kum modelleri için tüm değişkenlik durumlarında yapılan 3000 iterasyona göre, 10 model için toplam 30000 tekrarlı çözüm uygulanmıştır. ANSYS ile oluşturulan tüm kil ve kum modellerin geometrisi Şekil 3.22 ve Şekil 3.23' te verilmiştir.



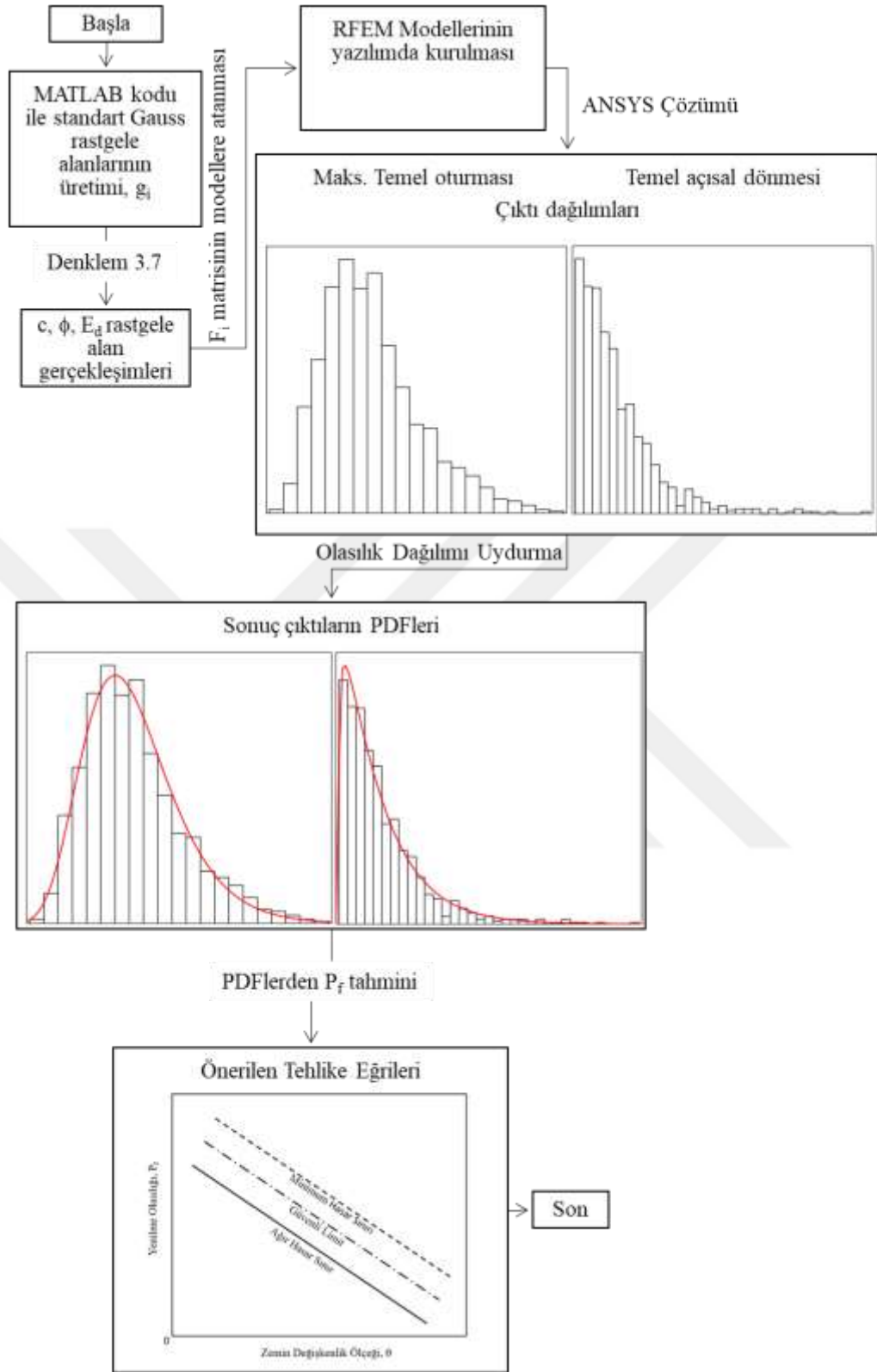
Şekil 3.22. Kıl sayısal analiz modelleri

Bu modellerdeki her bir zemin dörtgeni içine ilgili rastgele alan parametresinin o konumdaki değeri gelecek şekilde atama yapılmış ve tüm modeller analize hazır hale getirilmiştir. Çözümlerin ardından sonuçların histogramları kaydedilmiş ve her bir dağılıma uygun PDF eğrileri uydurulmuştur (*curve fitting*).

Dağılımlardan hesaplanan yenilme olasılıkları, korelasyon uzunlukları ile birlikte önerilen tehlike eğrilerini oluşturmaktadır. Her bir tehlike eğrisi tüm hasar sınırlarını içermekte ve yüzeysel temellerin güvenilirliğe dayalı tasarımında kullanılmak üzere pratiğe sunulmaktadır. Çalışmanın ana çerçevesi, Şekil 3.24' te verilen akış ile aktarılmıştır. Tüm adımlar detaylı başlıklar altında açıklanmıştır.



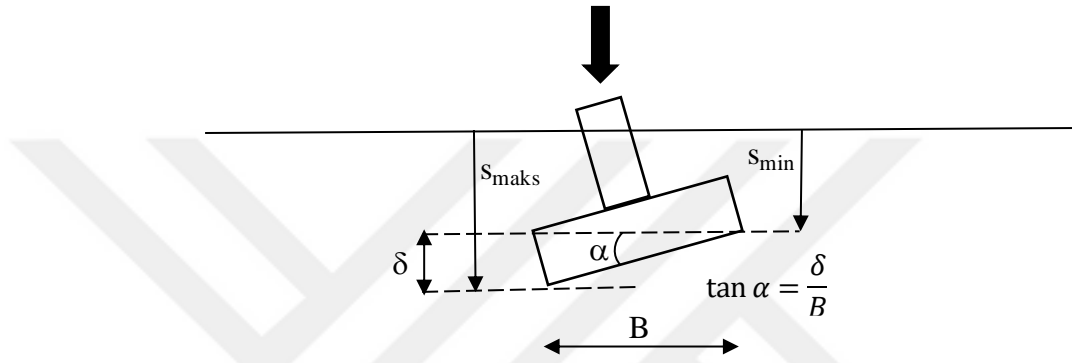
Şekil 3.23. Kum sayısal analiz modelleri



Şekil 3.24. Çalışmanın ana akışı

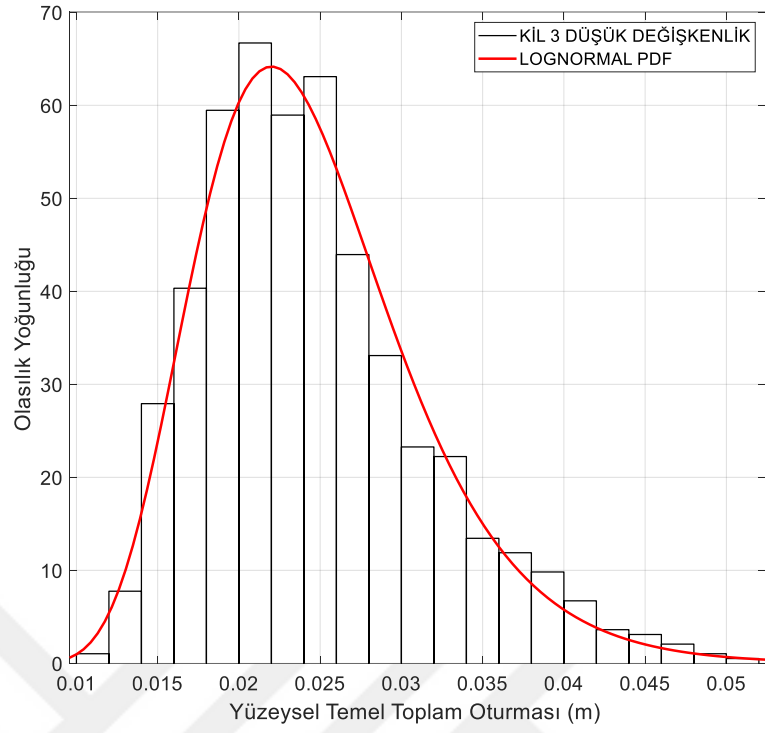
#### 4. ANALİZ SONUÇLARI VE BULGULAR

Tüm modellerin analiz sonuçlarından düşük, orta ve yüksek değişkenlik kategorileri için yüzeysel temel toplam oturma ve açısız dönme sonuçları kaydedilmiştir. Sayısal modeldeki temelin sağ ve sol alt ucundan seçilen düğüm noktalarındaki düşey yer değıştirme değeri kullanılmıştır. Bu yer değıştirmelerin mutlak maksimumunu temel toplam oturmasını, iki uç arasındaki fark ise temelin açısız dönmesini ifade etmektedir (Şekil 4.1).

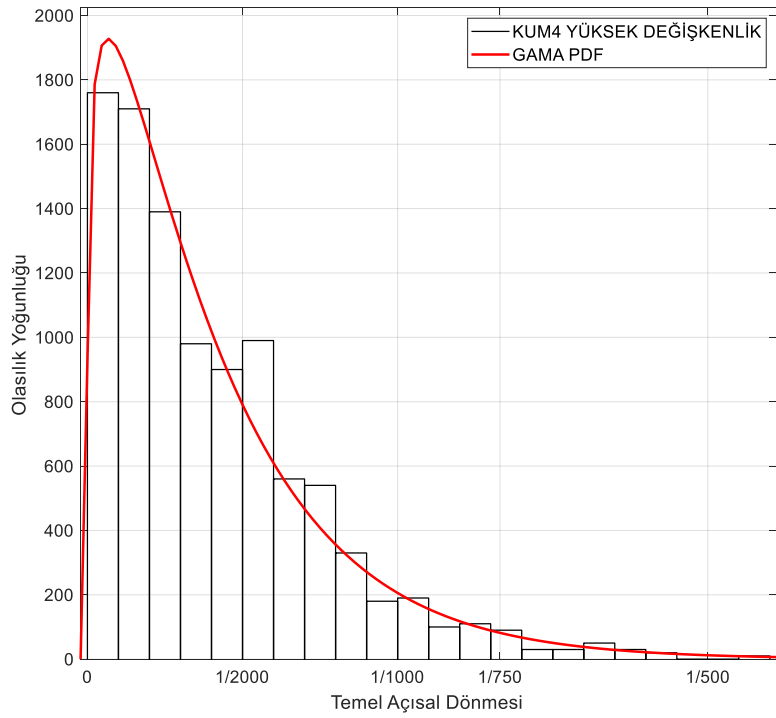


Şekil 4.1. Temeldeki maksimum oturma ve açısız dönme

Modeldeki her bir analiz sonucundan 1000 adet toplam oturma ve açısız dönme değeri kaydedilmiştir. Her bir model için düşük, orta ve yüksek değışkenlik kategorisinde toplam oturma için 3 ve açısız dönme için 3 olmak üzere toplam 6 dağılım elde edilmiştir. Ardından, tüm sonuç dağılımlarına uygun bir olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) uydurulmuştur (Şekil 4.2). Analiz sonuçları, yüzeysel temel toplam oturması için elde edilen çıktıların lognormal dağılıma uyduğunu göstermiştir. Temel toplam oturmaları için, Şekil 4.2' de verilen temsili dağılıma benzer şekilde 12 kil modeli için 36 adet; 10 kum modeli için 30 adet dağılım ve bu dağılımlara uydurulan lognormal PDF' ler oluşturulmuştur. Sonuçlar, açısız dönme çıktılarının ise gama dağılımına uyduğunu göstermiştir (Şekil 4.3). Temsili dağılım ve PDF' ye benzer şekilde temel açısız dönmesine göre 12 kil modeli için 36, 10 kum modeli için 30 adet dağılım ve gama PDF oluşturulmuştur.

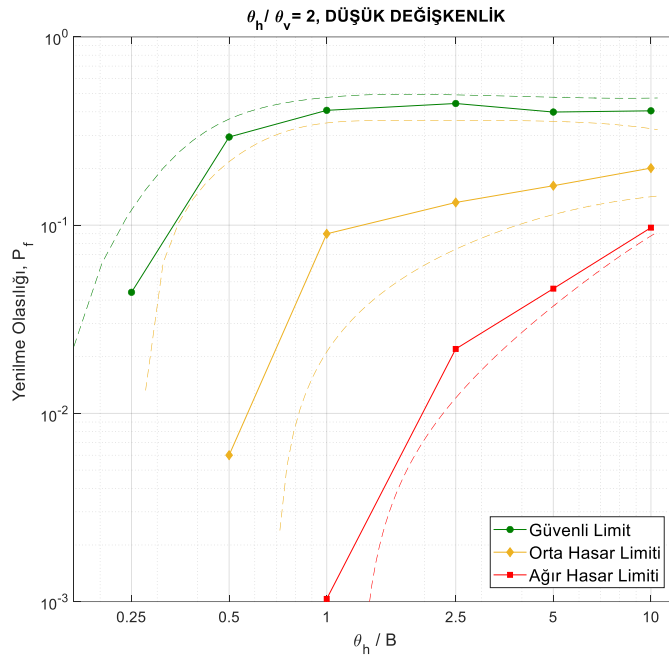


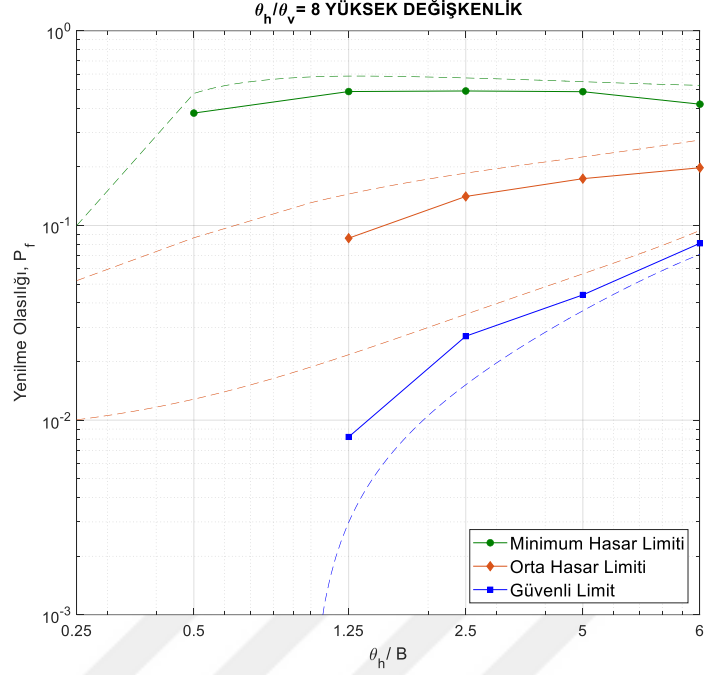
Şekil 4.2. Temsili bir model için toplam oturma sonuç dağılımı ve lognormal PDF



Şekil 4.3. Temsili bir model için açılal dönme sonuç dağılımı ve gama PDF

Sonuçların irdelenmesindeki ilk adımda, çalışmanın hipotezinde verilen tehlike eğrileri için bir ön değerlendirme yapılmıştır. Bu amaçla, kil ve kum modellerin sonuç çıktıklarına uydurulan olasılık dağılımları kullanılmadan, yalnızca ham verilerle bir inceleme yapılmıştır. Tüm modellerin analiz sonuçlarından, Tablo 3.5’ te belirtilen hasar sınırlarını aşan iterasyon sayısının, toplam iterasyon sayısına bölünmesiyle ham veriler kullanılarak yenilme olasılıkları ( $P_f$ ) belirlenmiştir. Bu değerler düşey eksende yerleştirilmiş, yatay eksen ise boyutsuz yatay korelasyon uzunluğu parametresi ( $\Theta_h = \theta_h/B$ ) ile  $\theta_h/\theta_v$  oranının kil için 2 ve 10, kum için 2 ve 8 olması koşulları için test tehlike eğrileri oluşturulmuştur. Tehlike eğrileri, grafikleri oluşturan noktalardan geçirilen eğrilerin %95 güven aralıkları ile sunulmuştur. Gerçekleştirilen ön değerlendirme için kil (Şekil 4.4a) ve kum (Şekil 4.4b) modelleri temsilen toplam oturmaya göre tehlike eğrileri sunulmuştur. Çalışmanın hipotezinde, zemindeki korelasyon uzunluğunun artması ile kabaca yenilme olasılığının da belirli oranda azalacağı öngörülmüştü. Ancak test tehlike eğrileri, sonuçların bu hipotezin tersine yöne gittiğini göstermiştir. Zemindeki yatay değişkenliğin yenilme olasılığına etkisi, korelasyon uzunluğunun temel genişliğine oranına bağlı boyutsuz değişkene göre farklılık göstermektedir. Sonuçların geçerliliği, doğrulama aşamasından sonra tartışılmıştır.





Şekil 4.4. a) Kil modeller ve b) kum modeller için temsili test tehlike eğrileri

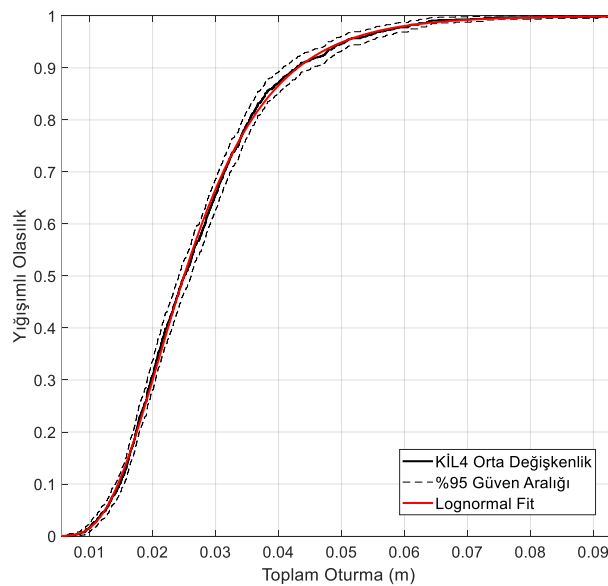
Tehlike eğrilerindeki değerlerin aralığı yüksek olduğundan, tüm değerlerin açık bir şekilde gösterilmesi adına, figürler çift logaritmik (log-log) eksenlerde sunulmuştur. Noktalı çizgiler, her bir  $\theta_h$  değeri için ham verilerden hesaplanan  $P_f$  değerlerini ifade etmektedir. Grafiklerdeki renkler farklı hasar sınırlarını temsil etmekte, kesikli çizgiler ise noktalardan geçirilmiş eğrilerin %95 güven aralıklarını göstermektedir.

Tüm tehlike eğrileri, tasarımda kullanıma uygun formatlarda sunulmuştur. Bu çerçevede, kil ve kum modeller için yüzeysel temel toplam oturma ve açısız dönmeye göre önerilen abaklar ayrı başlıklar altında detaylı verilmiştir. Son aşamada tüm çalışmanın sonuçlandırılması adına önerilen tehlike eğrilerinin geçerliliği, Uluslararası Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Birliğinin (ISSMGE- *International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*) gerçek veri tabanları ile doğrulanmıştır. Doğrulama aşaması ayrı bir başlık altında detaylı olarak açıklanmıştır.

#### 4.1. Toplam Oturma için Tehlike Eğrileri

Tüm kil ve kum modeller için edinilen PDF' ler, toplam oturmaya göre yenilme olasılıklarının hesaplanması için kullanılmıştır. Matematiksel olarak bir x

rastgele değişkeninin,  $z$  limitini aşması olasılığı  $1 - P(X \leq z)$ , yenilme olasılığı olarak adlandırılmaktadır. PDF' nin altında kalan alanın 1 olduğu kuralından yararlanarak  $P(X \leq z)$  olasılığı, yoğunluk fonksiyonunun  $z$  sınırına kadar eğrinin altında kalan alan olarak hesaplanmaktadır. Çalışmadaki problem için rastgele değişken  $X$ , toplam oturmayı;  $z$  limit değer ise Tablo 3.5' te verilen hasar limitlerini temsil etmektedir. Elde edilen PDF' lerin tekrarlı olarak integrasyonu yerine, MATLAB ile tüm PDF' ler yığışımli dağılım fonksiyonu (CDF-Cumulative Distribution Function) formunda gösterilmiştir. CDF, yatay eksendeki  $z$  limit değeri için direkt olarak bu sınıra kadar PDF eğrisinin altında kalan alanı vermektedir. Böylece, okunan değerin 1' den çıkarılmasıyla limit değerin aşılması yani yenilme olasılığı ( $P_f$ ) hesaplanmaktadır. Tüm durumlar için  $P_f$  %95 güven aralığı değerleriyle birlikte kaydedilmiş ve tehlike eğrileri bu verilere dayanarak oluşturulmuştur. Şekil 4.5' te kil model toplam oturma sonuçları için temsili bir CDF verilmiştir. Örneğin, bu CDF kullanılarak verilen tüm hasar limitleri için yığışımli olasılıklar okunmuş ve 1' den çıkarılarak  $P_f$  hesaplanmıştır. Tüm değerler alt ve üst limit şeklinde güven aralıklarıyla verilmiştir. Benzer işlem tüm kil ve kum modeller ile yüzeysel temel toplam oturma sonuçları için tekrarlanmıştır. Tablo 4.1 ve Tablo 4.2, tüm kil ve kum modeller ile yüzeysel temel toplam oturma ve açısız dönme durumları için hesaplanan  $P_f$ ' leri %95 güven aralıklarına göre alt ve üst limitleriyle göstermektedir. Koyu yazılmış sayılar lognormal CDF' lerden hesaplanan  $P_f$  değerlerini, normal yazılmış sayılar ise %95 güven aralığı için alt ve üst limit değerlerini ifade etmektedir.



Şekil 4.5. Kil 4 orta değişkenlik kategorisi için kullanılan temsili CDF

Tablo 4.1. Kil modeller için yenilme olasılıkları

TOPLAM OTURMA TEHLİKE EĞRİLERİ		DEĞİŞKENLİK													
Model No.	$\theta_h$ (m)	$\theta_v$ (m)	DÜŞÜK				ORTA				YÜKSEK				
			GÜVENLİ LİMİT	ORTA HASAR	AĞIR HASAR	GÜVENLİ LİMİT	ORTA HASAR	AĞIR HASAR	GÜVENLİ LİMİT	ORTA HASAR	AĞIR HASAR	GÜVENLİ LİMİT	ORTA HASAR	AĞIR HASAR	
KİL1	1	0.5	0.029130	0.000150	0.000010	0.104920	0.000010	0.000001	0.223940	0.000190	0.000010	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
			<b>0.039720</b>	<b>0.000200</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.126870</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.000002</b>	<b>0.253940</b>	<b>0.000440</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.000020</b>
KİL2	2	1	0.053240	0.000500	0.000030	0.158300	0.000050	0.000003	0.285930	0.000960	0.000040	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
			<b>0.282360</b>	<b>0.002430</b>	<b>0.000100</b>	<b>0.392490</b>	<b>0.016690</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.512360</b>	<b>0.054150</b>	<b>0.000350</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.000020</b>
KİL3	4	2	0.315400	0.007240	0.000300	0.461740	0.033940	0.000150	0.582660	0.088580	0.001570	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
			<b>0.422170</b>	<b>0.076040</b>	<b>0.003050</b>	<b>0.516600</b>	<b>0.147840</b>	<b>0.013960</b>	<b>0.594230</b>	<b>0.232680</b>	<b>0.039490</b>	<b>0.000050</b>	<b>0.000050</b>	<b>0.000050</b>	<b>0.000050</b>
KİL4	10	5	0.397440	0.064010	0.001990	0.491770	0.130680	0.010350	0.569660	0.211890	0.031750	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
			<b>0.428960</b>	<b>0.138840</b>	<b>0.020350</b>	<b>0.499660</b>	<b>0.213430</b>	<b>0.050930</b>	<b>0.555210</b>	<b>0.283250</b>	<b>0.092080</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>
KİL5	20	10	0.453610	0.156870	0.026350	0.524370	0.234700	0.061650	0.579690	0.306310	0.106940	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
			<b>0.414260</b>	<b>0.169360</b>	<b>0.040820</b>	<b>0.467430</b>	<b>0.231620</b>	<b>0.077160</b>	<b>0.511770</b>	<b>0.290620</b>	<b>0.121500</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>
KİL6	40	20	0.385180	0.201740	0.078070	0.337750	0.147880	0.042950	0.418040	0.242460	0.110100	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
			<b>0.409390</b>	<b>0.222150</b>	<b>0.091270</b>	<b>0.361400</b>	<b>0.165930</b>	<b>0.052290</b>	<b>0.442510</b>	<b>0.264170</b>	<b>0.125970</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>
KİL7	1	0.1	0.433950	0.243690	0.106060	0.385600	0.185340	0.063180	0.467200	0.286830	0.143240	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
			<b>0.000100</b>	<b>0.000010</b>	<b>0.000001</b>	<b>0.001000</b>	<b>0.000200</b>	<b>0.000001</b>	<b>0.040000</b>	<b>0.000100</b>	<b>0.000001</b>	<b>0.000001</b>	<b>0.000001</b>	<b>0.000001</b>	<b>0.000001</b>
KİL8	2	0.2	<b>0.00250</b>	<b>0.000015</b>	<b>0.000003</b>	<b>0.002000</b>	<b>0.000300</b>	<b>0.000002</b>	<b>0.052000</b>	<b>0.000200</b>	<b>0.000002</b>	<b>0.000002</b>	<b>0.000002</b>	<b>0.000002</b>	<b>0.000002</b>
			0.000400	0.000050	0.000005	0.004500	0.000400	0.000003	0.078000	0.000300	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003
KİL9	4	0.4	0.009000	0.000100	0.000010	0.073800	0.001000	0.000010	0.227300	0.001000	0.000030	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
			<b>0.013800</b>	<b>0.000200</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.092100</b>	<b>0.002000</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.257500</b>	<b>0.002500</b>	<b>0.000050</b>	<b>0.000050</b>	<b>0.000050</b>	<b>0.000050</b>	<b>0.000050</b>
KİL10	10	1	0.020700	0.000300	0.000050	0.113600	0.005000	0.000050	0.289600	0.004500	0.000100	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
			0.254800	0.001300	0.000150	0.424900	0.013000	0.000100	0.571600	0.055700	0.000200	0.000200	0.000200	0.000200	0.000200
KİL11	20	2	<b>0.286900</b>	<b>0.002500</b>	<b>0.000250</b>	<b>0.459900</b>	<b>0.019200</b>	<b>0.000250</b>	<b>0.606700</b>	<b>0.071600</b>	<b>0.000500</b>	<b>0.000500</b>	<b>0.000500</b>	<b>0.000500</b>	<b>0.000500</b>
			0.320700	0.000460	0.000450	0.495100	0.027900	0.000400	0.641000	0.090800	0.001000	0.001000	0.001000	0.001000	0.001000
KİL12	40	4	0.392400	0.043900	0.000600	0.512100	0.112000	0.005200	0.603700	0.198600	0.020200	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
			<b>0.417400</b>	<b>0.053700</b>	<b>0.001000</b>	<b>0.536800</b>	<b>0.127900</b>	<b>0.007400</b>	<b>0.628000</b>	<b>0.218900</b>	<b>0.025900</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>
KİL12	40	4	0.442800	0.065100	0.001600	0.561400	0.145300	0.010300	0.651800	0.240300	0.032900	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
			0.389000	0.085200	0.005500	0.473300	0.155100	0.020800	0.543200	0.231700	0.050200	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
KİL12	40	4	<b>0.413300</b>	<b>0.099100</b>	<b>0.007800</b>	<b>0.498100</b>	<b>0.173500</b>	<b>0.026700</b>	<b>0.567900</b>	<b>0.253100</b>	<b>0.060500</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>
			0.437900	0.114500	0.010800	0.522800	0.193200	0.033800	0.592300	0.275500	0.072300	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
KİL12	40	4	0.306300	0.086500	0.011300	0.373200	0.143100	0.031100	0.427300	0.197500	0.038500	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
			<b>0.329400</b>	<b>0.100400</b>	<b>0.015100</b>	<b>0.397300</b>	<b>0.160800</b>	<b>0.038700</b>	<b>0.451800</b>	<b>0.217800</b>	<b>0.069700</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>
KİL12	40	4	0.353200	0.115900	0.020000	0.421800	0.180000	0.047800	0.476500	0.239200	0.082500	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
			<b>0.353200</b>	<b>0.115900</b>	<b>0.020000</b>	<b>0.421800</b>	<b>0.180000</b>	<b>0.047800</b>	<b>0.476500</b>	<b>0.239200</b>	<b>0.082500</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>

Tablo 4.1 (Devamı)

AÇISAL DÖNME TEHLİKE EĞRİLERİ	θ <sub>a</sub> (m)	θ <sub>v</sub> (m)	DEĞİŞKENLİK											
			DÜŞÜK				ORTA				YÜKSEK			
			MINİMUM HASAR	GÜVENLİ LİMİT	AĞIR HASAR	MINİMUM HASAR	GÜVENLİ LİMİT	AĞIR HASAR	MINİMUM HASAR	GÜVENLİ LİMİT	AĞIR HASAR	MINİMUM HASAR	GÜVENLİ LİMİT	AĞIR HASAR
KİL1	1	0.5	0.046800	0.001700	0.000005	0.077400	0.004300	0.000001	0.118400	0.011800	0.000001	0.118400	0.011800	0.000100
			<b>0.061100</b>	<b>0.003100</b>	<b>0.000010</b>	<b>0.096200</b>	<b>0.007200</b>	<b>0.000010</b>	<b>0.141500</b>	<b>0.016600</b>	<b>0.000010</b>	<b>0.141500</b>	<b>0.016600</b>	<b>0.000200</b>
KİL2	2	1	0.079300	0.005700	0.000040	0.118900	0.011900	0.000100	0.168100	0.025100	0.000100	0.168100	0.025100	0.000500
			0.122500	0.010500	0.000100	0.184900	0.026900	0.000500	0.241800	0.047700	0.000500	0.241800	0.047700	0.001600
KİL3	4	2	<b>0.145800</b>	<b>0.016000</b>	<b>0.000200</b>	<b>0.212500</b>	<b>0.037000</b>	<b>0.001000</b>	<b>0.272100</b>	<b>0.062300</b>	<b>0.001000</b>	<b>0.272100</b>	<b>0.062300</b>	<b>0.003000</b>
			0.172800	0.024100	0.000400	0.242900	0.050800	0.002100	0.304700	0.080800	0.002100	0.304700	0.080800	0.005500
KİL4	10	5	0.194300	0.029400	0.000600	0.267200	0.060000	0.002700	0.338900	0.103100	0.002700	0.338900	0.103100	0.008700
			<b>0.214500</b>	<b>0.037000</b>	<b>0.001000</b>	<b>0.289200</b>	<b>0.071500</b>	<b>0.004000</b>	<b>0.362000</b>	<b>0.118400</b>	<b>0.004000</b>	<b>0.362000</b>	<b>0.118400</b>	<b>0.012000</b>
KİL5	20	10	0.236200	0.046500	0.001700	0.312200	0.085000	0.006100	0.385700	0.135600	0.006100	0.385700	0.135600	0.016500
			0.256500	0.054600	0.002200	0.336900	0.099500	0.007800	0.408000	0.155400	0.007800	0.408000	0.155400	0.021000
KİL6	40	20	<b>0.278100</b>	<b>0.065500</b>	<b>0.003300</b>	<b>0.359900</b>	<b>0.114500</b>	<b>0.010800</b>	<b>0.431600</b>	<b>0.173600</b>	<b>0.010800</b>	<b>0.431600</b>	<b>0.173600</b>	<b>0.027000</b>
			0.300800	0.078400	0.005100	0.383600	0.131400	0.015000	0.456000	0.193500	0.015000	0.456000	0.193500	0.034700
KİL7	1	0.1	0.309800	0.084800	0.005700	0.384200	0.140100	0.017500	0.454000	0.205400	0.017500	0.454000	0.205400	0.040700
			<b>0.332500</b>	<b>0.098700</b>	<b>0.008200</b>	<b>0.407700</b>	<b>0.157600</b>	<b>0.022800</b>	<b>0.479900</b>	<b>0.225500</b>	<b>0.022800</b>	<b>0.479900</b>	<b>0.225500</b>	<b>0.049900</b>
KİL8	2	0.2	0.355900	0.114500	0.011600	0.431600	0.176800	0.029800	0.501900	0.247100	0.029800	0.501900	0.247100	0.061000
			0.000005	0.000001	0.000001	0.000005	0.000001	0.000001	0.000005	0.000001	0.000001	0.000005	0.000001	0.000001
KİL9	4	0.4	<b>0.000010</b>	<b>0.000002</b>	<b>0.000003</b>	<b>0.000010</b>	<b>0.000002</b>	<b>0.000003</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.000002</b>	<b>0.000003</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.000003</b>	
			0.000020	0.000005	0.000003	0.000020	0.000003	0.000003	0.000020	0.000003	0.000003	0.000020	0.000003	0.000007
KİL10	10	1	0.001000	0.000010	0.000003	0.013200	0.000100	0.000003	0.027700	0.000400	0.000003	0.027700	0.000400	
			<b>0.002000</b>	<b>0.000030</b>	<b>0.000005</b>	<b>0.019600</b>	<b>0.000200</b>	<b>0.000004</b>	<b>0.038000</b>	<b>0.000900</b>	<b>0.000004</b>	<b>0.038000</b>	<b>0.000900</b>	<b>0.000030</b>
KİL11	20	2	0.003000	0.000400	0.000007	0.028800	0.000600	0.000006	0.052000	0.002000	0.000006	0.052000	0.002000	
			0.039900	0.000900	0.000010	0.079100	0.004500	0.000060	0.125700	0.010800	0.000060	0.125700	0.010800	0.000100
KİL12	40	4	<b>0.053100</b>	<b>0.001900</b>	<b>0.000030</b>	<b>0.098200</b>	<b>0.007400</b>	<b>0.000080</b>	<b>0.149600</b>	<b>0.016400</b>	<b>0.000080</b>	<b>0.149600</b>	<b>0.016400</b>	
			0.070400	0.003700	0.000050	0.121300	0.012400	0.000100	0.177200	0.024800	0.000100	0.177200	0.024800	0.000500
KİL13	10	1	0.099100	0.006300	0.000100	0.162900	0.018600	0.000200	0.226900	0.039500	0.000200	0.226900	0.039500	
			<b>0.114500</b>	<b>0.009000</b>	<b>0.000300</b>	<b>0.181600</b>	<b>0.024200</b>	<b>0.000400</b>	<b>0.247800</b>	<b>0.048500</b>	<b>0.000400</b>	<b>0.247800</b>	<b>0.048500</b>	<b>0.001600</b>
KİL14	20	2	0.131900	0.012700	0.000400	0.201800	0.031300	0.000700	0.270000	0.059300	0.000700	0.270000	0.059300	
			0.182300	0.028000	0.000600	0.252800	0.058600	0.002900	0.325000	0.100400	0.002900	0.325000	0.100400	
KİL15	40	4	<b>0.201700</b>	<b>0.035200</b>	<b>0.001000</b>	<b>0.274300</b>	<b>0.070000</b>	<b>0.004400</b>	<b>0.347800</b>	<b>0.115500</b>	<b>0.004400</b>	<b>0.347800</b>	<b>0.115500</b>	
			0.222600	0.044300	0.001700	0.296900	0.083300	0.006600	0.371300	0.132500	0.006600	0.371300	0.132500	
KİL16	10	1	0.000005	0.000002	0.000001	0.000005	0.000003	0.000001	0.000005	0.000003	0.000001	0.000005	0.000003	
			<b>0.000010</b>	<b>0.000003</b>	<b>0.000002</b>	<b>0.000010</b>	<b>0.000004</b>	<b>0.000002</b>	<b>0.000010</b>	<b>0.000005</b>	<b>0.000002</b>	<b>0.000010</b>	<b>0.000005</b>	

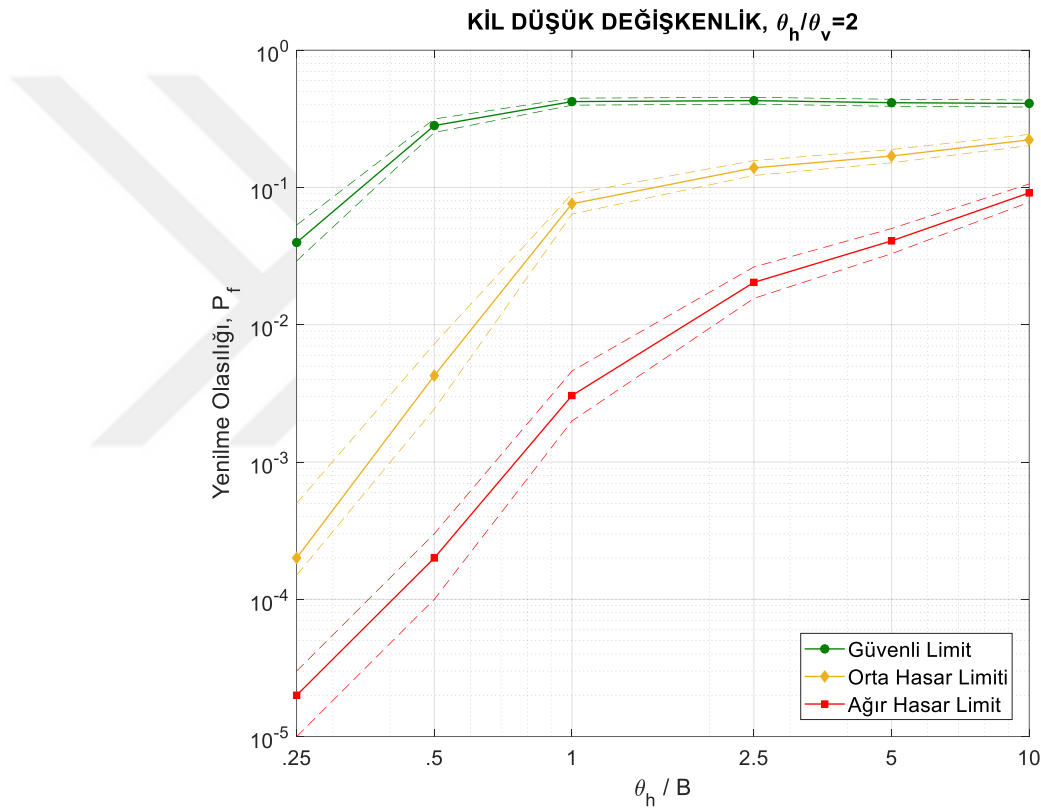
Tablo 4.2. Kum modeller için yenilme olasılıkları

TOPLAM OTURMA TEHLİKE EĞRİLERİ		DEĞİŞKENLİK												
Model No.	$\theta_h$ (m)	$\theta_v$ (m)	DÜŞÜK				ORTA				YÜKSEK			
			MINİMUM HASAR	ORTA HASAR	GÜVENLİ LİMİT	MINİMUM HASAR	ORTA HASAR	GÜVENLİ LİMİT	MINİMUM HASAR	ORTA HASAR	GÜVENLİ LİMİT	MINİMUM HASAR	ORTA HASAR	GÜVENLİ LİMİT
KUM1	1	0.5	0.001600	0.000010	0.000001	0.044700	0.000250	0.000010	0.151400	0.002400	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
			<b>0.003000</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.000002</b>	<b>0.058500</b>	<b>0.000400</b>	<b>0.000025</b>	<b>0.177300</b>	<b>0.003500</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>
KUM2	2	1	0.005200	0.000040	0.000003	0.075400	0.000600	0.000040	0.205900	0.006700	0.000000	0.000000	0.000000	
			0.156300	0.000100	0.000002	0.331700	0.007600	0.000100	0.457300	0.053100	0.002500	0.000000	0.000000	0.000000
KUM3	5	2.5	<b>0.182500</b>	<b>0.000200</b>	<b>0.000005</b>	<b>0.364600</b>	<b>0.011800</b>	<b>0.000300</b>	<b>0.492200</b>	<b>0.068400</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	
			0.211200	0.000300	0.000010	0.398600	0.017900	0.000500	0.527200	0.086800	0.007300	0.000000	0.000000	0.000000
KUM4	10	5	0.217500	0.002800	0.000010	0.354200	0.044700	0.003100	0.442400	0.125900	0.000000	0.000000	0.000000	
			<b>0.238500</b>	<b>0.004200</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.378000</b>	<b>0.054300</b>	<b>0.004500</b>	<b>0.467000</b>	<b>0.142700</b>	<b>0.033400</b>	0.000000	0.000000	0.000000
KUM5	1	0.125	0.260600	0.006100	0.000035	0.402400	0.065400	0.006600	0.491800	0.160900	0.000000	0.000000	0.000000	
			0.248800	0.008600	0.000100	0.365600	0.069000	0.008700	0.436900	0.153100	0.044200	0.000000	0.000000	0.000000
KUM6	2	0.25	<b>0.270600</b>	<b>0.011700</b>	<b>0.000200</b>	<b>0.389600</b>	<b>0.081300</b>	<b>0.011900</b>	<b>0.461500</b>	<b>0.171400</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	
			0.293500	0.015800	0.000400	0.414000	0.095200	0.016000	0.486200	0.191100	0.064800	0.000000	0.000000	0.000000
KUM7	5	0.625	0.001000	0.000003	0.000001	0.036000	0.000010	0.000001	0.085000	0.000040	0.000000	0.000000	0.000000	
			<b>0.002000</b>	<b>0.000003</b>	<b>0.000002</b>	<b>0.055000</b>	<b>0.000025</b>	<b>0.000002</b>	<b>0.112000</b>	<b>0.000075</b>	<b>0.000055</b>	0.000000	0.000000	0.000000
KUM8	10	1.25	0.003000	0.000005	0.000003	0.078000	0.000050	0.000003	0.152000	0.000100	0.000000	0.000000	0.000000	
			0.018700	0.000020	0.000005	0.160200	0.000100	0.000020	0.347100	0.000400	0.000300	0.000000	0.000000	0.000000
KUM9	20	2.5	<b>0.026900</b>	<b>0.000025</b>	<b>0.000008</b>	<b>0.187500</b>	<b>0.000300</b>	<b>0.000035</b>	<b>0.380700</b>	<b>0.000800</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	
			0.038100	0.000040	0.000015	0.217500	0.000600	0.000050	0.415300	0.001600	0.001200	0.000000	0.000000	0.000000
KUM10	40	5	0.145000	0.000100	0.000010	0.311400	0.009900	0.000100	0.440400	0.063800	0.000000	0.000000	0.000000	
			<b>0.170900</b>	<b>0.000200</b>	<b>0.000020</b>	<b>0.344500</b>	<b>0.015100</b>	<b>0.000200</b>	<b>0.475700</b>	<b>0.081000</b>	<b>0.007400</b>	0.000000	0.000000	0.000000
KUM11	10	1.25	0.199500	0.000400	0.000038	0.378700	0.022400	0.000500	0.511100	0.101400	0.000000	0.000000	0.000000	
			0.210100	0.001100	0.000056	0.365300	0.032000	0.001200	0.468600	0.115000	0.017100	0.000000	0.000000	0.000000
KUM12	20	2.5	<b>0.230800</b>	<b>0.001800</b>	<b>0.000185</b>	<b>0.389300</b>	<b>0.039800</b>	<b>0.001900</b>	<b>0.493300</b>	<b>0.127300</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	
			0.252600	0.002700	0.000600	0.413700	0.049100	0.003000	0.518000	0.144700	0.028600	0.000000	0.000000	0.000000
KUM13	40	5	0.249900	0.005600	0.000300	0.381400	0.060800	0.005700	0.465600	0.151800	0.000000	0.000000	0.000000	
			<b>0.271800</b>	<b>0.007900</b>	<b>0.000500</b>	<b>0.405500</b>	<b>0.072300</b>	<b>0.008100</b>	<b>0.490300</b>	<b>0.170000</b>	<b>0.046900</b>	0.000000	0.000000	0.000000
KUM14	10	1.25	0.294600	0.011000	0.001000	0.430100	0.085300	0.011200	0.515000	0.189600	0.000000	0.000000	0.000000	
			0.254500	0.017700	0.000600	0.353000	0.089500	0.017800	0.413800	0.171000	0.063500	0.000000	0.000000	0.000000
KUM15	20	2.5	<b>0.276500</b>	<b>0.022900</b>	<b>0.001000</b>	<b>0.376800</b>	<b>0.103700</b>	<b>0.023000</b>	<b>0.438300</b>	<b>0.190200</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	<b>0.000000</b>	
			0.299400	0.029400	0.001700	0.401200	0.119500	0.029500	0.462900	0.210600	0.088700	0.000000	0.000000	0.000000

Tablo 4.2 (Devamı)

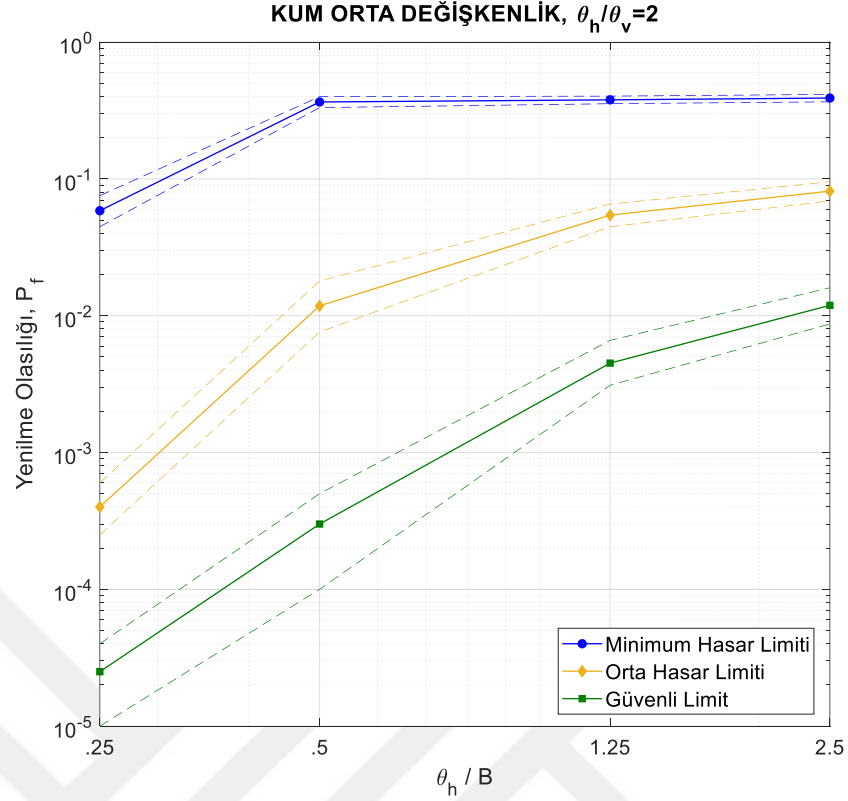
Model No.	$\theta_h$ (m)	$\theta_v$ (m)	DEĞİŞKENLİK													
			DÜŞÜK				ORTA				YÜKSEK					
			MİNİMUM HASAR	ORTA HASAR	GÜVENLİ LİMİT	MİNİMUM HASAR	ORTA HASAR	GÜVENLİ LİMİT	MİNİMUM HASAR	ORTA HASAR	GÜVENLİ LİMİT	MİNİMUM HASAR	ORTA HASAR	GÜVENLİ LİMİT		
KUM1	1	0.5	0.001000	0.000010	0.000001	0.000400	0.000100	0.000001	0.002100	0.000640	0.000039	0.000200	0.000030	0.000002	0.000003	0.000055
KUM2	2	1	0.003000	0.000050	0.000003	0.000900	0.000350	0.000005	0.006900	0.000860	0.000070	0.012000	0.000100	0.000002	0.000030	0.000100
KUM3	5	2.5	0.017900	0.000200	0.000005	0.084200	0.004600	0.000050	0.157600	0.016300	0.000300	0.026600	0.000500	0.000008	0.000080	0.000500
KUM4	10	5	0.023100	0.000300	0.000010	0.100500	0.007000	0.000100	0.105100	0.007900	0.000080	0.023100	0.000300	0.000010	0.000100	0.000600
KUM5	1	0.125	0.029500	0.000600	0.000025	0.115600	0.009700	0.000200	0.132500	0.013600	0.000400	0.037600	0.001000	0.000045	0.000400	0.001000
KUM6	2	0.25	0.048400	0.001500	0.000150	0.155200	0.017900	0.000200	0.173500	0.023200	0.000400	0.048400	0.001500	0.000150	0.000200	0.001700
KUM7	5	0.625	0.070700	0.003800	0.000450	0.193400	0.030200	0.000700	0.200000	0.025500	0.000010	0.070700	0.003800	0.000450	0.000700	0.002800
KUM8	10	1.25	0.000030	0.000002	0.000002	0.000255	0.000010	0.000002	0.000002	0.000040	0.000005	0.000030	0.000003	0.000003	0.000002	0.000003
KUM9	20	2.5	0.000050	0.000002	0.000002	0.000400	0.000020	0.000003	0.000075	0.000040	0.000005	0.000075	0.000005	0.000005	0.000005	0.000005
KUM10	40	5	0.000075	0.000002	0.000002	0.000560	0.000040	0.000004	0.000020	0.000239	0.000020	0.000075	0.000004	0.000004	0.000020	0.000030
			0.000100	0.000020	0.000004	0.002800	0.000239	0.000020	0.005000	0.000435	0.000030	0.000200	0.000020	0.000020	0.000020	0.000030
			0.000200	0.000035	0.000005	0.008700	0.000600	0.000045	0.016600	0.002900	0.000300	0.000700	0.000075	0.000045	0.000070	0.000050
			0.000600	0.000050	0.000008	0.037000	0.000900	0.000060	0.034400	0.004400	0.000075	0.000600	0.000075	0.000045	0.000070	0.000075
			0.005200	0.000080	0.000015	0.049400	0.001800	0.000060	0.012500	0.005600	0.000060	0.005200	0.000060	0.000060	0.000060	0.000060
			0.008500	0.000200	0.000030	0.065700	0.003500	0.000090	0.103100	0.012500	0.000075	0.008500	0.000075	0.000060	0.000075	0.000100
			0.014000	0.000350	0.000050	0.091500	0.006100	0.000080	0.150700	0.019800	0.000090	0.014000	0.000350	0.000050	0.000090	0.000300
			0.020100	0.000200	0.000060	0.105900	0.008600	0.000120	0.187600	0.028700	0.000080	0.020100	0.000200	0.000060	0.000080	0.000600
			0.025900	0.000400	0.000100	0.122200	0.012200	0.000150	0.207200	0.036100	0.000120	0.025900	0.000400	0.000100	0.000120	0.001000
			0.033300	0.000800	0.000150	0.117200	0.010100	0.000100	0.228200	0.045300	0.000150	0.033300	0.000800	0.000150	0.000150	0.001700
			0.028000	0.000400	0.000090	0.133400	0.013700	0.000200	0.262000	0.040800	0.000100	0.028000	0.000400	0.000090	0.000100	0.001100
			0.035200	0.000800	0.000150	0.151400	0.018600	0.000300	0.247100	0.050000	0.000200	0.035200	0.000800	0.000150	0.000200	0.001800
			0.044200	0.001300	0.000200	0.151400	0.018600	0.000300	0.269200	0.061100	0.000300	0.044200	0.001300	0.000200	0.000300	0.003000
			0.000350	0.000055	0.000004	0.003200	0.000340	0.000004	0.004890	0.000550	0.000004	0.000350	0.000055	0.000004	0.000050	0.000050
			0.000483	0.000070	0.000006	0.005600	0.000480	0.000006	0.006670	0.000754	0.000006	0.000483	0.000070	0.000006	0.000067	0.000067
			0.000567	0.000096	0.000008	0.007800	0.000630	0.000009	0.008500	0.000980	0.000009	0.000567	0.000096	0.000008	0.000088	0.000088

Yenilme olasılıkları güven aralıklarıyla tehlike eğrilerini oluşturmaktadır. Bu kapsamda abaklar düşük, orta ve yüksek olmak üzere 3 ayrı değişkenlik kategorisinde sunulmuştur. Ayrıca, yatay ve düşeydeki rijitlik ve dayanım değişimi eşit alınmayarak anizotropinin etkisi göz önüne alınmıştır. Kil modellerde, yatay ve düşey korelasyon uzunlukları oranının ( $\theta_h/\theta_v$ ) 2 ve 10 olması durumları için ayrı abaklar önerilmiştir. Böylece, 3 değişkenlik ve 2 anizotropi kategorisi olmak üzere kil modellerde, toplam oturma durumu için 6 adet tehlike eğrisi önerilmiştir. Kil modellerden temsili bir tehlike eğrisi Şekil 4.6' da verilmiştir. Eğrilerdeki her bir renk farklı hasar limitini, kesikli çizgiler ise yenilme olasılıklarının %95 güven aralıklarını ifade etmektedir.



Şekil 4.6. Kil modellerden toplam oturma durumu için temsili bir tehlike eğrisi

Kum modellerde, yatay ve düşey korelasyon uzunlukları oranı ( $\theta_h/\theta_v$ ) 2 ve 8 alınmıştır. Böylece, 3 değişkenlik ve 2 anizotropi kategorisi olmak üzere kum modellerde toplam oturma durumu için 6 adet tehlike eğrisi önerilmiştir. Kum modellerden temsili bir tehlike eğrisi Şekil 4.7' de verilmiştir.



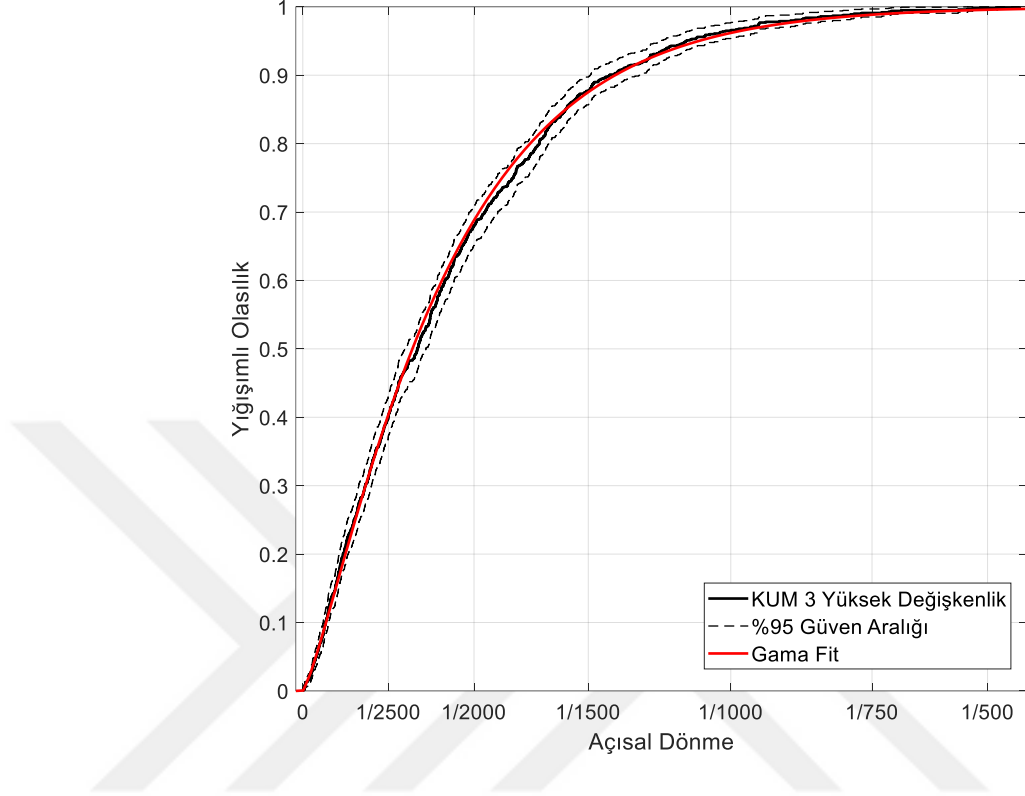
Şekil 4.7. Kum modellerden toplam oturma durumu için temsili bir tehlike eğrisi

Yüzeysel temel toplam oturmasına göre önerilen tüm tehlike eğrileri EK. B' de sunulmuştur.

#### 4.2. Açısal Dönme göre Tehlike Eğrileri

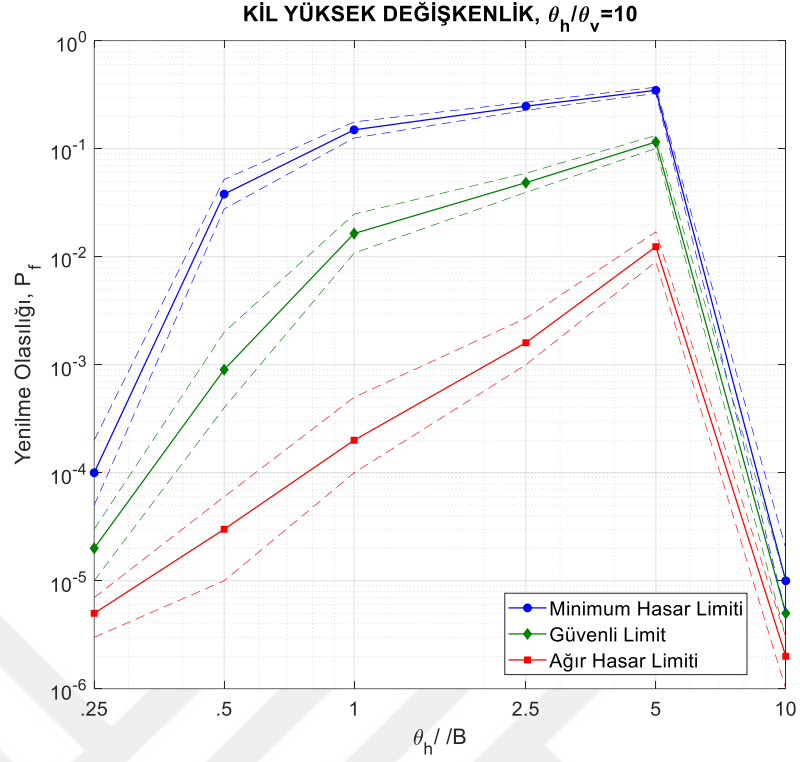
Kil ve kum modeller için oluşturulan gama dağılım PDF' leri, açısal dönme göre yenilme olasılıklarının hesaplanması için kullanılmıştır. Bölüm 4.1' de anlatılan Matematiğe göre açısal dönme için elde edilen PDF' ler, MATLAB ile CDF olarak ifade edilmiştir. CDF, yatay eksenindeki açısal dönme hasar limit değerleri için direkt olarak bu sınıra kadar PDF eğrisinin altında kalan alanı vermiştir. Böylece, okunan değerlerin 1' den çıkarılmasıyla limit değerinin aşılması yani yenilme olasılığı ( $P_f$ ) hesaplanmıştır. Tüm durumlar için  $P_f$  %95 güven aralığı değerleri ile birlikte kaydedilmiş ve tehlike eğrileri bu verilere dayanarak oluşturulmuştur. Şekil 4.8' de kum model temel açısal dönmesi için temsili bir CDF verilmiştir. Örneğin temsili CDF ile, verilen tüm hasar limitleri için yığışlımlı olasılıklar okunmuş ve 1' den çıkarılarak

$P_f$  hesaplanmıştır. Tüm değerler alt ve üst limit şeklinde güven aralıklarıyla verilmiştir. Benzer işlem tüm kil ve kum modellerle açısai dönme için tekrarlanmıştır.

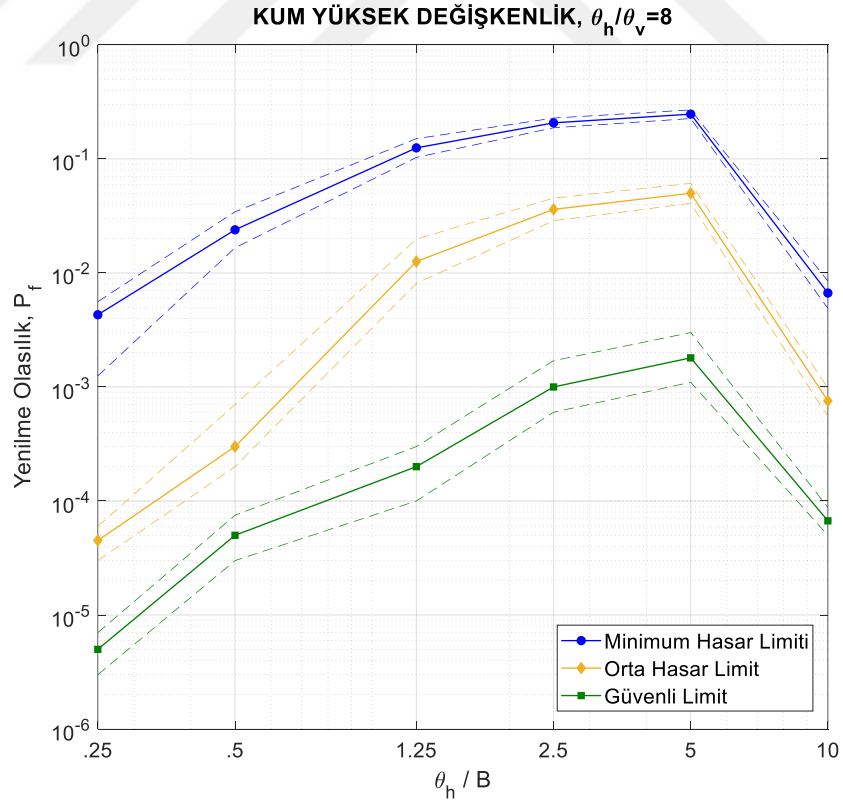


Şekil 4.8. Kum 3 yüksek değişkenlik kategorisi için kullanılan temsili CDF

Açısai dönme abakları düşük, orta ve yüksek olmak üzere 3 ayrı değişkenlik kategorisinde sunulmuştur. Kil modellerde, yatay ve düşey korelasyon uzunlukları oranının ( $\theta_h/\theta_v$ ) 2 ve 10 olması durumları için toplam 6 adet tehlike eğrisi önerilmiştir. Kil modellerden temsili bir tehlike eğrisi Şekil 4.9' da verilmiştir. Eğrilerdeki her bir renk farklı hasar limitini, kesikli çizgiler ise yenilme olasılıklarının %95 güven aralıklarını ifade etmektedir. Kum modellerde ise, yatay ve düşey korelasyon uzunlukları oranı ( $\theta_h/\theta_v$ ) 2 ve 8 alınmıştır. Böylece, 3 değişkenlik ve 2 anizotropi kategorisi olmak üzere kum modellerde temel açısai dönmesi için 6 adet tehlike eğrisi önerilmiştir. Kum modellerden temsili bir tehlike eğrisi Şekil 4.10' da verilmiştir. Yüzeysel temel açısai dönme durumuna göre oluşturulan tüm tehlike eğrileri EK. C' de verilmiştir.



Şekil 4.9. Kil modellerden temel açılmal dönmesi için temsili bir tehlike eğrisi



Şekil 4.10. Kum modellerden temel açılmal dönmesi için temsili bir tehlike eğrisi

### 4.3. Tehlike Eğrilerinin Geçerliliğinin Doğrulanması

Önerilen tehlike eğrileri, yatay ve düşey zemin değişkenliği belirlenmiş bir bölgedeki yüzeysel temel tasarımının güvenilirliğe dayalı kriterler ile incelenmesini mümkün hale getirmektedir. Bu tip bir abağın, kullanımı öncesinde geçerliliğinin doğrulanması gerekmektedir. Bu çerçevede, gerçek veri tabanları kullanılarak oluşturulan rastgele alan zemin özellikleri ile çalışmadaki modellerden analiz sonuçları elde edilmiş ve doğrulama sonuç çıktılarıyla her bir hasar sınırı için hesaplanan yenilme olasılıkları, önerilen tehlike eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Doğrulama için ISSMGE' nin, risk incelemeleri için kurduğu TC304 numaralı teknik komitenin koni penetrasyon deneyi (*CPT-Cone Penetration Test*) veri tabanı kullanılmıştır.

Kil tehlike eğrilerinin testi için TX-CPTU isimli veri tabanı seçilmiştir. Veri tabanı, Baytown Texas ABD bölgesinden katı aşırı konsolide CL/ CH kilde uygulanan CPT sonuçlarını içermektedir. Bölgede yapılan çalışma sonucunda düşey korelasyon uzunluğunun ortalama 0.849 m, yatay korelasyon uzunluğunun ise ortalama 5.83 m olduğu raporlanmıştır (Stuedlein vd., 2012a). Buna göre, RFEM modelinde  $\theta_v = 0.80$  m,  $\theta_h = 5.80$  m alınmıştır. Rastgele alan parametreleri olarak seçilen  $E_d$ ,  $c$  ve  $\phi$  değerleri, CPT veri tabanı ve korelasyonlar kullanılarak hesaplanmıştır. Deformasyon modülü ( $E_d$ ); koni uç direnci ( $q_c$ ), düşey toplam gerilme ( $\sigma_{v0}$ ) ve zemin tipi davranış indisine ( $I_c$ ) bağlı olarak Denklem 4.1' de verilen korelasyon ile hesaplanmıştır (Robertson ve Cabal, 2015):

$$E_d = [0.015 \times 10^{0.55I_c + 1.68}](q_c - \sigma_{v0}) \quad (4.1)$$

Kayma direnci açısı ( $\phi$ ), koni uç direnci ve efektif gerilmeye ( $\sigma'_{v0}$ ) bağlı Denklem 4.2' deki eşitlik ile elde edilmiştir (Robertson ve Campanella, 1983):

$$\phi' = \arctan[0.1 + 0.38 \log\left(\frac{q_c}{\sigma'_{v0}}\right)] \quad (4.2)$$

Kohezyon değeri ise kayma direnci açısına bağlı olarak Denklem 4.3' te önerilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Senneset vd., 1989):

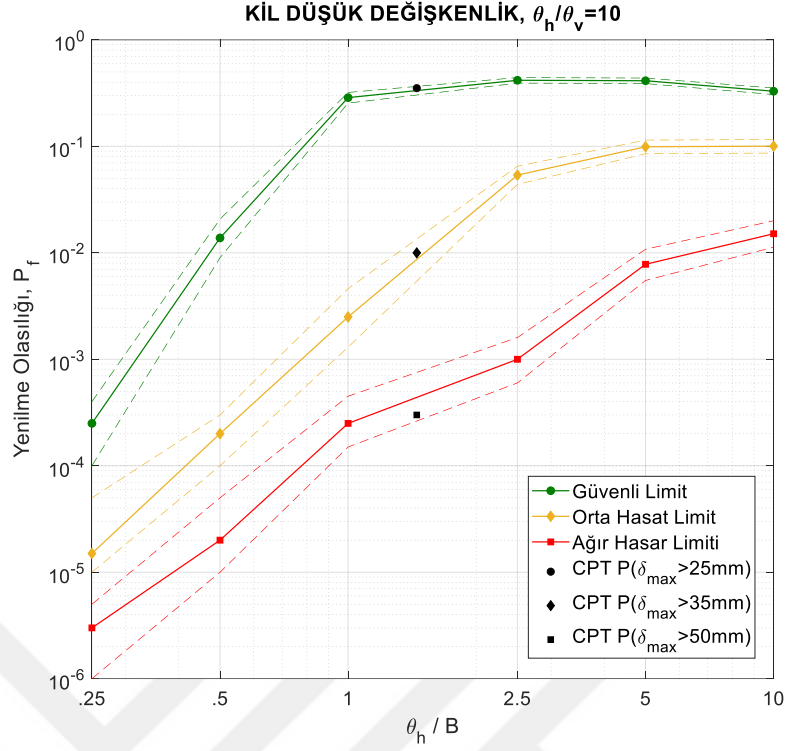
$$q_c = \left[ (N_q - 1) \left( \sigma'_{v0} + \frac{c'}{\tan \phi'} \right) \right] + \sigma_{v0} \quad (4.3)$$

Burada;  $N_q$  taşıma gücü faktörü  $\phi'$  ye bağlı katsayı olarak alınmaktadır. Veri tabanındaki 9 CPT sonucundan, Denklem 4.1- 4.3 arasında verilen eşitlikler ile modelde kullanılacak rastgele alan girdileri üretilmiştir. Tüm girdilerin her bir CPT için ortalama ( $\mu$ ), standart sapma ( $\sigma$ ) ve değişme katsayısı (COV) incelenmiştir. Kil modelde rastgele alan üretiminde kullanılmak üzere CPT veri tabanından hesaplanan girdilerin istatistik parametreleri Tablo 4.3' te özetlenmiştir.

Tablo 4.3. TX-CPTU veri tabanı rastgele alan parametrelerinin istatistikleri

Parametre		Ortalama	Minimum	Maksimum
$E_d$ (kPa)	$\mu$	47089	39480	57560
	$\sigma$	13967	10260	16607
	COV (%)	29.8	24.1	39.3
$c'$ (kPa)	$\mu$	5.0	3.6	5.8
	$\sigma$	4.2	2.8	7.0
	COV (%)	84.2	60.4	131.2
$\phi'$ (°)	$\mu$	35.8	32.4	38.2
	$\sigma$	5.5	4.1	7.0
	COV (%)	15.4	12.4	18.2

Parametrelerin COV değerlerine bakıldığında bölgedeki zemin, çalışmanın düşük değişkenlik kategorisine karşılık gelmektedir. Tablo 4.3' teki değerlere göre MATLAB ile  $E_d$ ,  $c$  ve  $\phi$  rastgele alanları üretilmiş ve bölgenin korelasyon uzunluklarına uyarlanan kil modeli, 1000 iterasyon ile ANSYS' te tekrarlı çözümlerle temel hareketlerinin dağılımı elde edilmiştir. Çalışmadaki hasar sınırları ile kil doğrulama modelinin toplam oturmaya göre yenilme olasılıkları belirlenmiştir. Bölgedeki zeminin korelasyon uzunluklarına göre,  $\theta_h/B = 5.8/4 = 1.45$  ve  $\theta_h/\theta_v = 5.8/0.8 = 7.25$  hesaplanmıştır. Bu değerlere göre veri tabanından elde edilen  $P_f$ ' lerin karşılaştırılması, kil modellerin tehlike eğrilerinden düşük değişkenlik kategorisi ve  $\theta_h/\theta_v = 10$  oranı ile yapılmıştır. Şekil 4.11' de kil veri tabanından edinilen yenilme olasılıklarının ilgili tehlike eğrisi üzerine noktalanması verilmiştir. Tüm noktalar, ilgili hasar limiti güven aralığı içerisinde kalmaktadır. Doğrulama modeli sonuçları, çalışmada killi zeminler için önerilen tehlike eğrilerinin geçerliliğini kanıtlar niteliktedir.



Şekil 4.11. CPT veritabanı ile kil tehlike eğrilerinin doğrulanması

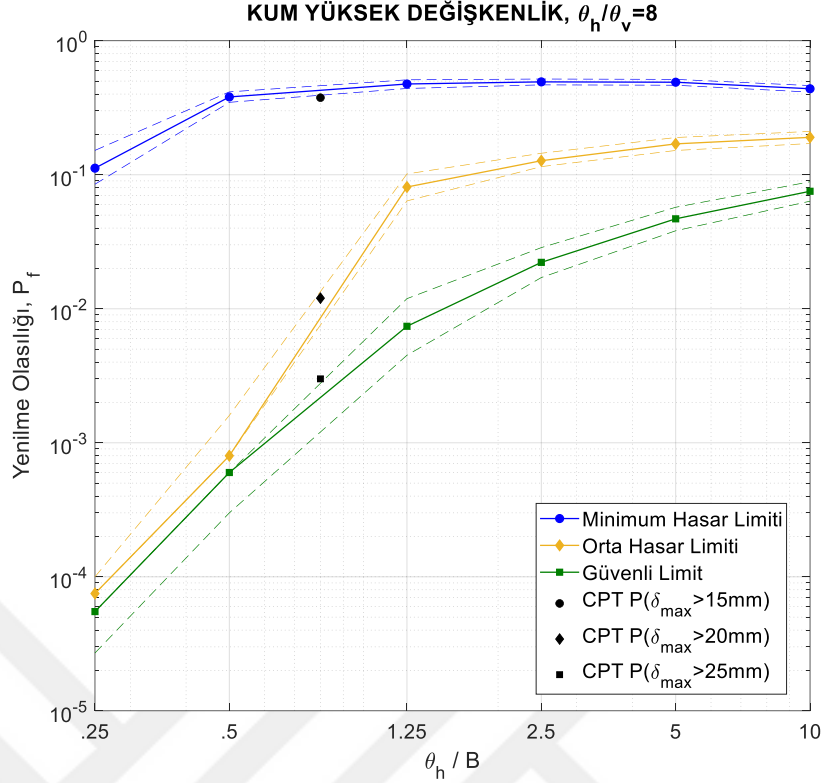
Kum tehlike eğrilerinin geçerliliği, SC-CPTU isimli CPT veri tabanı ile doğrulanmıştır. Veri tabanı, Hollywood Güney Carolina ABD bölgesinde orta-sıkı kum/ siltli kum (SM-SP) zeminde uygulanan CPT sonuçlarını içermektedir. Bölgedeki düşey korelasyon uzunluğu 0.46- 0.49 m, yatay korelasyon uzunluğu ise 3.18- 3.23 m olarak raporlanmıştır (Bong ve Stuedlein, 2017). Buna göre, RFEM modelinde  $\theta_v=0.50$  m,  $\theta_h= 3.20$  m alınmıştır. Rastgele alan parametreleri olarak seçilen  $E_d$  ve  $\phi$  değerleri, CPT veri tabanı ve korelasyonlar kullanılarak hesaplanmıştır. Veri tabanındaki 25 CPT sonucu ile Denklem 4.1 ve 4.2 kullanılarak hesaplanan parametrelerin istatistikleri Tablo 4.4' te özetlenmiştir. Kumdaki rijitlik ve direncin derinlikle değişimi için CPT profillerinden yola çıkılarak 0- 2.5, 2.5- 5, 5- 10 ve 10- 15m derinlik aralıklarına göre modelleme yapılmıştır. Parametrelerin COV değerlerine göre, bölgedeki zemin yüksek değişkenlik kategorisindedir. Tablo 4.4' teki değerlere göre MATLAB ile  $E_d$ ,  $\phi$  ve  $\psi$  rastgele alanları üretilmiş ve bölgenin korelasyon uzunluklarına uyarlanan kum modeli, 1000 iterasyon ile ANSYS' te tekrarlı çözümlenerek yüzeysel temel hareketlerinin dağılımı elde edilmiştir. Çalışmadaki hasar sınırları ile kum doğrulama modelinin toplam oturmaya göre yenilme olasılıkları belirlenmiştir. Bölgedeki zeminin korelasyon uzunluklarına göre,  $\theta_h/B= 3.2/4= 0.80$  ve  $\theta_h/\theta_v=$

3.2/0.5= 6.4 bulunmaktadır. Buna göre veri tabanından elde edilen  $P_f'$  lerin karşılaştırılması, kum modellerin tehlike eğrilerinden yüksek değişkenlik kategorisi ve  $\theta_h/\theta_v= 8$  oranı ile yapılmıştır.

Tablo 4.4. SC-CPTU veri tabanı rastgele alan parametrelerinin istatistikleri

Parametre		Derinlik	Ortalama	Minimum	Maksimum
E <sub>d</sub> (kPa)	$\mu$	0-2.5	32026	21569	59513
		2.5-5.0	46296	38010	55589
		5.0-10.0	49838	41929	63899
		10.0-15.0	50320	41000	63663
	$\sigma$	0-2.5	19784	9313	61174
		2.5-5.0	6511	3272	14412
		5.0-10.0	10979	8888	13500
		10.0-15.0	29515	11680	38854
	COV (%)	0-2.5	56.9	37.4	116.6
		2.5-5.0	14.1	6.9	32.6
		5.0-10.0	22.1	16.8	27.6
		10.0-15.0	58.7	28.5	77.6
$\phi'$ (°)	$\mu$	0-2.5	39.4	35.1	42.8
		2.5-5.0	40.2	36.8	41.6
		5.0-10.0	36.8	34.7	37.9
		10.0-15.0	30.6	28.2	32.4
	$\sigma$	0-2.5	7.8	5.0	11.6
		2.5-5.0	2.3	1.5	3.3
		5.0-10.0	3.6	2.9	4.6
		10.0-15.0	6.7	4.6	7.5
	COV (%)	0-2.5	20.1	11.8	31.0
		2.5-5.0	5.7	3.8	8.1
		5.0-10.0	9.7	7.7	13.2
		10.0-15.0	22.0	15.8	25.0

Şekil 4.12' de kum veri tabanından hesaplanan yenilme olasılıklarının ilgili tehlike eğrisi üzerine noktalanması verilmiştir. Tüm noktalar, verilen hasar limiti güven aralıkları içerisinde kalmaktadır. Doğrulama model sonuçları, çalışmada kumlu zeminler için önerilen tehlike eğrilerinin geçerliliğini kanıtlar niteliktedir.



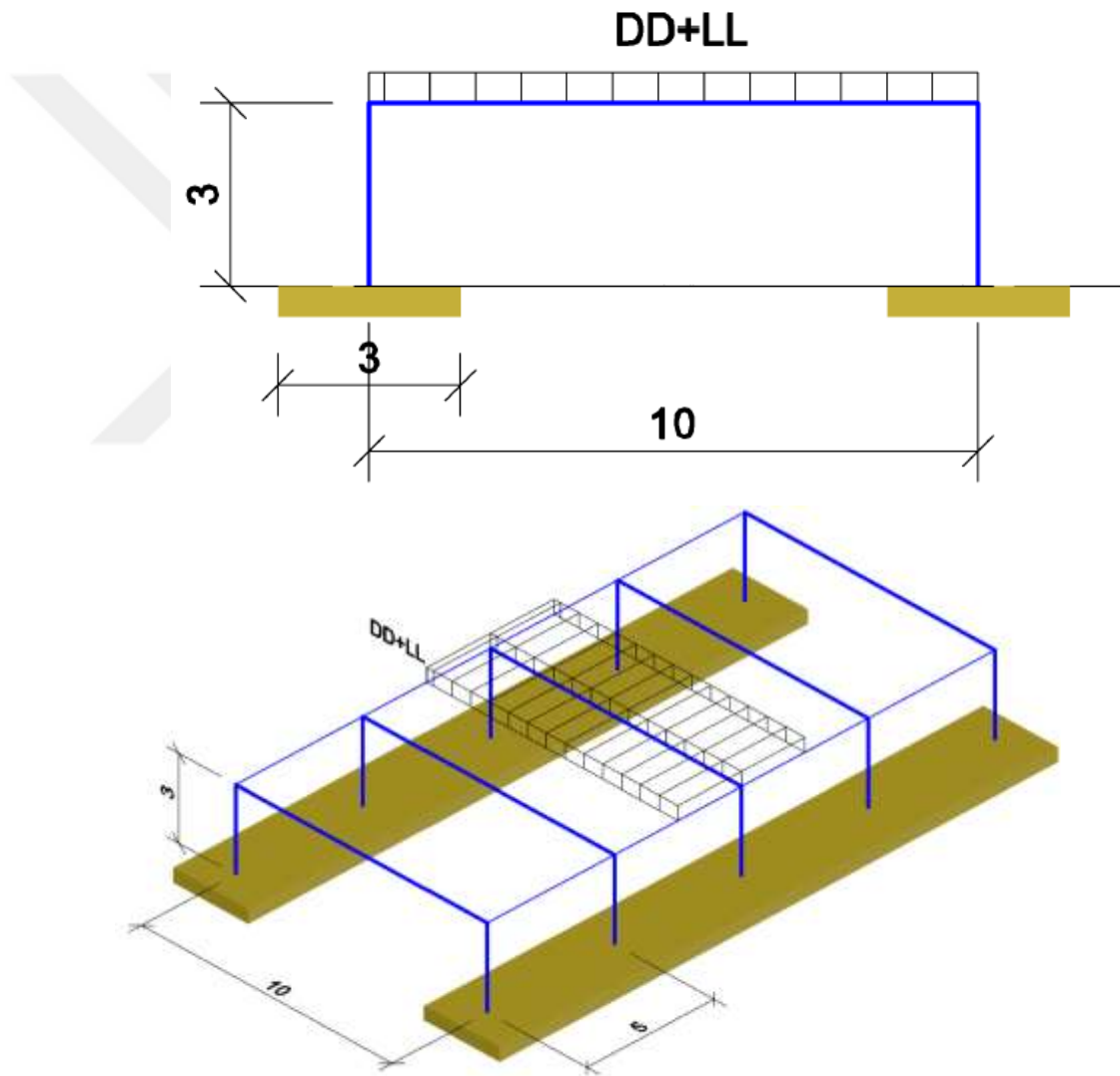
Şekil 4.12. CPT veri tabanı ile kum tehlike eğrilerinin doğrulanması

Önerilen tehlike eğrilerinin geçerliliği birbirinden bağımsız iki farklı bölgeye ve zemin özelliklerine ait CPT veri tabanları ile doğrulanmıştır.

#### 4.4. Önerilen Kil Tehlike Eğrileri için Örnek Problem Çözümü

Çalışmada, kohezyonlu zemine oturan şerit temellerin hizmet görülebilirlik sınır durumuna (SLS- *Serviceability limit state*) göre güvenilirlik analizi için tehlike eğrileri önerilmiştir. Uluslararası yönetmeliklerin büyük bir kısmı yüzeysel temellerin güvenilirliğe dayalı tasarımını (RBD- *Reliability-based design*) içermektedir; ISO, örneğin, yapıların güvenilirliği konulu ayrı bir yönetmelik yayınlamış ve hedef güvenilirliğe ulaşma amaçlı olasılık yöntemlerinin kullanımını kabul etmiştir (ISO-2394:2015, 2015). Birinci dereceden güvenilirlik yöntemleri (FORM- *First-order reliability methods*) veya bir tanesi bu çalışmada kullanılan olasılık yöntemler, standart tarafından kabul görmektedir. Önerilen kil tehlike eğrilerinin kullanımı, 3.0 m genişlikte ve 1.5 m derinlikte kohezyonlu zemin üzerine oturan şerit temellere sahip çelik bir endüstriyel çerçeve örneği üzerinde gösterilmiştir. Örnek yapının geometrisi Şekil 4.13' te verilmiştir. Düşey yük kombinasyonu göz önüne alınmış, standart bir

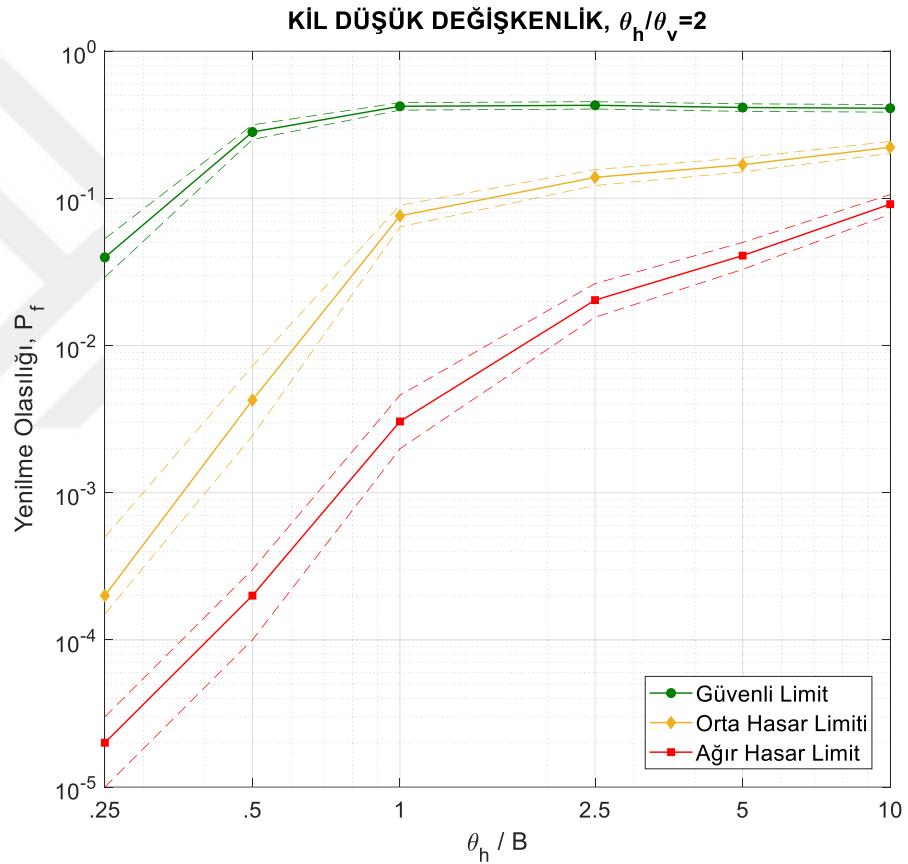
sanayi yapısı için alınan hareketli yük değerleri ile hesap yapılmıştır. Buna göre, ölü yük (DL- *Dead Load*) ve hareketli yük (LL- *Live Load*) kombinasyonu: DD+LL= 5.0+7.5 kN/m<sup>2</sup> alınmıştır. Düzlem deformasyon durumu uyarınca, şerit temelin bir çerçeveye gelen yük durumu için hesaplama yapılmıştır. Güvenilirlik değerlendirmesi yapılabilecek ölçüde zemin araştırması gerçekleştirildiği kabul edilmiştir. Zemin özellikleri, çalışmada kullanılan ortalama değerlerden alınmış:  $\mu_E= 15$  MPa,  $\mu_c= 5$  kPa,  $\mu_\phi= 20^\circ$ ; değişme katsayıları, düşük değişkenlik durumuna karşılık gelecek şekilde sırasıyla COV= 0.60, 0.30 ve 0.10 verilmiştir. Ayrıca, zeminin uzamsal değişkenliğinin ölçüldüğü kabul edilmiş ve  $\theta_h= 3.00$  m,  $\theta_v= 1.50$  m verilmiştir.



Şekil 4.13. Kil örneğindeki yapının geometrisi

Örnekte istenen, verilen koşullarda mevcut temel boyutunun kontrol edilmesidir. Yapının temel oturmalarına göre toleransı orta derece seçilmiştir (orta

hasar sınırı). İlk olarak, analitik (deterministik) çözümle SLS için gerekli minimum temel boyutu belirlenmiştir. Ardından zemin değişkenliği göz önüne alınmış ve hedef güvenilirlik indisi ( $\beta_{Hedef}$ ) için hesaplama yapılmıştır. ISO-2394:2015, JCSS (Joint Committee of Structural Safety) işbirliğiyle SLS için bir yıl referans periyotta hedef güvenilirlik indisini (ilgili yenilme olasılığıyla):  $\beta = 1.70$  ( $P_f \approx 5.10^{-2}$ ) önermiştir (JCSS, 2001). Verilen örnek yapının mevcut durumdaki  $\beta$  ve  $P_f$  değerleri, toplam oturma için önerilen ilgili tehlike eğrisinden tahmin edilmiştir (Şekil 4.14). Buna göre,  $\theta_h/\theta_v = 3.00/1.50 = 2.00$  ve orta değişkenlik kategorisi için önerilen tehlike eğrisi seçilmiş ve  $P_f$ ,  $\Theta_h = \theta_h/B = 3/3 = 1$  için  $8.10^{-2}$  okunmuştur ( $\beta = 1.40 < \beta_{Hedef}$ ).



Şekil 4.14. Örnekte kullanılan kil tehlike eğrisi

Hedef güvenilirlik sağlanmadığından, temelde ilgili  $\beta_{Hedef}$  için gerekli yeniden boyutlandırma yapılmıştır. Buna göre, tehlike eğrisinden orta hasar limiti için hedef güvenilirliğe karşılık gelen  $P_f$   $5.10^{-2}$  değeri için  $\Theta_h = \theta_h/B$ ,  $0.90 = 3.00/B$  okunmuş,  $B = 3.33$  m hesaplanmıştır. Örnek problemin hedef güvenilirlik için gerekli temel boyutu ayrıca FORM (Ang ve Tang, 1975; Hasofer ve Lind, 1974) ile hesaplanmış ve önerilen yöntemle karşılaştırılmıştır. Sonuçların özeti Tablo 4.5' te

verilmiştir. FORM çözümünün detayları EK. D' de sunulmuştur (Low ve Phoon, 2015).

Tablo 4.5. Örnek temel boyutlandırmanın farklı yöntemlerle karşılaştırılması

	Verilen	Analitik	Olasılık Tabanlı Yöntemler	
		SLS Limiti	FORM	Önerilen Tehlike Eğrileri
Temel Boyutu, B (m)	3.00	3.15	3.36	3.33

Yapılan karşılaştırma, verilen temel boyutunun yetersiz kaldığını göstermiştir. Ayrıca, analitik çözümün güvenilirlik gereksinimlerini karşılamadığı görülmektedir. Bu nedenle, özellikle zemin değişkenliği görülen durumlarda olasılık tabanlı yöntemlerin kullanımı gerekmektedir. FORM ve önerilen yöntemin sonuçları birbirine yakın çıksa da FORM çözümü zemindeki değişimi göz önüne almasına karşın uzamsal değişkenliği hesaba katmamaktadır. Öte yandan, önerilen yöntem, şerit temellerin SLS' ye göre güvenilirliğe dayalı tasarımda zemin uzamsal değişkenliğinin göz önüne alınması gerekliliğini göstermiştir. Tablo 4.6 FORM ve önerilen yöntemin, uzamsal değişkenliğin göz önüne alındığı durumdaki temel boyutlarının farkını ortaya koymaktadır.

Tablo 4.6. Farklı zemin değişkenliğinde boyutlandırma sonuçlarının karşılaştırılması

$\theta_h$ (m)	$\theta_v$ (m)	$B_{FORM}$ (m)	$\beta$ , tehlike eğrilerinden	$\beta_{Hedef=1.70}$ için Önerilen B (m)
3.00	1.50	3.36	1.40	3.33
10.00	1.00	3.36	1.00	4.00

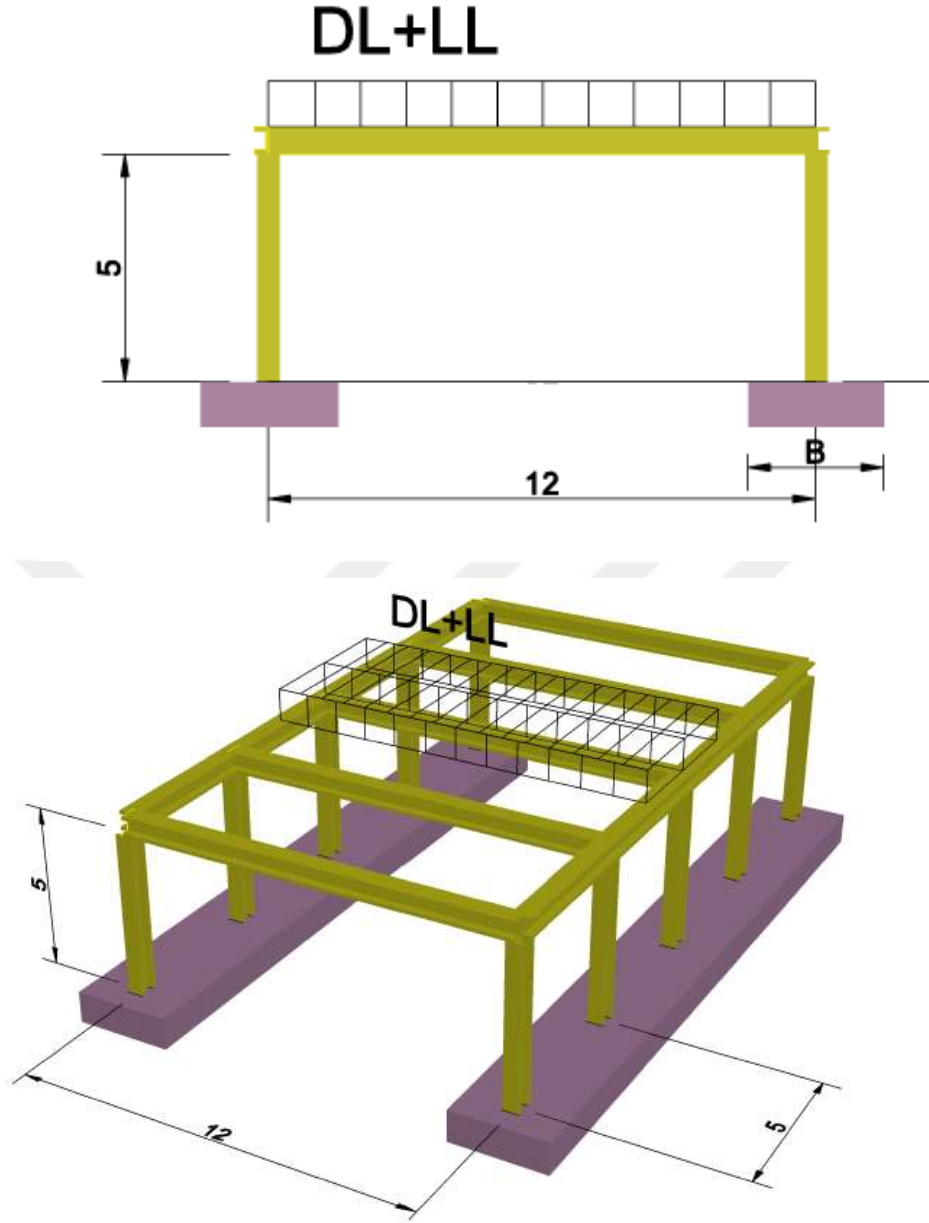
Önerilen tehlike eğrilerinden edinilen sonuçlar çerçevesinde temel boyutlandırmanın, güvenilirlik değerlendirmelerinde zemin değişkenliğinin göz ardı edilmesi durumunda yanıltıcı sonuçlar verebildiğini göstermiştir. Çalışmadaki tehlike eğrileri ise bu durumu etkili bir şekilde tanımlamıştır.

#### 4.5. Önerilen Kum Tehlike Eğrileri için Örnek Problem Çözümü

Çalışmada verilen tehlike eğrileri, kohezyonsuz zemin üzerine oturan şerit temellerin SLS' ye göre RBD değerlendirmesi için kullanılabilir. Eurocode gibi uluslararası yönetmelikler, güvenilirlik tabanlı tasarım çözümlerini kabul etmektedir. Örneğin, analitik/ ampirik çözümlerle Level I adı verilen esas yöntem

dayalı Eurocode, FORM (Level II) veya Level III adı verilen tamamen olasılık tabanlı yöntemlerin kullanımını da önermektedir (EN 1990 Ek B ve C (EN-1990:2002, 2002b)). Çalışmada kullanılan yöntem, Level III kategorisindeki olasılık tabanlı çözümlere karşılık gelmekte, önerilen tehlike eğrilerinin kullanımı örnek bir çalışma problemi ile bu bölümde gösterilmektedir. Endüstriyel bir çelik yapıyı taşıyacak 1.5 m derinlikte kohezyonsuz zemine oturan şerit bir temelin tasarımı açıklanmıştır. Örnek yapının detaylı geometrisi Şekil 4.15’ te gösterilmiştir. Bir sanayi yapısı için tipik hareketli yük değeri için düşey yük kombinasyonunda temel tasarımı yapılmış;  $DD+LL=10.0+7.5 \text{ kN/m}^2$  alınmıştır. Düzlem deformasyon durumu geçerli olacak şekilde bir çerçeveye gelen düşey yük kombinasyonu için hesap yapılmıştır. Güvenilirlik değerlendirmesi için yeterli ölçüde zemin numunesi ile parametrelerin belirlendiği kabul edilmiş ve çalışmada kum zemin için 0- 5 m derinlikte kullanılan ortalama değerler verilmiştir:  $\mu_E= 25 \text{ MPa}$ ,  $\mu_\phi= 25^\circ$ . Parametrelerin değişme katsayısı sırasıyla  $COV= 0.30$  ve  $0.12$  verilmiş, buna göre orta derece değişkenlik kategorisinde değerlendirme yapılmıştır. İlave olarak, zemin uzamsal değişkenliği ile ilgili çalışma yapıldığı kabul edilmiş ve bölgedeki değişkenlik  $\theta_h= 2.00 \text{ m}$   $\theta_v= 1.00 \text{ m}$  verilmiştir. Örnek problemde istenen, verilen zemin ve yapısal koşullar altında güvenli bir şerit temel boyutlandırmasıdır.

Yapının oturmaya karşı toleransı, SLS sınırı olan 25 mm kabul edilmiş ve toplam oturmaya göre örnekte kullanılan ilgili tehlike eğrisindeki “Güven Limit” hasar sınırına göre boyutlandırma yapılmıştır. İlk olarak, temel genişliği SLS’ ye göre analitik yöntemle boyutlandırılmıştır. Ardında, zemin değişkenliği hesaba katılmış ve hedef güvenilirliğe göre tasarım yapılmıştır. Eurocode EN 1990:2002 Ek B ve C, ikinci derece güvenilirlik sınıfındaki (RC2) bir yapı için SLS’ ye göre, bir yıl referans periyot için hedef güvenilirlik indisini  $\beta_{Hedef}=2.90$  (ilgili yenilme olasılığı  $P_f \approx 2.10^{-3}$ ) önermiştir. Buna göre,  $\theta_h/\theta_v= 2.00/1.00= 2.00$  ve orta değişkenlik kategorisi için önerilen tehlike eğrisi kullanılmıştır (Şekil 4.16).

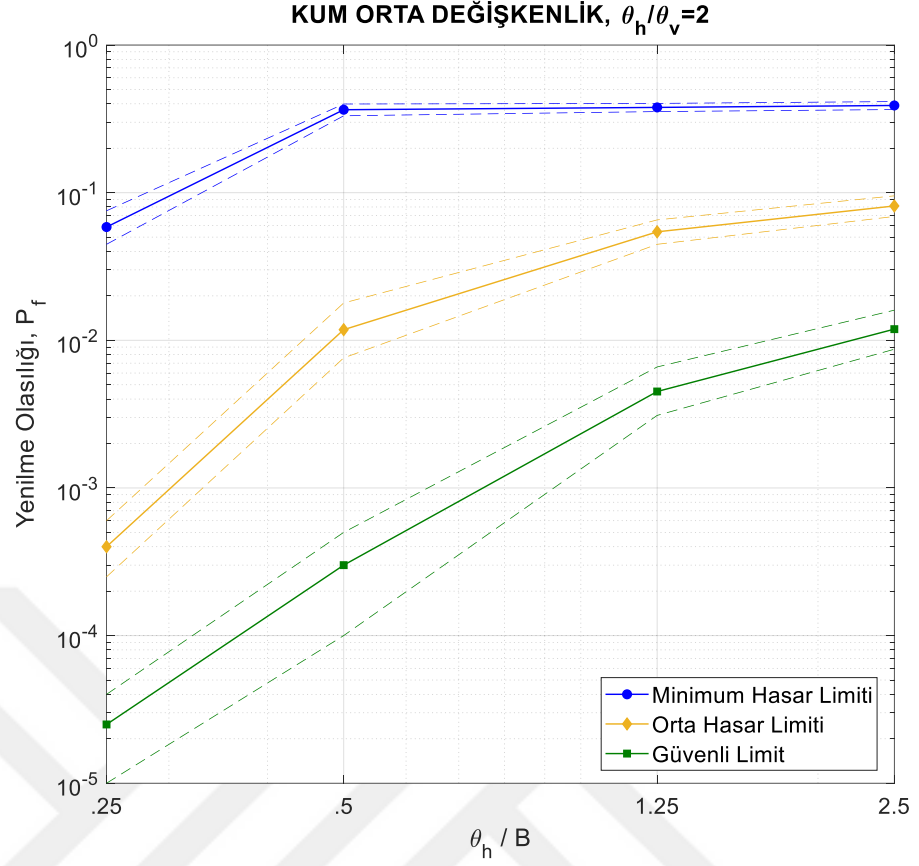


Şekil 4.15. Kum örneğindeki yapının geometrisi

Hedef  $P_f$  için  $\Theta_h = \theta_h/B = 2/B \approx 0.80$  okunmuş, buna göre  $B = 2.50$  m hesaplanmıştır. Önerilen yöntem ile çözüm ve FORM ile karşılaştırmalı sonuçlar Tablo 4.7' de özetlenmiştir.

Tablo 4.7. Temel boyutlandırmasının analitik ve olasılık tabanlı yöntemlerle karşılaştırılması

	<b>Analitik</b>	<b>Olasılık Tabanlı Yöntemler</b>	
	SLS	FORM	Önerilen Tehlike Eğrileri
Tasarlanan temel boyutu, B (m)	2.32	2.78	2.50



Şekil 4.16. Örnekte kullanılan kum tehlike eğrisi

Örnek problemde analitik çözüm ile boyutlandırmanın zemin değişkenliği göz önüne alındığında yetersiz kaldığı görülmektedir. Önerilen tehlike eğrileri, temel boyutunu FORM çözümünden biraz düşük kalarak daha optimize şekilde tahmin etmiştir. Bu durum, FORM çözümünün matematiksel doğası gereği zemindeki uzamsal değişkenliği ve kum zemindeki tabakalı profili göz önüne almamasıyla açıklanmıştır. Öte yandan, çalışmada önerilen tehlike eğrileri bu durumu etkili bir şekilde tanımlamaktadır. Tablo 4.8 FORM çözümünün, farklı uzamsal değişkenlik durumlarından önerilen yöntemden ne derece saptığını özetlemiş, kum benzeri zemin üzerindeki şerit temellerin RBD değerlendirmelerinde zemin uzamsal değişkenliğinin göz önüne alınması gerekliliğini vurgulamıştır.

Tablo 4.8. Farklı değişkenlik seviyeleri için temel tasarımlarının karşılaştırılması

$\theta_h$ (m)	$\theta_v$ (m)	$B_{FORM}$ (m)	$B_{Önerilen}$ (m)
2.00	1.00	2.78	2.50
8.00	1.00	2.78	3.20

Temel altındaki olası zayıf zemin bölgesi artan  $\Theta_h$  durumunda büyüyeceğinden, daha geniş temel boyutu ile bu durumun telafi edilmesi gerekmektedir. Çalışmada önerilen ve geçerliliği doğrulanmış tehlike eğrilerinden elde edilen sonuçlar, bu durumu etkili bir şekilde ifade etmektedir.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Mevcut çalışma, toplam oturma ve açılal d6nmeye g6re şerit temeller i7in tehlike eğrileri 6nermiştir. Abaklar, zemin kayma direnci ve rijitliğinin uzamsal değişkenliğini g6z 6n6ne alarak oluşturulmuştur. 7alışma, şerit temellerin SLS sınırlarına g6re g6venilirliğe dayalı tasarımında zemin uzamsal değişkenliğinin g6z 6n6ne alınması gerekliliğini g6stermiştir. Ayrıca, bu değerlendirmelerin sadece rijitlik parametreleriyle ( $E_d$ ) değil dayanım parametrelerindeki ( $c$  ve  $\phi$ ) değişimle birlikte ele alınması gerektiği vurgulanmıştır. Bu durumda yenilme y6zeyi dahil olmak 6zere zemin- temel sisteminin davranışına etki eden t6m parametrelerin değişken tanımlanmasıyla, temel hareketlerinin hem elastik hem plastik bileşenleriyle elde edilebileceği g6sterilmiştir.

Kil i7in oluşturulan toplam oturma tehlike eğrileri,  $\Theta_h = 1.0 \sim 2.5$  değer aralığının 6tesinde, bu kritik eşiğe kadarki yenilme olasılıklarına oranla, k676k değişimler g6stermiştir. Bu durumun başlıca nedeni, temel altındaki zemin hacminin, temel genişliği bakımından kritik bir değere kadar zemindeki uzamsal değişkenliğin etkisini artırmasıyla a7ıklanmıştır.

Kum toplam oturma tehlike eğrilerinde yenilme olasılıkları,  $\Theta_h$  ' de herhangi bir kritik değer g6stermeden artış eğiliminde bulunmuştur. Bu durum, temel altındaki kohezyonsuz zemin bölgesinin B temel genişliği bakımından artışı ile uzamsal değişkenliğin etkisinin artması ile a7ıklanmıştır. Temel altındaki zemin bölgesinde oluşabilecek rijitlik d6ř6ř6, kohezyonsuz bir zeminde temelin toplam oturmasında belirgin bir etki ile sonu7lanabilmektedir.

T6m a7ılal d6nme tehlike eğrilerinde yenilme olasılıkları,  $\Theta_h = 5$  değerinde zirve yapmış ve bu değerden sonra temelde d6nme ger7ekleşmediğini g6sterir nitelikte

sıfıra yaklaşmıştır. Bir diğer ifadeyle temel altındaki zeminin yatay yöndeki değişkenliği, temelın 5 katı gibi kritik bir değere kadar etkili olmuştur. Bu değerın ötesinde ise temel altındaki zemin yatay yönde üniforma yakın davranış göstermiş ve temelde açısız dönme gerçekleşmemiştir. İstisna olarak,  $\theta_h/\theta_v=2$  oranı için kum tehlike eğrileri,  $\Theta_h=5$  kritik noktasını içermediği için yenilme olasılıklarında artış eğiliminde kalmıştır.

Çalışmanın esas katkısı, zeminde etkili tüm parametreleri ve elasto-plastik zemin davranışını hesaba katarak, yüzeysel temel tasarım yönetmeliklerindeki deformasyon limitlerini karşılayan tehlike eğrileri oluşturulmasıdır. Böylece, temel tasarımı ve analizlerine olasılık tabanlı bir bakış açısı getirilerek katkı sağlanmıştır. Ayrıca, oluşturulan tehlike eğrileri ile yüzeysel temeller için güvenilirliğe dayalı tasarımda kullanılacak geçerliliği doğrulanmış ve yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu sayede, literatürdeki mevcut teorik içerik ile pratik tasarım ilkelerini birleştirebilen geçerli bir yöntem ile geoteknik tasarıma katkı sağlanmıştır.

### **5.1. Tamamlanan, Devam Eden ve Planlanan Çalışmalar**

Tez çalışması kapsamında öngörülen tüm hedefler sağlanmıştır. Bu kapsamın yanı sıra, tezdeki çalışmaları içeren ve İKÜ BAP Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen, BAP2202 kodlu “TEMEL DEFORMASYONLARININ RASTGELE ALAN ZEMİN ÖZELLİKLERİYLE SAYISAL ANALİZİ” başlıklı bir proje tamamlanmıştır. Bu proje kapsamında, tez çalışmasında oluşturulan modellerde kullanılan yazılımdan farklı bir yazılım (Midas GTS NX) ile analizler test edilmiş ve önerilen yöntemin, kullanılan sayısal analiz araçlarından bağımsız ve geniş kapsamlı uygulanabilir olduğu vurgulanmıştır. Projenin özeti EK. E’ de sunulmuştur.

Analiz girdilerinin rastgele alan olarak üretilmesinde kullanılan sistematik yaklaşım ve bu yaklaşım ile önerilen yöntemin, yalnızca tek tip bir probleme yönelik değil farklı temel tipleri ve Geoteknik problemlere uygulanabilir olduğu, tez sürecinde tamamlanmış çalışmalarda gösterilmiştir. Bu çalışmaların biri, 29- 30 Eylül 2022 tarihinde Kayseri Erciyes Üniversitesi’nde düzenlenen Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 18. Ulusal konferansında tam metin bildiri olarak sunulmuştur. Konferansa katılımının [ULEP-2022-60253] kodla İKÜ tarafından desteklendiği bu çalışmada, tez kapsamında kullanılan RFEM modellerinin aynı zamanda şerit temelli

beton bir çerçeve sisteminin zemin- temel- yapı etkileşiminde kullanılabilirliği gösterilmiştir (Mert ve Yazıcı, 2022). Ayrıca aynı çalışma, uzamsal değişkenliğin zeminle birlikte beton gibi farklı malzemelere de uygulanabileceğini vurgulamıştır. Tez sürecinde tamamlanan diğer bir çalışma, RF üretimi için kullanılan yöntemin yalnızca yüzeysel temeller için değil kazıklı temel gibi farklı tip yapılara da uygulanabildiğini kanıtlanmıştır. Matlab ile rastgele alan formunda üretilen CPT sonuçlarından hesaplanan kazık kapasitelerinin, gerçek sonuçlardan hesaplanan değerlerle uyumu gösterilmiştir (Mert ve Yazıcı, 2021). Tamamlanan yayınların özetleri EK. E' de verilmiştir.

Önerilen tehlike eğrileriyle ilgili detaylı yayınlar, kil model ve kum modellerden edinilen bulgulara göre iki ayrı makale olarak ele alınmıştır. Bu çerçevede killi zeminler için önerilen tehlike eğrileri ve kullanımını içeren makale, Teknik Dergi' de "*HAZARD CURVES FOR RELIABILITY ASSESSMENT OF STRIP FOOTINGS ON SPATIALLY VARYING COHESIVE SOILS*" başlığı ile hakem değerlendirmesindedir. Kum modellerin bulgularından oluşturulmuş makale ise "*RELIABILITY ASSESSMENT OF STRIP FOOTINGS ON SPATIALLY VARYING SAND*" başlıklı olarak *Geotechnical and Geological Engineering* dergisinde değerlendirme aşamasındadır. İki makalenin özetleri EK. E' de sunulmuştur.

Çalışma kapsamındaki analizlerin ilerisinde, anizotropi etkisinin  $\theta_h/\theta_v$  oranındaki değerlerin arttırılmasıyla detaylı araştırılması planlanmaktadır. Ayrıca, modellere YASS' nin etkisi katılarak tehlike eğrilerinin su seviyesindeki değişimin etkisiyle incelenmesi ve farklı Geoteknik problemler için tehlike eğrileri önerilmesi üzerine araştırmalar da gelecek çalışma programı arasındadır. Tez kapsamına eklenmemiş bu planlamaların hedef katkı ve çalışmanın amacına olumsuz etkisi olmamış, aksine gelecek incelemelerle ilave katkı sağlanması hedeflenmiştir.

## KAYNAKÇA

- Ahmed, A. ve Soubra, A. H. (2012). Probabilistic analysis of strip footings resting on a spatially random soil using subset simulation approach. *Georisk*, 6(3), 188–201. <https://doi.org/10.1080/17499518.2012.678775>
- Ahmed, A. ve Soubra, A. H. (2014). Probabilistic analysis at the serviceability limit state of two neighboring strip footings resting on a spatially random soil. *Structural Safety*, 49, 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2013.08.001>
- Ahmed, A. ve Soubra, A. H. (2018). Application of the subset simulation approach to spatially varying soils. K. K. Phoon ve J. Ching (Ed.), *Risk and Reliability in Geotechnical Engineering* (1. Baskı, pp. 561–577) içinde. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17970>
- Al-Bittar, T. ve Soubra, A. H. (2014). Probabilistic analysis of strip footings resting on spatially varying soils and subjected to vertical or inclined loads. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001046](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001046)
- Ang, A. H. S. ve Tang, W. H. (1975). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Decision, risk and reliability*. Wiley. <https://books.google.com.tr/books?id=tuRDAQAAIAAJ>
- Arel, E. ve Mert, A. C. (2021). Field simulation of settlement analysis for shallow foundation using cone penetration data. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 66, 103169. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2021.103169>
- Baecher, G. B. ve Chiristian, J. T. (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://www.wiley.com/en-us/Reliability+and+Statistics+in+Geotechnical+Engineering-p-9780471498339>
- Baecher, G. B. ve Ingra, T. S. (1981). Stochastic Fem in Settlement Predictions. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(4), 449–463. <https://doi.org/10.1061/ajgeb6.0001119>
- Bong, T. ve Stuedlein, A. W. (2017). Spatial Variability of CPT Parameters and Silty Fines in Liquefiable Beach Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(12), 04017093.

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001789](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001789)

- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design*. McGraw-Hill.  
<https://books.google.com.tr/books?id=iuBwtgAACAAJ>
- Budhu, M. (2008). *Foundations and earth retaining structures*. Wiley.  
<https://books.google.com.tr/books?id=3fVDAQAIAAJ>
- Budhu, M. (2010). *Soil Mechanics and Foundations (3.Baskı)*. John Wiley & Sons, Incorporated. <https://books.google.com.tr/books?id=ga8bAAAQBAJ>
- Cassidy, M. J., Uzielli, M. ve Tian, Y. (2013). Probabilistic combined loading failure envelopes of a strip footing on spatially variable soil. *Computers and Geotechnics*, 49, 191–205. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.10.008>
- Ching, J. ve Hu, Y. G. (2017). Effective Young's Modulus for a Footing on a Spatially Variable Soil Mass. *Geotechnical Special Publication, GSP 284*, 360–369. <https://doi.org/10.1061/9780784480717.034>
- Coduto, D. P. (2015). *Foundation Design: Principles and Practices*. Pearson Education. <https://books.google.com.tr/books?id=xa6gBwAAQBAJ>
- Constantine, P. G. (2020). *Random Field Simulation* (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27613-random-field-simulation>). MATLAB Central File Exchange.
- Das, B. M. (2010). *Principles of Foundation Engineering*. Cengage Learning. <https://books.google.com.tr/books?id=v3Mq9szzE1YC>
- Der Kiureghian, A. ve Ke, J. Bin. (1988). The stochastic finite element method in structural reliability. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 3(2), 83–91. [https://doi.org/10.1016/0266-8920\(88\)90019-7](https://doi.org/10.1016/0266-8920(88)90019-7)
- EN-1990:2002. (2002a). *Eurocode-Basis of Structural Design*. CEN European Committee for Standardization.
- EN-1990:2002. (2002b). *Eurocode. Basis of Strucrual Design*. CEN European Committee for Standardization.
- EN-1997-1. (2004). *Eurocode 7: Geotechnical design- Part 1: General Rules*. CEN European Committee for Standardization.

- Fenton, G. A. ve Griffiths, D. V. (2002). Probabilistic foundation settlement on spatially random soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(5), 381–390. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:5\(381\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:5(381))
- Fenton, G. A. ve Griffiths, D. V. (2005). Three-dimensional probabilistic foundation settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(2), 232–239. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:2\(232\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(232))
- Fenton, G. A. ve Griffiths, D. V. (2008). *Risk Assessment in Geotechnical Engineering*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470284704>
- Fenton, G. A. ve Vanmarcke, E. H. (1990). Simulation of random fields via local average subdivision. *Journal of Engineering Mechanics*, 116(8), 1733–1749. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1990\)116:8\(1733\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1990)116:8(1733))
- Ghanem, R. G. ve Spanos, P. D. (1991). Spectral stochastic finite-element formulation for reliability analysis. *Journal of Engineering Mechanics*, 117(10), 2351–2372. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1991\)117:10\(2351\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1991)117:10(2351))
- Griffiths, D. V. ve Fenton, G. A. (2001). Bearing capacity of spatially random soil: The undrained clay Prandtl problem revisited. *Geotechnique*, 51(4), 351–359. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.4.351>
- Griffiths, D. V. ve Fenton, G. A. (2007). Review of Probability Theory, Random Variables, and Random Fields. D. V. Griffiths ve G. A. Fenton (Ed), *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering* (1 Baskı, 491, pp. 1–69) içinde. Springer Viyana. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73366-0>
- Griffiths, D. V. ve Fenton, G. A. (2009). Probabilistic settlement analysis by stochastic and random finite-element methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(11), 1629–1637. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000126](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000126)
- Griffiths, D. V., Fenton, G. A. ve Cavers, W. (2007). The Random Finite Element Method (RFEM) in Settlement Analyses. D. V. Griffiths ve G. A. Fenton (Ed), *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering* (1 Baskı, 491, pp. 243–270) içinde. Springer Viyana. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73366-0>

- Hasofer, A. M. ve Lind, N. C. (1974). Exact and Invariant Second-Moment Code Format. *ASCE Journal of Engineering Mechanics Division*, 100(EMI), 111–121. <https://doi.org/10.1061/jmcea3.0001848>
- Huang, S. P., Quek, S. T. ve Phoon, K. K. (2001). Convergence study of the truncated Karhunen-Loeve expansion for simulation of stochastic processes. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 52(9), 1029–1043. <https://doi.org/10.1002/nme.255>
- ISO-2394:2015. (2015). *General Principles on Reliability of Structures*. International Organization for Standardization.
- Jamshidi Chenari, R. ve Alaie, R. (2015). Effects of anisotropy in correlation structure on the stability of an undrained clay slope. *Georisk*, 9(2), 109–123. <https://doi.org/10.1080/17499518.2015.1037844>
- JCSS. (2001). *Probabilistic Model Code Part 1 - Basis of Design*. Joint Committee of Structural Safety.
- Jha, S. K. (2016). Reliability-based analysis of bearing capacity of strip footings considering anisotropic correlation of spatially varying undrained shear strength. *International Journal of Geomechanics*, 16(5), 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000638](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000638)
- Johari, A. ve Sabzi, A. (2017). Reliability analysis of foundation settlement by stochastic response surface and random finite-element method. *Scientia Iranica*, 24(6), 2741–2751. <https://doi.org/10.24200/sci.2017.4169>
- Johari, A., Sabzi, A. ve Gholaminejad, A. (2019). Reliability Analysis of Differential Settlement of Strip Footings by Stochastic Response Surface Method. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 43(1), 37–48. <https://doi.org/10.1007/s40996-018-0114-3>
- Johari, A. ve Talebi, A. (2021). Stochastic Analysis of Piled-Raft Foundations Using the Random Finite-Element Method. *International Journal of Geomechanics*, 21(4), 4021020. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001966](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001966)
- Kenarsari, A. E. ve Jamshidi Chenari, R. (2015). Probabilistic settlement analysis of shallow foundations on heterogeneous soil stratum with anisotropic correlation

- structure. *Geotechnical Special Publication: Vol. GSP 256* (pp. 1905–1914).  
<https://doi.org/10.1061/9780784479087.174>
- Kohnke, P. (2009). *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications*.
- Kulhawy, F. H., Phoon, K. K., Grigoriu, M., Institute, E. P. R. ve Group, C. U. G. E. (1995). *Reliability-based Design of Foundations for Transmission Line Structures*. Prepared for Electric Power Research Institute.  
<https://books.google.com.tr/books?id=dSpUAAAAYAAJ>
- Lawrence, M. A. (1987). Basis random variables in finite element analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 24(10), 1849–1863. <https://doi.org/10.1002/nme.1620241004>
- Li, C. C. ve Der Kiureghian, A. (1993). Optimal discretization of random fields. *Journal of Engineering Mechanics*, 119(6), 1136–1154.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1993\)119:6\(1136\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1993)119:6(1136))
- Liu, P. L. ve Der Kiureghian, A. (1991). Finite element reliability of geometrically nonlinear uncertain structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 117(8), 1806–1825. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1991\)117:8\(1806\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1991)117:8(1806))
- Liu, W. K., Belytschko, T. ve Mani, A. (1986). Random field finite elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 23(10), 1831–1845. <https://doi.org/10.1002/nme.1620231004>
- Lloret-Cabot, M., Fenton, G. A. ve Hicks, M. A. (2014). On the estimation of scale of fluctuation in geostatistics. *Georisk*, 8(2), 129–140.  
<https://doi.org/10.1080/17499518.2013.871189>
- Low, B. K. ve Tang, W. H. (2007). Efficient Spreadsheet Algorithm for First-Order Reliability Method. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(12), 1378–1387.  
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2007\)133:12\(1378\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2007)133:12(1378))
- Low, B. K. ve Phoon, K. K. (2015). Reliability-based design and its complementary role to Eurocode 7 design approach. *Computers and Geotechnics*, 65, 30–44.  
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.11.011>
- Mendoza, C. ve Hurtado, J. E. (2022). The Importance of Geotechnical Random

Variability in the Elastoplastic Stress–Strain Behavior of Shallow Foundations Considering the Geological History. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(7), 3799–3818. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02132-7>

Mert, A. C. ve Yazıcı, G. (2021). Calculation of Pile Capacity in Cohesionless Soil by CPT Considering Spatial Variability. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(4), 1051–1060. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1048348>

Mert, A. C. ve Yazıcı, G. (2022). Zemin ve Beton Değişiminin Etkisiyle Beton Bir Çerçevenin Zemin-Yapı Etkileşimi. *ZMGM18- Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği* 18. *Ulusal Konferansı*, 361–372. <https://doi.org/10.5505/2022zmgm.SS-33>

Mirfendereski, D. (1990). *On series representation of random fields and their application in stochastic finite element analysis.*

Paice, G. M., Griffiths, D. V. ve Fenton, G. A. (1996). Finite element modeling of settlements on spatially random soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(9), 777–779. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1996\)122:9\(777\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1996)122:9(777))

Phoon, K. K., Huang, S. P. ve Quek, S. T. (2002). Implementation of Karhunen-Loeve expansion for simulation using a wavelet-Galerkin scheme. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 17(3), 293–303. [https://doi.org/10.1016/S0266-8920\(02\)00013-9](https://doi.org/10.1016/S0266-8920(02)00013-9)

Phoon, K. K. ve Kulhawy, F. H. (1999a). Evaluation of geotechnical property variability. *Canadian Geotechnical Journal* 36(4), 625–639. <https://doi.org/10.1139/t99-039>

Phoon, K. K. ve Kulhawy, F. H. (1999b). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 612–624. <https://doi.org/10.1139/t99-038>

Popescu, R., Deodatis, G. ve Nobahar, A. (2005). Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 20(4), 324–341. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2005.06.003>

Pouya, K. R., Zhalehjo, N. ve Jamshidi Chenari, R. (2014). Influence of random

heterogeneity of cross-correlated strength parameters on bearing capacity of shallow foundations. *Indian Geotechnical Journal*, 44(4), 427–435. <https://doi.org/10.1007/s40098-013-0096-9>

Robertson, P. K. ve Cabal, K. L. (2015). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*.

Robertson, P. K. ve Campanella, R. G. (1983). Interpretation of cone penetration tests. Part I: sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4), 718–733. <https://doi.org/10.1139/t83-078>

Senneset, K., Sandven, R. ve Janbu, N. (1989). Evaluation of soil parameters from piezocone tests. *Transportation Research Record*, 1235, 24–37.

Simões, J. T., Neves, L. C., Antão, A. N. ve Guerra, N. M. C. (2020). Reliability assessment of shallow foundations on undrained soils considering soil spatial variability. *Computers and Geotechnics*, 119(Aralık 2019), 103369. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103369>

Spanos, P. D. ve Ghanem, R. (1989). Stochastic finite element expansion for random media. *Journal of Engineering Mechanics*, 115(5), 1035–1053. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1989\)115:5\(1035\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:5(1035))

Stuedlein, A. W., Huffman, J. C., Barbosa, A. R. ve Belejo, A. F. V. (2022). Probabilistic Structural System Response to Differential Settlement Resulting from Spatially Variable Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(2), 4021184. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002735](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002735)

Stuedlein, A. W., Kramer, S. L., Arduino, P. ve Holtz, R. D. (2012a). Geotechnical Characterization and Random Field Modeling of Desiccated Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(11), 1301–1313. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000723](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000723)

Stuedlein, A. W., Kramer, S. L., Arduino, P. ve Holtz, R. D. (2012b). Reliability of Spread Footing Performance in Desiccated Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(11), 1314–1325. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000706](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000706)

- Suchomel, R. ve Mašín, D. (2011). Probabilistic analyses of a strip footing on horizontally stratified sandy deposit using advanced constitutive model. *Computers and Geotechnics*, 38(3), 363–374. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.12.007>
- Sudret, B. ve Der Kiureghian, A. (2000). *Stochastic Finite Element Methods and Reliability: A State-of-the-Art Report* (Kasım Sayısı). <https://www1.ethz.ch/ibk/su/publications/Reports/SFE-report-Sudret.pdf>
- Sudret, B. ve Der Kiureghian, A. (2002). Comparison of finite element reliability methods. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 17(4), 337–348. [https://doi.org/10.1016/S0266-8920\(02\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0266-8920(02)00031-0)
- Vanmarcke, E. H. (1977). Probabilistic Modeling of Soil Profiles. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, 103(11), 1227–1246. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)90012-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)90012-8)
- Vanmarcke, E. H. (2010). *Random Fields: Analysis and Synthesis*. World Scientific. <https://doi.org/https://doi.org/10.1142/5807>
- Winkelmann, K., Żyliński, K., Korzec, A. ve Górski, J. (2022). Effectiveness of Random Field Approach in Serviceability Limit State Analysis of Strip Foundation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(9), 4705–4720. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02179-6>
- Wu, Y., Zhou, X., Gao, Y. ve Shu, S. (2020). Bearing capacity of embedded shallow foundations in spatially random soils with linearly increasing mean undrained shear strength. *Computers and Geotechnics*, 122, 103508. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103508>
- Yue, Q. ve Yao, J. (2020). Soil deposit stochastic settlement simulation using an improved autocorrelation model. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 59(Ocak), 103038. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2020.103038>

## **EKLER**



## **EK. A. Rastgele Alan Üretiminde Kullanılan MATLAB Kod Satırları**



#### KiL1 ( $\theta_h=1m$ & $\theta_v=0.5m$ )

```
>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[1 0.5];
>>corr.sigma=1;
>>x=linspace(0.5,39.5,40);
>>y=linspace(0.25,19.75,40);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

#### KiL2 ( $\theta_h=2m$ & $\theta_v=1m$ )

```
>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[2 1];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(1,39,20);
>> y=linspace(0.5,19.5,20);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

#### KiL3 ( $\theta_h=4m$ & $\theta_v=2m$ )

```
>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[4 2];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(2,38,10);
>> y=linspace(1,19,10);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

#### KiL4 ( $\theta_h=10m$ & $\theta_v=5m$ )

```
>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[10 5];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(5,35,4);
>> y=linspace(2.5,17.5,4);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

#### KiL5 ( $\theta_h=20m$ & $\theta_v=10m$ )

```
>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[20 10];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(10,30,2);
>> y=linspace(5,15,2);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

#### KiL6 ( $\theta_h=40m$ & $\theta_v=20m$ )

```
>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[40 20];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(20,20,1);
>> y=linspace(10,10,1);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

#### KiL7 ( $\theta_h=1m$ & $\theta_v=0.1m$ )

```
>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[1 0.1];
```

```

>>corr.sigma=1;
>>x=linspace(0.5,39.5,40);
>> y=linspace(0.05,19.95,200);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);

```

#### KIL8 ( $\theta_h=2m$ & $\theta_v=0.2m$ )

```

>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[2 0.2];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(1,39,20);
>> y=linspace(0.1,19.9,100);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);

```

#### KIL9 ( $\theta_h=4m$ & $\theta_v=0.4m$ )

```

>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[4 0.4];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(2,38,10);
>> y=linspace(0.2,19.8,50);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);

```

#### KIL10 ( $\theta_h=10m$ & $\theta_v=1m$ )

```

>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[10 1];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(5,35,4);
>> y=linspace(0.5,19.5,20);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);

```

#### KIL11 ( $\theta_h=20m$ & $\theta_v=2m$ )

```

>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[20 2];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(10,30,2);
>> y=linspace(1,19,10);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);

```

#### KIL12 ( $\theta_h=40m$ & $\theta_v=4m$ )

```

>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[40 4];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(20,20,1);
>> y=linspace(2,18,5);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);

```

#### KUM1 ( $\theta_h=1m$ & $\theta_v=0.5m$ )

```

>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[1 0.5];
>>corr.sigma=1;
>>x=linspace(0.5,39.5,40);
>>y=linspace(0.25,4.75,10);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);

```

```
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

#### KUM2 ( $\theta_h=2m$ & $\theta_v=1m$ )

```
>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[2 1];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(1,39,20);
>> y=linspace(0.5,4.5,5);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

#### KUM3 ( $\theta_h=5m$ & $\theta_v=2.5m$ )

```
>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[5 2.5];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(2.5,37.5,8);
>> y=linspace(1.25,3.75,2);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

#### KUM4 ( $\theta_h=10m$ & $\theta_v=5m$ )

```
>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[10 5];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(5,35,4);
>> y=linspace(2.5,2.5,1);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

#### KUM5 ( $\theta_h=1m$ & $\theta_v=0.125m$ )

```
>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[1 0.125];
>>corr.sigma=1;
>>x=linspace(0.5,39.5,40);
>>y=linspace(0.0625,4.9375,40);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

#### KUM6 ( $\theta_h=2m$ & $\theta_v=0.25m$ )

```
>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[2 0.25];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(1,39,20);
>> y=linspace(0.125,4.875,20);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

#### KUM7 ( $\theta_h=5m$ & $\theta_v=0.625m$ )

```
>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[5 0.625];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(2.5,37.5,8);
>> y=linspace(0.3125,4.6875,8);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

### KUM8 ( $\theta_h=10\text{m}$ & $\theta_v=1.25\text{m}$ )

```
>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[10 1.25];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(5,35,4);
>> y=linspace(0.625,4.375,4);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

### KUM9 ( $\theta_h=20\text{m}$ & $\theta_v=2.5\text{m}$ )

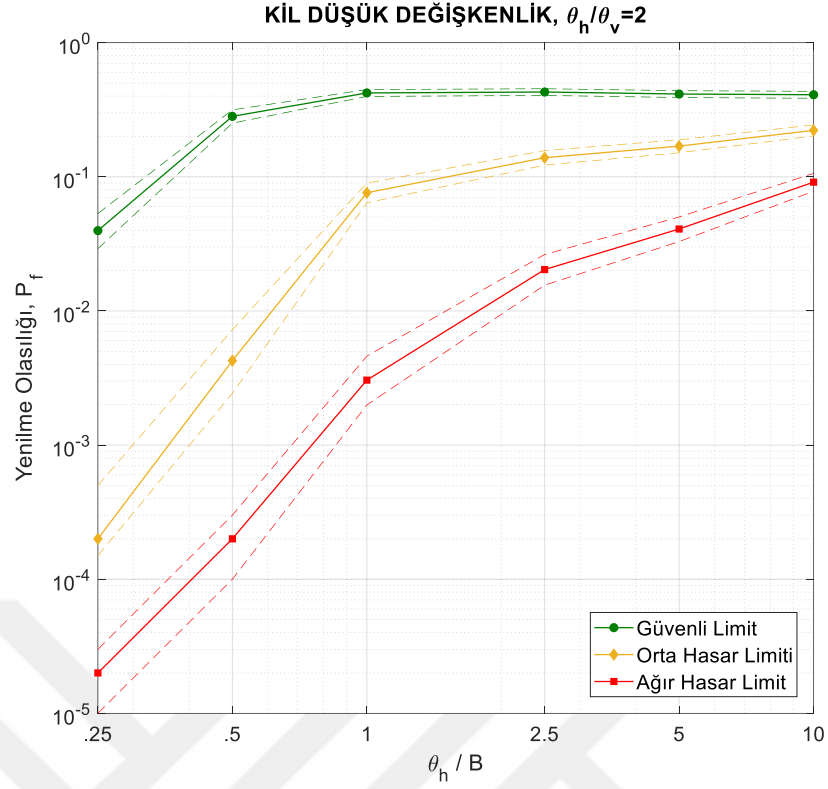
```
>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[20 2.5];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(10,30,2);
>> y=linspace(1.25,3.75,2);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

### KUM10 ( $\theta_h=40\text{m}$ & $\theta_v=5\text{m}$ )

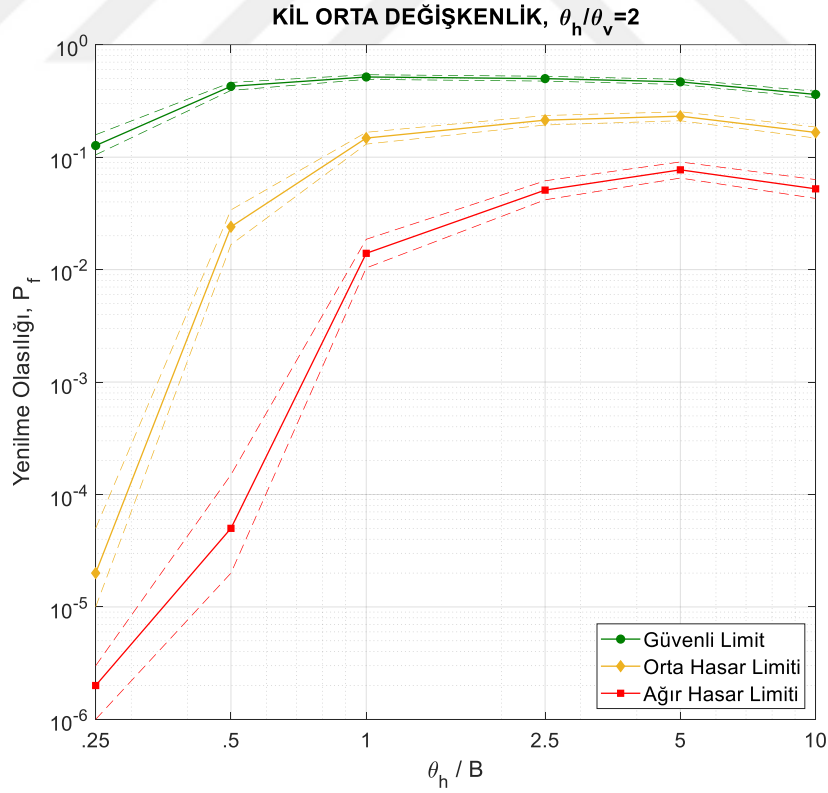
```
>>corr.name= 'exp';
>>corr.c0=[40 5];
>>corr.sigma=1;
>> x=linspace(20,20,1);
>> y=linspace(2.5,2.5,1);
>>[X,Y]=meshgrid(x,y);
>>mesh=[X(:) Y(:)];
>>[F,KL]=randomfield(corr,mesh,'nsamples',1000);
```

## **EK. B. Toplam Oturma Tehlike Eğrileri**

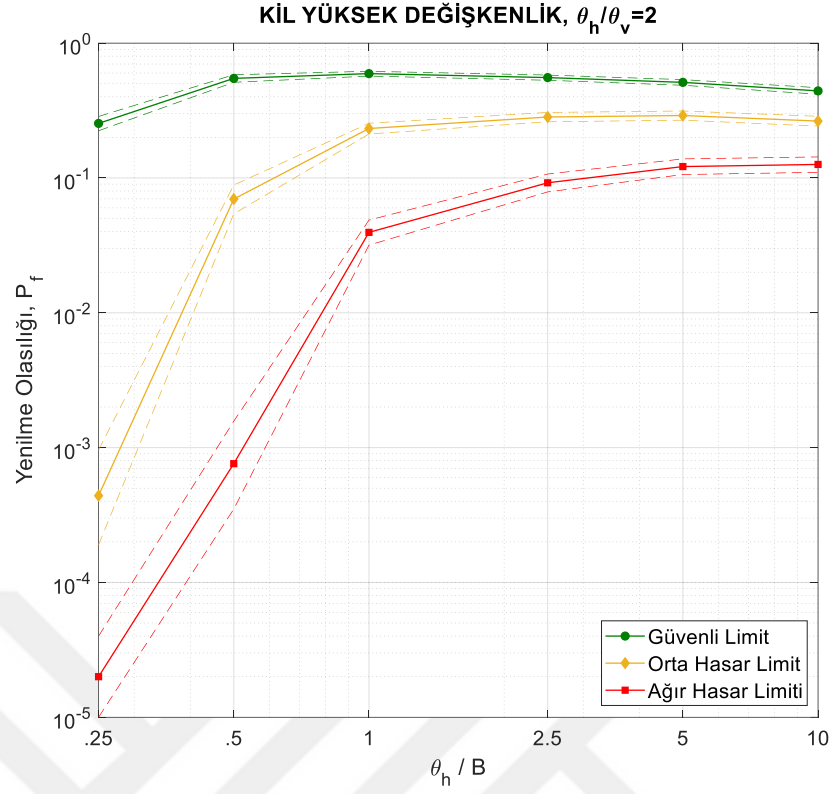




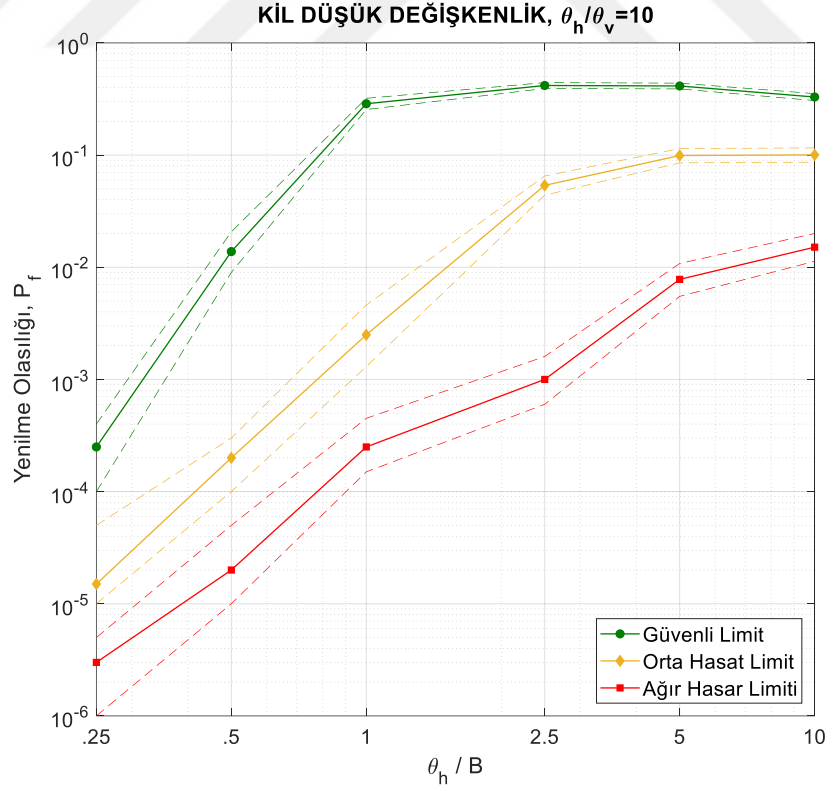
Şekil B.1.  $\theta_h/\theta_v=2$  oranı için kil düşük değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri



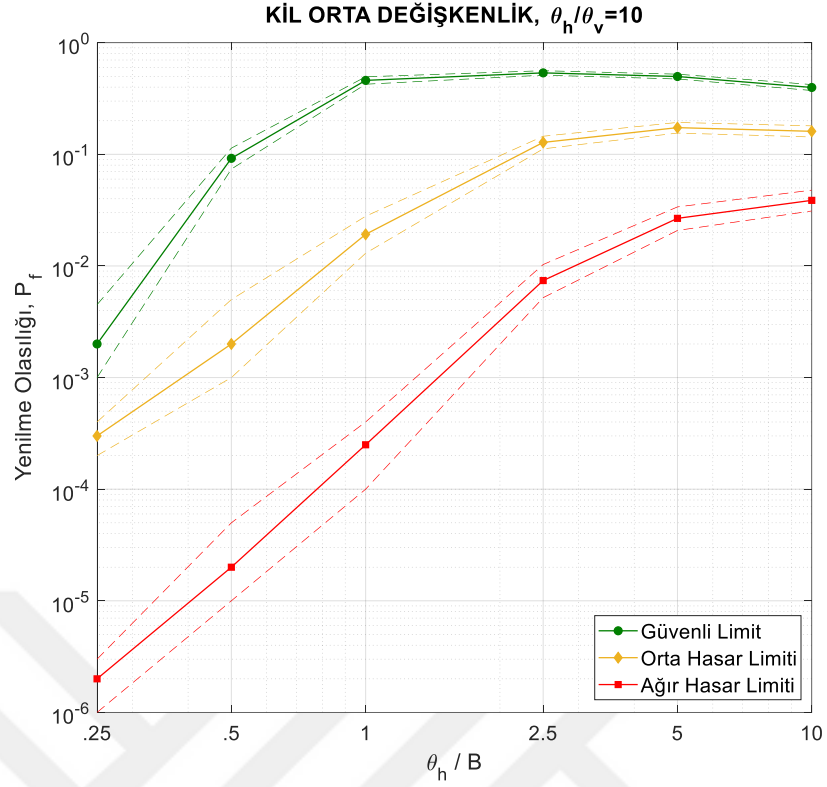
Şekil B.2.  $\theta_h/\theta_v=2$  oranı için kil orta değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri



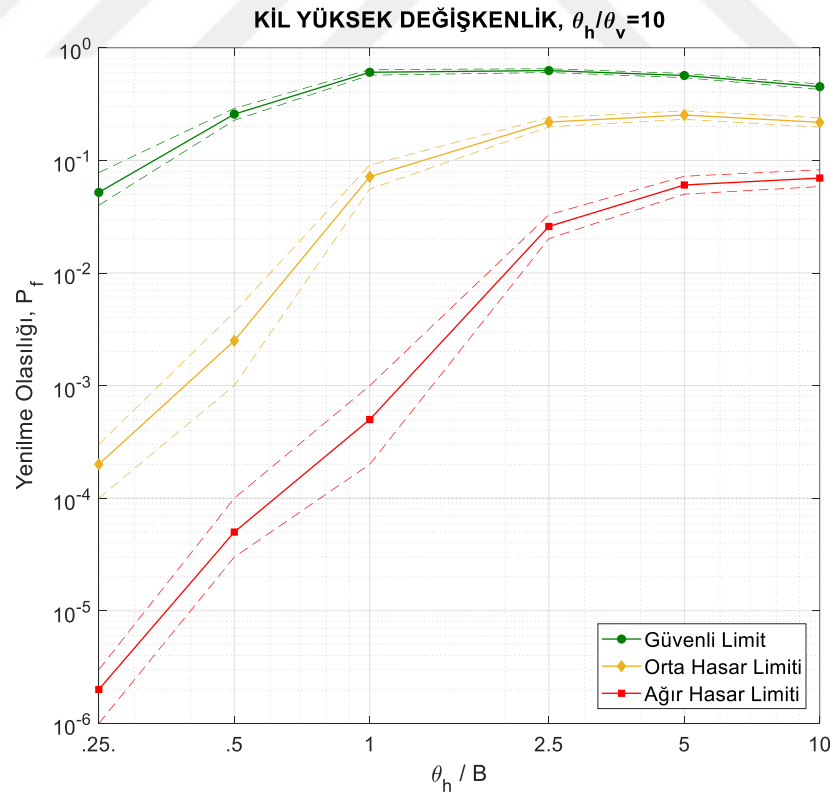
Şekil B.3.  $\theta_h/\theta_v=2$  oranı için kil yüksek değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri



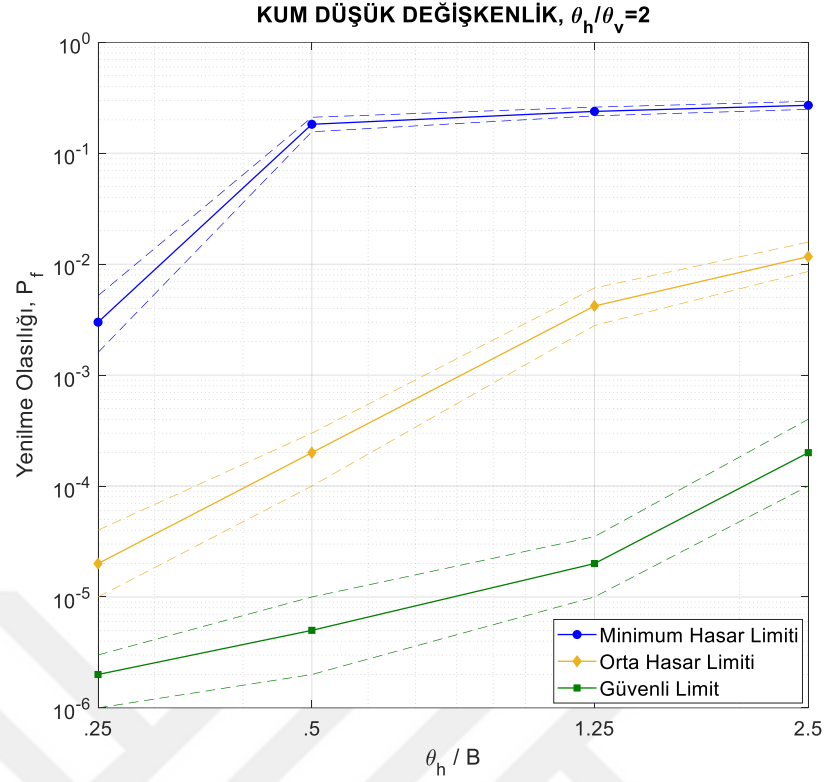
Şekil B.4.  $\theta_h/\theta_v=10$  oranı için kil düşük değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri



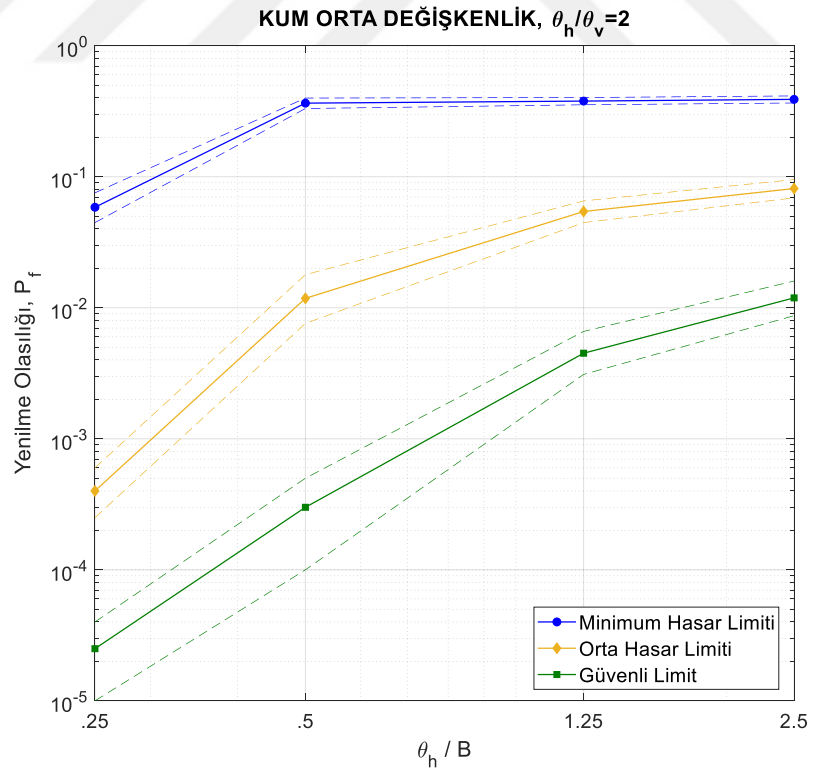
Şekil B.5.  $\theta_h/\theta_v=10$  oranı için kil orta değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri



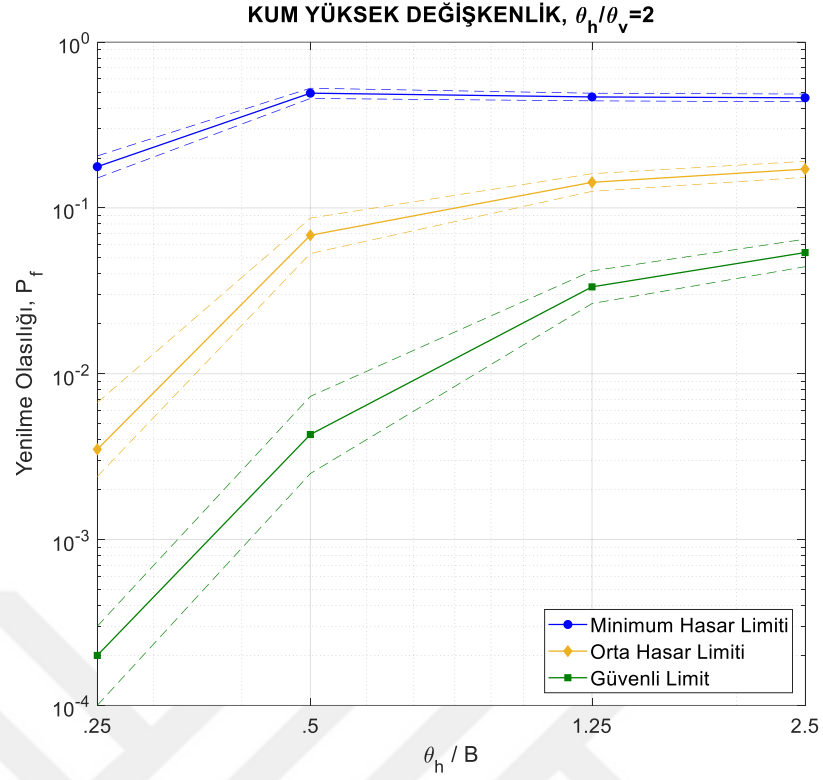
Şekil B.6.  $\theta_h/\theta_v=10$  oranı için kil yüksek değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri



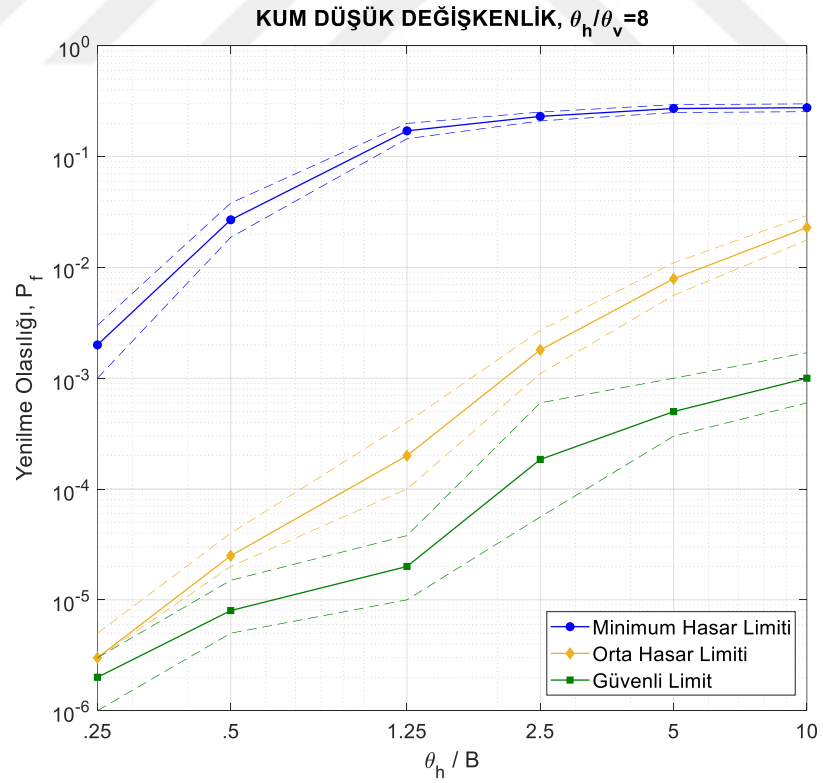
Şekil B.7.  $\theta_h/\theta_v=2$  oranı için kum düşük değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri



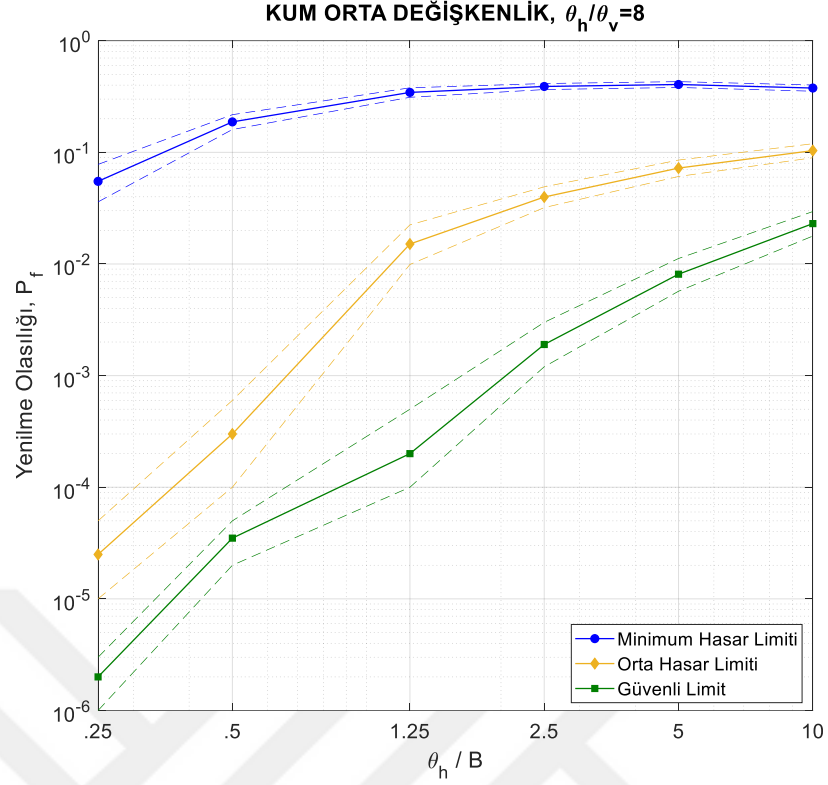
Şekil B.8.  $\theta_h/\theta_v=2$  oranı için kum orta değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri



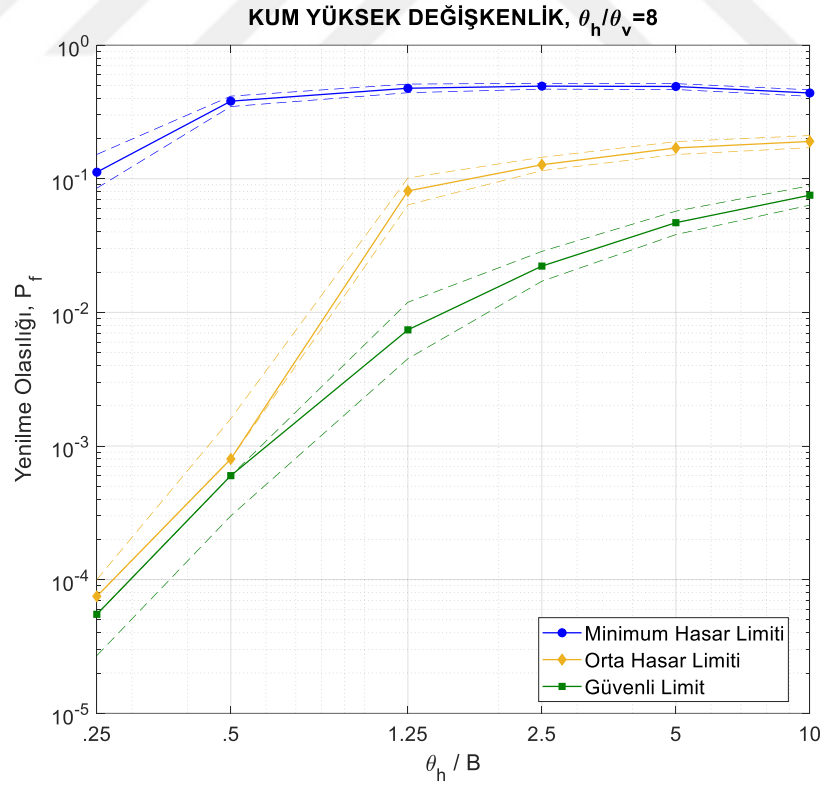
Şekil B.9.  $\theta_h/\theta_v=2$  oranı için kum yüksek değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri



Şekil B.10.  $\theta_h/\theta_v=8$  oranı için kum düşük değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri



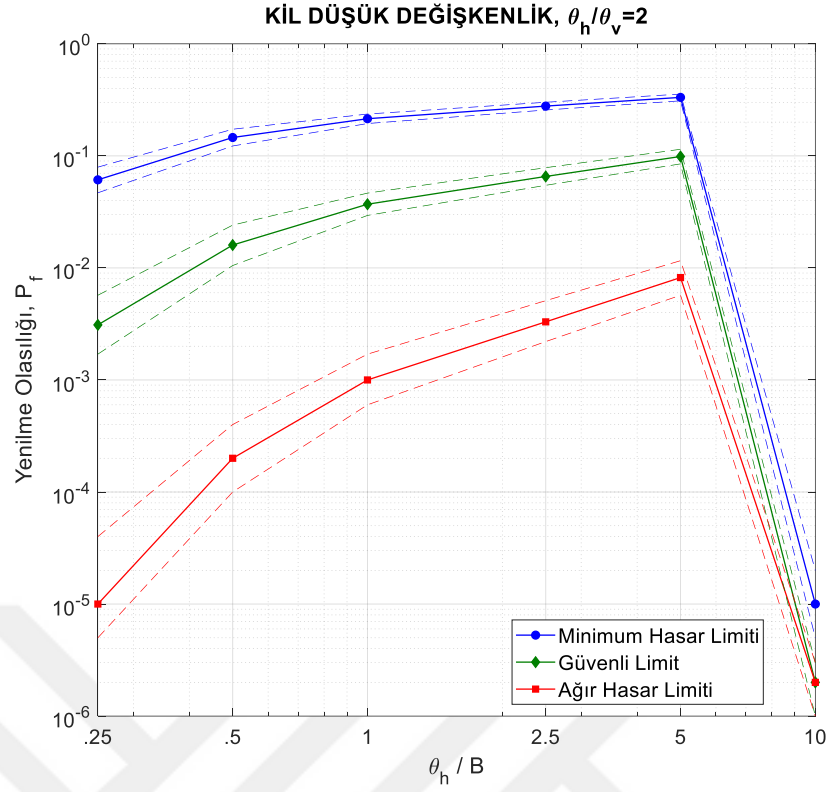
Şekil B.11.  $\theta_h/\theta_v=8$  oranı için kum orta değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri



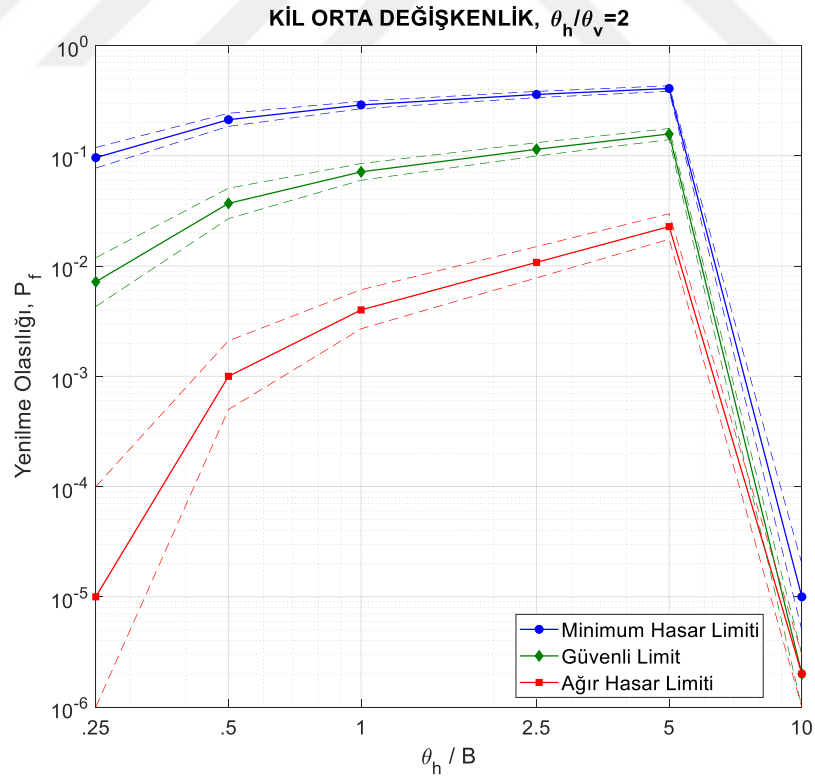
Şekil B.12.  $\theta_h/\theta_v=8$  oranı için kum yüksek değişkenlik toplam oturma tehlike eğrileri

## **EK. C. Açısal Dönme Tehlike Eğrileri**

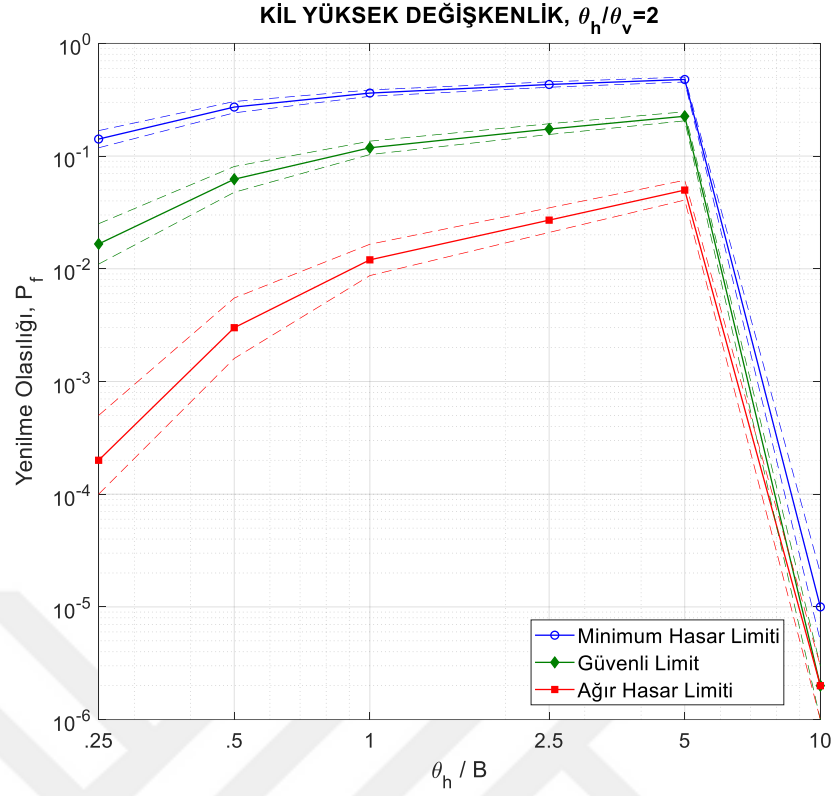




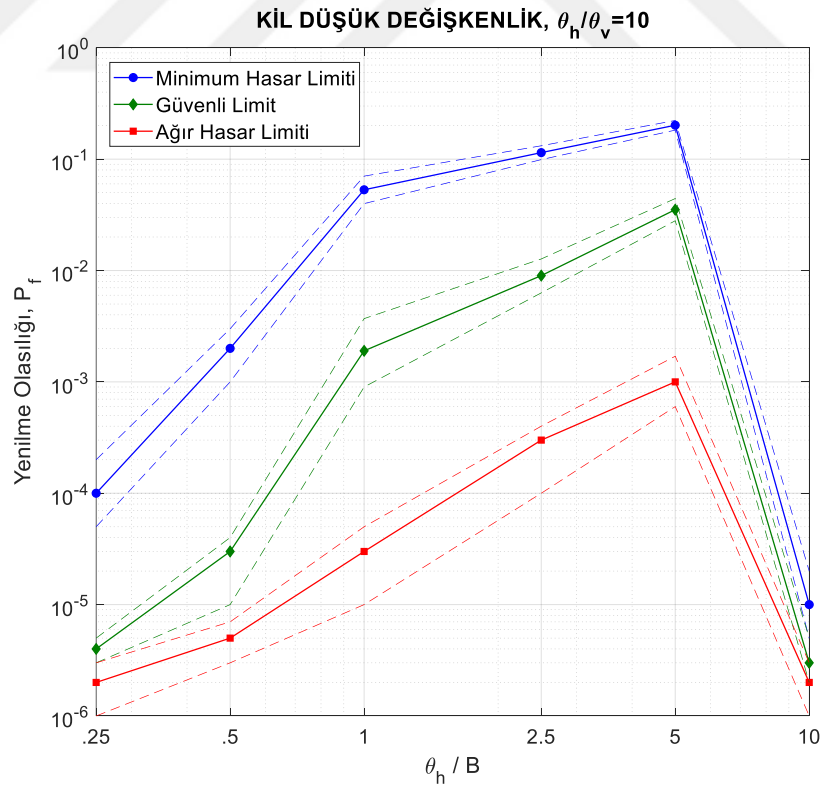
Şekil C.1.  $\theta_h/\theta_v=2$  oranı için kil düşük değişkenlik açısıl dönme tehlike eğrileri



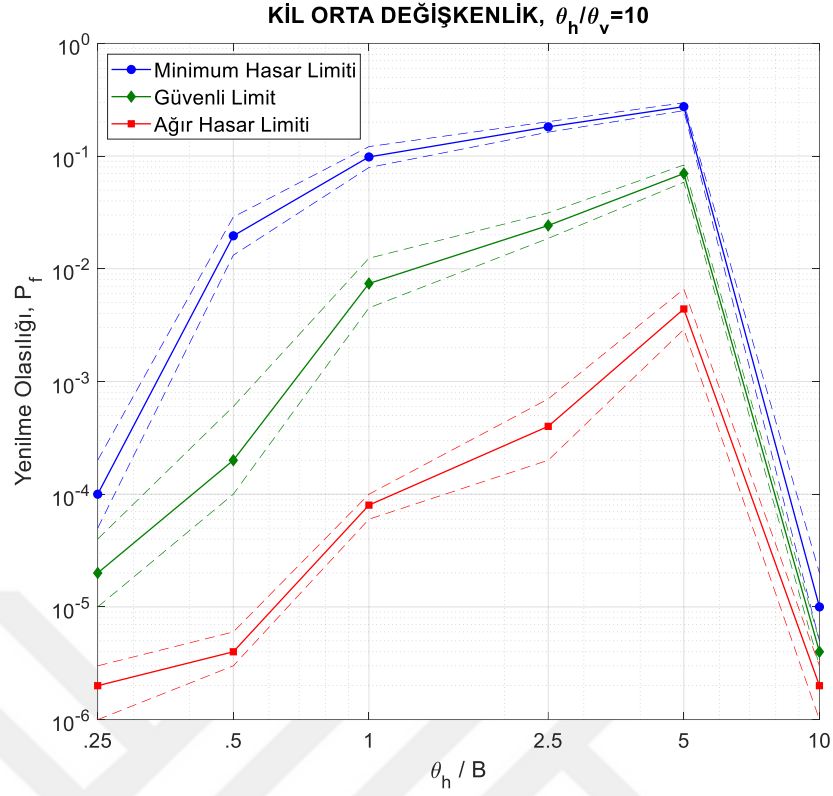
Şekil C.2.  $\theta_h/\theta_v=2$  oranı için kil orta değişkenlik açısıl dönme tehlike eğrileri



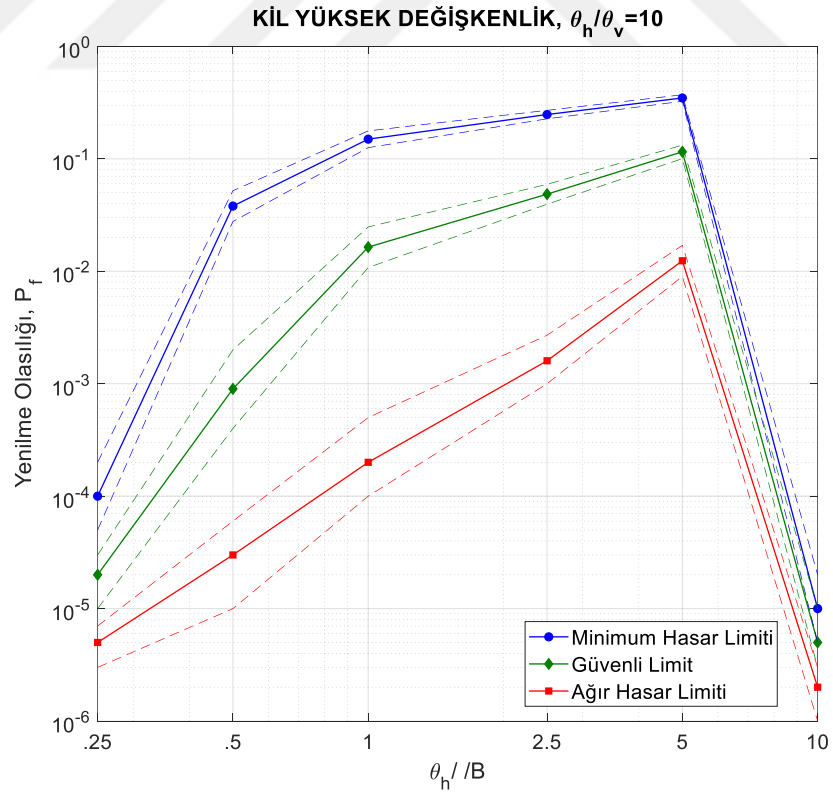
Şekil C.3.  $\theta_h/\theta_v=2$  oranı için kil yüksek değişkenlik açısal dönme tehlike eğrileri



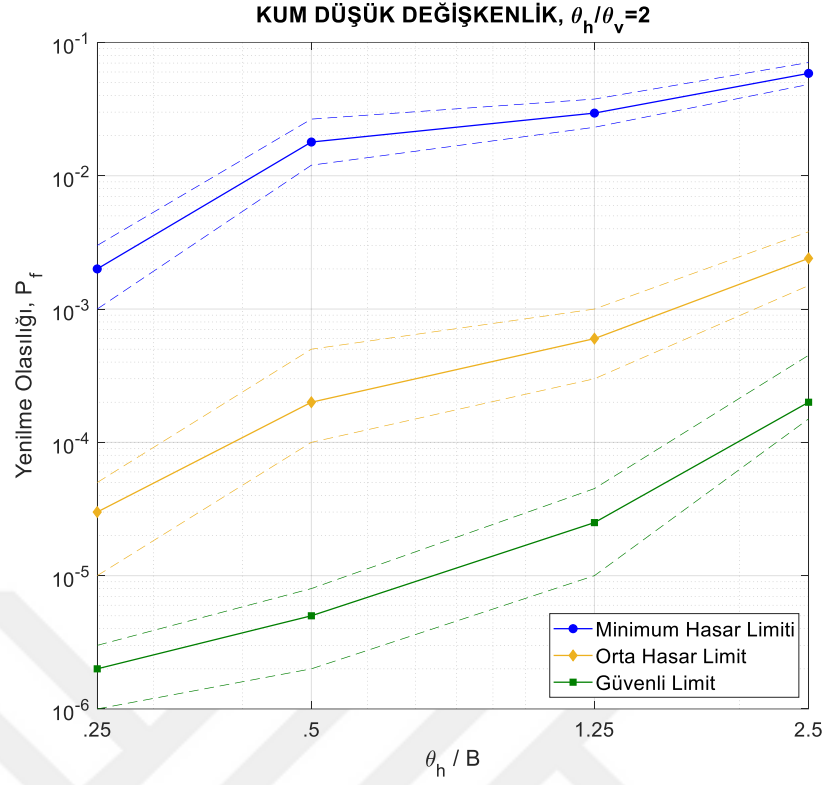
Şekil C.4.  $\theta_h/\theta_v=10$  oranı için kil düşük değişkenlik açısal dönme tehlike eğrileri



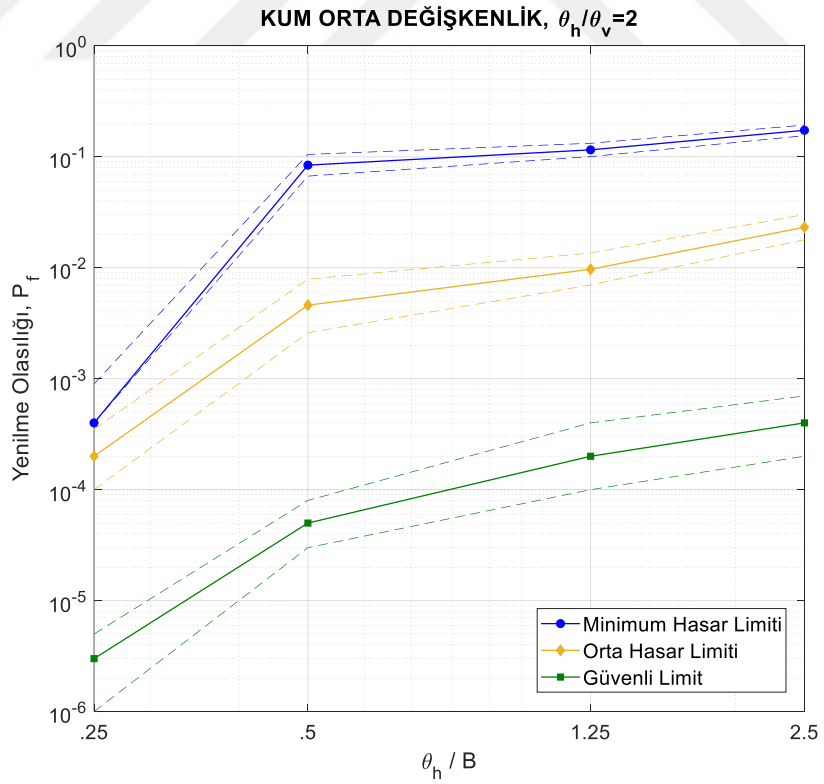
Şekil C.5.  $\theta_h/\theta_v=10$  oranı için kil orta değişkenlik açısal dönme tehlike eğrileri



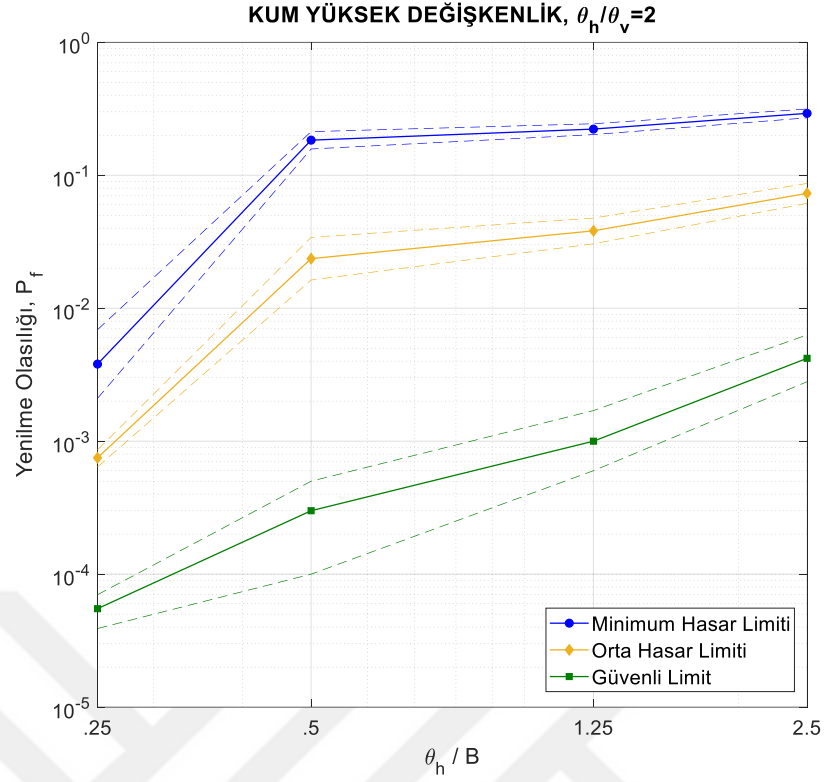
Şekil C.6.  $\theta_h/\theta_v=10$  oranı için kil yüksek değişkenlik açısal dönme tehlike eğrileri



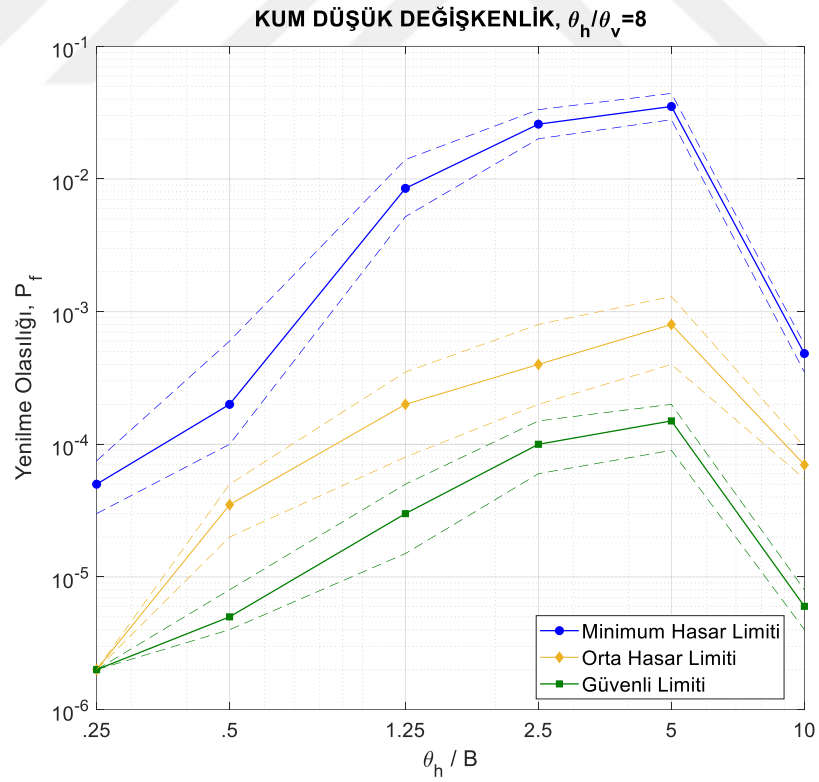
Şekil C.7.  $\theta_h/\theta_v=2$  oranı için kum düşük değişkenlik açısız dönme tehlike eğrileri



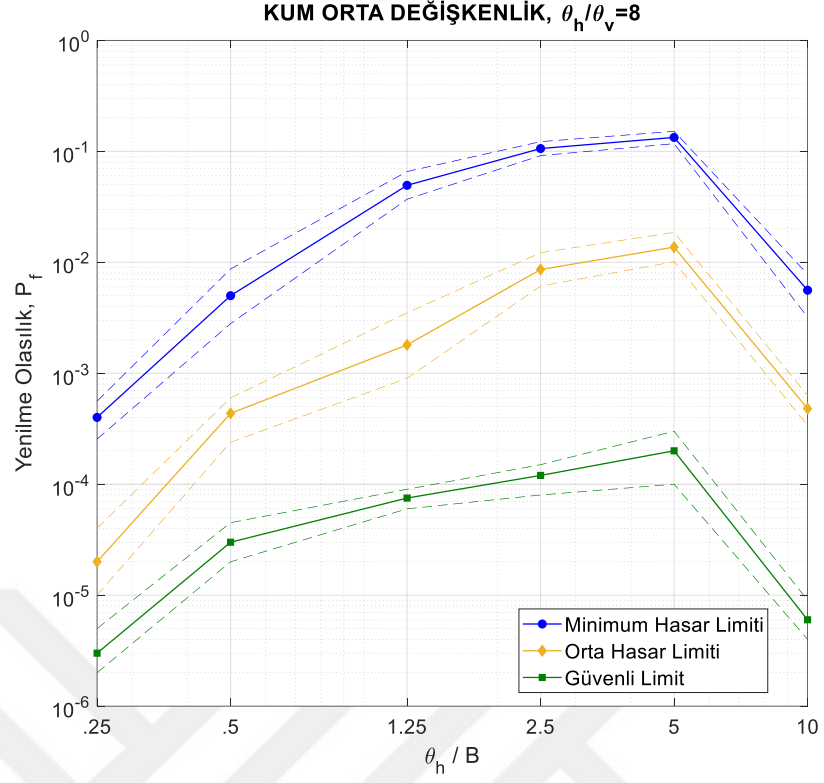
Şekil C.8.  $\theta_h/\theta_v=2$  oranı için kum orta değişkenlik açısız dönme tehlike eğrileri



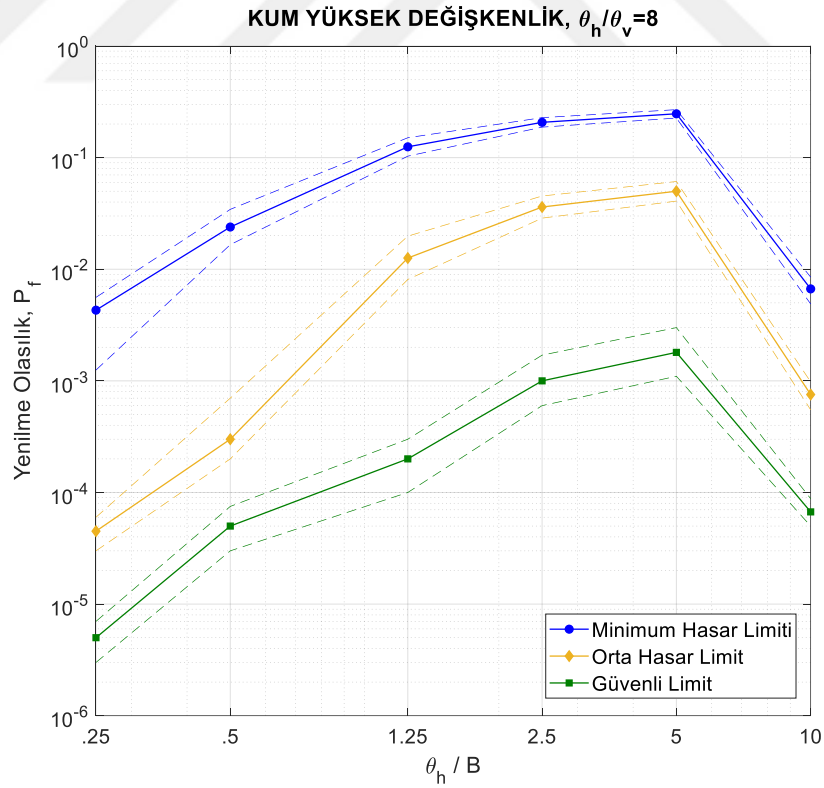
Şekil C.9.  $\theta_h/\theta_v=2$  oranı için kum yüksek değişkenlik açisal dönme tehlike eğrileri



Şekil C.10.  $\theta_h/\theta_v=8$  oranı için kum düşük değişkenlik açisal dönme tehlike eğrileri



Şekil C.11.  $\theta_h/\theta_v=8$  oranı için kum orta değişkenlik açısal dönme tehlike eğrileri



Şekil C.12.  $\theta_h/\theta_v=8$  oranı için kum yüksek değişkenlik açısal dönme tehlike eğrileri

## **EK. D. Birinci Dereceden Güvenilirlik Yöntemi (FORM) Çözümü**



Çalışmada kullanılan birinci dereceden güvenilirlik yöntemi (FORM- *first-order reliability method*) Low ve Tang tarafından 2007 yılında yayınlanmış hesap tablosu metodu ile uygulanmıştır (B. K. Low & Tang, 2007). Eurocode 7’ de kabul görmüş bu yöntemde  $\beta$  güvenilirlik indisine göre hesaplama yapılmaktadır. Limit durumdaki tanım kümesinin ( $\Omega$ ) içinde kalan tüm değişken parametrelere ( $\mathbf{x}$ ) göre minimum  $\beta$ ’ ya karşılık gelen sonuçlar belirlenir (Denklem D.1).

$$\beta = \min_{\mathbf{x} \in \Omega} \sqrt{\mathbf{n}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{n}} \quad (D.1)$$

Burada  $\mathbf{n}$ ,  $\mathbf{x}$  lognormal rastgele değişkenin eşdeğer normal dağılım ortalama ve standart sapmasıyla hesaplanan  $(x_i - \mu_i^{LN})/\sigma_i^{LN}$  boyutsuz vektörünü,  $\mathbf{R}$  ise parametrelerin birbiriyle ilişkisini gösteren korelasyon matrisini ifade etmektedir. Çalışmadaki problemde, Tablo 3.5’ te verilen hasar sınırları için yönetmeliklerde SLS için verilen sınır güvenilirlik indisine karşılık gelen zemin özellikleriyle gerekli B temel boyutu hesaplanmıştır. Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’ te verilen zemin özelliklerinin ortalama ve standart sapmaları kullanılmış ve Denklem D.1’ deki  $\mathbf{n}$  vektörü bu değerlere göre 1000 kez değiştirilerek hedef  $\beta$  değerine ulaşan iterasyondaki zemin parametreleri için gerekli temel boyutu belirlenmiştir. Önerilen kil tehlike eğrileri için çözülen örnekteki FORM hesap tabloları Şekil D.1’ de sunulmuştur. Burada  $\mathbf{n}$  vektörü 1000 iterasyonla tekrarlı değiştirilerek hedef  $\beta$  değerine ( $\sim 1.70$ ) ulaşılmış ve temel boyutu hesaplanmıştır. Verilen hesap tablosunda yalnızca temsili bir kısım iterasyonlar gösterilmiştir. Ayrıca, kum modellerde uygulanan örnek problem çözümü için de benzer hesap tablolarıyla ilgili kum zemin parametreleri kullanılarak hesaplama yapılmıştır.

R Matrisi	
1	0
0	1

n vektörü		$\beta$		c	$\phi$
-0.9046	0.049001	0.905922		3.190808	20.147
-1.52513	-0.46083	1.593233		1.949736	18.61751
1.536921	-0.75632	1.712935	✓	8.073841	17.73104
-0.99727	-1.19369	1.555458		3.005465	16.41892
0.3386	0.444233	0.558563		5.677199	21.3327

Taşıma Gücü Faktörleri (Bowles, 1997) $N_c = (N_q - 1) \cot(\phi)$ ; $N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)$ $N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi$	$N_q$	5.257637859	
	$N_c$	13.10366195	
	$N_\gamma$	2.7667808	
Hedef $\beta$ değerine karşılık gelen kayma direnci parametreleri	$\phi$	18	
	c	8	
SLS Taşıma Gücü (Bowles, 1997) $q_u = cN_c s_c d_c i_c + p_o N_q s_q d_q i_q + \frac{B'}{2} \gamma N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma$	24.90103	343.9855	-1437.5
Denklemin diskriminantı	$\Delta$	261506.9	
Denklemin kökü (B-Temel Boyutu)	B	3.361146	

Şekil D.1. Kıl modeller için FORM çözümü kısmi hesap tablosu

## **EK. E. Tamamlanmış ve Devam Eden Çalışma Özetleri**



TEMEL DEFORMASYONLARININ RASTGELE ALAN ZEMİN  
ÖZELLİKLERİYLE SAYISAL ANALİZİ

Gökhan YAZICI (Yürütücü), Ahmet Can MERT (Araştırmacı)

ÖZET

Çalışmada, elasto-plastik zeminin rastgele alan olarak tanımlanan deformasyon modülü ( $E_d$ ) ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, düşey çizgisel yük etkisindeki şerit temelin oturma ve dönmesinin incelenmesi amaçlanmıştır. Zemin deformasyon modülü  $E_d$ , Karhunen-Loève seri açılımı kullanılarak Gauss rastgele alanı olarak tanımlanmıştır. Zeminin yatay ve düşeydeki uzamsal değişkenliğinin rastgele alandaki temsili parametresi olan korelasyon uzunluklarındaki (*correlation length*,  $\theta_v$ ,  $\theta_h$ ) değişimin, temel deformasyonlarına etkileri incelenmiştir. Başlıca parametrelerle ( $E_d$ ,  $\theta_v$  ve  $\theta_h$ ) birlikte zemin kayma direnci parametrelerinin ( $c$  ve  $\phi$ ) rastgele alan olarak tanımlanmış, böylece tüm parametrelerin temel deformasyon davranışına etkisinin incelenmiştir. MATLAB yazılımı kullanılarak oluşturulan Monte Carlo Simulasyonları ile rastgele alan gerçekleşimi (*realization*), tekrarlı olarak sonlu elemanlar analizi ile çözülmüş ve en büyük toplam oturma ve temelin dönme değerleri için olasılık yoğunluk fonksiyonları (*PDF-Probability Density Function*) oluşturulmuştur. Toplam oturma ve dönme için edinilen PDF' ler kullanılarak limit değerler için yenilme olasılıkları ( $P_f$ ) hesaplanmıştır. Gerçek zemin özelliklerini içeren bir veri tabanı kullanılarak, önerilen yöntemle bağımsız bir model oluşturulmuş ve edinilen sonuçların çalışmadaki bulgularla karşılaştırılması yapılmıştır. Veri tabanı ile doğrulama kısmı, sonlu elemanlar analizi ile çözüm yapan bir genel amaçlı bir geoteknik problemlere özel olmak üzere iki farklı yazılımla gerçekleştirilerek yöntemin geniş kapsamlı uygulanabilirliği gösterilmiştir. Son aşamada, tüm parametrelerin değişiminin etkileri göz önüne alınarak, temel deformasyonları için tehlike eğrileri (*hazard curve*) oluşturulmuştur. Tehlike eğrileri, veri tabanı sonuçlarıyla test edilmiş, bu sayede zemin değişkenliği bilinen bir bölgede, temel oturma veya temelin açıl dönmesine yönelik güvenilirliğe dayalı tasarımda kullanılmak üzere bir yöntem geliştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Rastgele Alanlı Sonlu Elemanlar Yöntemi, Yenilme Olasılığı, Temel deformasyonları, Tehlike Eğrileri, Güvenilirliğe Dayalı Temel Tasarımı

**Bildiri No: 33 (DOI:10.5505/2022zmgm.SS-33)**

**Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 18. Ulusal Konferansı**

**29-30 Eylül 2022 Erciyes Üniversitesi, Kayseri**

**ZEMİN VE YAPISAL DEĞİŞKENLİĞİN ETKİSİYLE BETON BİR  
ÇERÇEVENİN ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ**

**Ahmet Can MERT, Gökhan YAZICI**

**ÖZET**

Çalışmada zemin ve beton özelliklerindeki değişkenliğin, çerçeve tipi bir sistemin zemin-yapı etkileşimine (SSI- *Soil-Structure Interaction*) etkisi değerlendirilmiştir. Rastgele alan sonlu elemanlar yöntemi (RFEM-*Random Field Finite Element Method*) kullanılarak zemin deformasyon modülü ( $E_s$ ) ve beton elastisite modülü ( $E_c$ ) uzamsal değişkenlikle (*spatial variability*) tanımlanmıştır. Modüllerdeki değişimin etkisi değerlendirilmiş ve sonuçlar deterministik analizle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacı olan zemin ve yapısal değişkenliğin SSI analizlerinde kullanımının vurgulanması çerçevesinde edinilen sonuçlar, yalnızca zemin değişkenliğinin göz önüne alınması durumu ile karşılaştırılarak sunulmuştur. Kıyaslamalar sonucunda çerçevenin girişinde meydana gelen en büyük bileşik normal gerilme, girişteki çökme ve temeldeki oturma değerleri deterministik sonuçlardan belirgin şekilde sapmaktadır. Ayrıca, yalnızca zemin değişkenliğinin göz önüne alınması da zemin ve beton değişkenliğinin aynı anda hesaba katılması durumuna göre sonuçlarda farklılık göstermiştir. Mevcut çalışmadaki bulgular, yapı-zemin etkileşimlerinde tüm değişkenliklerin göz önüne alınarak RFEM ile etkili çözüm gerçekleştirileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Beton değişkenliği, rastgele alan teorisi, sonlu elemanlar yöntemi, zemin değişkenliği, zemin-yapı etkileşimi

**CALCULATION OF PILE CAPACITY IN COHESIONLESS SOIL  
BY CPT CONSIDERING SPATIAL VARIABILITY**

**Ahmet Can MERT, Gökhan YAZICI**

**ABSTRACT**

The study aims to construct a framework for CPT based ultimate pile capacity calculation for cohesionless soils with random field theory. Cone tip resistance ( $q_c$ ) was taken as the spatially varying parameter with a constant mean and changing coefficients of variation. CPT profiles were simulated with random field generations, and the ultimate capacity of a single pile ( $Q_u$ ) was calculated with these simulations. The influence of spatial variation of  $q_c$  on the variation of  $Q_u$  was investigated. The proposed framework was finally verified by comparing the results of an actual CPT database and the simulated CPT profiles in the study. The results showed that the critical vertical scale of fluctuation for CPT-based pile capacity calculations was equal to one diameter of pile ( $\delta_v=1D$ ), and that the method effectively predicted the ultimate pile capacity through simulated CPT profiles with random field. The proposed method is especially recommended for cases where the uncertainty consideration is necessary, yet the site-specific data is limited. The study aims to contribute a simple framework to the methods of CPT-based pile capacity with uncertainty consideration. The proposed method aims to facilitate the pile design framework with limited available data.

**Keywords:** Cone penetration test, Ultimate pile capacity, Random fields, Spatial variability, Cohesionless soil

**HAZARD CURVES FOR RELIABILITY ASSESSMENT OF STRIP  
FOOTINGS ON SPATIALLY VARYING COHESIVE SOILS**

**Ahmet Can MERT, Gökhan YAZICI, Hadi KHANBABA ZADEH**

**ABSTRACT**

The present study aimed to create a series of hazard curves against maximum total settlement and angular rotation of strip footings for probabilistic shallow foundation design on clays. Random field finite element method (RFEM) was adopted with elasto-plastic clay-like soil behavior, deformation modulus ( $E_d$ ) and shear strength parameters ( $c$  and  $\phi$ ) were employed as random field inputs. Parameters were defined and assigned to the analysis models with varying correlation lengths ( $\theta_h, \theta_v$ ). Models have been iteratively solved one thousand times, and output distributions of maximum settlement and angular rotations were recorded. Probability density functions (PDF) were fitted to the outputs, and probability of failure ( $P_f$ ) for footing deformation limits was subsequently estimated. Proposed hazard curves for two anisotropy and three variability categories were developed employing the estimated  $P_f$ s. The method proposed has been validated using an independent database of in-situ results, and a worked example was provided to illustrate the implementation of the process. The key contribution of the research is to form hazard curves for shallow foundations considering elasto-plastic soil behavior with the impact of all influencing parameters, respecting the limit values for foundation deformation in the design codes. The proposed technique offers a probabilistic evaluation of strip footings with spatial variation of clayey soils and a valid method for the reliability-based design of foundations in the serviceability limit state.

**Keywords:** Random Field Finite Element Method, Strip Footings, Soil-Foundation-Structure Interaction, Reliability-Based Design, Serviceability Limit State, Cohesive Soils

**RELIABILITY ASSESSMENT OF STRIP FOOTINGS ON  
SPATIALLY VARYING SAND**

**Ahmet Can MERT, Gökhan YAZICI, Hadi KHANBABAZADEH**

**ABSTRACT**

The target of the present work is to construct hazard curves for maximum settlement and angular rotation for reliability assessment of shallow foundation design on sands. Analyses were conducted by employing the random field finite element method (RFEM) with non-linear sand-like behavior of soil with spatially varying deformation modulus ( $E_d$ ) and angle of shearing resistance  $\phi$  as random inputs. Inputs were generated as random fields with varying correlation lengths ( $\theta_h$  and  $\theta_v$ ) and assigned to the analysis models. Models were subsequently solved with one thousand iterations, maximum settlement and angular rotation of footing results were recorded. Output distributions for each model were fitted with a corresponding probability density function (PDF), and probability of failure ( $P_f$ ) values were estimated from these PDFs. The proposed hazard curves were then formed with the estimated  $P_f$  values for the determined anisotropy and variability categories. The method proposed in the study was validated by a database containing in-situ test results, and a worked example was presented to express the implementation of the hazard curves. The major contribution of the present study is to form the hazard curves for shallow foundations on sands by considering both the non-linear behavior of soil and the influence of all effecting parameters, which satisfy the deformation limits in the foundation design regulations. The proposed hazard curves will provide an approach for probabilistic investigation of strip footings with the consideration of the spatial variation of sand-like soils, and a robust method for the reliability-based design of strip footings with serviceability limit state.

**Keywords:** Soil-Structure Interaction, Reliability-Based Design, Random Field Finite Element Method, Foundation Settlement, Serviceability Limit State, Probability of Failure