

**T.C.  
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DONATILI DUVARLARIN (ZEMİNLERİN) SAYISAL ANALİZİ**

**ÖZCAN ÇALIK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
DR. ÖĞR. ÜYESİ. SELÇUK BİLDİK**

**İSTANBUL, 2018**

Özcan ÇALIK tarafından hazırlanan “Donatılı Duvarların (Zeminlerin) Sayısal Analizi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile İstanbul Gelişim Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Selçuk BİLDİK

İnşaat Mühendisliği, Nişantaşı Üniversitesi

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

**Başkan:** Prof. Dr. İlknur BOZBEY

İnşaat Mühendisliği, İstanbul Üniversitesi

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

**Üye:** Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN

İnşaat Mühendisliği, Gelişim Üniversitesi

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

Tez Savunma

Tarihi: ...../...../.....

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

.....  
Prof. Dr. Nuri KURUOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

(İmza)

Özcan Çalık

(05.06.2018)

DONATILI DUVARLARIN (ZEMİNLERİN) SAYISAL ANALİZİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Özcan ÇALIK

GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2018

ÖZET

Kot farklarının olduğu alanlarda istinat yapılarının kullanılması gereksinimleri ortaya çıkmaktadır. İstinat yapılarının kalıcı yapılar olması nedeniyle uzun süreli davranışlarının bilinmesi ve buna göre tasarlanması gerekmektedir. İstinat yapıları rijit ve esnek sistemler olarak iki farklı şekilde inşa edilmektedirler. Rijit istinat duvarlarının yükseklik sınırlamalarının olması, donatılı duvar olarak bilinen esnek yapıların kullanılmasını ön plana çıkarmıştır. Donatılı duvarlar bir zemin yapısı olduğu için analiz ve hesaplamalarda zeminin davranışının modellenmesi önem kazanmaktadır. Bu bakımdan analizlerde zeminin anizotrop, heterojen yapısını modelleyebilecek nonlineer analiz yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu davranış modelini yansıtan sonlu elemanlar programlarında doğru parametre seçimi önemlidir. Bu çalışmada donatılı duvarları etkileyen parametreler sonlu elemanlar programı kullanılarak analiz edilmiştir. İncelenen parametreler dolgu ve mevcut zeminin kayma mukavemeti açısı, donatı elemanının eksenel rijitliği ve yüzey elemanının eğilme rijitliğidir. Hassaslık analizi olarak bilinen yöntem kullanılarak parametrelerin davranışa etkisi incelenmiştir. Analizler sonucunda incelenen parametrelerden dolgu ve mevcut zeminin kayma mukavemeti açısının, donatı elemanının eksenel rijitliğinin ve yüzey elemanının eğilme rijitliğinin davranışı etkileyen önemli parametreler olduğu görülmüştür. Dolgu ve mevcut zeminin elastisite modülünün diğer parametrelere göre davranışı daha az etkilemektedir.

Anahtar Kelimeler : Donatılı duvar, hassaslık analizi, sonlu elemanlar, deplasman, güvenlik sayısı.

Sayfa Adedi : 111

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Selçuk BİLDİK

# NUMERICAL ANALYSIS OF REINFORCED WALLS (SOILS)

(M. Sc. Thesis)

Özcan ÇALIK

GELİŞİM UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2018

## ABSTRACT

The need of using retaining structures arises where there are differences in elevation in the field. Due to the fact that retaining structures are permanent structures, long-term behavior needs to be known and designed accordingly. Retaining structures are constructed in two different ways as rigid and flexible systems. The presence of elevation limitations of rigid retaining walls puts forward the use of flexible structures known as reinforced walls. Since the reinforced walls are constructed with backfill material, the modeling of the behavior of the soil medium becomes important in analysis and calculations. For this reason, nonlinear analysis methods which can model the anisotropic, heterogeneous structure of the soil medium should be used. It is important to select the correct parameters in finite element programs that reflect this behavior pattern. In this study, parameters affecting reinforced walls were analyzed by using the finite element program. The parameters investigated are the angle of shear strength of the existing soil and backfill material, the axial stiffness of the reinforcement element and the bending stiffness of the surface element. The effect of parameters on behavior was investigated using the sensitivity analysis. As a result of the analysis, it is concluded that the shear strength of the existing soil and the backfill material is an important parameter affecting the behavior of the reinforced soil comparing to the other parameters (axial rigidity of the reinforcement element and bending rigidity of the surface element). The modulus of elasticity of the backfill and the existing soil has less influence on reinforced soil behavior than the other parameters.

Key Words : Reinforced walls, sensitivity analysis, finite element, displacement, safety factor  
Page Number : 111  
Supervisor : Dr. Öğr. Üyesi Selçuk BİLDİK

## TEŞEKKÜR

İnşaat sektörü için yapılmış her çalışma, kat edilmiş her mesafe, geliştirilen her bir sistem kuşkusuz ki ülkemiz için ve çalışanlarımız için çok değerli ve önemlidir. Bu kapsamda donatılı duvar konusu üzerinde bir çalışması yaptım. Bu çalışma kendine özgü ve öncü bir çalışma olması için birçok kişi ve kurumdan destek aldım. Bu desteklerin başında danışman hocam “Nişantaşı Üniversitesi” öğretim üyesi Dr. Öğr. Üyesi Selçuk BİLDİK’e, “Çukurova Üniversitesi” emekli öğretim üyesi Prof. Dr. Mustafa Laman’a, “Perfom Geoteknik Mühendislik & Müşavirlik” çalışanı İnşaat Mühendisi Abdirahman Yasin Duale’ye, İnşaat Mühendisi Cihangir Öztürk’e, “Tekno Maccaferri” çalışanı İnşaat Mühendisi Doğan Gündoğdu’ya, “Destan Yapı San Tic. Ltd. Şti.” çalışanı İnşaat Teknikeri Taylan Dikbaş’a, eşime ve aileme sonsuz teşekkür ederim.

Kızım Tuana Lena’ya ithafen

**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ .....	1
2. DONATILI ZEMİNLER.....	3
2.1. Donatılı Zemin Kavramı .....	3
2.1.1. Donatı malzemesi.....	4
2.1.1.1. Metal elemanlar .....	4
2.1.1.2. Geosentetik (polimer) elemanlar .....	5
2.1.2. Dolgu malzemesi.....	9
2.2. Donatılı Zeminlerin Çalışma Mekanizması.....	9
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	11
3.1. Donatılı Zeminde Yapılan Çalışmalar .....	11
3.1.1. Akinmunsuru ve Akinbolade (1981) .....	11
3.1.2. Patel (1982) .....	12
3.1.3. Fragaszy ve Lawton (1985).....	12
3.1.4. Guido vd. (1985).....	12
3.1.5. Khing vd. (1993).....	13

3.1.6. Omar vd. (1993).....	13
3.1.7. Yetimoğlu vd. (1994).....	14
3.1.8. Das ve Omar (1994).....	14
3.1.9. Shin ve Das (2000) .....	15
3.1.10. Shin vd. (2002).....	15
3.1.11. Laman ve Yıldız (2003) .....	15
3.1.12. Patra vd. (2006).....	16
3.2. Donatılı Duvarda Yapılan alışmalar .....	17
3.2.1. Berg vd. (1986) .....	17
3.2.2. Juran ve Christopher (1989).....	18
3.2.3. Lo ve Xu (1992).....	18
3.2.4. Rowe vd. (1995).....	18
3.2.5. Porbaha ve Goodings (1996).....	19
3.2.6. Porbaha (1998).....	19
3.2.7. Aslan (2007).....	20
3.2.8. Yardımcı (2013).....	20
3.2.9. Bajlan (2016).....	21
3.3. Literatür Değerlendirmesi.....	21
4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ .....	23
4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	23
4.1.1. Geoteknik mühendisliği'nde sonlu elemanlar yöntemi .....	26
4.1.2. Donatılı zemin davranışının modellenmesi.....	27
4.1.3. Zemin davranışının modellenmesi.....	28
4.2. Plaxis Programı .....	30
4.2.1. Geometrik modelin oluşturulması.....	30



4.2.2. Elemanlar [48].....	31
4.2.2.1. Zemin elemanları .....	31
4.2.2.2. Kiriş elemanları.....	32
4.2.2.3. Geogrid elemanı.....	33
4.2.2.4. Ara yüzey elemanı .....	33
4.2.3. Zemin modelleri.....	34
4.2.3.1. Lineer elastik model (le) [48] .....	34
4.2.3.2. Mohr-coulomb model (mc) [48] .....	35
4.2.3.3. Jointed-rock model (jr) [48].....	35
4.2.3.4. Soft soil model (ss) [48].....	35
4.2.3.5. Soft soil creep model (ssc) [48] .....	35
4.2.3.6. Hardening soil model (hs) [48] .....	36
4.2.3.7. Hardening soil model with small-strain stiffness (hssmall) [48] .....	38
4.2.4. Hassaslık analizi ve parametre değişimi.....	38
4.2.4.1. Plaxis yazılımı ile hassaslık ve parametre değişimi analizi .....	39
4.2.4.1.1. Parametre değişimi.....	40
4.2.4.1.2. Hassaslık analizi teorisi .....	41
<b>5. SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE MODEL ANALİZİ.....</b>	<b>43</b>
5.1. Analiz Programı.....	43
5.2. Malzeme Özellikleri.....	45
5.2.1. Model zemin.....	45
5.2.2. Dolgu malzemesi .....	46
5.2.3. Geogrid donatı tabakaları .....	47
5.2.4. Yüzey eleman.....	47
5.4. Sonlu Elemanlar Analizleri .....	48

5.4.1. Seri 1: Hassaslık analizi ile yük etkisinin araştırılması .....	48
5.4.2. Seri 2: Hassaslık analizi ile geogrid boyu etkisinin araştırılması .....	55
5.4.3. Seri 3: Kademeli (palyeli) donatılı duvarda s/h ve yük etkisinin araştırılması .....	69
5.4.4. Seri 4: Kademeli (palyeli) donatılı duvarda hassaslık analizi .....	76
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>81</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>85</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>89</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>90</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.1. Hassaslık matrisi.....	41
Çizelge 5.1. Doğal zemin için MC model parametreleri .....	46
Çizelge 5.2. Dolgu malzemesi için MC model parametreleri.....	46
Çizelge 5.3. Geogrid elemanı parametreleri .....	47
Çizelge 5.4. Yüzey elemanı parametreleri .....	47
Çizelge 5.5. Hassaslık (sensitivite) parametreleri.....	48
Çizelge 5.6. Yüksüz durumda sensitivite analiz sonuçları.....	49
Çizelge 5.7. Yüklü durumda sensitivite analiz sonuçları.....	49
Çizelge 5.8. Hassaslık (sensivite) analiz parametreleri .....	55
Çizelge 5.9. Deplasmana etkileyen parametrelerin geogrid boyuna göre etkisi.....	56
Çizelge 5.10. Geogrid boyuna göre MSF'e etkileyen parametreler .....	59
Çizelge 5.11. Referans parametre değerleri .....	69
Çizelge 5.12. s/H'a göre deplasman değerleri .....	69
Çizelge 5.13. Analiz parametreleri .....	74
Çizelge 5.14. Değişen yük altında deplasman ve MSF değişimi .....	74
Çizelge 5.15. Kademeli (palyeli) donatılı duvar sensitivite analiz parametreleri .....	77
Çizelge 5.16. Kademeli donatılı duvar sensitivite analiz sonuçları .....	77

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.1. Çelik model temellerin detayları [25].....	16
Şekil 4.1. Modelin sonlu elemanlara bölünmesi [42] .....	24
Şekil 4.2. Farklı düğüm sayılarına göre elemanlar [42].....	25
Şekil 4.3. HS Modeli [45-46].....	29
Şekil 4.4. (a) Düzlem şekil değiştirme, (b) Eksenel simetrik problem [47] .....	31
Şekil 4.5. Zemin elemanlarında düğüm ve gerilme noktaları pozisyonu [41].....	32
Şekil 4.6. Kiriş elemanı [42] .....	32
Şekil 4.7. Geogrid elemanı [41].....	33
Şekil 4.8. Ara yüzey elemanları ile zemin elemanlarının bağlantısı [48].....	34
Şekil 4.9. Drenaj koşulunda laboratuvar üç eksenli deneyinde hiperbolik gerilme şekil değiştirme ilişkisi [42] .....	37
Şekil 4.10. Toplam bağıl hassaslık diyagramı [48].....	42
Şekil 5.1. Birinci seri analizlerde kullanılan Model-1 .....	44
Şekil 5.2. İkinci seri analizlerde kullanılan Model-2.....	44
Şekil 5.3. Üçüncü seri analizlerde kullanılan Model-3.....	45
Şekil 5.4. Yüklü ve Yüksüz durumda deplasmana etkileyen parametreler .....	50
Şekil 5.5. Yüksüz durumda referans değerlere göre elde edilen ortalama deplasman konturu .....	51
Şekil 5.6. Yüksüz durumda maksimum değerlere göre elde edilen minimum deplasman konturu .....	51
Şekil 5.7. Yüksüz durumda minimum değerlere göre elde edilen maksimum deplasman konturu .....	52
Şekil 5.8. Yüklü durumda referans değerlere göre elde edilen ortalama deplasman konturu .....	53
Şekil 5.9. Yüklü durumda maksimum değerlere göre elde edilen minimum deplasman konturu .....	53

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.10. Yüklü durumda minimum değerlere göre elde edilen maksimum deplasman konturu .....	54
Şekil 5.11. Yüklü ve yüksüz durumda MSF'ye etkileyen parametreler .....	55
Şekil 5.12. Dolgu kayma mukavemet açısının ( $\phi$ ) deplasmana etkisi .....	57
Şekil 5.13. Geogrid aksenal rijitliğinin ( $EA_1$ ) deplasmana etkisi .....	57
Şekil 5.14. Zemin kayma mukavemet açısının ( $\phi$ ) deplasmana etkisi .....	57
Şekil 5.15. Yüzey elamanı eğilme rijitliğinin ( $EI$ ) deplasmana etkisi .....	58
Şekil 5.16. Dolgu kayma mukavemet açısının ( $\phi$ ) MSF'e etkisi .....	59
Şekil 5.17. Zemin kayma mukavemet açısının ( $\phi$ ) MSF'e etkisi .....	59
Şekil 5.18. Geogrid aksenal rijitliğinin ( $EA_1$ ) deplasmana etkisi .....	60
Şekil 5.19. Geogrid boyu 6m'de referans değerlere göre elde edilen ortalama deplasman konturu .....	61
Şekil 5.20. Geogrid boyu 6m'de maksimum değerlere göre elde edilen minimum deplasman konturu .....	62
Şekil 5.21. Geogrid boyu 6m'de minimum değerlere göre elde edilen maksimum deplasman konturu .....	62
Şekil 5.22. Geogrid boyu 7m'de referans değerlere göre elde edilen ortalama deplasman konturu .....	63
Şekil 5.23. Geogrid boyu 7m'de maksimum değerlere göre elde edilen minimum deplasman konturu .....	63
Şekil 5.24. Geogrid boyu 7m'de minimum değerlere göre elde edilen maksimum deplasman konturu .....	64
Şekil 5.25. Geogrid boyu 8m'de referans değerlere göre elde edilen ortalama deplasman konturu .....	64
Şekil 5.26. Geogrid boyu 8m'de maksimum değerlere göre elde edilen minimum deplasman konturu .....	65
Şekil 5.27. Geogrid boyu 8m'de minimum değerlere göre elde edilen maksimum deplasman konturu .....	65
Şekil 5.28. Geogrid boyu 9m'de referans değerlere göre elde edilen ortalama deplasman konturu .....	66

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.29. Geogrid boyu 9m’de maksimum değerlere göre elde edilen minimum deplasman konturu .....	66
Şekil 5.30. Geogrid boyu 9m’de minimum değerlere göre elde edilen maksimum deplasman konturu .....	67
Şekil 5.31. Geogrid boyu 10m’de referans değerlere göre elde edilen ortalama deplasman konturu. ....	67
Şekil 5.32. Geogrid boyu 10m’de maksimum değerlere göre elde edilen minimum deplasman konturu .....	68
Şekil 5.33. Geogrid boyu 10m’de minimum değerlere göre elde edilen maksimum deplasman konturu .....	68
Şekil 5. 34. s/H'a göre deplasman değişimi .....	70
Şekil 5.35. s/H=0.1’de referans değerlere göre elde edilen deplasman konturu.....	70
Şekil 5.36. s/H=0.2’de referans değerlere göre elde edilen deplasman konturu.....	71
Şekil 5.37. s/H=0.3’de referans değerlere göre elde edilen deplasman konturu.....	71
Şekil 5.38. s/H=0.4’de referans değerlere göre elde edilen deplasman konturu.....	72
Şekil 5.39. s/H=0.5’de referans değerlere göre elde edilen deplasman konturu.....	72
Şekil 5.40. s/H=0.7’de referans değerlere göre elde edilen deplasman konturu.....	73
Şekil 5.41. s/H=1’de referans değerlere göre elde edilen deplasman konturu.....	73
Şekil 5.42. Yüke göre deplasman değişimi.....	74
Şekil 5.43. Yüke göre MSF değişimi.....	75
Şekil 5.44. q=20 kN/m/m’de analiz değerlerine göre elde edilen deplasman konturu ...	75
Şekil 5.45. q=50 kN/m/m’de analiz değerlerine göre elde edilen deplasman konturu ...	76
Şekil 5.46. q=100 kN/m/m’de analiz değerlerine göre elde edilen deplasman konturu .	76
Şekil 5.47. Referans değerlere göre elde edilen ortalama deplasman konturu .....	78
Şekil 5.48. Maksimum değerlere göre elde edilen minimum deplasman konturu.....	78
Şekil 5.49. Minimum değerlere göre elde edilen maksimum deplasman konturu.....	79
Şekil 5.50. Seçilen parametrelerin deplasman etkisi .....	79

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.51. Seçilen parametrelerin MSF etkisi.....	80
Şekil 6.1. Hassaslık analizinde kullanılan parametrelerin deplasmana etkisi.....	83
Şekil 6.2. Hassaslık analizinde kullanılan parametrelerin MSF'e etkisi .....	83
Şekil 6.3. Seçilen parametrelerin deplasman ve MSF etkisinin karşılaştırması .....	84



**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. Geogrid [7].....	6
Resim 2.2. Geogrid ve dolgu malzemesi [7].....	7
Resim 2.3. Geotekstil [10] .....	7
Resim 2.4. Geomembran [11].....	8
Resim 2.5. Geomembran uygulaması [12].....	8
Resim 2.6. Geokompozit [13].....	9



## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>m<sup>3</sup></b>	Metreküp
<b>%</b>	Yüzde
<b>mm</b>	Milimetre
<b>cm</b>	Santimetre
<b>pH</b>	Hidrojen potansiyeli
<b>°</b>	Derece
<b>±</b>	Artı eksi
<b>Mg</b>	Miligram
<b>w<sub>opt</sub></b>	Optimum su muhtevası
<b>C<sub>u</sub></b>	Üniformluluk katsayısı
<b>D<sub>r</sub></b>	Rölatif sıklık
<b>Φ</b>	Kayma mukavemeti açısı / İçsel sürtünme açısı
<b>γ</b>	Birim hacim ağırlık
<b>kN</b>	Kilo Newton
<b>ρ<sub>k</sub></b>	Kuru yoğunluk
<b>C<sub>c</sub></b>	Derecelenme Katsayısı
<b>γ<sub>k</sub></b>	Kuru birim hacim ağırlık
<b>BCR</b>	Taşıma kapasitesi faktörü
<b>D<sub>f</sub></b>	Temelin gömülü derinliği
<b>B</b>	Temel genişliği
<b>/</b>	Bölme
<b>D</b>	Daire çapı
<b>r</b>	Daire yarı çapı
<b>g</b>	Yer çekim ivmesi
<b>m</b>	Metre
<b>km</b>	Kilometre
<b>EI</b>	Eğilme rijitliği

<b>EA</b>	Eksenel rijitlik
<b>R<sub>inter</sub></b>	Mukavemet azaltma faktörü
<b>E</b>	Elastisite modülü
<b><math>\nu</math></b>	Poisson oranı
<b>c</b>	Kohezyon
<b><math>\Psi</math></b>	Dilatasyon açısı
<b>E</b>	Elastisite modülü
<b>K<sub>0</sub></b>	Sükûnetteki toprak basıncı katsayısı
<b><math>\lambda^*</math></b>	Modifiye sıkışma indeksi [41]
<b><math>\kappa^*</math></b>	Modifiye şişme indeksi [41]
<b><math>\mu^*</math></b>	Modifiye sünme indeksi [41]
<b>E<sub>t</sub></b>	Teğet elastisite modülü
<b>E<sub>50</sub><sup>ref</sup></b>	Deviatörük yüklemesiyle oluşan plastik deformasyonlar
<b>E<sub>oed</sub><sup>ref</sup></b>	“Sıkışma nedeniyle oluşan plastik deformasyonlar” [41]
<b>E<sub>ur</sub><sup>ref</sup></b>	“Elastik boşaltma”
<b><math>\nu_{ur}</math></b>	Elastik yükleme
<b>p<sup>ref</sup></b>	Referans çevre basıncı
<b>kg</b>	Kilogram

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

<b>A.B.D.</b>	Amerika Birleşik Devleti
<b>bkz.</b>	Bakınız
<b>FEM</b>	Finite Element Method
<b>FHWA</b>	Federal Highway Administration
<b>HS</b>	Hardening Soil Model
<b>Hsmall</b>	Hardening Soil Model With Small-Strain Stiffness
<b>JR</b>	Jointed-Rock Model
<b>LE</b>	Lineer Elastik Model
<b>Maks.</b>	Maksimum
<b>MC</b>	Mohr-Coulomb Model
<b>MCC</b>	Modifiye Cam-Kil Modeli
<b>Min.</b>	Minimum

<b>MSF</b>	Güvenlik Katsayısı
<b>N.B.S.</b>	U.S. Ulusal Standartlar Bürosu
<b>NCMA</b>	National Contract Management Association
<b>PLAXIS</b>	Finite Element Code for Soil and Rock Analysis [48]
<b>Ref.</b>	Referans
<b>SEY</b>	Sonlu Elemanlar Yöntemi
<b>SS</b>	Soft Soil Model
<b>SSC</b>	Soft Soil Creep Model
<b>U.S.</b>	United States
<b>vb.</b>	Ve benzeri
<b>vd.</b>	Ve diğerleri
<b>vs.</b>	Ve saire



## 1. GİRİŞ

Günümüzde nüfusun yoğun artışı ile birlikte arazi kısıtlamaları farklı kotlar arasında yapıların inşasını zorunlu hale getirmiştir. Farklı kotlar arasında inşa edilen istinat yapıları esnek ya da rijit olarak inşa edilebilmektedir. Rijit sistemler betonarme istinat duvarları olup, belirli bir yükseklikten sonra bu yapıların inşası gayri ekonomik olmakta ve güvenlik anlamında sorunlar oluşturmaktadır. Bu nedenle belirli bir kot farkı sınırından sonra esnek sistemler olarak adlandırılan donatılı duvarlar kullanılması ekonomi, güvenlik ve estetik açısından daha uygundur. Bu yapılar kot farkı olan alanlarda, otoyol dayanma yapılarında, dolgularda ve son dönemlerde viyadük temeli olarak sıklıkla ve artan bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yapıların tasarım ve projelendirmelerinde birçok varsayım ve kabul dikkate alınarak farklı hesap yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yapılar genellikle analitik hesap yöntemlerini dikkate alan yaklaşımlar ile tasarlanmaktadır. Ancak, donatılı duvarlar bir zemin yapısı olduğundan, zemin yapısının davranışına uygun bir hesap yöntemi ile tasarlanması gerekmektedir. Betonarme istinat yapıları lineer analiz yöntemleri ile hesaplanabilirken, donatılı duvarların zeminin anizotropik davranışından ötürü nonlineer olarak analiz edilmesi gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Günümüzde zeminin özelliklerini dikkate alarak nonlineer analiz yapan program sayısı sınırlıdır. Nonlineer analiz yapan programlar arasında en çok bilineni sonlu elemanlar yöntemini kullanarak hesap yapan Plaxis programıdır. Bu tür yapıların davranışını etkileyen en önemli hususlardan biri, inşa edildiği alandaki zemin özellikleri olup, yapının oturacağı zeminin özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve hesaplarda dikkate alınmasıdır. Ancak, zeminin heterojen, anizotrop yapısı nedeniyle gerçekçi olarak modellenmesi oldukça zor ve karmaşıktır. Kimi zaman yetersiz zemin etüdü, kimi zaman da yetkin olmayan kişiler tarafından yapılan geoteknik değerlendirmeler nedeniyle hesaplamalarda kullanılan zemin parametreleri yanlış seçilebilmektedir. Bu durum projenin istenilen güvenlik düzeyini yakalayamamasına, ya da gayri ekonomik olmasına neden olmaktadır. Bu problemleri ortadan kaldırmanın yolu, farklı parametrik varsayımlar için analizler yapılarak, risk düzeyine göre doğru tasarıma geçmektir. Ancak, parametre değişimleri hesap aşamasında daha fazla modelleme gerektireceğinden, zaman alıcı bir süreç olmaktadır. Tüm bu zorluklar dikkate alındığında, aynı tasarım modeli üzerinde belirli parametrik sınırlar içinde çok sayıda analiz yapma olanağı mühendislik tasarımları için büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada Plaxis 2D 2018 VIP programında tanımlanan hassaslık analizleri

ile tek bir model üzerinde farklı parametrik sınırlar kullanılarak donatılı duvarlar analiz edilmiştir.

Çalışma kapsamında üç farklı model dikkate alınarak, dört farklı seride donatılı duvarların davranışına etki eden parametreler araştırılmıştır. Birinci seri analizlerde, 10m yüksekliğinde bir duvarın üzerinde yük olması ve olmaması durumlarında donatılı duvar dolgusunun ve duvarın inşa edildiği zeminin kayma mukavemeti açısı ile elastisite modülleri, geogrid donatının aksel rijitliği, yüzey elemanının eğilme rijitliğinin etkileri belirli değerler arasında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar üzerinde yapılan karşılaştırmalarda deplasman ve güvenlik sayıları kullanılmıştır.

İkinci seri analizlerde, donatılı duvarda kullanılan donatı boyları değiştirilerek benzer şekilde parametre etkileri özetlenmiştir. Üçüncü seri analizlerde, 10m yüksekliğindeki duvarın iki kademe olarak (palyeli) inşa edilmesi durumunda kademeler arasındaki farkın ve duvara üzerinde etkiyen yükün davranışa etkisi incelenmiştir. Dördüncü seri analizlerde ise, kademeli (palyeli) duvar durumu için hassaslık analizleri yapılarak parametrelerin davranışa etkisi yorumlanmıştır.

Çalışma sonucunda donatılı duvara etki eden en önemli parametrelerin dolgu ve zeminin kayma mukavemeti açısı, donatının aksel rijitliği ve yüzey elemanının eğilme rijitliği olduğu görülmüştür. Analizlerde deplasman kriteri dikkate alındığında, duvarı oluşturan dolgu ve donatı elemanı etken parametre olarak ön plana çıkarken, güvenlik analizlerinde zeminin de etken hale geldiği görülmektedir. Bu durum mukavemet azaltma yöntemi ile yapılan analizlerde zeminin ve duvar yapısının bir bütün olarak analiz edilmesinden kaynaklanmaktadır.

Çalışmada hassaslık analizleri, geoteknik mühendisliği uygulamalarında seçilen zemin ve malzeme özelliklerinin farklı sınırlar içinde çok sayıda analiz yapılmasına gerek duyulmadan bir model üzerinde hesap yaparak tasarımın risklerini ortaya koyması oldukça önemlidir. Bu açıdan hassaslık analizleri geoteknik mühendisliğinde yeni çalışmaların hızlı ve efektif olarak yapılmasının önünü açacaktır.

## 2. DONATILI ZEMİNLER

### 2.1. Donatılı Zemin Kavramı

Zeminlerin çeşitli yöntemlerle iyileştirilmesi çok eski çağlara dayanmaktadır. Sulak ya da bataklık alanların ağaç gövdeleri ve dallar ile güçlendirilmesi zeminlerin iyileştirilmesine ilk örnek olarak gösterilebilir. Bu uygulamalar sırasında donatı malzemesinin yumuşak zemin içine batıyor olması, zeminde yer alan donatı elemanının boşluklarının şişmesi ve donatı elemanının süreç içinde çürümesi en önemli zorluklar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Uzun süre bu tarz donatılı duvar (zemin) imalatı devam etmektedir. 1960'lı yılların ortalarında bu alanda ana gelişmeler ilk olarak ortaya çıkmaya başlamıştır. Mimar Henri Vidal Fransa'da sahilde yürürken kum yığınları dikkatini çekmiş ve içinde yer alan çam yapraklarının kumun stabilitesini artırdığını fark etmiştir. Bu gözlemden sonra Vidal donatılı duvar (zemin) görüşünü ortaya atmıştır. 1963 yılında Vidal donatılı duvar patentini almak için başvuru yapmıştır. Vidal'in paten başvurusu ilk kez donatılı duvar 1966 yılında Fransa'da imal edilmiştir. A.B.D.'de ilk donatılı duvar imal edilmesi ise 1972 yılı olarak kayıtlara geçmiştir. Bu iki ülkede yapılan donatılı duvar çalışmasında donatı elemanı olarak metal çubuklar tercih edilmiştir. [1].

Donatılı duvar (zemin), zeminin kritik yönlerdeki mukavemetini artırmak ve içine çekmeye dayanıklı zemin ile arasında yeteri sürtünmeye sahip metal veya polimerden üretilmiş geotekstiller yerleştirilerek elde edilen kompozit bir malzeme olarak tanımlanır [2]. Donatılı zeminlerin kayma mukavemeti, donatı malzemesi özelliklerine, donatıyı yerleştirme şekline, donatı boyuna ve zeminin özelliklerine bağlıdır. Donatılı zeminlerin istenilen davranışı sergilemesi için donatı malzemesi çekme mukavemeti ve donatı malzemesi ile zemin arasındaki sürtünme katsayısının yeterli büyüklükte olması gerekmektedir. Ayrıca donatıların zemin içerisinde asal çekme birim deformasyonları doğrultusunda yerleştirilmeleri sistemin zorunluluğudur [3].

Donatılı zemin iç yapısı ve çalışma sistemi karmaşık ve belirsizdir. Sistemin davranışını belirlemek amacı ile yapılan çalışmalar, laboratuvar ortamında küçük modeller yapılarak gerçek boyuttaki yapıların incelenmesi ve sonlu elemanlar metodu ve diğer bilgisayar

programlarına uyarlanmış matematik çalışmalarını kapsayacak şekilde gelişmiş yöntemleri içermektedir. Kompozit bir malzeme olan donatılı zemin çalışma sisteminin anlaşılabilir olması için donatı malzemesi ve zemin özelliklerinin bilinmesi mutlaka gerekmektedir.

### **2.1.1. Donatı Malzemesi**

Donatılı zeminde kullanılan malzemeler; metal elemanlar ve polimer elemanlar olmak üzere iki başlık altında toplanmaktadır. Donatı elemanı dolgu malzemesi ile kapatıldığından dolayı, kullanılan donatının ömrü, korozyona uğraması gibi faktörler projenin duraylılığını ve ömrünü doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle günümüzde polimer malzeme kullanımı daha yaygındır. Aşağıda metal ve polimer malzemelerin donatı elemanı olarak kullanılması ile ilgili bilgiler sunulmaktadır.

#### **2.1.1.1. Metal Elemanlar**

Donatılı zemin ile ilgili ilk çalışmalarda donatı malzemesi olarak metal şeritler veya çubuklar kullanılmıştır. Metal elemanların kullanılması halinde en önemli sorun olarak kullanım ömürleridir. Donatılı duvar yapıları 75 ile 100 yıllık kullanım sürelerine göre projelendirilmektedir. Metal donatıların paslanması söz konusu olduğundan, metal elemanların kalınlıklarının projelendirilmede çok önemli bir yeri vardır. Donatı kalınlıkları çevre şartlarına ve taşıyacakları yük miktarına göre değişmektedir [3]. Yapısal elemanların paslanması gibi bir sorun ve önceden belirleyemeyeceğimiz şekilde korozyona karşı donatıların nasıl boyutlandırılacağı, güvenlik katsayısının ne olacağı ve projelendirmenin sonuçlarının tahmin edilenden farklı çıkması sonucunda ne olabileceği gibi soruların cevaplanması gerekmektedir. Bu gibi sorulara cevap verebilmek için paslanma mekanizmasını bilinmesi gerekmektedir.

Bununla birlikte, zemine gömülen elemanın şeklinin de kullanım ömrüne etkisi vardır. Örneğin dairesel kesitli metal boru zemine gömüldüğünde derinlemesine paslanırsa boruda sıvı ve basınç kaybı meydana gelebilir. Şerit ve levha tipte metal elemanda noktasal olarak gerçekleşen paslanma, gerilmeye direnen en kesiti azaltması yönünde çok daha az etkilidir. Bu nedenle aynı tip paslanma etkisi göz önünde bulundurulduğunda metal borular kullanılmayacak hale gelirken, şerit metal kullanılabilir. Paslanma, elektrokimyasal bir olay olarak gerçekleşmektedir. Her zeminin paslandırıcılığı farklılık gösterebilmektedir.



Donatının ilk ve devam eden süreçteki uzun zamanlı paslanmasına etki eden çok sayıda iç ilişki faktörü söz konusudur. Bu durumda hizmet ömrünün belirlenmesindeki en önemli etkenlerden biri paslanmadır.

U.S. Ulusal Standartlar Bürosu (N.B.S.) tarafından 1910 yılında her türlü zemin içerisindeki çeşitli kaplama ve metaller için detaylı arazi deneyleri başlatılmış ve 1955 yılına kadar sürmüştür. Bu çalışma günümüzde de kullanılan en kapsamlı çalışmadır.

N.B.S. deneylerinde 128 değişik demirli ve demirsiz metal örnekler zemine gömülmüştür. Deneylerde, zemin ve su şartları birbirinden farklı olan 47 noktada, galvaniz kaplamalı ve kaplamasız çelik donatı numuneleri kullanılmıştır. Deney alanındaki rezistivite, pH değeri ölçülürken, zaman ve çevreden kaynaklı şartlara göre değişebilen parametreler ile metal kaybı arasında sayısal bir korelasyon yapılabilmek amacıyla ölçümler kayıt altına alınmıştır. N.B.S. çalışmalarını yürüten Romanoff, paslanmanın ilk zamanlarda yüksek olduğunu, sonra çok daha düşük ve sabit bir hızla düştüğünü göstermiştir. Romanoff, paslanmadaki yavaşlamanın başlangıçtaki hızla gelişmelerden daha önemli bir parametre olduğunu belirtmiştir.

Galvanizli çeliğin paslanma konusundaki çalışmalarını derinleştirmek amacıyla Reinforced Earth grubu 1988'de yeni bir çalışma olarak Darbin-Jailoux-Montuelle birlikte çalışmasıyla "Kuru Yapılar Şartnamesi" ne bağlı olarak yarı ve doymuş zeminlerin elektrokimyasal deneylerini yapmışlardır. Çalışmada, projelendirme için zamanla yitirilen kalınlık kaybının hesaplanması için extrapolasyon eğrileri elde edilmesi amaçlanmıştır.

### **2.1.1.2. Geosentetik (Polimer) Elemanlar**

Dokuma türü malzemelerin inşaat mühendisliğinde kullanılması düşüncesi, daha önceleri de belirtilmiştir ve denenmiştir. "Geosentetik" ya da "geotekstil" olarak isimlendirilen malzemeler 1960'lı yılların son döneminde gelişmeye başlamıştır. Gelişmesini etkileyen en önemli faktörler; 2. dünya savaşından sonra yüksek teknolojiye ile birlikte sentetik hammadde kullanımına yönelmiş olmak ve batı tekstil endüstrisi kapasitesinin fazla olmasıdır [1]. Bu nedenle inşaat sektöründe yeni arayışa girilmiştir [1]. Holtz'un donatılı zeminde donatı elemanı olarak, metal donatı yerine geosentetik kullanmasıyla ilk çalışmayı

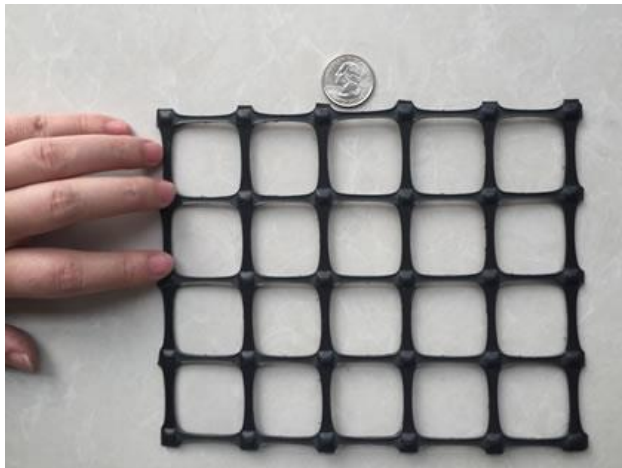
1970'li yıllarında başında yapmıştır [4]. Asya kıtasının güneydoğusunda kıyı ve liman yapı imalatlarında genellikle faydalanılan özellikleri filtre ve yalıtım özelliğidir [5].

Paris'te 1977'de yapılan "International Conferance on the Use of Fabrics in Geotechnics", bir başlangıç noktası olmuş ve geosentetiklerin mekaniğe, hidroliğe ve geotekniğe dayandırılarak kullanılmasının gerektiği vurgulanmıştır.

Geotekstilller, inşaat sektörü içerisinde zemin içinde ve diğer yapı malzemeleri ile bir arada kullanılan sentetik yüzey elemanlarıdır. Bu başlık altında çoğu polimer bileşimli (bazlı) geniş bir ürün yelpazesi yer almaktadır. Bunlarda, günümüzde geniş üretim ve tasarım olanakları ile birlikte, geoteknikte, çevrede, hidrolikte ve ulaştırma mühendisliğinde yararlanılmaktadır [5]. Geosentetik teriminde; Geo, zemini, sentetik ise başta polimer olmak kaydı ile fiberglas, lastik, kauçuk gibi plastik endüstrisinde üretilen ürünleri ifade etmektedir [6]. Çeşitli parametrelere göre sınıflandırılabilen geosentetik türleri en genel hatlarıyla 4 çeşittir;

- a. Geogridler
- b. Geotekstilller
- c. Geomembranlar
- d. Geokompozitler

Geogrid; polimer bazlı damarlardan oluşmakta ve bu damarlar birbirlerini iki grup halinde dik kesmektedir (Resim 2.1.-Resim 2.2.). İplikçik denilen yüksek çekme mukavemetine sahip elamanların dikdörtgen oluşturacak biçimde birleştirilmesi ya da delikler açılmış geosentetik elemanın iki doğrultu boyunca çekilmesi ile oluşan malzemedir.



Resim 2.1. Geogrid [7]



Resim 2.2. Geogrid ve dolgu malzemesi [7]

Geotekstil; yapı ya da sistemin parçası olarak temel elemanı olarak, zeminde, kayada ve toprak ile veya geoteknik mühendisliği alanında başka malzeme ile birlikte kullanılan geçirimli (gözenekli) bir tekstil ürünüdür (Resim 2.3.) [8]. Geotekstil üretimi sırasında fiber, iplik ve filamentler kullanılmaktadır. Fiber, kesilmiş film şeritlerini içermektedir. Fiberin bükülebilir olması, ince olması, yüksek miktarda boy/kalınlık oranı ile karakteristik bir malzemedir. Fiberlerin belirli bir miktar uzunluğu sahip olanına filament denmektedir. İplik (yarn) ise uzunluğu belli bir miktar olan ve kesit alanı daha küçük, bükülmüş ya da bükülmemiş fiber veya filamentlerin monte edilmiş, geotekstil üretimi için hazırlanmış hali için kullanılır [9].



Resim 2.3. Geotekstil [10]

Geomembranlar iki yönde de sürekli, geniş bir yüzey alana sahip, yalıtım amacıyla kullanılabilen geosentetikler olarak ifade edilir (Resim 2.4.- Resim 2.5.). Geomembranlar geçirimsiz yüzey örtüleridir. Yüksek yoğunluklu polietilen hammaddesinden üretilirler.



Resim 2.4. Geomembran [11]



Resim 2.5. Geomembran uygulaması [12]

Geokompozit; en az iki geosentetik malzemenin birlikte kullanılması ile oluşan malzemedir (Resim 2.6.). Geokompozit malzemeler birden daha fazla işlevi yerine getirirler ve geosentetik malzemelerin yalnız kullanılmasından daha etkili çözüm sunmaktadırlar. Geosentetikler günümüzde yol inşaatları, su yapıları, drenaj işleri, demiryolları, asfalt yenileme, havaalanları ve donatılı istinat yapıları olmak üzere artan bir oranda her alanda kullanılmaktadır.



Resim 2.6. Geokompozit [13]

### 2.1.2. Dolgu Malzemesi

Donatılı zemin yapılarında kullanılacak dolgu malzemesi seçiminde etkili olan bazı parametreler aşağıdaki gibidir;

- a. Yapım sırasındaki kısa süreli stabilitesi
- b. Yapının uzun süreli stabilitesi
- c. Dolgu malzemesinin fizikokimyasal özellikleri

Bahsi geçen parametreler dikkate alındığında dolgu malzemesinde aranan bazı şartlar aşağıdaki gibidir;

- a) Proktor sıkılığının %95 ve  $\pm 2 w_{opt}$  sıkıştırma yapılmalıdır.
- b) Minimum  $30^\circ$  sahip olan içsel sürtünme açılı granüler malzeme kullanılmalıdır.
- c) Uygun granülometresi olan malzeme kullanılmalıdır.
- d) Malzeme içeriğinde kimyasal ve organik madde yer almamalıdır.

### 2.2. Donatılı Zeminlerin Çalışma Mekanizması

Eksenel yükü yüklenmiş olan granüler malzemelerde yanıl genişlemeler oluşmakta ve buna bağılı olarak da yanıl gerilmeler düşey gerilmelerin yarısından daha büyük bir şiddette ortaya çıkmaktadır. Zemin içerisine uzama özelliğı ihmal edilebilecek olan donatı elemanları, donatı ile zemin arasında sürtünme etkisiyle yanıl gerilmeyi önlemektedir.

Ayrıca sistemin davranışı, bir yanal dayanma kuvvetine ya da yük zemin yüzeyine etki ediyor gibi olmaktadır. Zemin yüzeyine geldiği kabul edilen yatay yükün pasif zemin basıncına eşit olmaktadır. Zemin elemanlarından hepsi ayrı ayrı bu duruma eşit bir yatay basınç etkisindedir. Bu sebeple düşey basınç artarsa, yatay kuvvette artmaktadır. Bu nedenle kayma mukavemeti açısının herhangi bir aldığı değer için Mohr gerilme dairesi, noktaların tamamında kopma eğrisinin çok altında kalmaktadır. Zeminle donatı arasındaki sürtünmenin kayba uğraması ya da donatıların kopması sebebiyle dengenin bozulması söz konusu olur.

Donatılı zemin yapılarının tasarımındaki en önemli hesaplar, donatılar tarafından karşılanan yanal ya da düşey gerilme basınçlarını belirlemektir. Fazla basınçlar, donatılarda yapının göçmesine ya da gerilme kopmasına sebep olur.

Zemin ve donatılar arasında yer alan kayma direnci ile ilgili hesap, zemin içerisindeki donatının hareketi yalnızca basınçların yeni bir şekilde dağılması ve kütlede yavaş deformasyona neden olacağı için daha az önem arz etmektedir.

Genel olarak; anizotropik kohezyon teorisi ve artırılmış çevre basınç teorisi olmak üzere iki teori ile, içerisine donatı malzemesi yerleştirilen bir kohezyonsuz zeminde meydana gelen mukavemet açıklanmaktadır.

### 3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Donatılı zeminlerin tarihçesi çok geçmişe dayanmasına rağmen, donatı zeminler üzerine araştırmalar son yüzyılda yoğunlaşmıştır. Özellikle ikinci dünya savaşından sonra donatılı zemin üzerine çalışmalar artmış ve geosentetikler üzerindeki çalışmalar ön plana çıkmıştır. Bu araştırmalarla birlikte donatılı zeminin kullanımı da yaygınlaşmaya başlamıştır.

Donatılı zeminlerde birçok araştırmacı tarafından teorik, deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Donatılı zeminler üzerine literatürde yapılmış olan çalışmalar bu bölümde özetlenmektedir. Çalışmalar donatılı zeminlerde yapılan çalışmalar ve donatılı duvarlarda yapılan çalışmalar üzerine iki başlık altında ele alınmaktadır.

#### 3.1. Donatılı Zeminde Yapılan Çalışmalar

Bu başlık altında donatı ile güçlendirilmiş elemanlar üzerine yapılan çalışmalar ele alınmıştır.

##### 3.1.1. Akinmunsuru ve Akinbolade (1981)

Bu çalışmada araştırmacılar donatının ilk gömülme derinliği ( $u$ ), donatı tabakaları arasındaki boşluk ( $h$ ) ve tabaka sayısının ( $N$ ) zemin taşıma kapasitesine etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyler 100 cm uzunluğunda ve 70 cm derinliğinde ahşap bir kasada yapılmış olup, model temel olarak 13 mm kalınlığında ve 100 mm uzunluğunda kare çelik levha kullanmışlardır. Deneylerde kullanılan kum zeminin kayma mukavemet açısını  $38^\circ$  olarak belirlemişlerdir. Donatı elemanı olarak 10 mm genişliğinde 0.03 mm kalınlığında ve kopma dayanımı  $80\text{N/mm}^2$  olan fiber lifler kullanmışlardır. Deneylerde, ağ donatı tabakası oluşturarak kum tabakalarının üzerine yerleştirilmiştir. Çalışma sonucunda; ilk donatı tabakası derinliği, tabaka sayısı, tabakalar arasındaki düşey mesafe ve donatı ağırları arasındaki yatay mesafenin taşıma kapasitesini doğrudan etkilediği görülmüştür. İlk donatı derinliği  $1.75B$  oranında olması durumunda taşıma kapasitesinde 3 kat artış görülmüştür.

### 3.1.2. Patel (1982)

Patel yapmış olduğu çalışmada kohezyonsuz zeminde donatı kullanılması durumunda, temel şeklinin taşıma gücü ve yük oturma davranışına etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Deneysel,  $D=141.5$  mm çapında daire,  $B=145$  mm genişliğinde şerit ve  $B=113.5$  mm,  $L=465$  mm boyutlarında dikdörtgen temeller kullanılarak deneyler yapmıştır. Donatı elemanı olarak geotekstil tabakaları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda taşıma gücünün maksimum olduğu en uygun ilk donatı derinliği oranının  $u=0.47B$  veya  $u=0.47D$  olduğunu belirlemiştir.

### 3.1.3. Fragazy ve Lawton (1985)

Fragazy ve Lawton yaptıkları çalışmada güçlendirilen temel zeminlerinde güçlendirme elemanının uzunluğunun ve zemin yoğunluğunun taşıma gücüne etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Deneyler 560 mm genişliğinde, 1220 mm uzunluğunda ve 360 mm derinliğinde dikdörtgen sunta kasada yapılmıştır. Model temel olarak 76x152 mm ebatlarında dikdörtgen çelik levha kullanılmıştır. Temel zemini olarak,  $C_u=1.5$ ,  $C_c=0.75$ ,  $\gamma=1.470$ , 1.540 ve 1.590 Mg/m<sup>3</sup>,  $D_r=\%31$ , %70 ve %90 karşılık gelen  $\phi=36.5^\circ$ ,  $38^\circ$ ,  $39^\circ$  olan kum zemin kullanılmıştır. Güçlendirme elemanı olarak 25.4 mm genişliğinde 0,0254 mm kalınlığında ve çekme mukavemeti 1.34 kN/m olup evlerde kullanılabilen alüminyum folyo kullanılmış olup, deneylerde ilk donatı derinliği 25.4 cm ( $u/B=0.33$ ) ve tabakalar arası mesafe ( $h$ ) 25.4 mm olacak şekilde üç tabaka kullanmışlardır. Donatı uzunluğun  $3B$  ve  $7B$  arasında olması durumunda taşıma gücünde 1.25 ve 1.7 kat artış olduğunu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar güçlendirme elemanının boyunun taşıma gücü kapasitesini doğrudan etkilediğini göstermektedir.

### 3.1.4. Guido vd. (1985)

Guido vd. yapmış oldukları çalışmada geotekstil ile güçlendirilen kumlu zeminlerdeki temeller üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Model deneylerde 1220 mm boyutlarında, 920 mm yüksekliğinde kare kasa ve 310 mm boyutunda kare temel kullanmışlardır. Temel zemini olarak,  $C_u=2.5$  ve 1.9 olan,  $\rho_k=1.480$  ve 1.426 Mg/m<sup>3</sup>,  $D_r=\%50$  ve  $\phi=35^\circ$  ve  $36^\circ$  olan farklı dağılımda kum kullanmışlardır. Beş tabakalı



geotekstil ile güçlendirilmiş temel zemininde ( $u/B$ ) oranının 0.28 ve ( $h/B$ ) oranının 0.18 olması durumunda taşıma gücünde 2.8 kat artış olduğu gözlenmiştir.

### 3.1.5. Khing vd. (1993)

Khing vd. şerit temeller kullanarak, geogrid ile güçlendirilmiş kum zeminlerin taşıma gücünü belirlemek için, 304,8 mm genişliğinde, 1100 mm uzunluğunda ve 914 mm yüksekliğinde çelik bir kasada deneyler yapmışlardır. Model temel olarak 304,8 mm uzunluğunda 101,6 mm genişliğinde ve 25,4 mm kalınlığında sert kereste malzeme kullanmışlardır. Temel zemini olarak, üniformalık katsayısı ( $C_u$ ) 1.53, derecelenme katsayısı ( $C_c$ ) 1.10, kuru birim ağırlığı ( $\gamma_k$ ) 17.14 kN/m<sup>3</sup>, Rölatif sıkılık derecesi ( $D_r$ ) %70 ve kesme mukavemeti açısı ( $\phi$ ) 40.3° olan iyi derecelenmiş yuvarlak ince silisli kum kullanmışlardır. Deneylerde; ilk donatı tabaka derinliği, donatı tabaka genişliği ve donatı tabakası sayısının etkisi araştırılmıştır. Sınır taşıma gücü ve belli oturmalara karşılık gelen taşıma gücü değerlerine göre hesaplanan, taşıma gücü oranları kullanılarak donatının taşıma kapasitesine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda ilk donatı derinliği oranının ( $u/B$ ) diğer tabakalar arası mesafeden ( $h$ ) fazla olması gerektiği, donatı yerleştirilecek toplam derinlik oranının ( $d/B$ ) 2.25'den fazla olması halinde sonuçlara etkisi olmadığı görülmüştür. Oturma oranının ( $s/B$ ) 0.25, 0.50 ve 0.75 değerleri için yaklaşık %67 - %75 oranında nihai taşıma gücü değerleri elde edilmiş olup, 6 tabaka donatı kullanılması durumunda taşıma kapasitesinde 4 kata kadar artış gözlenmiştir.

### 3.1.6. Omar vd. (1993)

Omar vd. deneysel çalışmalar ile geogrid ile güçlendirilen zeminlerde donatı uzunluğu ile temel genişliğinin oranının ( $B/L$ ) taşıma gücüne etkilerini araştırmışlardır. Şerit temel ile yapılan deneylerde 304,8 mm genişliğinde şerit temeller ile 1100 mm uzunluğunda ve 914 mm yüksekliğinde kasada deneyler yapmışlardır. Kare temel deneyleri için ise 910 mm genişliğinde, 910 mm uzunluğunda ve 910 mm yüksekliğinde geniş kasalar kullanmışlardır. 76,2×76,2 mm, 76,2×152,4 mm, 76,2×228,6 mm ve 76,2×304,8 mm boyutlarında ( $B/L$ ) oranı 1, 0.5, 0.333 ve 0 olan dört tip kare temel model kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda en yüksek taşıma gücü donatılı zemin tabakası kalınlığının şerit temellerde 2B ve kare temellerde 1.4B olması durumunda elde edilmiştir. Donatının katkısı olması için ilk donatı tabakasının, temel tabanından itibaren B derinliği içinde

olması gerektiği anlaşılmıştır. Taşıma gücünün en yüksek olduğu durumda donatı genişliği şerit temelerde 8B, kare temelerde 4.5B olarak elde edilmiştir.

### 3.1.7. Yetimoğlu vd. (1994)

Yetimoğlu vd. yaptıkları çalışmalarda, geogrid-donatılı kum zemin üzerine oturan temellerin, laboratuvarında bir dizi model deneylerle ve sonlu elemanlar analizi yaparak geogrid ile güçlendirmenin taşıma kapasitesi ve oturmaya etkisi araştırılmıştır. Model deneyler, 700 mm genişliğinde, 700 mm uzunluğunda ve 1000 mm yüksekliğinde çelik kasada yapılmıştır. Model temel olarak 127 mm uzunluğunda, 101.5 mm genişliğinde, 12.5 mm kalınlığında dikdörtgen çelik levha kullanılmıştır. Temel zemini olarak,  $C_u=2.33$ ,  $C_c=0.76$ ,  $\gamma_k=17.16$  kN/m<sup>3</sup>,  $D_r=\%70-73$  ve  $\phi =40^\circ$  olan iyi derecelenmiş ince kum kullanmışlardır.

Tek tabaka güçlendirilmiş kum için, taşıma kapasitesinin en yüksek olduğu birinci güçlendirme tabakanın optimum bir gömülme derinliğinin temel taban genişliğinin yaklaşık 0.3'ü olduğu görülmüştür. Çok tabakalı güçlendirilmiş kum için, en yüksek taşıma kapasitesi yaklaşık 0.25B'lik bir gömülme derinliğinde gerçekleştiği görülmüştür. Çok tabakalı güçlendirilmiş kum için, güçlendirme tabakaların optimum düşey aralığı incelenmiş, optimum düşey aralığın 0.2B ve 0.4B arasında olduğu görülmüştür. Güçlendirilmiş kumların taşıma kapasitesi, belirli bir etkin bölge içerisinde güçlendirme elemanın boyutu ve güçlendirme tabaka sayısı ile önemli ölçüde artmaktadır. İncelenen koşullar için, etkili bölgenin kapsamı, temelin tabanından ve kenarlarından yaklaşık 1.5B içinde bulunduğu görülmüştür.

### 3.1.8. Das ve Omar (1994)

Das ve Omar yaptıkları deneysel çalışmalarda geogrid ile güçlendirilen kumlu ve killi zeminlerdeki şerit temellerin taşıma gücünü karşılaştırmışlardır. Model deneyler için 1960 mm uzunluğunda, 305 mm genişliğinde ve 914 mm yüksekliğinde kasa kullanılmıştır. Tüm temellerin uzunluğu 304.8 mm olmak üzere, 50.8 mm, 76.2 mm, 101.6 mm, 127 mm, 152.4mm ve 177.8 mm genişliğinde olmak üzere 6 farklı boyutta temel kullanmışlardır. Geogrid ile güçlendirilmiş bir zeminde en yüksek taşıma kapasitesine ulaşmak için donatı tabakası kalınlığı kumlarda 2B, killerde ise 1.75B olması gerektiği görülmüştür. Donatının

en efektif olduğu durumda ilk geogrid tabakasının 0.3B ile 0.4B derinlikleri arasına yerleştirilmesinin uygun olacağı belirtilmiştir.

### 3.1.9. Shin ve Das (2000)

Shin ve Das yaptıkları deneylerde bir veya daha fazla geogrid donatı tabakası kullanarak orta sıkı ve sıkı zeminde deneyler yapmışlardır. Deneylerde bir tip şerit temel ile iki farklı rölatif sıklıkta ( $D_r=0.59$  ve  $0.74$ ) kumda tek çeşit geogrid kullanılmıştır. Her iki sıklık için donatı gömülme derinliği ( $D_f=0.0-0.75B$ ), donatı tabakası sayısı ve donatı genişlikleri kullanılarak taşıma gücünün belirlenmesine yönelik deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda tek donatı tabakası kullanılan deneylerde optimum donatı derinliğinin temel genişliğinin %35'ine karşılık geldiğini belirtmişlerdir. Deneylerde, iki rölatif yoğunlukta sıkıştırılmış kumda ve tek tip geogrid kullanılmıştır. Temel derinliği sıfır ile  $0.75B$  ( $B$ , temel genişliği) arasında seçilmiştir. Sonuçta taşıma kapasitesi oranı cinsinden (BCR) ifade edilmiştir. BCR değerleri dikkate alınığında kritik güçlendirme oranı 2 olarak bulunmuştur.

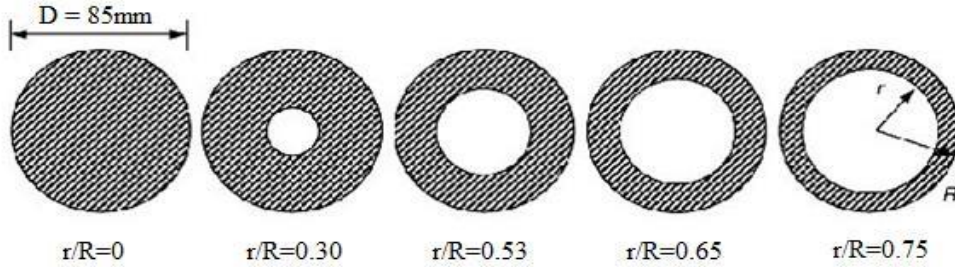
### 3.1.10. Shin vd. (2002)

Shin vd. yaptıkları çalışmada geogrid elemanın kum zeminlerin taşıma gücüne etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Model deneyler 174 mm genişliğinde, 1000 mm uzunluğunda ve 600 mm yüksekliğinde çelik kasada gerçekleştirilmiştir. Model temel olarak 172 mm uzunluğunda, 67 mm genişliğinde ve 77 mm kalınlığında ahşap temel kullanmışlardır. Temel zemini olarak,  $C_u=2.65$ ,  $C_c=1.51$ ,  $D_r=74\%$  ve  $\phi=38^\circ$  olan kötü derecelenmiş kum kullanmışlardır. Donatısız zemin ve ilk donatı derinliği ( $u/B$ )=0.4, tabakalar arası mesafe oranı ( $h/B$ )=0.4, donatı tabaka uzunluğu oranı ( $L/B$ )=6 olan güçlendirilmiş zeminde deneyler yapmışlardır. İlk donatı derinliği  $2B$  olduğu durumda, donatısız zemine göre taşıma gücünün arttığını belirtmişlerdir.

### 3.1.11. Laman ve Yıldız (2003),

Laman ve Yıldız geogridle güçlendirilen kum zeminlerdeki dairesel temellerin taşıma kapasitelerini araştırmışlardır. Model deneyleri 700 mm uzunluğunda, 700 mm genişliğinde ve 700 mm derinliğinde çelik kasa içerisinde yapmışlardır. Temel zemini

olarak  $C_u=1.5$ ,  $C_c=1.1$ ,  $\gamma=17.10 \text{ kN/m}^3$ ,  $\phi=41^\circ$  olan Seyhan nehri kumu kullanmışlardır. Model temel olarak Şekil 3.1.'de detayları gösterilen 20 mm kalınlığında, 85 mm dış çapında ve değişik iç boşluk çaplarında çelik dairesel-halka temeller kullanmışlardır.



Şekil 3.1. Çelik model temellerin detayları [25]

Farklı ring temellerde yapılan deneyler sonucunda güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş zeminlerde halka genişliği oranı,  $r/R$ , yaklaşık  $0.30B$  bulunmuştur. Güçlendirilmiş zeminlerde yapılan deneylerde ilk geogrid tabakası için en uygun derinlik  $0.30B$  bulunmuştur. Dört sıradan fazla güçlendirme tabakasının kullanılması durumunda taşıma kapasitesinde önemli bir artış olmadığı görülmüştür. Donatı elemanı uzunluğunun  $3B$ 'den daha büyük olması durumunda taşıma kapasitesinin sabit kaldığı görülmüş olup, optimum donatı boyu  $3B$  olarak belirlenmiştir. Geogrid düzenlemesine bağlı olarak, nihai taşıma kapasitesi değerlerinin, güçlendirilmemiş zeminin üç katına kadar artırılabilceği görülmüştür.

### 3.1.12. Patra vd. (2006)

Patra vd. geogrid donatılı kum zemine oturan merkezi ve eksantrik yüklü şerit temelin, taşıma gücünü belirlemek için model şerit temellerle deneyler yapmıştır. Deneylerde rölatif sıklığı % 72 olan kum kullanılmıştır. Deneysel olarak, sınır taşıma gücü ile donatı tabakası kalınlığı, gömülme derinliği ve eksantriksitedeki ilişki araştırılmaya çalışılmıştır. Deneylerin sonuçlarından benzer donatı durumlarında, eksantrik yüklü temelin taşıma gücü ile merkezi yüklü temelin taşıma gücü bir azaltma katsayısı ile ilişkilendirilmişlerdir. Bu azaltma katsayısının, eksantriksitede ve donatılı zemin tabakası yüksekliği ile temel derinliği toplamının bir fonksiyonu olduğunu sonucu çıkarılmışlardır.

### 3.2. Donatılı Duvarda Yapılan Çalışmalar

Bu başlık altında donatı elemanı kullanılarak duvar yapılması ile ilgili çalışmalar ele alınmaktadır.

#### 3.2.1. Berg vd. (1986)

Berg vd. yaptıkları çalışmada iki adet donatılı zemin istinat yapısının inşaat esnasındaki ve inşaat sonrasındaki performansını incelemişlerdir. Duvarlarda yüksek çekme dayanımına sahip geogridler kullanılmıştır. Tucson duvarı olarak isimlendirilen ilk duvarda 0.15m kalınlığında, 1.5m genişliğinde ve yüksekliği duvar yüksekliğine eşit yüzey kaplamaları kullanılmıştır. Lithonia duvarı olarak adlandırılan ikinci duvarda ise 1.65m genişliğinde ve 1.2m yüksekliğinde prekast yüzey kaplaması panelleri kullanılmıştır. Yapım inşaat esnasındaki ve sonrasındaki performansını inceleyebilmek amacıyla kaplama panelleri üzerine yük ölçüm hücreleri yerleştirilmiştir. Dolgu içerisine ise düşey deformasyon ölçerler yerleştirilmiştir. Geogridlerde meydana gelecek deformasyonları ölçmek için ise geogridler üzerine yanal deformasyon ölçerler yerleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde Tucson duvarının üst kesimlerindeki kaplama panellerinin dışa doğru yaklaşık 65mm hareket ettiği görülmüştür. Yapının topuk kesiminde ise dışa doğru bir hareket gerçekleşmemiştir. Bu davranışın inşaat öncesi yapılan analizler sonucu beklenen davranışa uygun olduğu ve bu tip duvarlarda inşaat esnasında duvara (1:60)'lık bir yüzey eğimi verilmesinin uygun olacağı belirtilmiştir. Lithonia duvarı da analizler sonucu beklenen davranışa uygun bir davranış sergilemiştir. Yapılan gözlemler sonucunda bu tip duvarlar içinse başlangıç yüzey eğiminin (1:40) olmasının uygun olacağı belirtilmiştir. Yük ölçüm hücreleri yardımı ile belirlenen yanal yük ölçümlerinden yararlanarak yüzey kaplamalarına ve birleşim noktalarına gelen yükler tespit edilmiştir. Yapılan ölçümler analiz sonucu hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. Burada duvarın alt ve üst kesimlerinde ölçülen değerler teorik değerlere yaklaşmaktadır. Orta kesim için hesaplanan değerler ise ölçülen değerlerden oldukça yüksektir. Dolgu içerisine yerleştirilen yük ölçüm hücreleri yardımıyla elde edilen düşey gerilme değerleri ve davranışları benzer olmakla beraber teorik olarak hesaplanan değerlerden farklı olduğunu belirtmiştir. Geogridler üzerine yerleştirilen birim deformasyon ölçerlerden elde edilen değerler maksimum şekil değiştirmelerin, şev topuğundan geçen ve düşeyle 18-19° açı yapan bir doğru üzerinde yer aldığı göstermiştir.

### 3.2.2. Juran ve Christopher (1989)

Juran ve Christopher laboratuvarında küçük ölçekli deneyler ile geotekstil donatılı yapıların performansını incelemişlerdir. Model deneylerin analizinde kullanılacak parametreleri belirlemek amacıyla çekme deneyleri yaparak kullanılacak donatıların zemin içerisinde gömülü olduğu durumdaki ve serbest haldeki gerilme-deformasyon eğrilerini elde etmişlerdir. Çalışmada zeminin içsel sürtünme açısının 40-45° arasında değişen değerler aldığı belirlenmiştir. Yapılan deneyler göçmenin dolgu ön yüzündeki kaplama panellerinde aşırı deformasyonlar oluşması, donatının kopması veya sıyırılması sonucu meydana gelebileceğini göstermiştir. Yapılan çalışma sonucunda geotekstil donatılı yapılarının davranışının oldukça kompleks olduğu ve yapının performansının inşaat adımları ile donatı esnekliğinden önemli ölçüde etkilendiği görülmüştür.

### 3.2.3. Lo ve Xu (1992)

Love ve Xu yumuşak kil tabakaları üzerinde yer alan donatılı dolgularda meydana gelecek drenajsız dairesel göçme için yeni bir limit denge analiz yöntemi geliştirmiştir. Analizde kayma yüzeyi boyunca meydana gelecek deformasyon yumuşamaları da göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca göçme anında kayma yüzeyi boyunca oluşacak deformasyonların esnek geotekstilin çekme dayanımının mobilize olabilmesi için uygun olup olmadığı da araştırılmıştır. Dolgu malzemesinin homojen olduğu ve drenajlı koşullarda göçtüğü kabul edilmiştir. Temel zeminini oluşturan kilde ise göçme anında drenajsız koşulların geçerli olduğu düşünülmüştür. Geotekstil donatıların stabiliteye olan katkısını incelemek amacıyla farklı sayıda ve dayanımdaki geotekstillere kullanıldığı deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak kullanılan geotekstil donatı sayısı ve geotekstillere elastisite modülleri arttıkça geotekstillere olan katkılarının arttığı gözlenmiştir.

### 3.2.4. Rowe vd. (1995)

Rove vd. yumuşak zeminler üzerine inşa edilen geotekstil donatı zeminlerin inşaat esnasındaki ve göçme anındaki performansının incelemek amacıyla çeşitli ölçüm aletleri ile kullanarak bir test dolgusu inşa etmiştir. Yüksek sıkışabilirliğe sahip, yumuşak bir temel zemini üzerine inşa edilen dolguda donatı malzemesi olarak yüksek dayanımlı

örgülü geotekstiller kullanılmıştır. Çalışmada ilk olarak dolgunun inşa edileceği temel zeminini incelemek amacı ile arazide sondaj çalışması, koni penetrasyon deneyleri ve arazi veyn deneyleri yapılmıştır. Dolgunun inşaatına yaklaşık 0.3-0.5m kalınlıkta granüler örtü tabakasının yerleştirilmesi ile başlanmıştır. Kademe kademe yapılan dolgu esnasında oluşan boşluk suyu basınçları, gerilmeler, şekil değiştirmeler ve geotekstilde meydana gelen uzamalar kullanılan ölçüm aletleri yardımıyla ölçülmüştür. Geotekstilde meydana gelen uzamalar, boşluk suyu basıncı değişimleri, yatay ve düşey deplasmanlar birlikte göz önüne alındığında temel zemininin 5.7m dolgu yüksekliğinde göçmeye ulaştığını görülmüştür. Geotekstilde meydana gelen uzamalara bakıldığında geotekstilin stabiliteye olan katkısı 3.4m dolgu yüksekliğine kadar belirgin olmamakla birlikte dolgu yüksekliğinin 4.5m'ye ulaşmasının ardından yavaş yavaş artmakta olduğunu belirlenmiştir. Dolgu 5.7m yüksekliğe ulaştıktan sonra geotekstilin stabiliteye olan katkısı belirgin olarak arttığı görülmüştür. 8.2m dolgu yüksekliğine ulaşıldığında geotekstildeki uzama %8,5 seviyelerindedir. Sonuç olarak dolgu yüksekliği 8.2m'de sabit iken deformasyonların ve geotekstildeki uzamaların devam ettiği ve geotekstildeki uzamanın %25'lere ulaşmasının ardından geotekstilin koptuğu belirlenmiştir.

### **3.2.5. Porbaha ve Goodings (1996)**

Porbaha ve Goodings santrifüj deneyleri ile kohezyonlu zeminlerle oluşturulan dik ve az eğimli şevler üzerinde davranışını incelemiştir. Deneylerde rijit ve yumuşak birimlere oturan 24 farklı donatılı şev modeli üzerinde deneyler yapılmıştır. Dolgu içerisine yerleştirilen geotekstillerin stabiliteye katkısı araştırılmıştır. H duvar yüksekliği olmak üzere az eğimli şevlerde geotekstil boyunun  $L=0.67H$  ve dik şevler için  $L=0.75H$  olması durumunda optimum durumun sağlandığı görülmüştür. Duvar yüzeyinin eğimli olması durumunda kullanılacak geotekstil miktarının önemli mertebede azaldığı görülmüştür.

### **3.2.6. Porbaha (1998)**

Porbaha yapmış olduğu çalışmada şev eğimini ve kullanılan geotekstilin boyunu değiştirmenin kayma yüzeylerinin oluşumuna olan etkisini araştırmak amacıyla bir seri santrifüj deneyi gerçekleştirmiştir. Göçme yüzeyinin yerinin donatı boyuna ve şev eğimine bağlı olarak değiştiğini belirlemiştir. Kullanılan geotekstil donatının boyu  $L=0.5H$ 'dan  $L=0.75H$ 'ya doğru arttıkça göçme yüzeyinin donatılı şevin ön yüzüne doğru yaklaştığı

görülmüştür. Kullanılan geotekstil donatı boyunun kısa olduğu durumlarda donatılı zemin yapısının ince, uzun, stabil olmayan bir istinat duvarı gibi davrandığı ve öne doğru devrilmeye zorlandığı görülmüştür. Bu durum donatının sadece şevin alt kısmında belirli bir kısımda göçme yüzeyi ile kesişmesi ve stabiliteye çok az oranda katkı sağlaması ile açıklanmıştır. Donatı boyu uzadıkça göçme yüzeyi ile kesişen donatı sayısı artmakta ve dolayısıyla geotekstil donatıların stabiliteye olan katkısının da arttığı görülmüştür.

### **3.2.7. Aslan (2007)**

Çalışma kapsamında donatılı duvar yapılarının statik ve dinamik yüklemeler altında davranış ve tasarım ilkeleri incelenmiştir. Tasarım aşamasında Türkiye, Fransa ve ABD karayolları idarelerinin ilgili şartname ve yönetmelikleri kullanılmıştır. Çalışma içerisinde ABD karayolları şartnamesi temel alınarak model bir donatılı zemin istinat duvarı tasarlanmış, aynı model dinamik ve statik yüklemeler altında Plaxis programı ile analiz edilmiştir. Donatılı zemin yapılarının davranış prensiplerini analiz etmek için Plaxis sonlu elemanlar programı kullanılarak parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada donatı tipi, aralığı, dolgu malzemesi tipi ve donatılandırılmış bir şevin, sistem stabilitesine etkisi incelenmiştir. Çalışmanın son bölümünden ise teorik ve Plaxis Sonlu Elemanlar Programı ile yapılan analizlerin sonuçları karşılaştırılarak, uygulanan modellerin sisteme etkisi üzerinde yorumlarda ve değerlendirmelerde bulunulmuştur. 12 metre yükseklikteki donatılı duvarın stabilite kontrollerinden sonra ilk tasarımda  $L = 0.7H$  prensibinin statik tasarım için yeterli olduğu ancak dinamik yüklemelerde, donatı uzunluğu en az  $0.9H$  seviyesine getirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca, incelenen problemde, donatı boyunda yüzde 20'lik artışın kayma stabilitesinde yüzde 10'luk bir artışa neden olduğu görülmüştür.

### **3.2.8. Yardımcı (2013)**

Yardımcı sonlu elemanlar programı kullanarak yüksek duvarların kademeli olarak inşa edilmesi durumunda tasarıma etkiyen parametreleri araştırmıştır. Sonlu elemanlar analizinde Plaxis 8.2 paket programı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 58 adet sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde donatı uzunluğunun (L), duvar dolgu tipinin ve duvar kademeleri arasındaki mesafenin (S) davranışa etkisi incelenmiştir. Donatı boyunun artması güvenlik katsayısını arttırdığı, yatay deplasmanı



azalttığı görülmüştür. Duvarlar arasındaki kademe mesafesinin duvar yüksekliğinin 1.5 katını geçtiği durumlarda donatı etkisinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.

Duvarlar arası mesafenin artırılmasıyla güvenlik katsayısı artmıştır ve kalıcı yatay deplasmanlar azalmıştır. Kohezyonsuz dolgu yerine kohezyonlu dolgu kullanıldığı durumlarda, güvenlik katsayısının azaldığı ve deplasmanların arttığı gözlenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde, kademeli istinat duvarının iki bağımsız duvar olarak çalışmaya başladığı durum irdelenmiştir. Kohezyonsuz dolgulara; kritik öteleme mesafesi kat yüksekliğinin 2 katı (2H) olduğu bulunmuştur. Kohezyonlu dolgu kullanıldığında bu değer duvar katının 2.25 katı (2.25H) olarak gözlenmiştir.

### **3.2.9. Bajlan (2016)**

Bu çalışmada, geogrid donatılı istinat yapılarının davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla; donatı uzunluğu, donatılar arası mesafe, istinat duvarının kalınlığı, istinat duvarının gömülme derinliği, sürşarj yükü, yer altı su seviyesi ve donatı rijitliği parametrelerinin, geogrid donatılı istinat duvarlarının performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Analizler, PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışma sonunda elde edilen sonuçlara göre:

1) Donatı ve sürşarj yükü olmadan inşa edilebilecek en büyük duvar yüksekliği 2.9m. olduğu görülmüştür.

2) Donatı uzunluğu (L) değerinin artırılması duvar davranışı üzerinde önemli bir etkisi olmakla birlikte, donatılar arası düşey mesafenin etkisi daha sınırlı kaldığı görülmüştür.

3) Geosentetik donatılı istinat duvarlarında temel zeminindeki suyun etkisinden dolayı stabilite kaybı yaşanmazken donatısız durumda stabilite kaybı yaşandığı görülmüştür.

### **3.3. Literatür Değerlendirmesi**

Donatılı zemin ve donatılı duvar ile ilgili yapılmış olan literatür çalışmaları dikkate alındığında daha çok laboratuvar ölçeğinde veya sayısal analizlerle belirli özellikteki

donatı ve zeminin birlikte davranışı ele alınmıştır. Ancak teorikte kabul edilen koşulların, saha uygulaması esnasında değişkenlik gösterdiği bilinen bir gerçektir. Örneğin söz konusu duvar imalatının yapıldığı sahada zeminin hesapta dikkate alınandan daha iyi ya da kötü olması, duvar imalatında yapılan dolgunun kalitesinin değişkenlik göstermesi, kullanılan donatı özelliğinin farklılığı söz konusu olabilecek sorunların başında gelmektedir. Bu nedenle tasarımda malzeme ve zemin koşullarının alt ve üst sınırlarının dikkate alınarak hesap yapılması oldukça önemlidir. Literatürdeki çalışmalar değerlendirildiğinde zemin, dolgu ve donatı özelliklerinin irdelendiği ve bu özelliklerin davranışa etkisinin araştırıldığı çalışmalar oldukça sınırlıdır. Özellikle bahsi geçen özelliklerin değiştirilerek çok sayıda sayısal analiz yapmak da pratik mühendislikte oldukça zor ve karmaşıktır. Bu tez çalışması kapsamında hassaslık analizleri yapılarak dolgu, zemin, yüzey elemanı ve donatının özelliklerinin değişmesi durumunda davranışın değişimi incelenmiştir. Analizlerde Plaxis 2D 2018 VIP programı kullanılmış olup, hassaslık analizleri yapılmıştır. Bu açıdan çalışma literatürdeki bu eksiği kapatacak bir niteliktedir. Çalışmada ayrıca 10m yüksekliğinde bir duvarın tek ve iki kademedede yapılması durumu, donatı boyu, sürşarj yükü ve palye genişliğinin etkileri araştırılmıştır.

## 4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

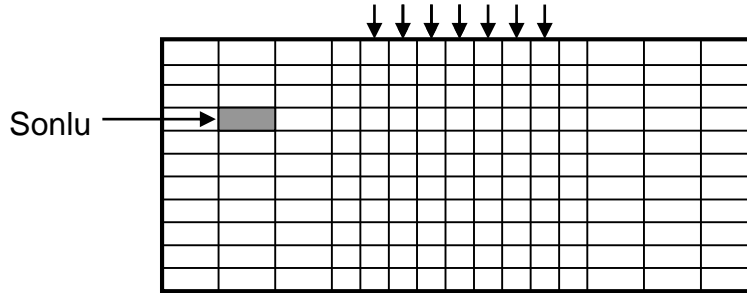
Günümüzde bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerin de etkisiyle zemin ve zemine gömülü yapıların tasarımında sayısal analiz programları kullanılmaktadır. Zemin yapısı gereği anizotrop, heterojen bir yapıya sahip olduğu için zeminin özelliklerinin doğru bir şekilde tanımlanması ve yapıların zemin ile etkileşiminin gerçekçi olarak modellenmesi oldukça zor problemlerden birisidir. Bu amaçla geliştirilen birçok sonlu elemanlar programında zemin ortamı nonlinear, zeminle ilişkili yapılar ise lineer olarak modellenmektedir. Bu çalışmada donatılı duvarların analizinde sonlu elemanlar yöntemine dayalı Plaxis 2D 2018 VIP programı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ileri analiz yöntemlerinden biri olarak tanımlanan hassaslık analizleri yapılarak duvar davranışına etkiyen parametreler araştırılmıştır. Bu başlık altında sonlu elemanlar yöntemi ve Plaxis 2D 2018 VIP programı ile ilgili bilgilere yer verilmektedir.

### 4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Zeminlerin davranışı çalışmalarında, çok farklı ampirik ve teorik metotlar kullanılmaktadır. Zeminin anizotrop ve heterojen yapıda olması nedeniyle çözümlerin nonlinear davranış şartları altında yapılması gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Bu davranış daha basit bir kabul ile zemin davranışı lineer-elastik ve homojen olarak düşünülerek çözüme gidilmektedir. Bu çözüm tekniğinde zamana bağlı davranışın dikkate alınmaması, anizotropik ve heterojen zemin yapısının homojen düşünülmesi pratik uygulamada yaklaşık bir çözüm olarak görünse de gerçek zemin davranışını yansıtmamaktadır. Problem boyutlarının büyümesi ile birlikte başta yapısal problemlerde kullanılmak üzere yeni yapılan teorik çalışmalar, bilişimdeki gelişmeler ile birlikte yeni çözüm yöntemlerini ortaya çıkarmıştır. Bu çözüm tekniklerinin en önemlilerinden birisi Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) olup, zaman içindeki gelişmelerle yapısal problemlerde kullanılan bu yöntem zemin problemleri için de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

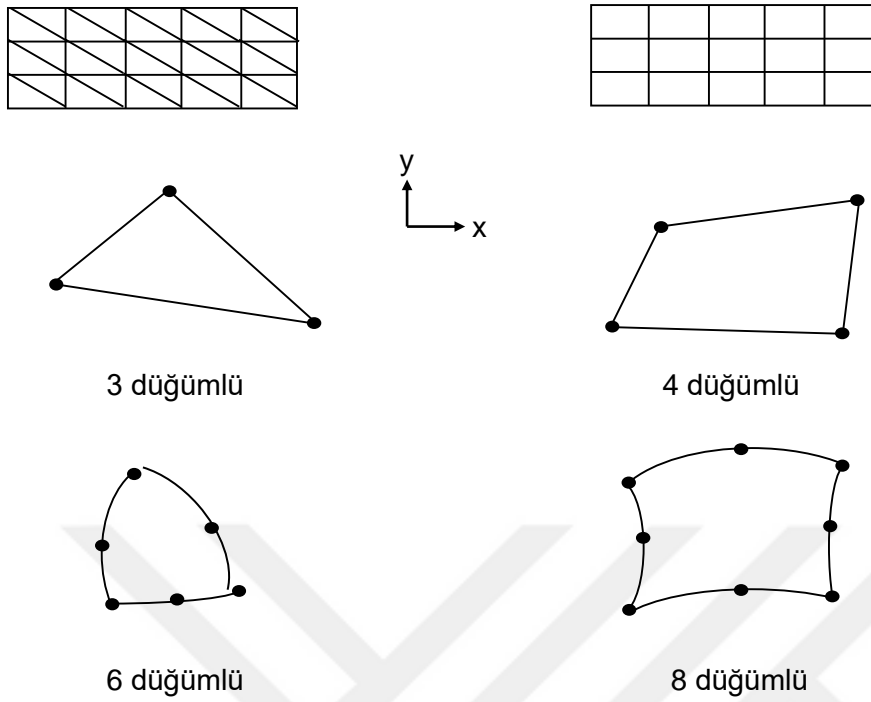
Zeinkiewicz (1977) bu yöntemi matematiksel olarak açıklanan sürekli sistemlerin genel çözüm metodu olarak tarif etmiştir. Bu yöntem ile birlikte sürekli bir sistemi matematiksel olarak modelleme imkânı vardır. Bu metotta, “sürekli bir sistem, kendi içinde sonlu sayıda bileşen veya elemanlardan ve bu elemanları birleştiren düğüm noktalarından oluşan ayırık

bir sistem olarak modellenmektedir” (Şekil 4.1.) [42]. Bu demektir ki, sistemi sonlu elemanlara bölerek, denklemler bir eleman gibi yazılarak ve entegre edilmek kaydı ile oluşturulan sistemim denklemleri elde edilir. Sonuç olarak devamlı ortam düşünülerek ele alınan “diferansiyel denklem” takımı “lineer denklem” takımına indirgenmiştir.



Şekil 4.1. Modelin sonlu elemanlara bölünmesi [42]

SEY’de, problemin geometrisi, yük durumu, sınır koşullarına bağlı olarak bir, iki ya da üç boyutlu olarak problem modellenebilir. Modelde dikkate alınan koşullara göre eleman seçimleri yapılır ve bu elemanlar problem tipine göre bir, iki ve üç boyutlu olabilir. Mesela düzlem deformasyon problemlerinde, problem iki boyuta indirgenerek üçgen ya da dörtgen elemanlar kullanılabilir (Şekil 4.2). Her elemanın kendi içinde düğüm noktaları yer almakta olup, istenilen çözüm hassasiyetine bağlı olarak düğüm sayıları değişkenlik gösterebilir. Düzlemsel ve eğrisel durumlar için seçilen eleman sayısı dolayısıyla düğüm sayıları değişkenlik göstermekte olup bazı tipik örnekler Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Farklı düğüm sayılarına göre elemanlar

Sonlu elemanlar yönteminde, model ağlara bölünerek birçok elemanda çözümlene yapılmaktadır. Ağlara bölünen elemanlar diğer komşu elemanlara düğüm noktaları ile bağlıdır. Bu nedenle deplasmanların bu noktalarda birbiri ile uyumludur ve büyük sistemlerde doğru sonuçlar elde edilebilmesi için eleman sayısının fazla olması gerekmektedir. Eleman sayısının artması da işlem hacmini dolayısıyla çözüm süresini uzatmaktadır. Çözüm süresinin daha kısa hale gelmesi de bilgisayar yardımı ile çözülmektedir.

Seçilen şekil fonksiyonu bilinmeyenlerin ortamda dağılımını ifade etmektedir. “Eleman düğüm noktaları, eleman bölgesinde bilinmeyen büyüklüğün (deplasman vb.) dağılım şeklini tanımlamak üzere matematiksel bir fonksiyon yazmak için imkân sağlamaktadır” [42]. Geoteknik alanında problemler genelde, deplasman metoduyla formülize edilir. Polinom ya da seriler şekil için fonksiyon belirlemek amacıyla kullanılmaktadır:

$$\{\delta\} = [N] \{d\}_e \quad (4.1)$$

Formülde,  $\{\delta\}$  elemanın deplasman bileşenlerini (rastgele bir yer),  $[N]$  şekil fonksiyonunda,  $\{d\}_e$ , elemanların düğüm noktalarındaki deplasmanlarını belirtmektedir. Elemanın şekil değiştirmeleri, “düğüm noktası deplasmanları cinsinden” ifadesi [42],

$$\{\varepsilon\} = [B] \{d\}_e \quad (4.2)$$

şeklinde yazılır. [B], eleman deformasyonu matrisini ifade eder.

Gerilmeler, “elastisite matrisi” [D] kullanılır, deformasyon ile ilişkilendirilir,

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} \quad (4.3)$$

şeklinde yazılır.

Sonraki aşamada kabul edilir bir varvasyonel mantık (enerjinin min. olması mantığı vs.) kullanıp her düğüm noktasında yer alan değer için bir denklem grubu elde edilir [42]:

$$\{f\} = [k] \{d\}_e \quad (4.4)$$

Denklemden,

{f} : “eleman yük vektörü”

[k] : “eleman rijitlik matrisi”

Her bir eleman için tek tek bulup (4.4) formülleri uygun bir biçimde birleştirilip bütün sistemi ifade eden cebri denklem takımı elde edilmiş olunur.

$$\{F\} = [K] \{d\} \quad (4.5)$$

Burada,

{F} : “sistem yük vektörü”

[K] : “sistem rijitlik matrisi”

{d} : “sistem deplasman vektörü değerini” belirtmektedir. Bu sistemin içerisine sınır koşullarına uygun satır/sütun işlemleri de dahil edilerek, indirgenmiş sistem elde edilmiş olunur [41].

#### 4.1.1. Geoteknik Mühendisliği’nde Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi öncelikle lineer-elastik davranış gösteren problemlerin çözümünde kullanılmaya başlanmıştır. Teorik çalışmalardaki gelişmelere paralel olarak nonlinear problemler de sonlu elemanlar ile çözülmeye başlanmıştır. Özellikle zeminin anizotrop ve heterojen yapısından dolayı nonlinear analiz yöntemi geoteknik problemleri için önemli bir gelişme olarak uygulanmaktadır. Geoteknik mühendisliğinde zemin ortamının gerilme durumu problemin çözümünde önemli etkiye sahiptir. Zira, zemini oluşturan boşluklar kısmen ya da tamamen suyla dolu olabilmekte, bu durum da zemin gerilme-deformasyon davranışını etkilemektedir. Bu nedenle zeminlerde gerilme kavramı

suyun varlığı dikkate alındığında toplam gerilme, nötr gerilme ve efektif gerilme olmak üzere 3 farklı şekilde değerlendirilmekte ve stabilite analizlerinde daha çok efektif gerilme kavramı dikkate alınmaktadır. Geoteknik problemlerinin diğer bir özel durumu da zemin ortamının beton, çelik gibi farklı malzemelerden üretilen yapısal elemanlarla temas halinde olup, gerilme değişimlerine karşı birlikte hareket etmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu etkileşim sırasında zemin ile yapısal elemanın temas yüzeylerindeki davranış kolayca modellenememekte, temas yüzey elemanlarının oluşturulup modellenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum geoteknik mühendisliği problemlerinde üst yapı analiz ve yapılan kabullerinden farklı durumları dikkate almayı gerektirmektedir [42].

Geoteknik problemlerin sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmesinde, uygulamada gerçekleştirilen safhalar birebir modellenmelidir. Böylece mesela, temel kazısına yönelik derin kazı çalışmalarında, modellemenin de adım adım ilerlemesi gerekir. Bu sayede her adımda ortaya çıkan zemin hareketleri, bir sonraki safha için modele dahil edilerek davranış gerçeğe yakın bir şekilde dikkate alınmış ve elde edilen gerilmeler, deformasyonlar ve zemin suyu davranışları her aşamada güvenilir olarak elde edilmiş olacaktır [43].

#### **4.1.2. Donatılı Zemin Davranışının Modellenmesi**

Donatılı duvarların sonlu elemanlar yöntemi ile analizinde, donatı-zemin arasındaki etkileşimin doğru bir şekilde modellenmesi gerekir. Genelde kompozit veya ayırık yöntemler olarak adlandırılan yaklaşımlar kullanılmaktadır.

Donatılı duvar sisteminde zemin ortamı homojen ve donatı ile beraber kompozit bir ortam oluşturan kompozit bir malzeme davranışı gösterdiği kabul edilir. Bu yöntem sistemin bütün bileşenlerini birlikte dikkate aldığından işlem daha kolaydır. Ancak, ortamın iç stabilitesi ile ilgili çıktı olmaması kompozit yöntemin eksikliğidir.

Ayırık yöntemde ise, zemin ortamı ile içerisinde kullanılan güçlendirme elemanı iki ayrı malzeme olarak dikkate alınır. Bu yöntemde ortamın iç stabilitesi ile ilgili çıktı alınmıyor olması kompozit yönteme göre üstünlüğüdür.

### 4.1.3. Zemin Davranışının Modellenmesi

Bu bölümün başında izah edilen gerekçelerden, geoteknik mühendisliği problemlerinin sayısal çözümünde sonlu elemanlar yönteminin kullanılması durumunda gerçeğe yakın çözüm elde edebilmek amacıyla, zeminin non-linear ve zamana bağlı davranışı dikkate alınmalıdır. Geoteknik mühendisliği projelerinde çözüm üretebilen sonlu elemanlar programları kütüphanesinde farklı zemin modelleri bulunmaktadır. Bunlar arasında ilk geliştirilen modellerden birisi olan hiperbolik zemin (HS) modeli yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu model Kondner (1963), tarafından ortaya atılmış olup daha sonra Duncan ve ark. (1970) geliştirilmiştir [46]. Model, geleneksel laboratuvar deney (üç eksenli basınç) sonuçlarından yararlanılarak geliştirilmiş olup, deformasyon eğrisinin hiperbole benzediği kabulüne dayanır. Model yapılan ilave düzeltmelerle drenaj durumu da dikkate alınarak geliştirilmiş ve modeli tanımlayan parametre sayısı 9 olmuştur.

Hiperbolik modeli, tanımlayan denklem aşağıdaki gibidir:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (4.6)$$

Burada;

- $(\sigma_1 - \sigma_3)$  : fark gerilme,
- $\varepsilon$  : “eksenel deformasyon”,
- a ve b : “malzeme sabitleri”dir.

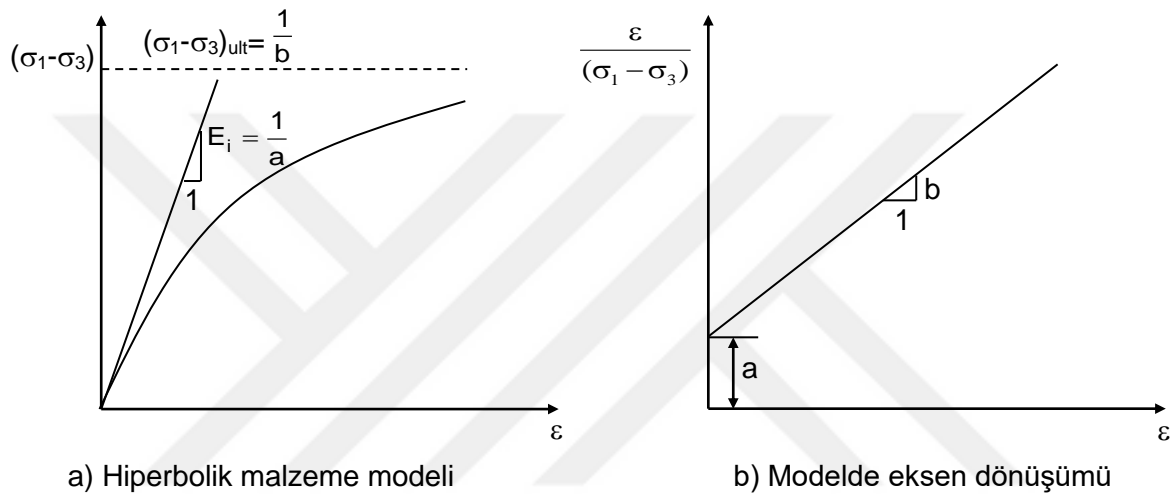
Burada asal gerilmeler eşit olduğunda ( $\sigma_1 = \sigma_3$ ) a sabitinin tersi başlangıç teğet elastisite modülü olarak kabul edilmekte ve  $E_i$  ifadesi ile tanımlanmaktadır (Şekil 4.3. (a)). Diğer sabit “b” parametresinin tersi ise, deformasyon eğrisine asimptot olan düşey eksen ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) değeri olarak kabul edilmektedir (Şekil 4.3.(a)).

Kondner (1963) malzeme parametrelerine ulaşabilmek amacıyla üç eksenli basınç deney sonuçlarından elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisini modifiye ederek, düşey eksen Şekil 4.3. (b)’de görüldüğü gibi değiştirmiştir. Denklem 4.6 ile benzer şekilde tekrar yazıldığında:



$$\frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = a + b\varepsilon \quad (4.7)$$

halini alır. “a ve b parametreleri sırasıyla düz çizginin, y eksenini kestiği nokta ve eğimidir” [46]. “Laboratuvar gerilme-şekil değiştirme datalarının Şekil 4.3.(b) deki gibi dönüştürülmüş formda çizilmesi, a ve b parametrelerinin belirlenmesini kolaylaştırmaktadır” [45-46].



Şekil 4.3. HS Modeli [45-46]

Sayısal analiz modelinde (sonlu elemanlar yöntemi) kullanılacak parametrelerin belirlenmesi için, teğet elastisite modülü,  $E_t$  ile fark gerilmenin  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  değişiminin oluşturulması için Denklem (4.6)’nın diferansiyeli alınır:

$$E_t = \frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial\varepsilon} = \frac{a}{(a + b\varepsilon)^2} \quad (4.8)$$

Model, zeminlerin non-linear, gerilme bağımlı ve elastik olmayan özelliğini göstermektedir. Hiperbolik zemin modeli, zeminin gerilme-deformasyon davranışında, gerilmenin artımı ile deformasyonların da kademeli olarak artmasından, zeminin non-linear davranış gösterdiği durumu dikkate almaktadır. Bu durumda yük artışına bağlı olarak, her adımda zemin gerilme-deformasyonu şekli doğrusal alınıp ve bu davranışın her adım için Hooke kanununa uyduğu kabul edilir [48].

## 4.2. Plaxis Programı

Çok farklı geoteknik problemlerinde, SEY ile şekil değiştirme ve stabilite analizleri yapabilen bilgisayar programı olarak PLAXIS (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis) karşımıza çıkmaktadır. “1987 yılında Hollanda Delft Teknik Üniversitesi tarafından yumuşak zemin üzerindeki nehir dolgularının sonlu elemanlar yöntemi ile kolay bir şekilde analiz edilebilmesi için tasarlanmıştır” [41]. Daha sonra süreçlerde, geoteknik mühendisliğinde başka diğer alanlardaki uygulamaları da içerisine alacak biçimde genişletildi. Plaxis, geoteknik mühendisliği projelerinde tasarım aşamasında talep edilen, “zemin-yapı etkileşimi”, “gerilme – deformasyon”, pekiştirme (konsolidasyon), taşıma gücü, akım ağı, zemin dinamiği konularını yanında malzemelerin farklı olması durumlarında kullanılabilen ve pratikte uygulanabilen sonuçlar vermektedir.

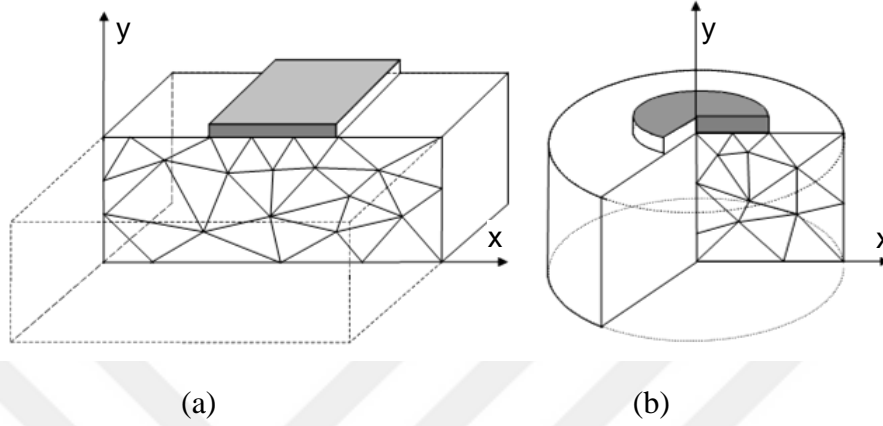
Bu çalışmada, PLAXIS 2D 2018 VIP programı kullanılmıştır. Program, geoteknik mühendisliği problemleri çözümüne karşılık geliştirilmiştir. Çözümlerde, problemler iki boyutlu olacak şekilde aksel simetrik veya düzlem deformasyon geometri koşulunda statik ve dinamik olarak çözümlenmektedir. Program ile birlikte, malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışları non-linear analiz teknikleriyle çözülebilmektedir. “PLAXIS, çok yönlü ve karmaşık bir yapı arz eden geoteknik uygulamaların analizi için önemli özelliklerle donatılmıştır. Aşağıda bu özelliklerin kısa bir özeti verilmiştir” [42].

### 4.2.1. Geometrik Modelin Oluşturulması

Plaxis 'de; “yapılar, kazı safhaları, zemin tabakaları, yükler ve sınır şartlarının girişi için özel bir grafik ortamı (CAD) kullanılır” [42]. Bu sayede plaxis içerisinde geometrik model, gerçek yerine uygun, gerçek ve detaylı olarak oluşturulmaktadır. Plaxis 'de, sorun tipine göre çözüm için düzlem deformasyonu veya “eksel simetrik” geometri koşullar kullanılır.

Düzlem deformasyonunda, cismin bir doğrultuda yer alan boyutun “z eksenini”, bu boyuta dik olan diğer iki doğrultuda yer alan boyutlarından fazla olması durumu söz konusu kullanılır. Bu durumun uygulanması için, “z” doğrultusunda yalnızca düzgün yayılı yükler etkisi olmalı ve “hacimsel kuvvetler” “z” doğrultusuna bağlı olmamalıdır (Şekil 4.4.'(a)) [47].

Çözülecek sorunun “z ekseni” çevresinde “çepeçevre simetrik” olmasında, şekil değiştirmeler ve “gerilmeler dönme açısından bağımsız” olur, bu sebep problem Şekil 4.4.(b)’de görüldüğü gibi alan üzerinde iki boyutlu sorun olarak ele alınabilir [47].

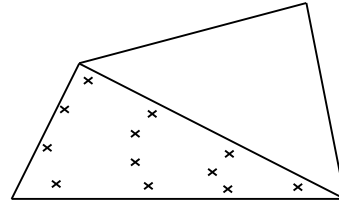
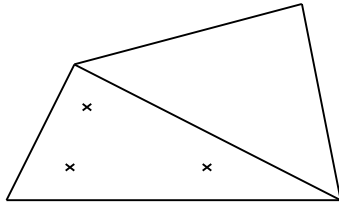


Şekil 4.4. “(a) Düzlem şekil değiştirme, (b) Eksenel simetrik problem” [47]

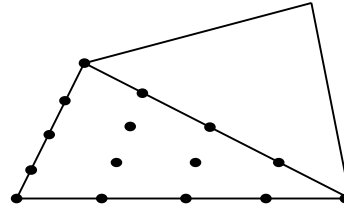
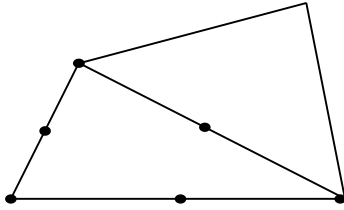
#### 4.2.2. “Elemanlar” [48]

##### 4.2.2.1. Zemin Elemanları

Plaxis ‘de oluşturulan zemin ortamı iki boyutlu üçgen elemanlara ayrılır. Programda, üçgen elemanlar 6 ve 15 düğüm noktalı olmak üzere iki şekilde yer alır (Şekil 4.5.) 15 düğüm noktalı elemanlar daha hassas analiz yaparlar, 6 düğüm noktalı elemanlara göre. “Sonlu elemanlar analizinde, deplasmanlar düğüm noktalarında, gerilmeler ise, düğümler yerine her bir Gauss-noktasında (veya gerilme noktasında) hesaplanmaktadır” [42].



Gerilme noktaları



Düğüm noktaları

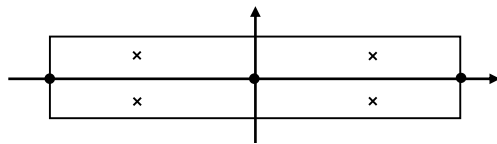
6 Düğümlü Üçgen Eleman

15 Düğümlü Üçgen Eleman

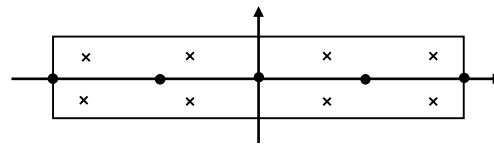
Şekil 4.5. “Zemin elemanlarında düğüm ve gerilme noktaları pozisyonu” [41]

#### 4.2.2.2. Kiriş Elemanları

Plaxis; plak, duvar ve temel gibi yapı elemanlarını 3 ya da 5 düğüm noktası olan farklı iki kiriş elemanı kullanılıp tanımlanır (Şekil 4.6.). Analizde, zemin elemanı 6 düğümlü ise kiriş elemanı 3 düğümlü, zemin elemanı 15 düğümlü ise, kiriş elemanı 5 düğümlü kullanılır. “Kiriş elemanı, Mindlin kiriş teorisine dayanılarak geliştirilmiştir” [42]. Teoride, kiriş elemanı eğilme ve kayma etkisi altında kalır. İlave olarak aksenal bir kuvvet uygulanırsa elemanın boyu değişir. “Kiriş elemanı daha önce tanımlanan eğilme momenti veya maksimum aksenal kuvvete ulaştığında plastik hale gelmektedir”[42]. Kiriş elemanlarının “malzeme özelliği” olarak plaxis’e “EI” ve “EA” değerleri girilir [41].



3 Düğümlü



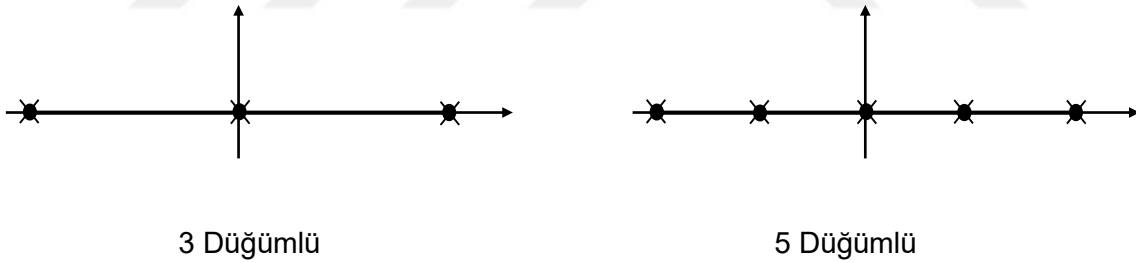
5 Düğümlü

Şekil 4.6. “Kiriş elemanı” [42]

El/EA oranındaki bir değişiminin, eşdeğer kalınlık (deq) ve gerilme noktalarını ayıran mesafeyi değiştireceğine dikkat etmek önemlidir. Bu oran, plaka üzerindeki kuvvetleri mevcut olduğunda yapılırsa, eğilme momentlerin dağılımını değiştirir, bu da kabul edilemez. Bu nedenle, bir plakanın malzeme özellikleri analiz sırasında değiştirilirse (örneğin Staged Construction çerçevesinde) El / EA oranının değişmeden kalması gerektiğine dikkat edilmelidir.

#### 4.2.2.3. Geogrid Elemanı

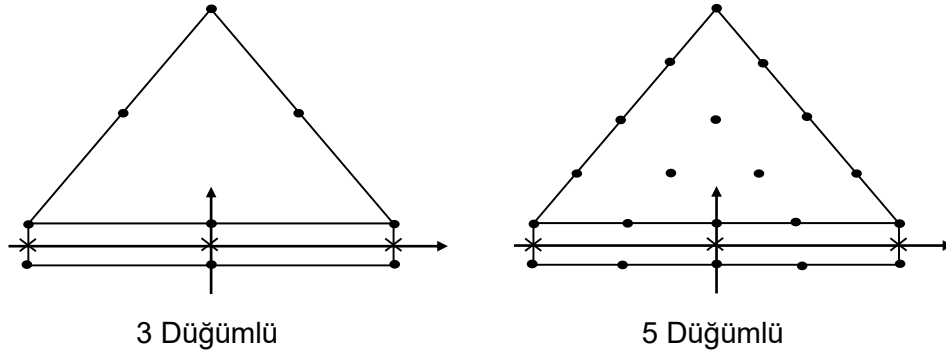
Plaxis 'de geoteknik problemin çözümü için kullanılacak olan donatı elemanı veya malzemesi geogrid elemanı olarak seçilmektedir. Geogridler; "EA"ya sahip, "EI"sı ise çok düşük malzemelerdir. Bu nedenle çekme çok dayanımı yüksektir ve basınç dayanımı ihmal edilir. Programda "malzeme özelliği" olarak "EA" değeri girilir. "Plaxis 'de geogridler, her düğüm noktasında iki serbestlik derecesine sahip ( $u_x$ ,  $u_y$ ) geogrid elemanlar kullanılarak tanımlanırlar" (Şekil 4.7.) [41]. Analizlerde 6 düğümlü seçilen zemin elemanı için geogrid elemanlar 3 düğümlü olarak, 15 düğümlü zemin elemanlı seçilir ise, geogrid elemanlar 5 düğümlü olarak tanımlanırlar.



Şekil 4.7. "Geogrid elemanı" [41]

#### 4.2.2.4. Ara Yüzey Elemanı

Donatı ve zemin ya da yapı ve zemin arasında etkileşimin modellenmesi sebebiyle ara yüzey elemanları kullanılmaktadır. Ara yüzey elemanları ile zemin elemanları birbirine bağlantısı Şekil 4.8.'de gösterilmiştir. Zemin elemanları 6 düğümlü olursa ara yüzey elemanı 3 düğümlü, zemin elemanı 15 elemanlı olursa ara yüzey elemanı 5 düğümlü şeklinde ifade edilir.



Şekil 4.8. ‘‘Ara yüzey elemanları ile zemin elemanlarının bağlantısı’’ [48]

‘‘Yapı ile zemin veya donatı ile zemin arasındaki etkileşimi, ara yüzey elemanı için uygun bir mukavemet azaltma faktörü ( $R_{inter}$ ) seçilerek modellenmektedir’’[42]. ‘‘Bu faktör, ara yüzey mukavemeti (çeper sürtünmesi ve adhezyon) ve zemin mukavemeti (sürtünme açısı ve kohezyon) ile ilişkilidir’’[41].

Ara yüz elemanları için rijitlik matrisi Newton Cotes entegrasyonu vasıtasıyla elde edilir. Newton Cotes gerilme noktalarının konumu düğüm çiftleri ile çakışır. Dolayısıyla, 10 düğümlü bir ara yüz elemanı için beş gerilme noktası kullanılırken 6 düğümlü bir ara yüz elemanı için üç gerilme noktası kullanılır.

#### 4.2.3. ‘‘Zemin Modelleri’’ [48]

Plaxis ‘de zeminini ve diğer ortamları (kaya, kum, çakıl vb.) davranışlarını modelleyebilmek için 7 farklı yöntem kullanılır. Bu yöntemleri ve parametreler aşağıda özetlenmiştir.

##### 4.2.3.1. ‘‘Lineer Elastik Model (LE)’’ [48]

LE modelde zemin ortamın gerilme şekil değiştirme davranışının Hooke kanununa uyduğu kabul edilmektedir. Zemin ortam izotrop lineer elastik bir malzeme olarak alınır. Modelde veri olarak ‘‘E’’ ve ‘‘ $\nu$ ’’ değerleri girilir. Bu model, zemin ortamı için davranışı tam olarak yansıtamaz. Bu nedenle çoğunlukla zemin ortamında bulunan yapısal elemanlar için geçerli malzeme modeli olarak dikkate alınır.

#### 4.2.3.2. “Mohr-Coulomb Model (MC)” [48]

Zeminin gerçek davranışına yakın, doğrudan elastik ya da tam plastik malzeme yerine, elasto-plastik davranışını dikkate alan zemin modelidir. Modelin kullanılması durumunda girilecek parametreler; “E”, “ $\nu$ ”, “c”, “ $\phi$ ” ve “ $\psi$ ”dir. Model kullanılırken önce gerçekçi bir sükûnet durumunda yanal basınç katsayısı ( $K_0$ ) belirlenip ortamın ilk gerilme ortamı oluşturulur. Zemin ortamı rijitlik parametresi olarak elastisite modülü, zemin profilinin tamamında sabit alınır. Model matematiksel çözümleri kısa sürede yapabildiğinden, analizlerde zemin ortamının şekil değiştirmelerinin ön bilgi olarak elde edilmesi amacıyla kullanılmaktadır.

#### 4.2.3.3. “Jointed-Rock Model (JR)” [48]

Bu model özellikle tabakalaşma ve belirli hata yönlerini (kesme düzlemleri) içeren kaya katmanlarının davranışını modellemek için kullanılan anizotropik elastik-plastik bir modeldir. Her bir düzleme ait parametreler “ $\phi$ ” ve “c”dir. Bozulmamış kaya, sabit sertlik özellikleri “E” ve “ $\nu$ ” ile tamamen elastik olarak kabul edilir. Bunların dışında analizlerde dilatasyon açısı, “ $\psi$ ” değerleri kullanılır. Daha düşük elastik özellikler tabakalaşma yönü için tanımlanabilir.

#### 4.2.3.4. “Soft Soil Model (SS)” [48]

Literatürde “soft soil (SS)” olarak isimlendirilen zeminler genellikle oturma sorunları oluşturabilecek özellikte ve zayıf dayanım gösteren özelliktedir. Bu tür zemin ortamları için SS model kullanılır. Model sonuçları başlangıç sıkışma durumları için daha gerçekçi sonuç verir. Model veri parametreleri; “c”, “ $\phi$ ”, “ $\psi$ ”, “ $\lambda^*$ ”, ve “ $\kappa^*$ ” değerleridir [48].

#### 4.2.3.5. “Soft Soil Creep Model (SSC)” [48]

Bu model, yumuşak zemin ortamlar için zamana bağlı davranışı modellemek için önerilmektedir. Uygulama örnekleri olarak, yapı temelleri ve dolgularda uzun süreli oturma problemleri ve tünel, derin kazı gibi büyük zemin hareketleri olan ortamlardaki

örnekler için kullanılabilir. Modelde veri olarak, “c”, “ $\phi$ ”, “ $\psi$ ”, “ $\lambda^*$ ”, “ $\kappa^*$ ” ve “ $\mu^*$ ” değerleri girilir [48].

#### 4.2.3.6. “Hardening Soil Model (HS)” [48]

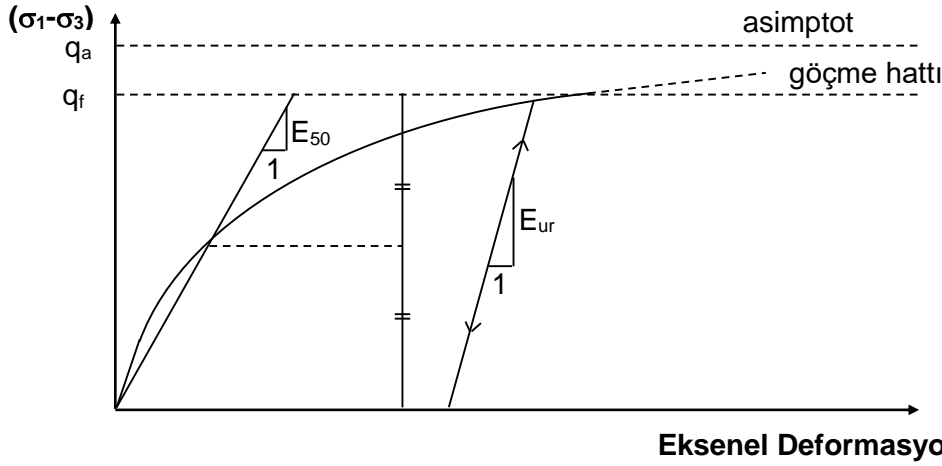
Bu model, yumuşak ve sert zemin ortamları için önerilmektedir. MC modelinin geliştirilmiş bir üst modelidir. Pekleşen zemin modelinde, gerilme bağımlı rijitlik modülü ön plana çıkar. Bu modelde basıncın artmasıyla zemin rijitliği de artar. Şekil 4.9’da görüldüğü gibi model, drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen aksel deformasyon-fark gerilme ilişkisini yaklaşık hiperbol kabul eder [42]. Bu bağıntıyı ilk öneren Kondner (1963) olmuştur. Daha sonra, Duncan ve Chang (1970) modeli geliştirmiş ve model “hiperbolik zemin modeli” şeklinde isimlendirilmiştir. Bu model hiperbolik zemin modeline göre bazı farklılıklar içermektedir. Öncelikle, model elastisite teorisini yerine daha çok plastisite teorisini kullanmaktadır. Ayrıca, bu model zemin dilatasyon davranışını da kapsamaktadır. Son olarak, modelin akma başlığı (yield cap) içermesi önemli bir farklılıktır.

Modelde öne çıkan hususlar;

- Rijitliğin gerilmeye bağlı oluşu (ilgili parametre, m),
- Fark yükleme ile oluşan plastik şekil değiştirmeler (ilgili parametre,  $E_{50}^{ref}$ ),
- Sıkışma ile ortaya çıkan plastik şekil değiştirmeler (ilgili parametre  $E_{oed}^{ref}$ ),
- Elastik boşaltma/yükleme davranışı (ilgili parametre  $E_{ur}^{ref}$ ,  $\nu_{ur}$ ),
- Mohr-Coulomb modeli göçme (ilgili zemin parametreleri, c,  $\phi$  ve  $\psi$ ).



### Deviatör Gerilme



Şekil 4.9. “Drenaj koşulunda laboratuvar üç eksenli deneyinde hiperbolik gerilme şekil değiştirme ilişkisi” [42]

“HS model” formülündeki ana fikir, üç eksenli basınç deneyi sonucundaki verilere bakıldığında “düşey deformasyon” ( $\varepsilon_1$ ) ve “deviatörük gerilme” ( $q$ ) arasında hiperbolik bir ilişki vardır (Şekil 4.9). “HS Modelde hiperbol denklemleri”;

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1 - q/q_a} \quad (q < q_f \text{ için}) \quad (4.9)$$

şeklinde yazılır [41]. Burada  $q_a$ , içsel sürtünme açısının asimptot olduğu veridir.  $E_{50}$  ise, Denklem 4.10’da bahsedilen, başlangıç yüklemesi esnasındaki gerilme ile bağımlı olan “rijitlik modülüdür”:

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left( \frac{c \cos \phi - \sigma'_3 \sin \phi}{c \cos \phi + p^{\text{ref}} \sin \phi} \right)^m \quad (4.10)$$

“Buradaki  $E_{50}^{\text{ref}}$ , referans çevre basıncı,  $p^{\text{ref}}$ , değerine karşılık gelen referans rijitlik modülüdür” [42]. “Rijitlik modülü”, “üç eksenli basınç” deneyinde yer alan “çevre basıncına” maruz kalan “küçük asal gerilme”, “ $\sigma'_3$ ” verisine bağlı kalmaktadır. Basınç olmasından dolayı “ $\sigma'_3$ ” verisinin işareti eksidir. Modelde yer alan “gerilme seviyesi” üs değeri “ $m$ ” ile kontrol edilir. Göçme anındaki “deviatörük gerilme”, “ $q_f$ ” ve “deviatörük gerilmenin” asimptot kaldığı “ $q_a$ ” verisi düzenekte aşağıdaki yer alan denklemler ile tanımlanır [42]:

$$q_f = (c \cot \phi - \sigma'_3) \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4.11)$$

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (4.12)$$

“ $q_f$ ” verisi, “ $c$ ” ve “ $\phi$ ” verileri kullanılarak MC göçme kriterinden hesaplanır. Bu nedenle, “ $q=q_f$ ” olduğu zaman MC modeline göre göçme olur ve tam plastik akma meydana gelir. “ $q_f$ ” ve “ $q_a$ ” arasındaki oran, “göçme oranı”, ( $R_f$ ), olarak ifade edilir. “ $R_f$ ” değeri her daim 1’den küçüktür.

Modelde, “boşaltma–yükleme rijitlik modülü” için, aşağıdaki denklem kullanılır:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cos \phi - \sigma'_3 \sin \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)^m \quad (4.13)$$

“ $E_{ur}^{ref}$ ”: “Referans çevre basıncı”, “ $p^{ref}$ ”: “referans Young modülü” [42].

#### 4.3.3.7. “Hardening Soil model with small-strain stiffness (HSsmall)” [48]

Bu model Hardening Soil model için belirlenen tüm parametrelere ilave olarak küçük birim deformasyon rijitliğinde zeminin artan rijitliğini de dikkate almaktadır. Düşük birim deformasyon seviyelerinde çoğu zemin, mühendislik birim deformasyon seviyelerinden daha yüksek bir sertlik sergiler ve bu sertlik birim deformasyon ile doğrusal olmayan şekilde değişir. HSsmall modelde başlangıç birim deformasyon geçmişi modülü, küçük birim deformasyon kayma modülü  $G_0^{ref}$  ve kayma modülünün küçük deformasyon kayma modülüne göre %70 azalması durumundaki birim deformasyon seviyesi  $\gamma_{0.7}$  parametreler mevcuttur. HSsmall modelinin gelişmiş özellikleri, çalışma yükü koşullarında daha belirgindir. Bu model, Hardening Soil model modelinden daha güvenilir yer değiştirmeler sağlar.

#### 4.2.4. Hassaslık Analizi ve Parametre Değişimi

Günümüzde geoteknik mühendisliği projelerindeki en büyük zorluk zemin ortamının gerçekçi olarak sonlu elemanlar yönteminde tanımlanmasıdır. Çoğu zaman zemin özelliklerinin gerçeğe göre çok daha iyi ya da çok daha kötü tanımlanması nedeniyle ekonomik olmayan ya da güvenilir olmayan projelendirme durumları ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan bir geoteknik tasarımda

hangi parametrenin sonuca ne kadar etki ettiğinin bilinmesi önem arz etmektedir. Bunun gerek zeminin gerekse geoteknik modeldeki diğer yapısal elemanların malzeme özelliklerinin minimum ve maksimum değerlerinin de analizde kullanılarak en iyi ve en kötü durumların irdelenmesi önemlidir. Ancak bu tür problemlerde birçok parametre etkisinin araştırılması model sayısını arttırmakta ve hesap sürecini uzatmaktadır. Plaxis 2D 2018 VIP programında kullanıcılara sunulmuş olan “Hassaslık Analizi” özelliği ile tek bir model üzerinden birçok parametrenin probleme etkisi incelenebilmektedir [48].

Hassaslık Analizi ve Parametre Değişimi, her bir zemin özelliğinin değişiminin sonuçlar üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılır. Hassaslık Analizi parametrelerin doğru bir şekilde belirlenememesi durumunda yararlı bir analiz olabilir. Böyle bir durumda, belirli kriterler karşısında *Hassaslık sayısı* değerlendirmek için parametrelerin tek tek değiştirildiği bir hassaslık analizi yapılabilir [40]. Hassaslık sayısı, parametrelerin hangisinin büyük ve küçük bir etkiye sahip olduğunu değerlendirmek için kullanılabilir. Daha sonra, büyük etkiye sahip olan parametrelerin birlikte değiştirildiği zaman beklenen sonuçların aralığını değerlendirmek için bir “Parametre Değişimi” analizi gerçekleştirilebilir.

#### 4.2.4.1. Plaxis Yazılımı İle Hassaslık Ve Parametre Değişimi Analizi

Plaxis yazılımıyla “Hassaslık ve Parametre Değişimi Analizi” aşağıdaki sırayla yapılır:

- ✓ Öncelikle model seçilmiş bulunan başlangıç verileriyle çözülür. Böylece modelde herhangi bir sorun olmadığı görülür.
- ✓ Hesaplama modülünde *Calculate* sekmesinden Hassaslık Analizine geçilir (*Calculate*->*Sensitivity*->*Run Analysis*). Bu sırada bitmiş hesap adımları tekrar hesaplanabilecek şekilde işaretlenmelidir.
- ✓ Çıkan ekranda “Parametreler seçimi” (*Select parameters*) sekmesinde girilir.
- ✓ Bu sayfada hassaslık analizi yapılacak parametrelerin seçimi yapılır. Seçimler zemin özellikleri yanında plak, ankraj kökü ve ankraj gövdesi ile ilgili parametreler için de yapılabilir. Seçilen her bir parametre için olası minimum ve maksimum değerler girilir.
- ✓ Daha sonra, hassaslık sayısı hesaplanması için bir kriter eklenecek.

Kriterler;

*Deplasman kriteri*

Bu kriterde hassaslık sayısı hesaplanması deplasmanlara dayanmaktadır. Hesaplamalar, toplam deplasman (U), x

yöndeki deplasmanları ( $U_x$ ) veya y yöndeki deplasmanlar ( $U_y$ ) ile yer değiştirme durumunda belirtilebilir.

#### *Gerilim-Gerinim*

Hassaslık sayısı hesaplanması, gerinim veya gerilme kriterlerine dayanmaktadır. Bu kriter, Kartezyen efektif gerilme, aşırı boşluk basıncı veya toplam kartezyen gerinimleri gibi farklı seçenekler belirlemek mümkündür.

#### *Ulaşılan değerler*

Hassasiyet sayısı hesaplanması, her bir aşama için ulaşılan değerlere dayanmaktadır. Bu kriterde, x veya y yönünde Ulaşılan kuvvet,  $\sum M_{sf}$ ,  $\sum M_{stage}$ , Ulaşılan toplam süre veya Ulaşılan maksimum boşluk basıncı gibi farklı seçenekler bulunmaktadır.

- ✓ Farklı kriterleri seçtikten sonra, bir sonraki adım Run analysis tıklayarak hassasiyet analizini gerçekleştirilmesidir. Hesaplama tamamlandıktan sonra alt panelde tüm parametreler ve her adımın başarılı olup olmadığına dair bir genel bakış mevcuttur.
- ✓ Sonuçlara etkisi az olan parametreler seçim dışına çıkarılarak Parametre Değişimi analizine geçilir. (*Calculate* → *Parameter Variation* → *Run Analysis*)
- ✓ Parametre Değişimi analizi sonrasında oluşturulan, maksimum ve minimum değerlerden elde edilen sonuçlara bakılabilir.

#### **4.2.4.1.1. Parametre Değişimi**

“Parametre Değişimi” seçeneği, incelenecek her bir parametrenin alt ve üst sınırları kullanılarak olası tüm kombinasyonların oluşturulması ve bu değerlerin kullanıldığı bütün modellerin çözümünü içerir. Buna göre doğal gerilmeler ana modelde hesaplandıktan sonra bütün kombinasyonlar için tüm aşamaların ayrı ayrı hesaplanması gerekmektedir. İncelenecek zemin özelliği sayısı n ise,  $2^n+1$  (+1 ana modeli göstermektedir) sayıda modelin tamamının çözülmesi gerekir. Eğer incelenmesi istenen özellik sayısı (n) çok fazla ise bu durumda çözüm süresi saatler belki de günler alabilecektir. n=2 olan bir modelde çözülecek hassaslık analizi ve parametre değişimi analizi sayısı 5 iken, incelenecek özellik sayısı n=6 iken çözüm sayıları 13 ve 65 olmaktadır. Bazı parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisi diğerlerine göre çok daha fazla, bazılarınınki de ihmal edilebilecek düzeyde az olabilmektedir. Bu nedenle çözüm yapılacak kombinasyon

sayısının azaltılması için öncelikle her bir parametrenin etkisinin ‘‘Hassaslık Analizi’’ yapılarak belirlenmesi, etkisi az olanların çözümlerden elenmesi gerekmektedir. Birden fazla kriterler tanımlandığında, hassaslık sayısı, tüm kriterlerin sayılarının ağırlıklı ortalamasını temel alır [40].

#### 4.2.4.1.2. Hassaslık Analizi Teorisi

Hassaslık sayısı ( $\eta_{SS,i}$ , *sensitivity score*) önemli belirsizlik kaynaklarını değerlendirmek için, diğer yöntemlerle (örnek; Hassaslık oranı, EPA (1999)) kıyaslanırsa daha sağlam bir yöntemdir [48].

Hassaslık sayısı değişkenlerin sıfır değerini (örneğin su seviyeleri, geometriler) işleyebilir ve değişkenlerin yüzde değişimine referans değerine duyarlı değildir. Tek bir kriterle ilgili  $x_i$ 'nin belirli bir parametresinin global skoru şu şekilde hesaplanır:

$$\eta_{SS,i} = |f(x_{i,max}) - f(x_{i,min})| \quad (4.14)$$

Burada  $f(x_{i,max})$ ,  $x_i=x_{i,max}$  olduğunda elde edilen sonuç ve  $f(x_{i,min})$ ,  $x_i=x_{i,min}$  olduğunda elde edilen sonucudur. Eğer n parametreleri değişirse,  $x_i$ 'nin hassaslık sayısı;

$$X_{i,score} = 100 \eta_{SS,i} / \sum_{i=1}^n \eta_{SS,i} \quad (4.15)$$

Yapılan hassaslık analizi ile her bir değişken (elastisite modülü, kayma direnci açısı, vb.), her bir hesap aşaması (kazı, yükleme, vb.) ve her bir sonuç (deplasman, kuvvet, güvenlik sayısı, vs.) için hassaslık sayısı ( $\eta_{SS,i}$ ) hesaplanır. Hassaslık sayılarının kullanımı ile hassaslık matrisi oluşturulur (Çizelge 1). Her bir değişken için toplam hassaslık sayısı ( $\sum \eta_{SS,i}$ ), her bir hesap aşamasında elde edilen hassaslık sayılarının toplamına eşittir [48].

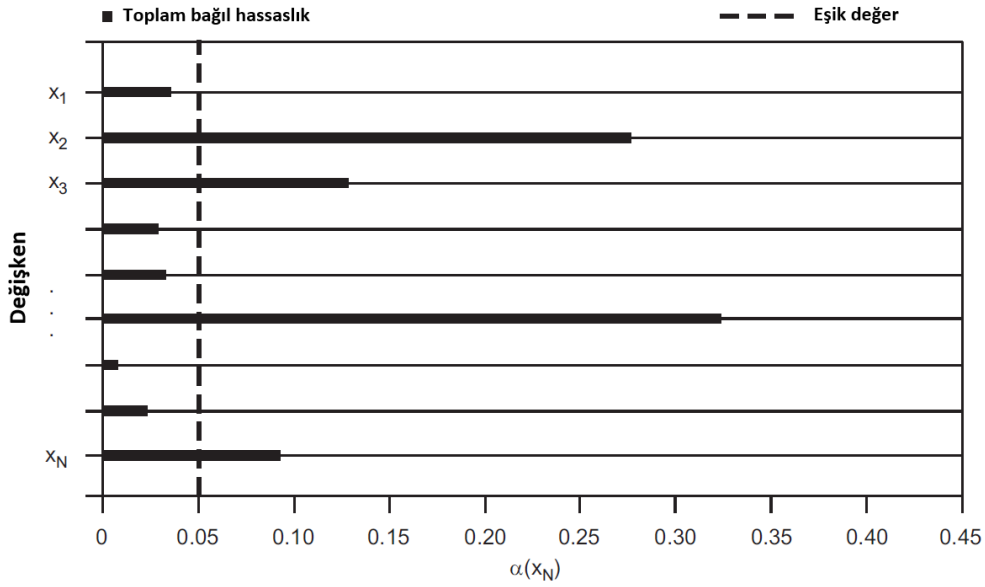
Çizelge 4.1. Hassaslık matrisi

	Sonuçlar					
	A	B	...	Z	□	□
Girdiler						%
$x_1$	$\eta_{SS,A1}$	$\eta_{SS,B1}$	...	$\eta_{SS,Z1}$	$\sum \eta_{SS,1}$	$\alpha(X_1)$
$x_2$	$\eta_{SS,A2}$	$\eta_{SS,B2}$	...	$\eta_{SS,Z2}$	$\sum \eta_{SS,2}$	$\alpha(X_2)$
:	:	:	:		:	:
:	:	:	:		:	:
$x_N$	$\eta_{SS,AN}$	$\eta_{SS,BN}$	...	$\eta_{SS,ZN}$	$\sum \eta_{SS,N}$	$\alpha(X_N)$

Hassaslık analizi sonuçları kullanıcı tarafından seçilen sonuç değerlerine doğrudan bağlı olduğu için hangi sonuçların inceleneceği bir mühendislik öngörüsü gerektirmektedir. m çoklu kriterler durumunda, her bir  $x_i$  parametresi için,  $\eta_{SS,i}$  her bir j kriterine ( $\eta_{SS,i}$ )<sub>j</sub> göre hesaplanır ve  $j=1, 2, \dots, m$ . Son olarak, her bir değişken için toplam bağıl hassaslık  $\alpha(X_i)$  şöyle verilir;

$$\alpha(x_i) = 100 \frac{\sum_{j=1}^m (\eta_{SS,i})}{\sum_{j=1}^m \sum \eta_{SS,i}} / m \quad (4.16)$$

Şekil 4.10.'da her bir değişken için toplam bağıl hassaslık  $\alpha(X_i)$  diyagram halinde göstermektedir.



Şekil 4.10. Toplam bağıl hassaslık diyagram [48]

## 5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODEL ANALİZİ

Bu tez çalışması kapsamında donatılı duvarların davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizi kapsamında 10m yüksekliğinde bir duvar yapısının tek ve iki kademeli inşa edilmesi durumunda donatı boyu, sürşarj yükü ve palye genişliği gibi parametreler araştırılmıştır. Ayrıca hassaslık analizleri yapılarak dolgu, zemin, yüzey elemanı ve donatının özelliklerinin değişmesi durumunda davranışın değişimi incelenmiştir. Analizler Plaxis 2D 2018 VIP programı kullanılarak yapılmıştır.

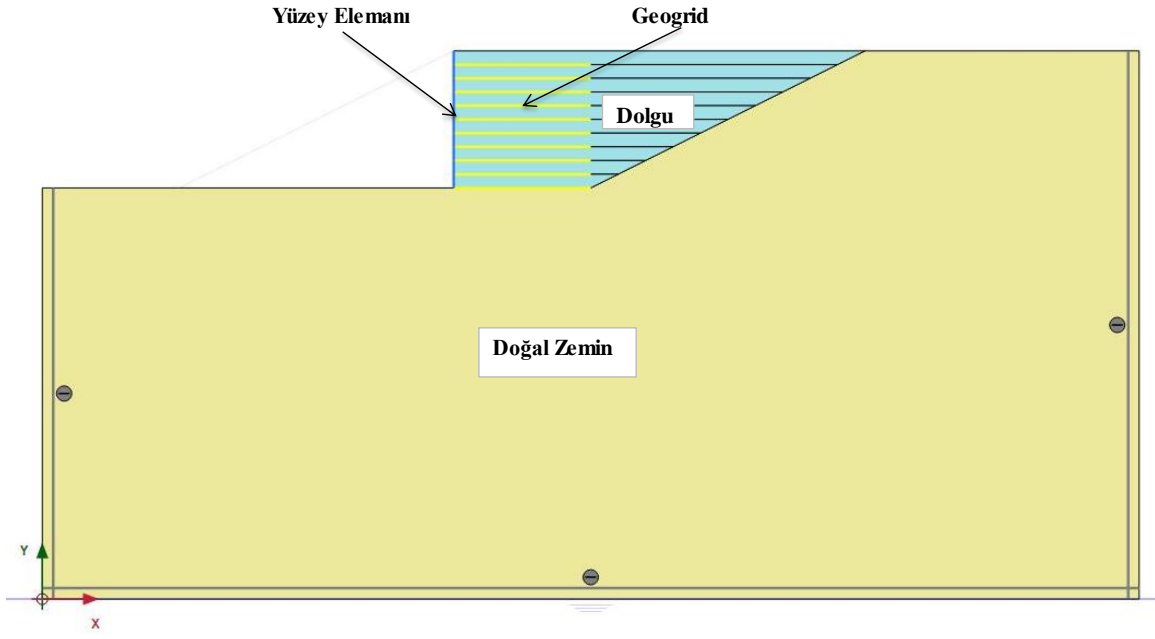
### 5.1. Analiz Programı

Analizlerde Plaxis 2D 2018 VIP bilgisayar programı kullanılarak geometrik modelin, iki boyutlu oluşturulması, çözüm bekleyen probleme uygun olarak düzlem deformasyon koşullarında oluşturulur. Üç farklı model üzerinde üç seri analiz gerçekleştirilmiştir.

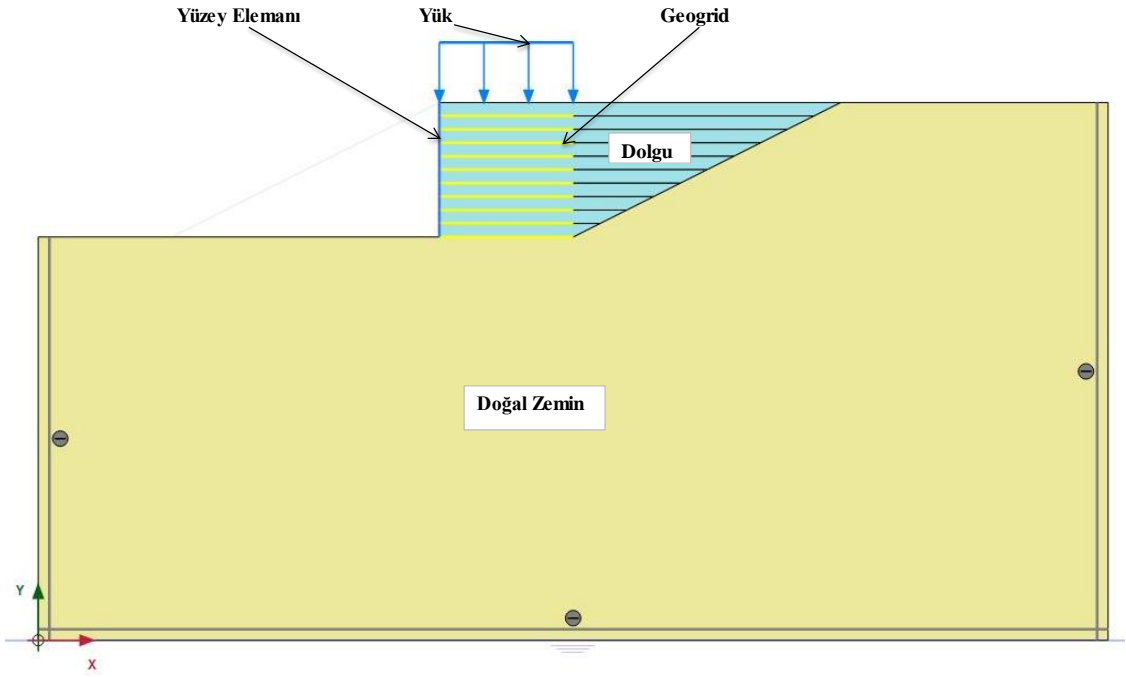
Birinci seri analizlerde 10m yüksekliğinde 1m donatı aralığında oluşturulan bir donatılı duvar sistemine yük etkimesi durumunda zemin özelliklerinin, duvar dolgusu özelliğinin, donatı ve yüzey elemanının eğilme ve aksenal rijitliklerinin davranışına etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla yapılan analizlerde kullanılan problem geometrisi Model-1 olarak adlandırılmış olup, model Şekil 5.1.'de gösterilmektedir.

İkinci seri analizlerde donatı boyunun değiştirilmesi durumunda zemin özelliğinin, dolgu özelliğinin, donatı ve yüzey elemanının rijitliklerinin etkisi incelenmiştir. Donatı boyu ile ilgili değişken parametreler Şekil 5.2.'de sunulmaktadır.

Üçüncü seri analizlerde ise 10m yüksekliğindeki duvarın iki kademeli olarak inşa edilmesi durumunda kademe aralığının davranışa etkisi incelenmiştir. Araştırılan parametrelerin gösterildiği Model-3 Şekil 5.3.'de gösterilmektedir.

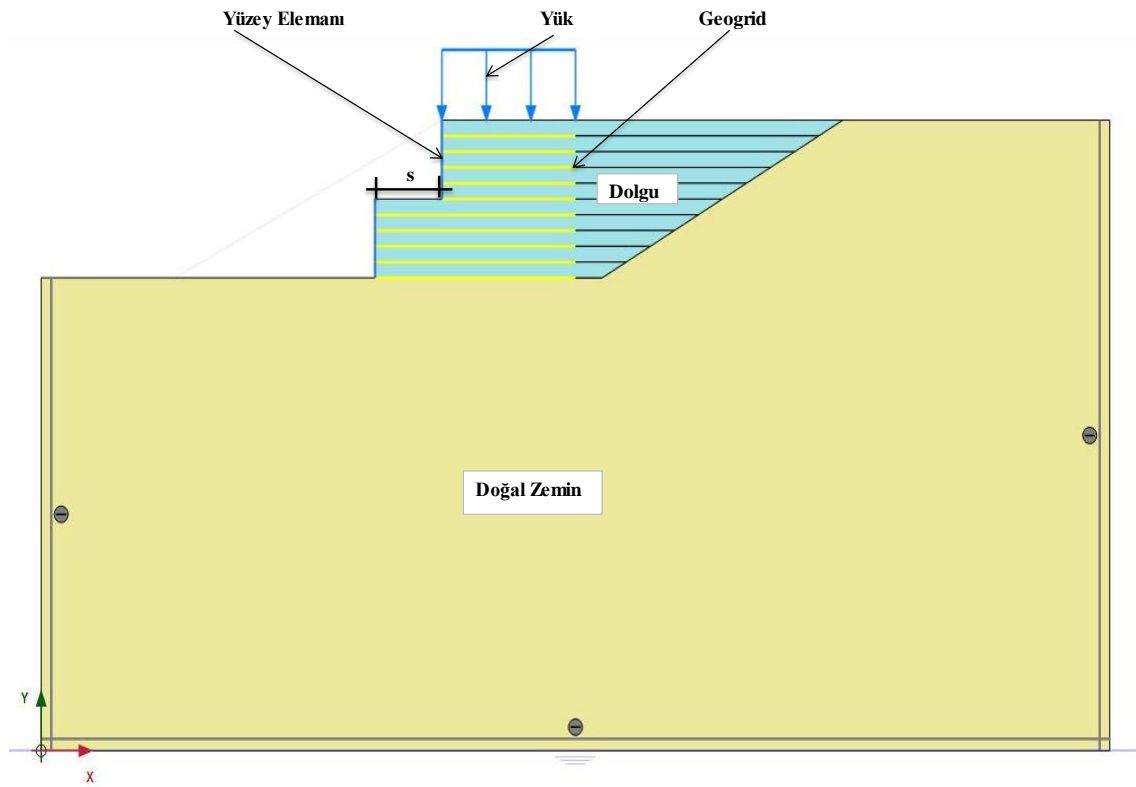


Şekil 5.1. Birinci seri analizlerde kullanılan Model-1



Şekil 5.2. İkinci seri analizlerde kullanılan Model-2





Şekil 5.3. Üçüncü seri analizlerde kullanılan Model-3

## 5.2. Malzeme Özellikleri

### 5.2.1. Model Zemin

Donatılı duvarın inşa edileceği alanın zemininin tanımlanmasında Mohr Coulomb (MC) Zemin modeli kullanılmıştır. Donatılı duvarda kullanılan malzeme özelliklerinin etkisinin daha doğru bir şekilde belirlenmesi amacıyla zeminde göçme olmayacak şekilde davranış gösterecek iyi zemin koşulları tanımlanmıştır. Başlangıç zemin koşullarının tanımlandığı modelde zemin rijitliği E değeri derinlik boyunca sabit kabul edilmiştir. Analizlerde kullanılan doğal zemin parametreleri Çizelge 5.1.'de özetlenmektedir.

Çizelge 5.1. Doğal zemin için MC model parametreleri

Parametre Adı	Simge	Birim	Değer
Birim hacim ağırlığı	$\gamma_n$	kN/m <sup>3</sup>	18
Doygun birim hacim ağırlığı	$\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	20
Elastisite modülü	E	kN/m <sup>2</sup>	80000
Poisson oranı	$\nu$	-	0.40
Kohezyon	c	kN/m <sup>2</sup>	5.0
Kayma mukavemet açısı	$\phi$	(°)	45
Dilatasyon açısı	$\psi$	(°)	15

### 5.2.2. Dolgu Malzemesi

Duvar imalatında kullanılacak geri dolgu malzemesinin kontrollü olarak imal edileceği düşünülmesi nedeniyle analizlerde Mohr Coulomb (MC) modeli kullanılarak modelleme yapılmıştır. Dolgu malzemesine ait özellikler Çizelge 5.2.'de sunulmaktadır.

Çizelge 5.2. Dolgu malzemesi için MC model parametreleri

Parametre Adı	Simge	Birim	Değer
Birim hacim ağırlığı	$\gamma_n$	kN/m <sup>3</sup>	18
Doygun birim hacim ağırlığı	$\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	20
Elastisite modülü	E	kN/m <sup>2</sup>	40000
Poisson oranı	$\nu$	-	0.35
Kohezyon	c	kN/m <sup>2</sup>	5.0
Kayma mukavemet açısı	$\phi$	(°)	35
Dilatasyon açısı	$\psi$	(°)	5

### 5.2.3. Geogrid Donatı Tabakaları

Donatı elemanının modellenmesinde Plaxis programında tanımlanan geogird malzemesi seçilmiş olup, piyasada kullanılan ve çekme gerilmeleri ile uzama miktarları dikkate alınarak belirlenen aksel rijitlik (EA) değerleri analizlerde kullanılmıştır. Kullanılan donatı özellikleri Çizelge 5.3.'de sunulmaktadır. Malzemenin izotropik davranış göstermesi için iki aksel rijitlik değeri programa girilmiştir.

Çizelge 5.3. Geogrid elemanı parametreleri

Parametre Adı	Simge	Birim	Değer
Eksenel rijitlik	EA <sub>1</sub>	kN/m	2000
Eksenel rijitlik	EA <sub>2</sub>	kN/m	2000

### 5.2.4. Yüzey Eleman

Donatılı duvarda ön yüzey elemanı Plaxis programı içinde tanımlanan “plate” eleman kullanılarak tanımlanmıştır. Ön yüzey elemanının kalınlığı aksel rijitlik ve eğilme rijitliği parametreleri kullanılarak belirlenmiştir. Kullanılan yüzey eleman kalınlıkları uygulamada sık kullanılan kalınlardan seçilmiştir. Analizlerde kullanılan yüzey elemanlarının özellikleri Çizelge 5.4.'de sunulmaktadır.

Çizelge 5.4. Yüzey elemanı parametreleri

Parametre Adı	Simge	Birim	Değer
Ağırlık	w	kN/m <sup>2</sup>	0
Kalınlık	d	m	0.15
Eksenel rijitlik	EA <sub>1</sub>	kN/m	45x10 <sup>5</sup>
Eksenel rijitlik	EA <sub>2</sub>	kN/m	45x10 <sup>5</sup>
Eğilme rijitliği	EI	kNm <sup>2</sup> /m	8438

## 5.4. Sonlu Elemanlar Analizleri

Tez çalışması kapsamında yapılan analizler ve analiz sonuçları bu başlık altında ele alınmaktadır. Analizler dört farklı seri olarak ele alınmıştır. Seri 1’de yük etkisinin, Seri 2’de geogrid boyunun ve Seri 4’de palye (kademe) yapılmasının problemde hassasiyeti analizi edilmiştir. Seri 3’de ise kademeli (palyeli) donatılı duvarda S/H ve yükün dikkate alınmasının probleme etkileri araştırılmıştır. Analizlerde aynı yükseklikteki bir duvarın davranışına etkileyen farklı parametreler kullanılarak deplasman ve güvenlik sayısı (MSF) karşılaştırılmıştır.

### 5.4.1. Seri 1: Hassaslık Analizi ile Yük Etkisinin Araştırılması

Bu seri analizlerde daha önce oluşturulan Model 1 ve Model 2 kullanılarak 10m yükseklikteki donatılı duvara sürşarj yükünün etkimesi ve yük olmaması durumları araştırılmıştır. Bu amaçla doğal zemin, dolgu malzemesi, yüzey elemanı ve donatı elemanının özellikleri belirli sınırlar arasında seçilerek, bu sınırlar aralığında hassaslık analizleri yapılmıştır. Dolgu ve doğal zemin mukavemet parametreleri, yüzey elemanı eğilme rijitliği, donatı aksel rijitliği minimum, maksimum ve ortalama değerleri Çizelge 5.5.’de sunulmaktadır. Bu parametreler oluşturulurken ana model analizlerinde kullanılan parametreler referans olarak kabul edilmiştir. Referans parametrelere göre analizler yapıldıktan sonra minimum ve maksimum değerler arasında hassaslık analizi yapılarak söz konusu parametrelerin sonuçlara etkileri incelenmiştir.

Çizelge 5.5. Hassaslık (sensitivite) parametreleri

Model (Geogrid L=10m)		Min.	Ref.	Max
Dolgu	$\phi$ (°)	20	35	45
	E (kN/m <sup>2</sup> )	20000	40000	80000
Zemin	$\phi$ (°)	30	45	55
	E (kN/m <sup>2</sup> )	40000	80000	120000
Geogrid	EA <sub>1</sub> (kN/m)	1000	2000	4000
Yüzey Elemanı	EI(kNm <sup>2</sup> /m)	1837.5	8438	23430

Duvarın yüklü ve yüksüz olması durumları için yapılan analizler sonucunda deplasman değerleri ve güvenlik katsayıları elde edilmiştir. Yüksüz durum için elde edilen deplasman

değerleri ve güvenlik katsayıları (MSF) Çizelge 5.6.'da özetlenmektedir. Yüklü analiz için elde edilen sonuçlar ise Çizelge 5.7.'de sunulmaktadır.

Çizelge 5.6. Yüksüz durumda sensitivite analiz sonuçları

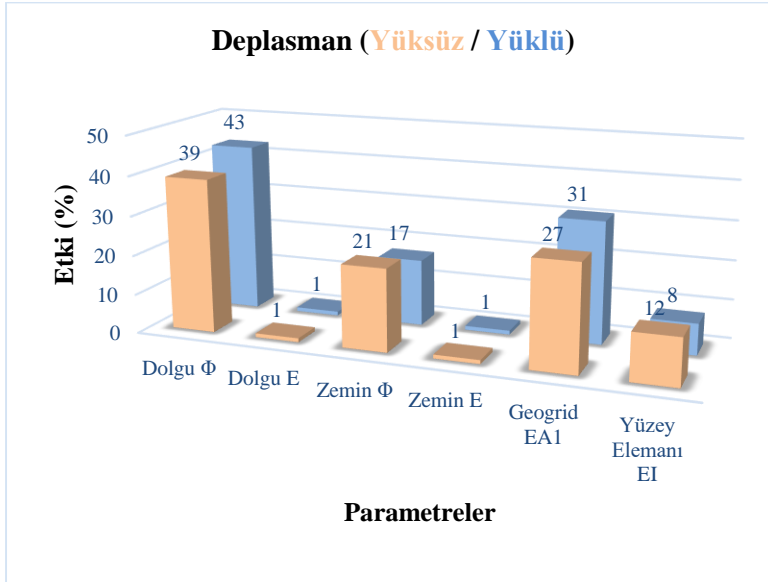
Model (Geogrid L=10m, q=0kN/m/m)		Deplasman (%)	MSF (GS) (%)
Dolgu	$\phi$ (°)	39	33
	E (kN/m <sup>2</sup> )	1	7
Zemin	$\phi$ (°)	21	49
	E (kN/m <sup>2</sup> )	1	0
Geogrid	EA <sub>1</sub> (kN/m)	27	10
Yüzey Elemanı	EI(kNm <sup>2</sup> /m)	12	1

Çizelge 5.7. Yüklü durumda sensitivite analiz sonuçları

Model (Geogrid L=10m, q=20kN/m/m)		Deplasman (%)	MSF (GS) (%)
Dolgu	$\phi$ (°)	43	30
	E (kN/m <sup>2</sup> )	1	7
Zemin	$\phi$ (°)	17	54
	E (kN/m <sup>2</sup> )	1	2
Geogrid	EA <sub>1</sub> (kN/m)	31	6
Yüzey Elemanı	EI(kNm <sup>2</sup> /m)	8	1

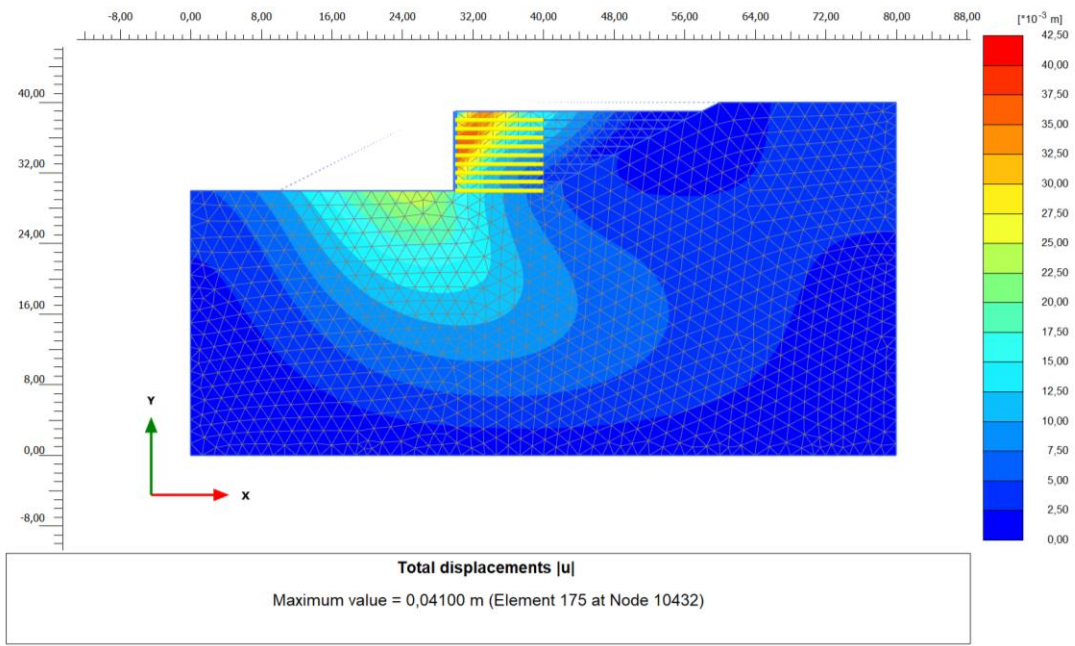
Deplasman değerleri dikkate alınarak Şekil 5.4.'de yüklü ve yüksüz durumda davranışa etkileyen parametrelerin sonuçları sunulmaktadır. Grafik incelendiğinde yüksüz durumda duvar dolgusunun kayma mukavemeti açısının sonuçlara etkisi %39 mertebesinde iken yükün etkimesi durumunda bu etki %43 mertebelerine çıkmaktadır. Bu durum yükleme durumunda dolgunun çalışmaya başladığını ve yük nedeniyle duvarın kendi içindeki malzeme davranışının etkili olduğu görülmektedir. Benzer şekilde donatı elemanının aksel rijitliği yüksüz durumda sonuca %27 mertebesinde etkirken, bu değer yük etkisi altında %31 seviyesine çıkmaktadır. Bu durum dolguda olduğu gibi yük etkisi altında donatının da sisteme etkisinin arttığını göstermektedir. Yüzey elemanının eğilme rijitliğinin etkisi ise, yüksüz durumda %12 seviyesinde iken, yükleme durumunda %8 mertebesine inmiştir. Yüzey elemanı etkisindeki bu değişim donatı ve dolgunun daha etkin çalışması ile birlikte yüzey elemanına gelen etkinin azalması ile ifade edilebilir. Doğal zeminin kayma mukavemeti açısının sonuçlara etkisi yüksüz durumda %21 iken, yüklü durumda bu değer %17 seviyesinde belirlenmiştir. Buradan yükleme durumunda ilk olarak donatı ve duvar dolgusunun devreye girmesi ve zeminin ikinci bir etken durumuna geldiğini göstermektedir. Doğal zemin ve duvar dolgusunun elastisite modüllerinin

etkisinin değişmemesi ise göçme mekanizmasında kayma mukavemeti açısının öne çıkan parametre olduğunu göstermektedir. Bu durum literatürle de uyumludur.

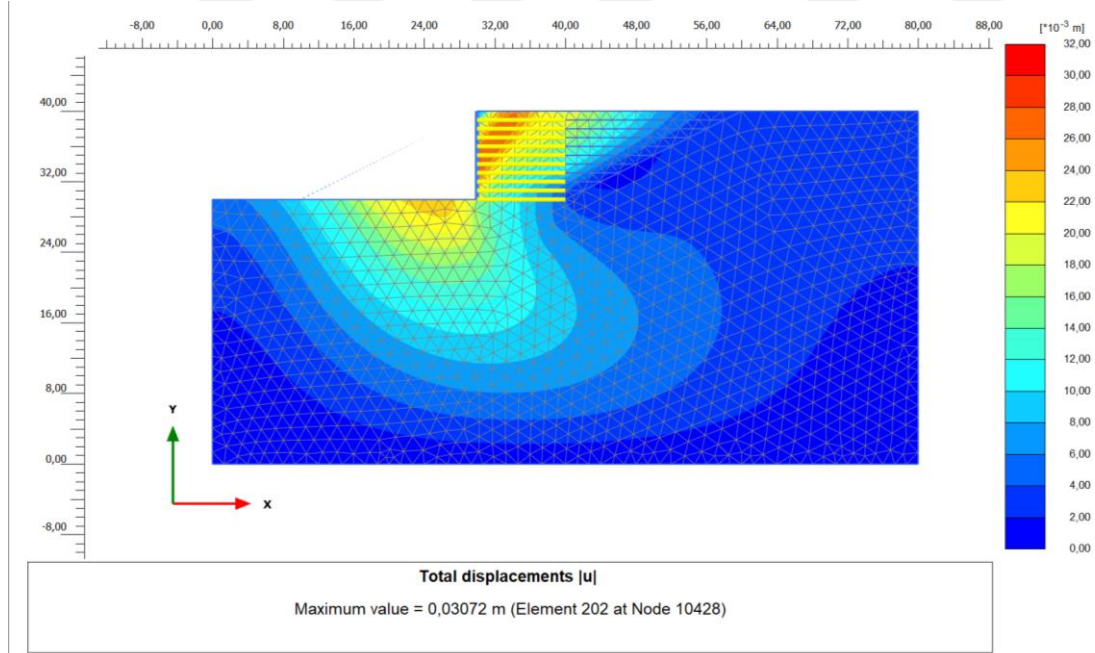


Şekil 5.4. Yüklü ve yüksüz durumda deplasmana etkiyen parametreler

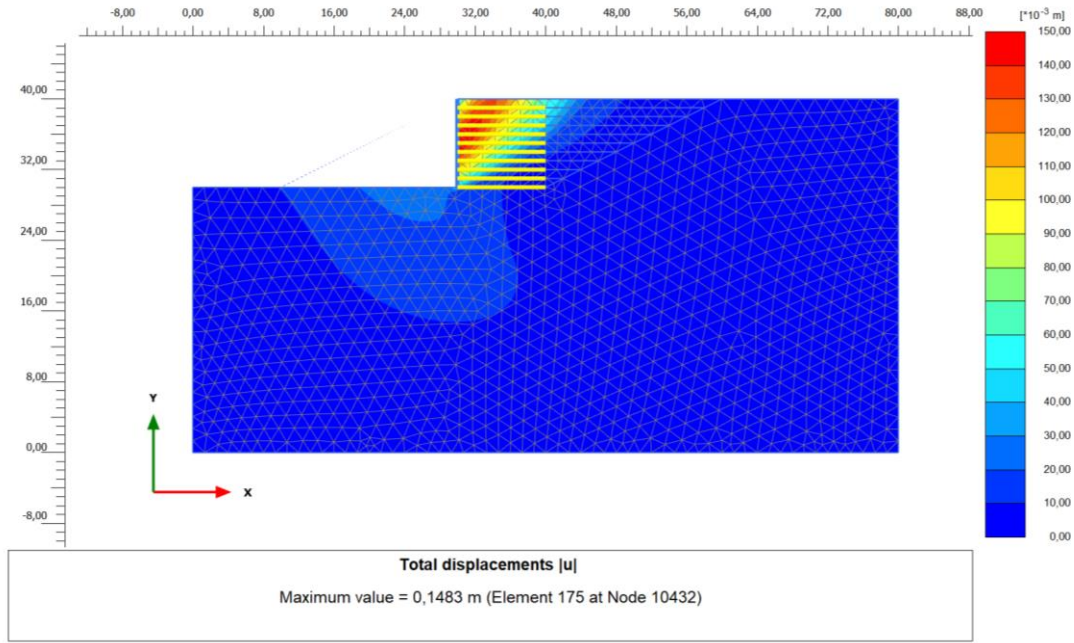
Yüksüz durum için ortalama değerlere göre yapılan analiz sonucunda elde edilen deplasman konturları Şekil 5.5.'de, maksimum değerlerin dikkate alındığı analiz sonucunda elde edilen deplasman konturları Şekil 5.6.'de ve minimum değerlere göre yapılan analiz sonuçları ise Şekil 5.7.'de sunulmaktadır. Deplasman konturları değerlendirildiğinde, maksimum değerlerin kullanıldığı durumda yapılan hassaslık analizlerinde maksimum deformasyon değeri 3.0cm bulunurken, minimum değerlerin kullanılması durumunda oluşan deformasyon miktarı 14.8cm mertebesindedir. Referans değerlerin kullanılması durumunda ise deformasyon miktarı 4.1cm olarak elde edilmiştir. Sonuçlar zemin özelliklerinin deformasyonu önemli mertebede etkilediğini göstermektedir. Zemin özelliklerinin azalmasıyla deformasyonlardaki artış oranı büyük mertebelere ulaşmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre geoteknik tasarımlarda yapılan kabuller arasındaki küçük farklılıkların sonuçları doğrudan etkilediği görülmektedir. Bu bakımdan tasarımda seçilen parametrelerin doğru aralıkta belirlenmesinin önemli olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.5. Yüksüz durumda referans değerlere göre elde edilen ortalama deplasman konturu



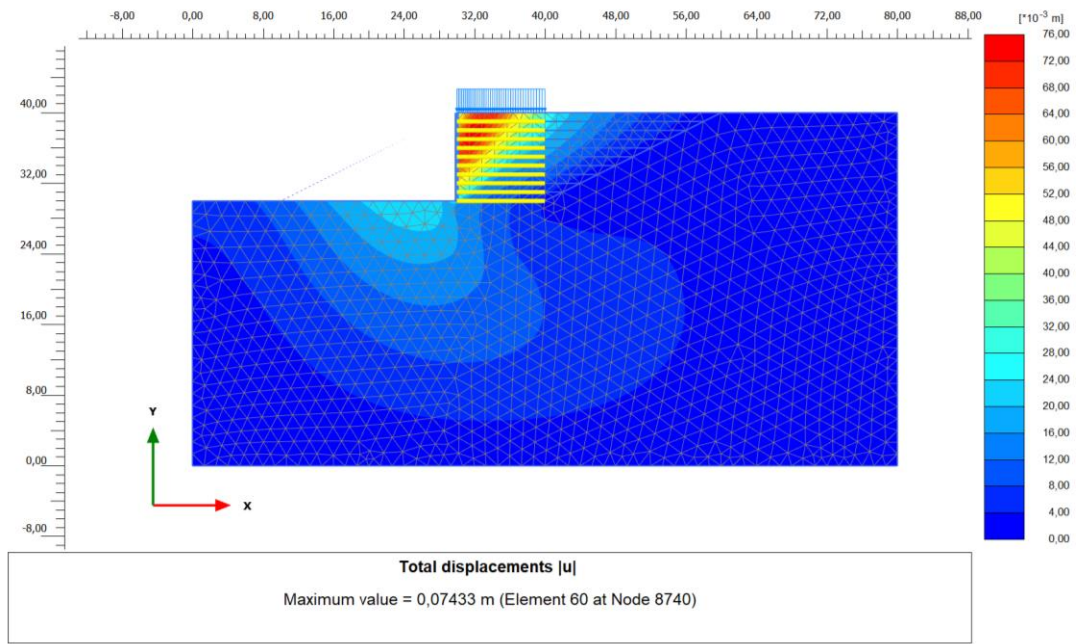
Şekil 5.6. Yüksüz durumda maksimum değerlere göre elde edilen minimum deplasman konturu



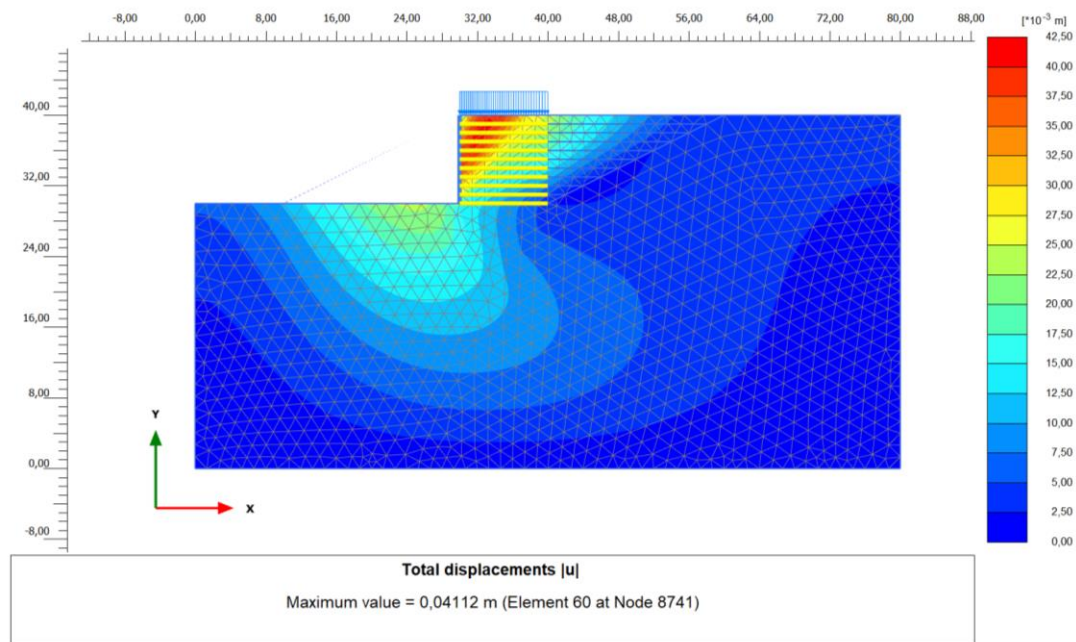
Şekil 5.7. Yüksüz durumda minimum değerlere göre elde edilen maksimum deplasman konturu

Yüklü durum için referans değerlere göre yapılan analiz sonucunda elde edilen deplasman konturları Şekil 5.8.'de, maksimum değerlerin dikkate alındığı analiz sonucunda elde edilen deplasman konturları Şekil 5.9.'da ve minimum değerlere göre yapılan analiz sonuçları ise Şekil 5.10.'de sunulmaktadır. Deplasman konturları değerlendirildiğinde maksimum değerlerin kullanıldığı durumda yapılan hassaslık analizlerinde maksimum deformasyon değeri 4.1cm bulunurken, minimum değerlerin kullanılması durumunda oluşan deformasyon miktarı 19.6cm mertebesindedir. Referans değerlerin kullanılması durumunda ise deformasyon miktarı 7.4cm olarak elde edilmiştir. Sonuçlar yüksüz duruma göre değerlendirildiğinde, yükün deformasyonları önemli mertebede arttırdığı görülmektedir. Hassaslık analizleri zemin özelliklerinin deformasyonu önemli derecede etkileyen parametre olduğunu göstermektedir. Zemin özelliklerinin azalmasıyla deformasyonlardaki artış oranı büyük mertebelere ulaşmaktadır.

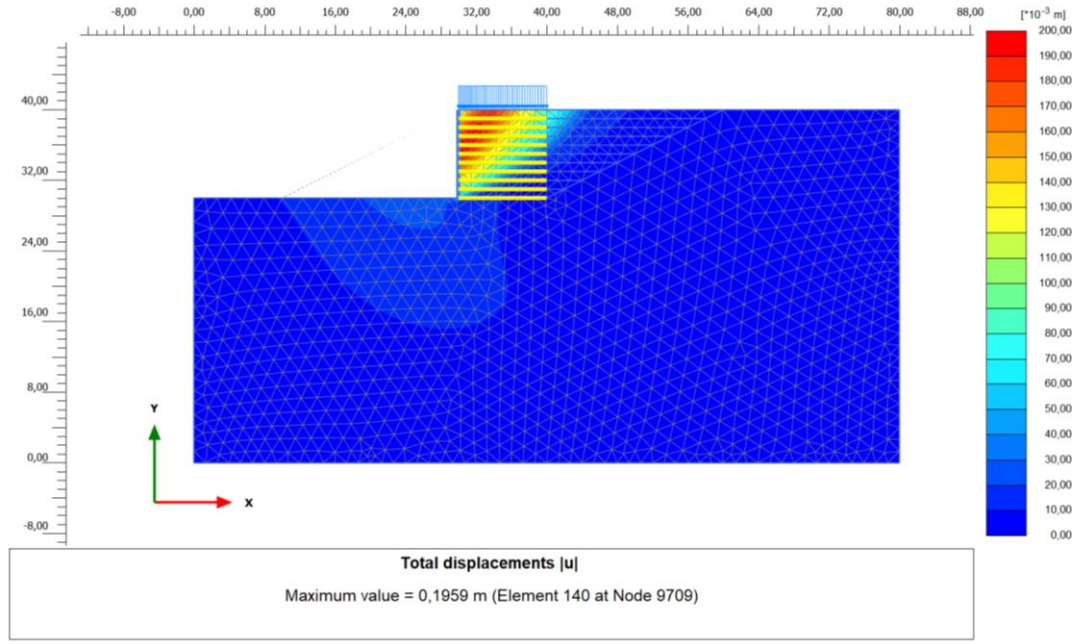




Şekil 5.8. Yüklü durumda referans değerlere göre elde edilen ortalama deplasman konturu



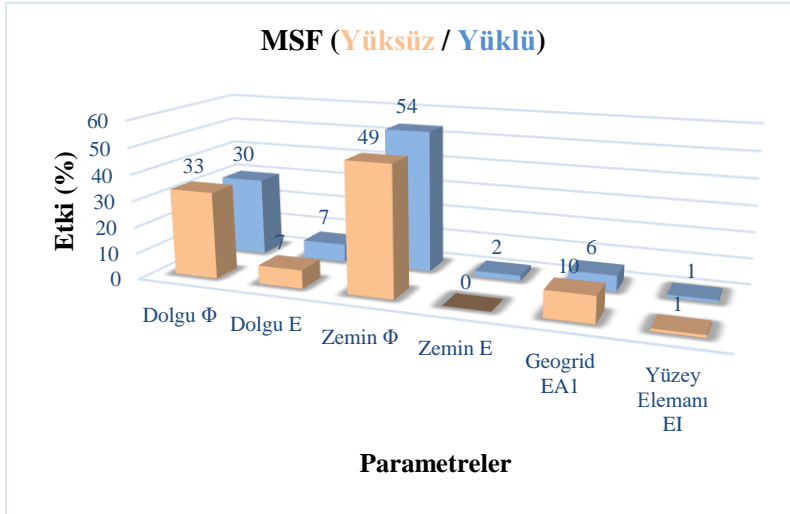
Şekil 5.9. Yüklü durumda maksimum değerlere göre elde edilen minimum deplasman konturu



Şekil 5.10. Yüklü durumda minimum değerlere göre elde edilen maksimum deplasman konturu

Duvar üzerinde yük olması ve olmaması durumları için güvenlik sayıları (MSF) değerlendirilmiştir. Güvenlik sayılarını etkileyen parametreler ve etki oranları Şekil 5.11.'de sunulmaktadır.

Grafik incelendiğinde, yüksüz durumda duvar dolgusu kayma mukavemeti açısının sonuçlara etkisi %33 mertebesinde iken, yükün etkimesi durumunda bu etki %30 seviyesine düşmektedir. Benzer şekilde, donatı elemanının eksenel rijitliği yüksüz durumda sonuca %10 mertebesinde etki ederken, bu değer yük etkisi altında %6 seviyesine düşmektedir. Doğal zeminin kayma mukavemeti açısının sonuçlara etkisi yüksüz durumda %49 iken, yüklü durumda bu değer %54 seviyesinde belirlenmiştir. Yüzey elemanının eğilme rijitliğinin etkisi ise, yüksüz durumda %12 seviyesinde iken, yüklü durumda %8 mertebesine inmiştir. Tüm veriler değerlendirildiğinde, doğal zemin özelliklerinin güvenlik sayısını doğrudan etkilediği görülmektedir. Güvenlik sayısı analizlerinde mukavemet azaltma yöntemi kullanılması ve bu yöntemde doğal zeminin devreye girmesi zemin etkisini ön plana çıkarmaktadır.



Şekil 5.11. Yüklü ve yüksüz durumda MSF'ye etkiyen parametreler

#### 5.4.2. Seri 2: Hassaslık Analizi ile Geogrid Boy Etkisinin Araştırılması

Tez çalışması kapsamında donatılı duvarda kullanılan geogridin boyunun davranışa etkisi hassaslık analizleri ile incelenmiştir. Bu seri analizlerde daha önce bilgileri verilen Model 2 kullanılarak 10m yüksekliğindeki duvar yapısı dikkate alınmıştır. Analizlerde doğal zemin ve dolgu malzemesi kayma mukavemeti açıları, yüzey elemanı eğilme rijitliği ve donatı aksel rijitliği değerleri belirli sınırlar arasında seçilmiştir. Ana modelde referans değerleri ile seçilen parametrelerin minimum ve maksimum değerleri Çizelge 5.8.'de sunulmaktadır. Bu parametreler oluşturulurken ana modelde kullanılan parametreler referans olarak kabul edilmiştir. Referans parametrelere göre analizler yapıldıktan sonra minimum ve maksimum değerler arasında hassaslık analizi yapılarak parametrenin sonuçlara etkisi incelenmiştir.

Çizelge 5.8. Hassaslık (sensivite) analiz parametreleri

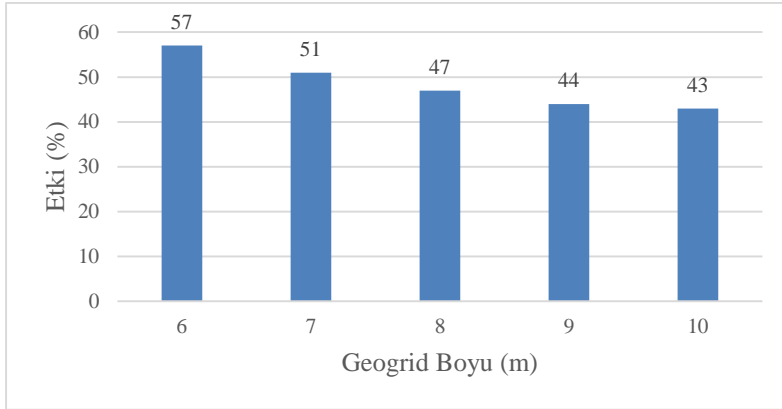
Model (Geogrid L=değişken )		Min.	Ref.	Maks.
Dolgu	$\phi$ (°)	20	35	45
	E (kN/m <sup>2</sup> )	20000	40000	80000
Zemin	$\phi$ (°)	30	45	55
	E (kN/m <sup>2</sup> )	40000	80000	120000
Geogrid	EA <sub>1</sub> (kN/m)	1000	2000	4000
Yüzey Elemanı	EI(kNm <sup>2</sup> /m)	1837.5	8438	23430
Yük	q (kN/m/m)	20		

Donatılı duvarda farklı boylarda geogrid boyu kullanılması durumuna göre deplasman ve güvenlik katsayıları (MSF) elde edilmiştir. Farklı donatı boyları için elde edilen deplasman değerleri Çizelge 5.9.'da özetlenmektedir.

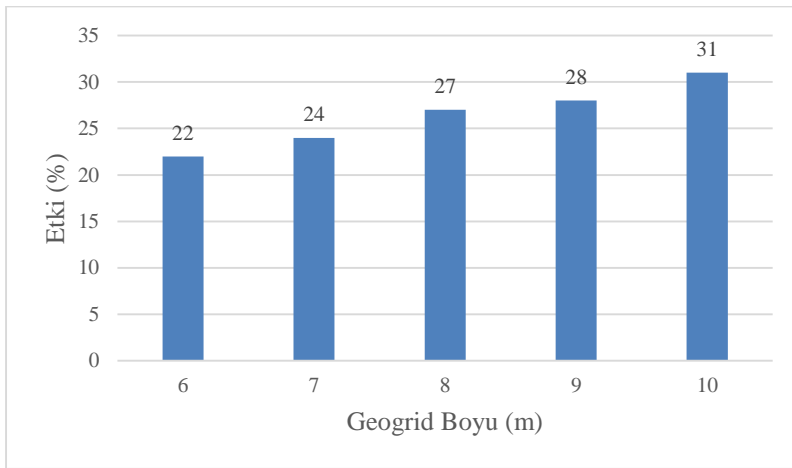
Çizelge 5.9. Deplasmana etkiyen parametrelerin geogrid boyuna göre etkisi

Geogrid Boyu (m)	Deplasmana Etkisi (%)			
	Dolgu $\Phi$	Zemin $\Phi$	Geogrid $EA_1$	Yüzey Elemanı EI
6	57	16	22	4
7	51	17	24	6
8	47	17	27	6
9	44	20	28	7
10	43	17	31	8

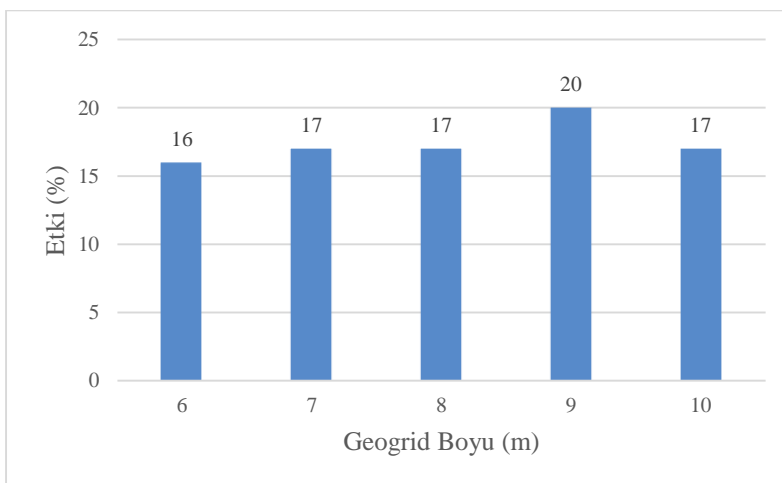
Geogrid boyunun değiştirilmesi ile dolgu malzemesi kayma mukavemeti açısının deplasman değerleri üzerindeki etkisi Şekil 5.12.'de grafik olarak da sunulmaktadır. Grafik incelendiğinde, duvar dolgusu kayma mukavemeti açısının sonuçlara etkisi, geogrid boyu 6m iken %57 mertebesinde, geogrid boyunun 10m ye kadar artması durumunda bu etki %43 mertebelerine düşmektedir. Bu durum dolgu içindeki geogridin çalışmaya başladığını ve dolgunun etkisini azalttığını göstermektedir. Benzer şekilde, Şekil 5.13.'de donatı elemanının aksenal rijitliği geogrid boyu 6m iken sonuca %22 mertebesinde etki ederken, geogrid boyunun 10m ye kadar artması durumunda bu değer %31 seviyesine çıkmaktadır. Yüzey elemanının eğilme rijitliğinin Şekil 5.15.'de etkisi 6m'de %4 seviyesinde iken 10m'de %8 mertebesine kadar çıkmaktadır. Bu durum donatının devreye girmesi ile birlikte dolgu ve yüzey elemanına gelen etkinin azalması şeklinde ifade edilebilir. Doğal zeminin kayma mukavemeti açısının sonuçlara etkisi 6m'de %16 iken, 10m'de %17 seviyesine kadar çıkmıştır (Şekil 5.14.). Doğal zemin ve duvar dolgusunun elastisite modülleri etkisinin değişmemesi, göçme mekanizmasında kayma mukavemeti açısının ön plana çıkan parametre olduğunu göstermektedir. Bu durum literatürle de uyumdur.



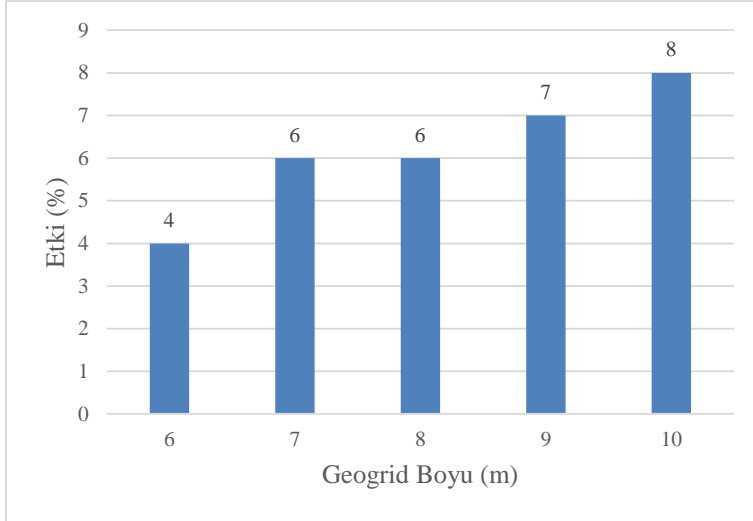
Şekil 5.12. Dolgu kayma mukavemet açısının ( $\phi$ ) deplasmana etkisi



Şekil 5.13. Geogrid aksenal rijitliğinin ( $EA_1$ ) deplasmana etkisi



Şekil 5.14. Zemin kayma mukavemet açısının ( $\phi$ ) deplasmana etkisi



Şekil 5.15. Yüzey elamanı eğilme rijitliğinin (EI) deplasmana etkisi

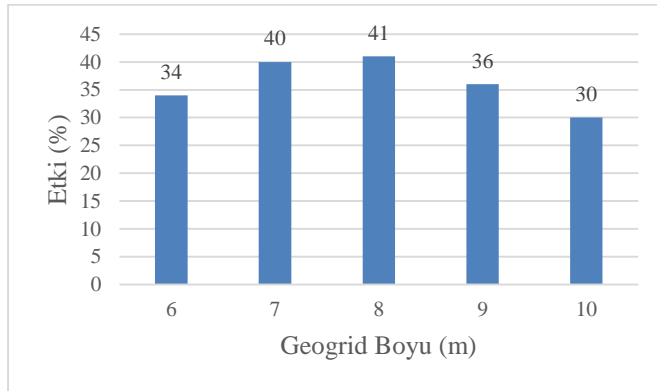
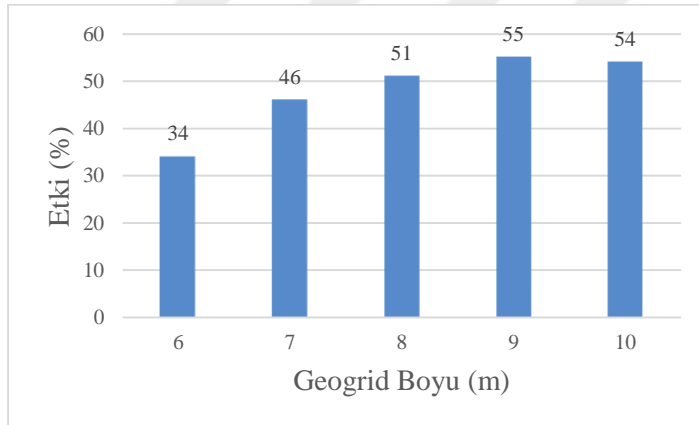
Seri 1 analizlerde ayrıca MSF'e bakılmıştır (Çizelge 5.10.). Yüzey elemanın eğilme rijitliğinin etkisi yoktur. Geogrid boyunun değiştirilmesi ile dolgu malzemesi kayma mukavemeti açısının MSF değerleri üzerindeki etkisi Şekil 5.16.'de grafik olarak da sunulmaktadır. Dolgu kayma mukavemeti açısı geogrid boyu 6m'den 8m'ye kadar %34 den %41'e artmakta, sonra 9m ve 10 m için azalmakta %30'a düşmektedir.

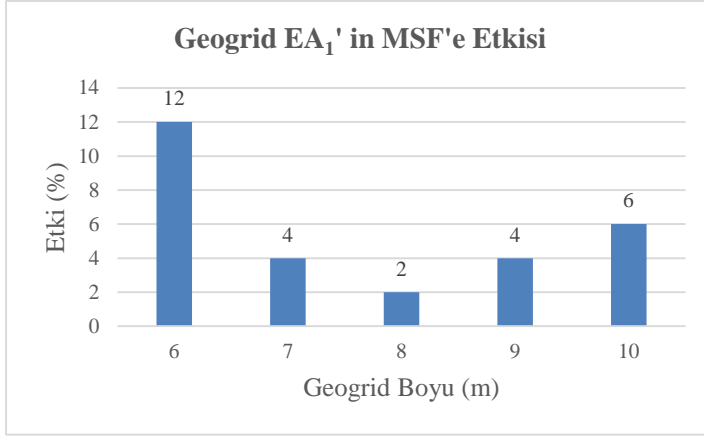
Geogrid boyunun değiştirilmesi ile doğal zeminin kayma mukavemeti açısının MSF değerleri üzerindeki etkisi Şekil 5.17.'de grafik olarak da sunulmaktadır. Mevcut zemin kayma mukavemeti açısının geogrid boyu arttıkça etkisinin arttığı, geogrid boyu 6m'de %34 iken, 10m'ye çıktığında %54 olduğu görülmüştür.

Geogrid boyunun değiştirilmesi ile geogrid eksenel rijitliğinin MSF değerleri üzerindeki etkisi Şekil 5.18.'de grafik olarak da sunulmaktadır. Geogrid boyu artıkça geogrid eksenel rijitliği etkisi 6m'de %12 iken 8m'de %2'ye azalmakta sonra 10m'de %6'ya kadar artmaktadır. Burada dolgu ile geogrid arasında ters bir ilişki söz konusudur. Biri etkinliğini artırırken diğeri azalmaktadır.

Çizelge 5.10. Geogrid boyuna göre MSF'e etkiyen parametreler

Geogrid Boyu (m)	MSF Etkisi (%)			
	Dolgu $\Phi$	Zemin $\Phi$	Geogrid $EA_1$	Yüzey Elemanı EI
6	34	34	12	0
7	40	46	4	0
8	41	51	2	1
9	36	55	4	0
10	30	54	6	1

Şekil 5.16. Dolgu kayma mukavemet açısının ( $\phi$ ) MSF'e etkisiŞekil 5.17. Zemin kayma mukavemet açısının ( $\phi$ ) MSF'e etkisi



Şekil 5.18. Geogrid eksenel rijitliğinin ( $EA_1$ ) deplasmana etkisi

Geogrid boyunun probleme etkisinin araştırıldığı Seri 2 analizlerinde deplasman konturları da dikkate alınarak Şekil 5.19.- Şekil 33.'de sunulmuştur. Geogrid boyu 6m alınıp referans değerlere göre yapılan analiz sonucunda elde edilen deplasman konturu Şekil 5.19.'de, maksimum değerlerin dikkate alındığı analiz sonucunda elde edilen deplasman konturu Şekil 5.20.'de ve minimum değerlere göre yapılan analiz sonuçları ise Şekil 5.21.'de sunulmaktadır. Deplasman konturları incelendiğinde maksimum değerlerin kullanıldığı durumda yapılan hassaslık analizlerinde maksimum deformasyon değeri 4.2cm bulunurken, minimum değerlerin kullanılması durumunda oluşan deformasyon 30.1cm mertebesindedir. Referans değerlerin kullanılması durumunda ise deformasyon 8.1cm olarak elde edilmiştir.

Geogrid boyu 7m alınıp referans değerlere göre yapılan analiz sonucunda elde edilen deplasman konturu Şekil 5.22.'de, maksimum değerlerin dikkate alındığı analiz sonucunda elde edilen deplasman konturu Şekil 5.23.'da ve minimum değerlere göre yapılan analiz sonuçları ise Şekil 5.24.'de sunulmaktadır. Maksimum değerlerin kullanıldığı durumda yapılan hassaslık analizlerinde maksimum deformasyon değeri 3.4cm bulunurken, minimum değerlerde oluşan deformasyon 24.0cm mertebesindedir. Referans değerlerde deformasyon 7.5cm olarak elde edilmiştir.

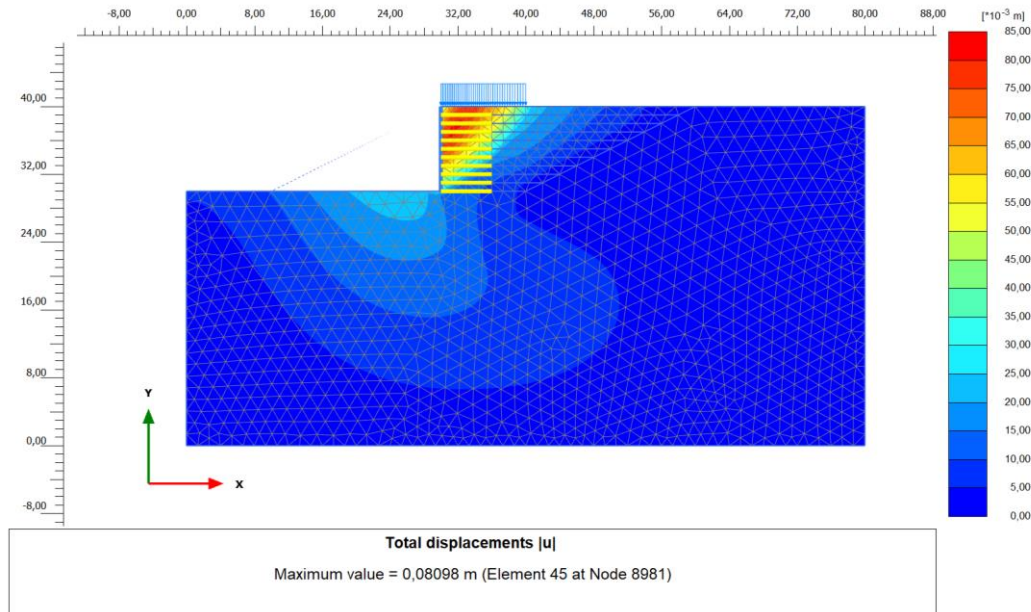
Geogrid boyu 8 m alınıp referans değerlere göre yapılan analiz sonucunda elde edilen deplasman konturu Şekil 5.25.'de, maksimum değerlerin dikkate alındığı analiz sonucunda elde edilen deplasman konturu Şekil 5.26.'da ve minimum değerlere göre yapılan analiz sonuçları ise Şekil 5.27.'de sunulmaktadır. Maksimum değerlerin kullanıldığı durumda yapılan hassaslık analizlerinde maksimum deformasyon değeri 4.1cm bulunurken,



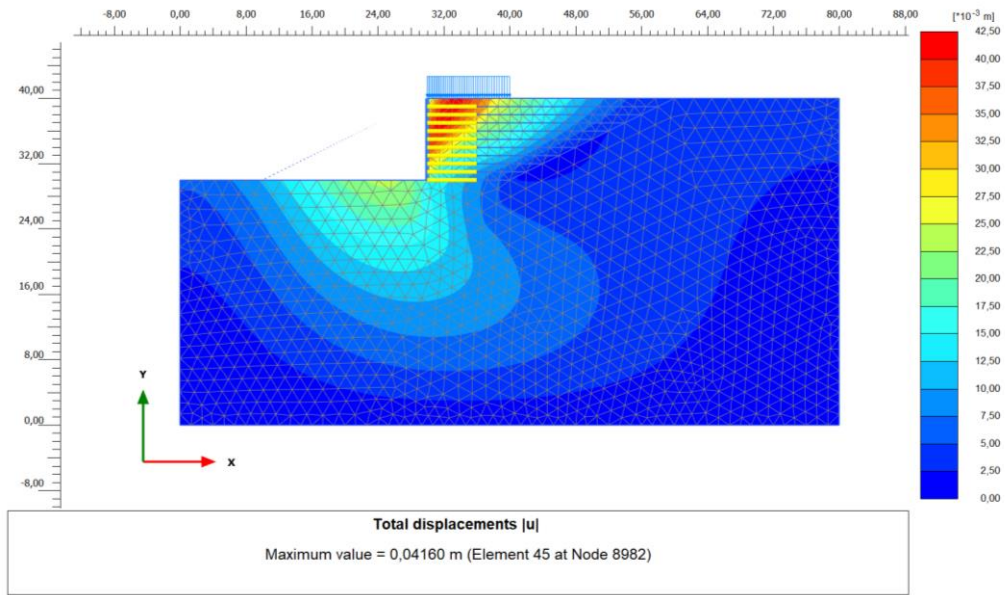
minimum değerde deformasyon 21.9cm mertebesindedir. Referans değerde ise deformasyon 7.6cm olarak elde edilmiştir.

Geogrid boyu 9m alınıp referans değerlere göre yapılan analiz sonucunda elde edilen deplasman konturu Şekil 5.28.'de, maksimum değerlerin dikkate alındığı analiz sonucunda elde edilen deplasman konturu Şekil 5.29.'da ve minimum değerlere göre yapılan analiz sonuçları ise Şekil 5.30.'de sunulmaktadır. Maksimum değerlerin kullanıldığı durumda yapılan hassaslık analizlerinde maksimum deformasyon değeri 4.0cm bulunurken, minimum değerde oluşan deformasyon 20.1cm mertebesindedir. Referans değerde ise deformasyon 7.3cm olarak elde edilmiştir.

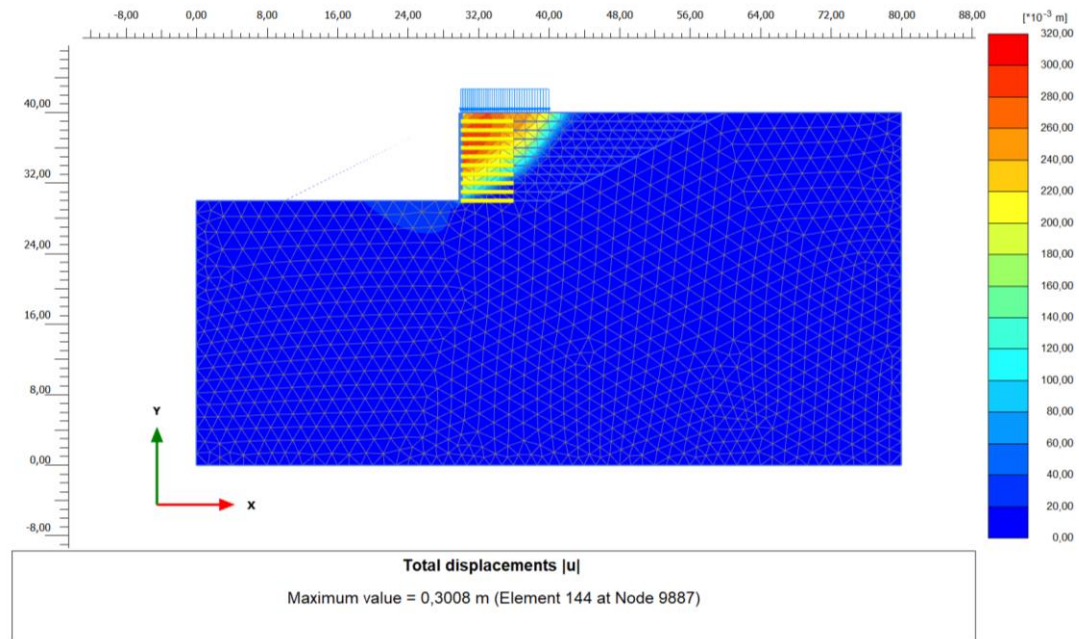
Geogrid boyu 10m alınıp referans değerlere göre yapılan analiz sonucunda elde edilen deplasman konturu Şekil 5.31.'de, maksimum değerlerin dikkate alındığı analiz sonucunda elde edilen deplasman konturu Şekil 5.32.'de ve minimum değerlere göre yapılan analiz sonuçları ise Şekil 5.33.'de sunulmaktadır. Maksimum değerlerin kullanıldığı durumda yapılan hassaslık analizlerinde maksimum deformasyon değeri 4.1cm bulunurken, minimum değerde oluşan deformasyon 19.6cm mertebesindedir. Referans değerde ise deformasyon 7.4cm olarak elde edilmiştir.



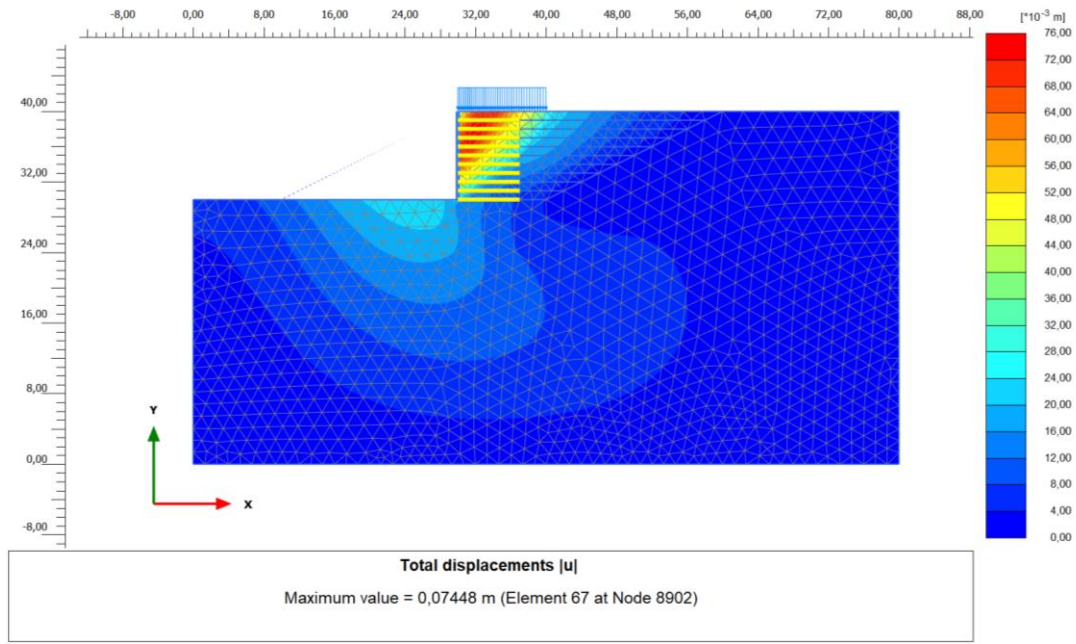
Şekil 5.19. Geogrid boyu 6m'de referans değerlere göre elde edilen ortalama deplasman konturu



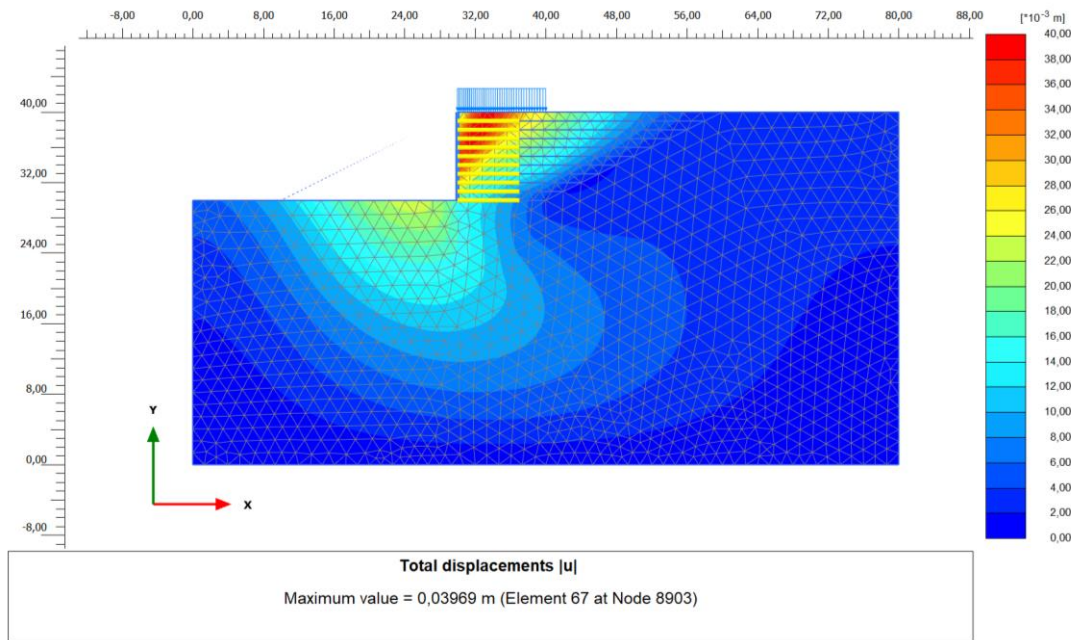
Şekil 5.20. Geogrid boyu 6m’de maksimum değerlere göre elde edilen minimum deplasman konturu



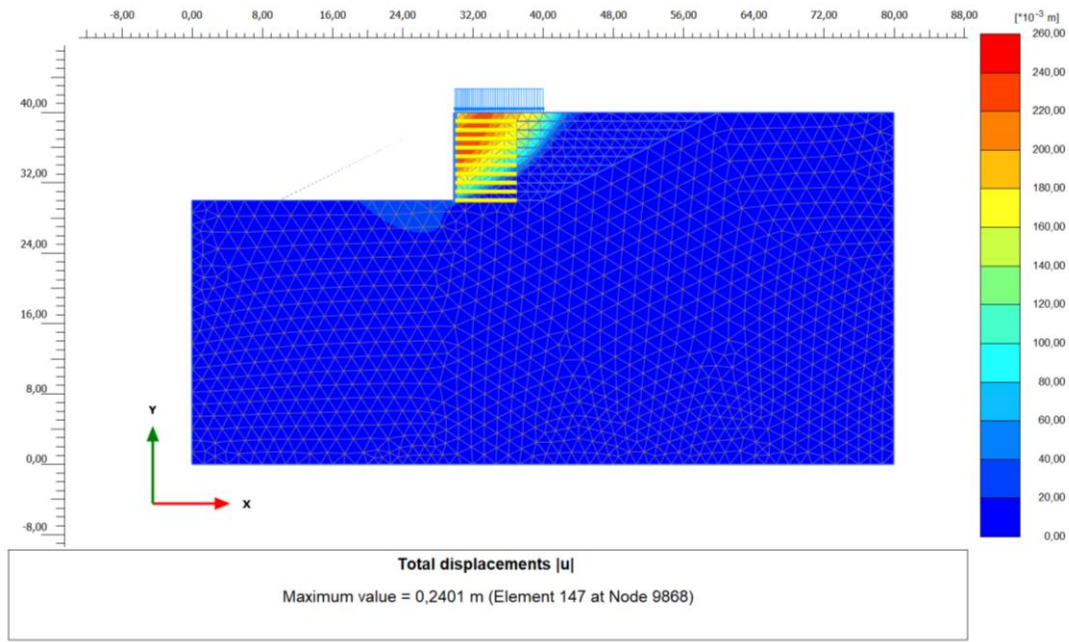
Şekil 5.21. Geogrid boyu 6m’de minimum değerlere göre elde edilen maksimum deplasman konturu



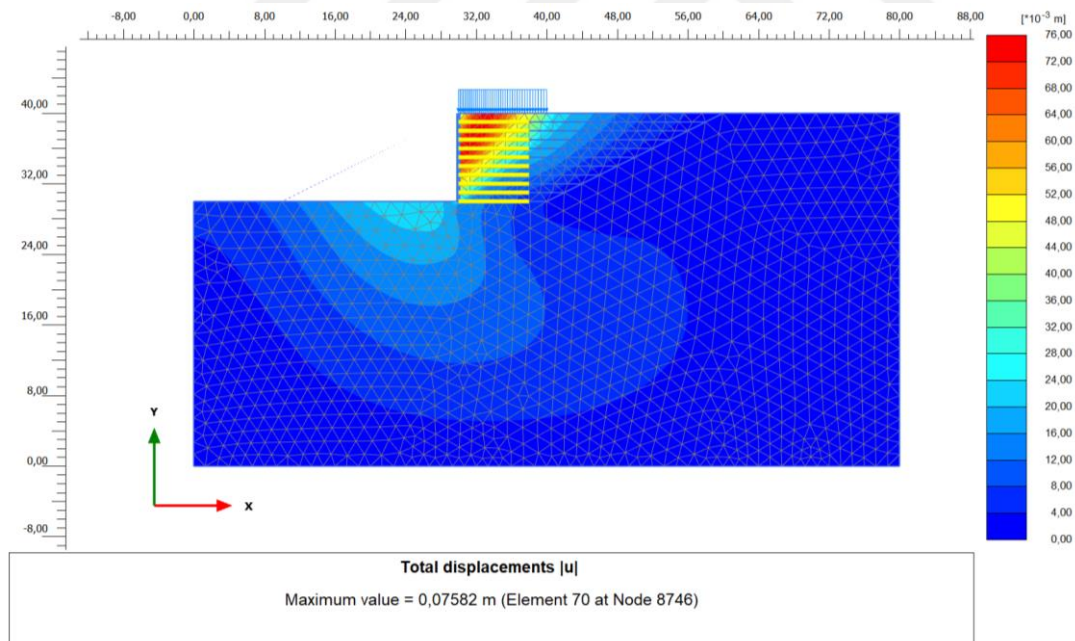
Şekil 5.22. Geogrid boyu 7m’de referans değerlere göre elde edilen ortalama deplasman konturu



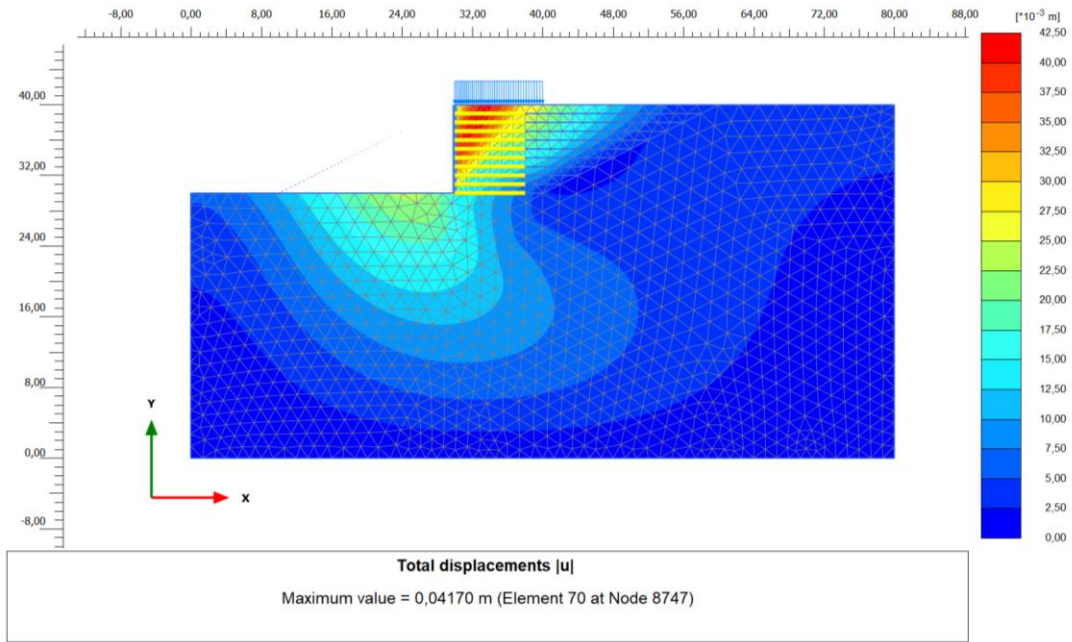
Şekil 5.23. Geogrid boyu 7m’de maksimum değerlere göre elde edilen minimum deplasman konturu



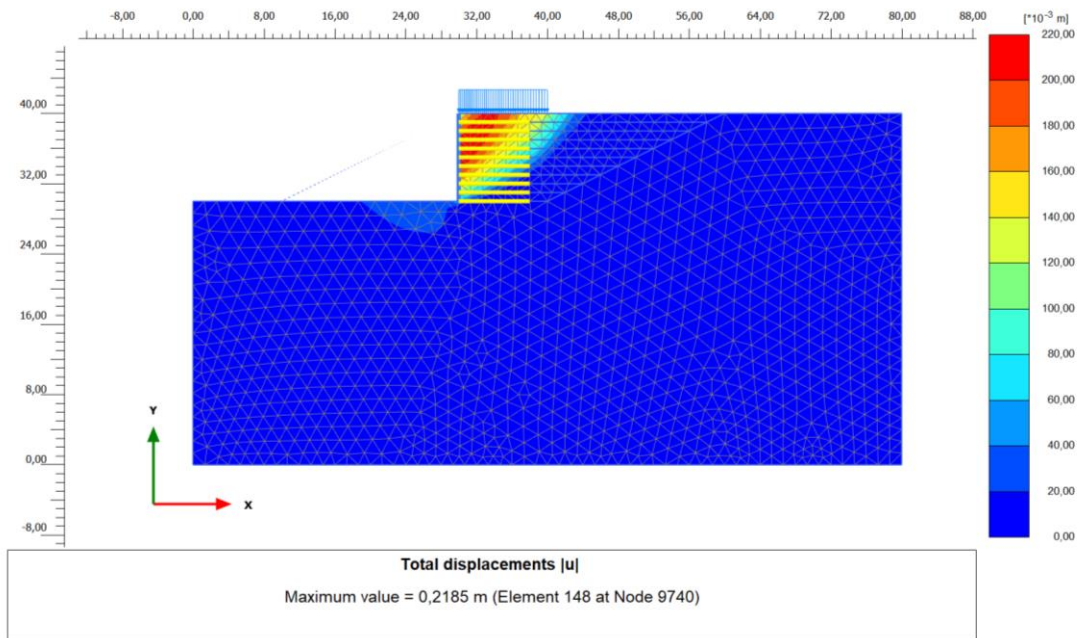
Şekil 5.24. Geogrid boyu 7m’de minimum değerlere göre elde edilen maksimum deplasman konturu



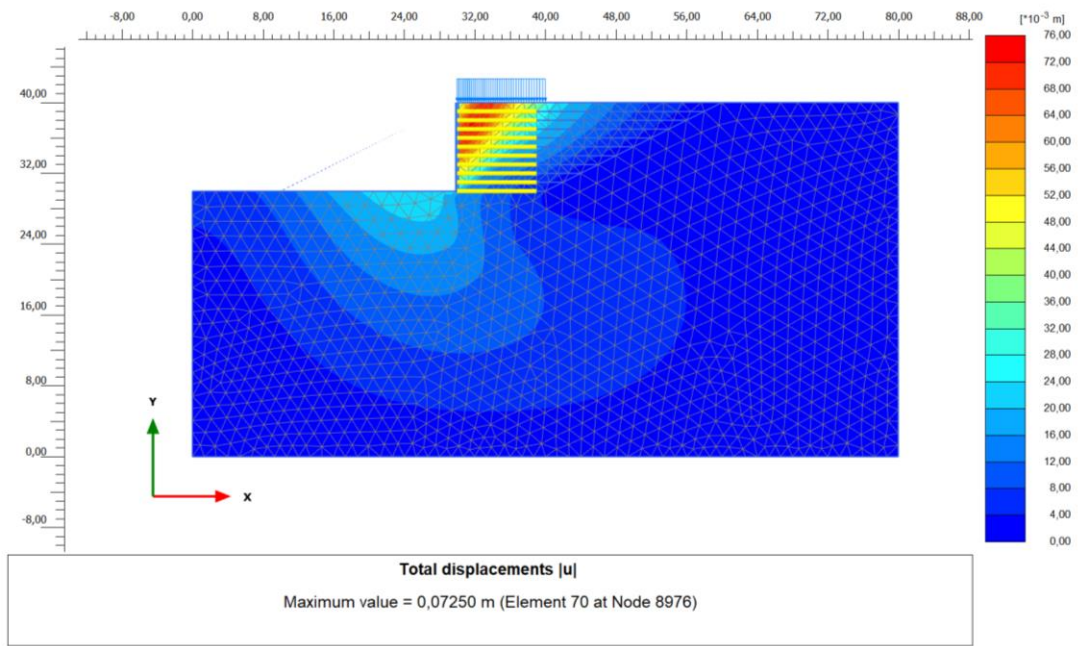
Şekil 5.25. Geogrid boyu 8m’de referans değerlere göre elde edilen ortalama deplasman konturu



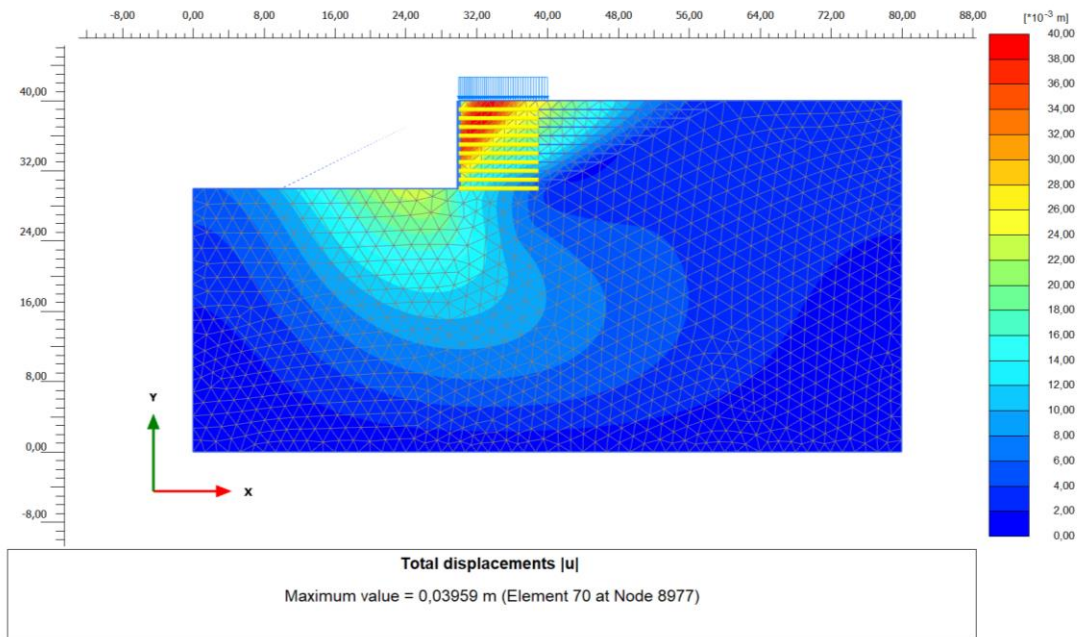
Şekil 5.26. Geogrid boyu 8m’de maksimum değerlere göre elde edilen minimum deplasman konturu



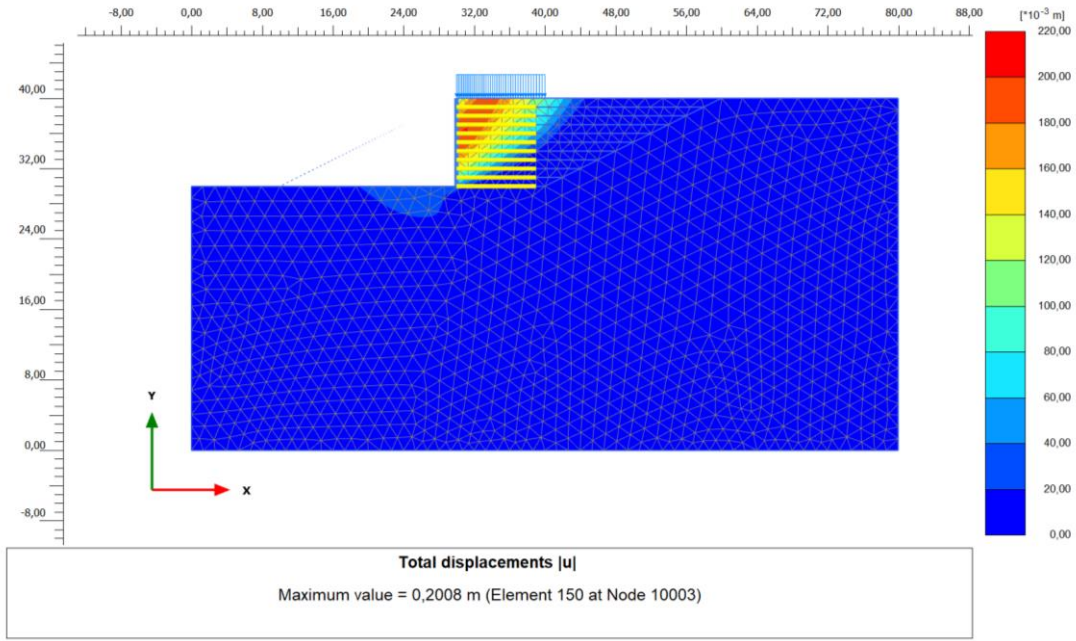
Şekil 5.27. Geogrid boyu 8m’de minimum değerlere göre elde edilen maksimum deplasman konturu



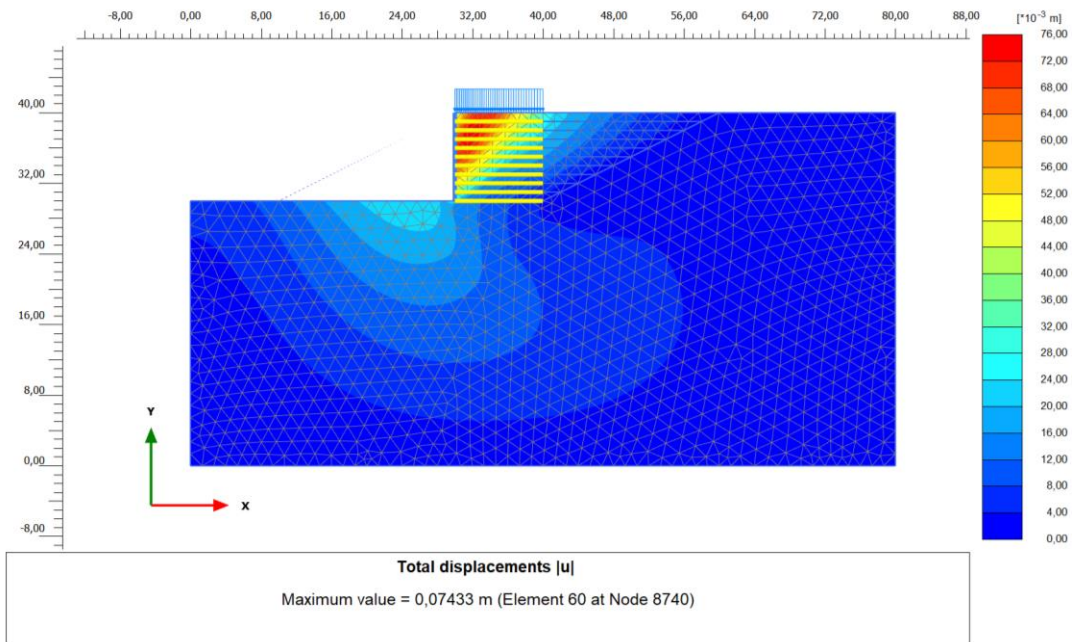
Şekil 5.28. Geogrid boyu 9m’de referans değerlere göre elde edilen ortalama deplasman konturu



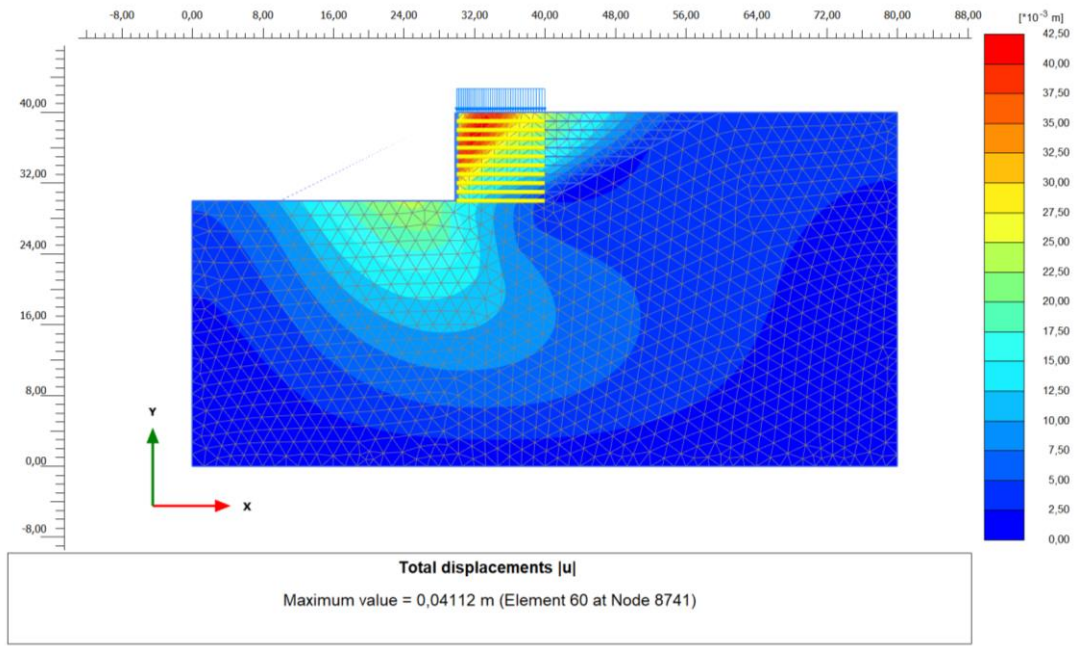
Şekil 5.29. Geogrid boyu 9m’de maksimum değerlere göre elde edilen minimum deplasman konturu



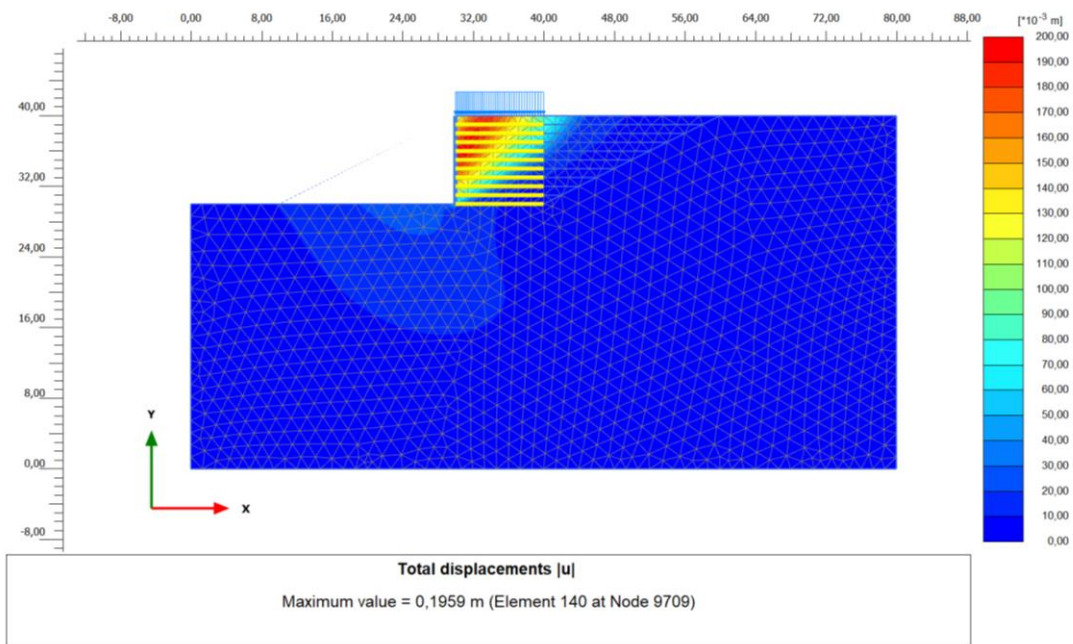
Şekil 5.30. Geogrid boyu 9m’de minimum değerlere göre elde edilen maksimum deplasman konturu



Şekil 3.31. Geogrid boyu 10m’de referans değerlere göre elde edilen ortalama deplasman konturu



Şekil 5.32. Geogrid boyu 10m’de maksimum değerlere göre elde edilen minimum deplasman konturu



Şekil 5.33. Geogrid boyu 10m’de minimum değerlere göre elde edilen maksimum deplasman konturu



### 5.4.3. Seri 3: Kademeli (Palyeli) Donatılı Duvarda s/H ve Yük Etkisinin Araştırılması

Bu çalışmada Model 3 üzerinde araştırma yapılmıştır. Model 3’de 10m yüksekliğindeki donatılı duvar iki parçalı palyeli olarak düşünülmüştür. Palye genişliği “s”, toplam yüksekliği ise “H” olarak gösterilmiştir. Modelde kullanılan geogridler için; palye alt kısmındaki geogrid boyu (La), 7.5m ve palye üst kısmındaki geogrid boyu (Lü), 5m alınmıştır. Burada s/H oranı değişiminin deplasman ve güvenlik katsayısına etkileri incelenmiştir. Bu amaçla doğal zemin, dolgu malzemesi, yüzey elemanı ve donatı elemanı özellikleri referans değerler seçilmiştir. Söz konusu parametrelerin değerleri Çizelge 5.11.’de sunulmaktadır.

Çizelge 5.11. Referans parametre değerleri

Model (Geogrid Lü=5m / La=7.5m)		Değer
Dolgu	$\phi$ (°)	35
	E (kN/m <sup>2</sup> )	40000
Zemin	$\phi$ (°)	45
	E (kN/m <sup>2</sup> )	80000
Geogrid	EA <sub>1</sub> (kN/m)	2000
Yüzey Elemanı	EI(kNm <sup>2</sup> /m)	8438
Yük	q (kN/m/m)	50

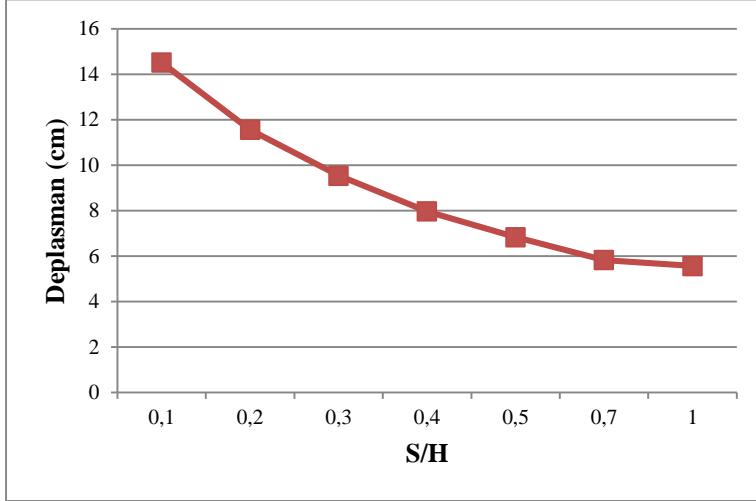
Duvarın s/H oranına göre yapılan analizler sonucunda deplasman değerleri elde edilmiş olup Çizelge 5.12.’de özetlenmektedir.

Çizelge 5.12. s/H’a göre deplasman değerleri

s/H	Deplasman (cm)
0.1	14.52
0.2	11.56
0.3	9.54
0.4	7.97
0.5	6.84
0.7	5.83
1	5.57

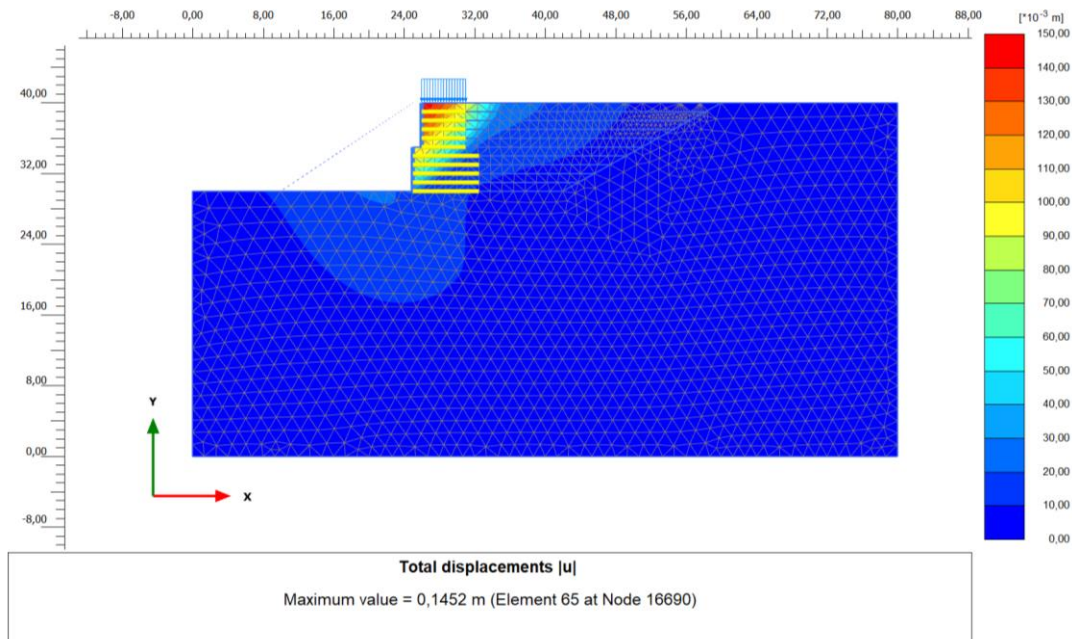
s/H oranının değişimi ile deplasman ilişkisi Şekil 5.34.’de grafik olarak da sunulmaktadır. Grafikten, palye genişliği arttıkça deplasmanın azaldığı görülmektedir. s/H=0.1 için

deplasman değeri 14.52cm,  $s/H=1$  olduğunda deplasman değeri 5.57cm'ye kadar düşmektedir.

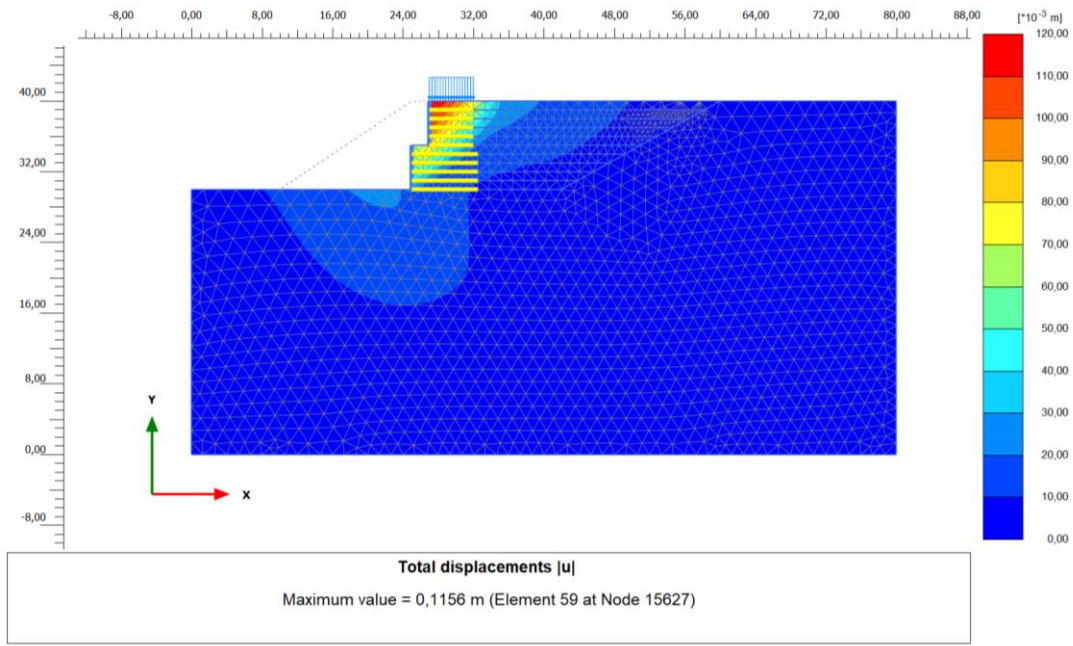


Şekil 5.34.  $s/H$ 'a göre deplasman değişimi

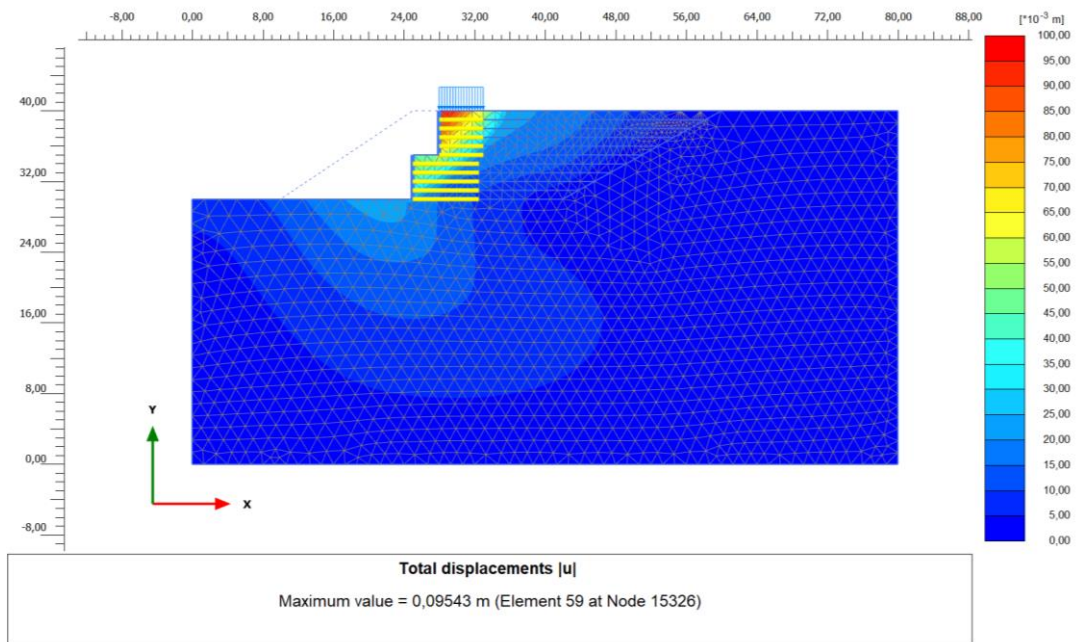
$s/H$  oranının probleme etkisinin araştırıldığı Seri 3 analizlerinde deplasman konturları da dikkate alınarak Şekil 5.35.- Şekil 41.'de sunulmuştur.



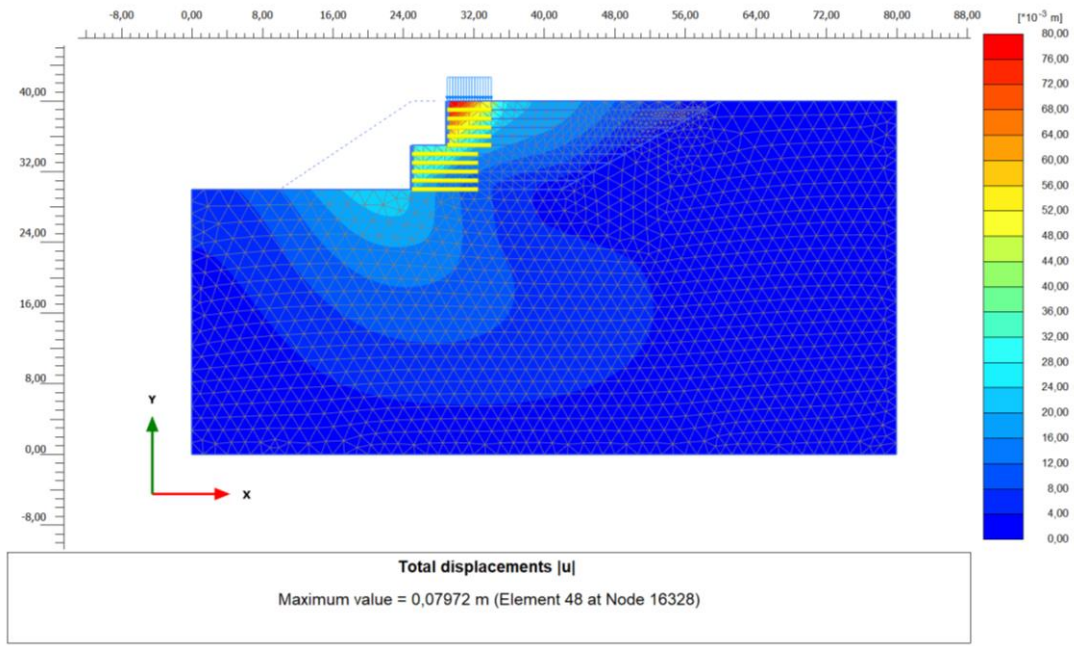
Şekil 5.35.  $s/H=0.1$ 'de referans değerlere göre elde edilen deplasman konturu



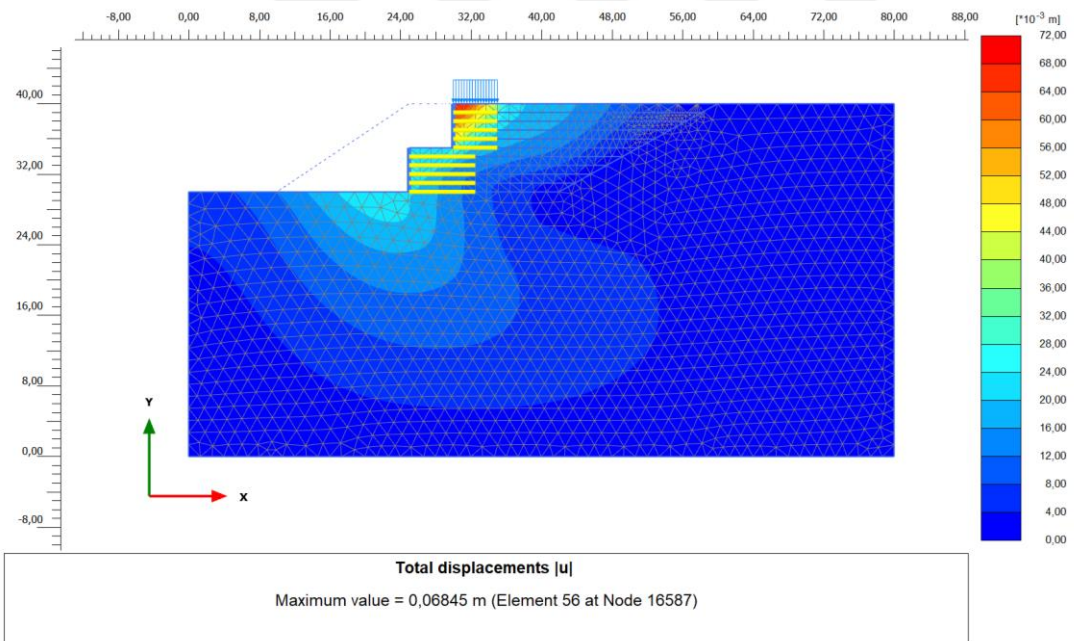
Şekil 5.36.  $s/H=0.2$ 'de referans değerlere göre elde edilen deplasman konturu



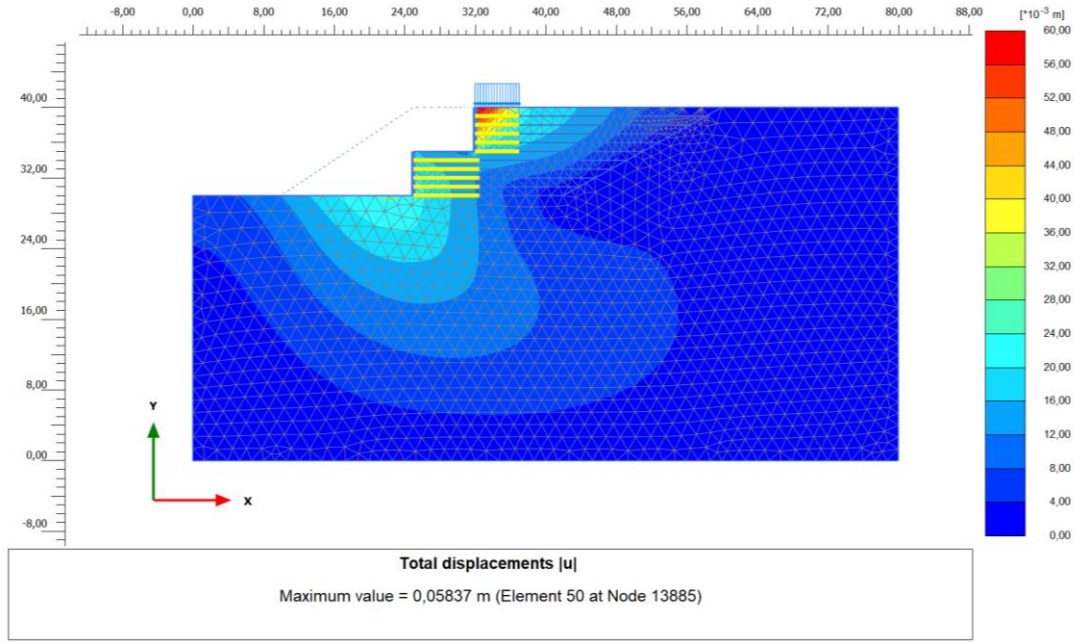
Şekil 5.37.  $s/H=0.3$ 'de referans değerlere göre elde edilen deplasman konturu



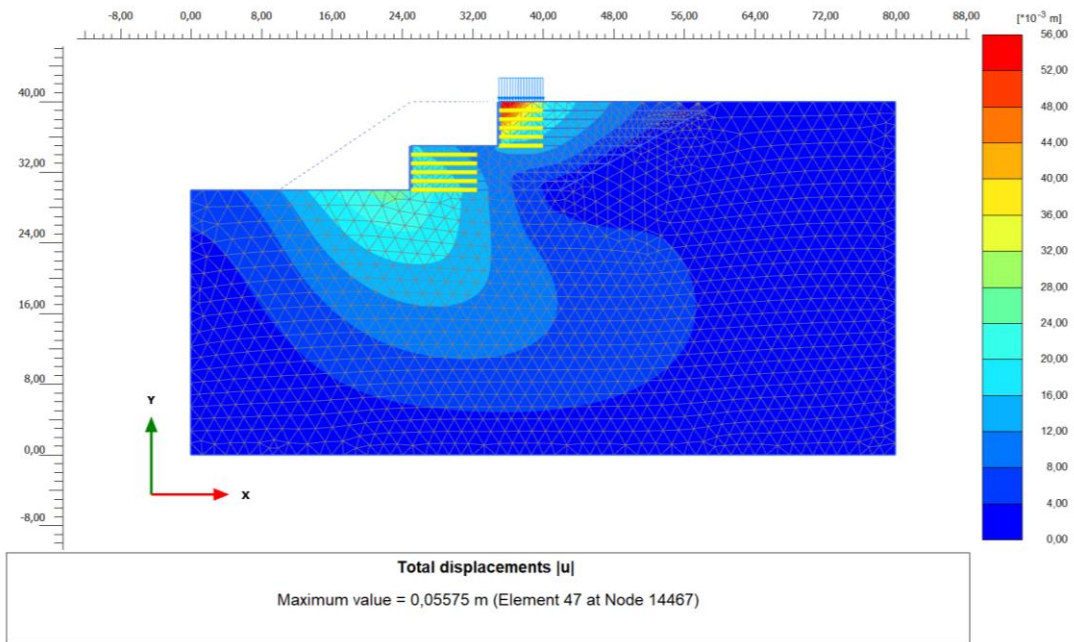
Şekil 5.38.  $s/H=0.4$ 'de referans değerlere göre elde edilen deplasman konturu



Şekil 5.39.  $s/H=0.5$ 'de referans değerlere göre elde edilen deplasman konturu



Şekil 5.40.  $s/H=0.7$ 'de referans değerlere göre elde edilen deplasman konturu



Şekil 5.41.  $s/H=1$ 'de referans değerlere göre elde edilen deplasman konturu

Palyeli donatılı duvarda ayrıca Sürşarj yükünün modele etkisi araştırılmıştır. Analizlerde Çizelge 5.13. deki parametreler kullanılmıştır. Analiz sonunda elde edilen deplasman ve güvenlik katsayısı değerleri Çizelge 5.14. de sunulmaktadır.

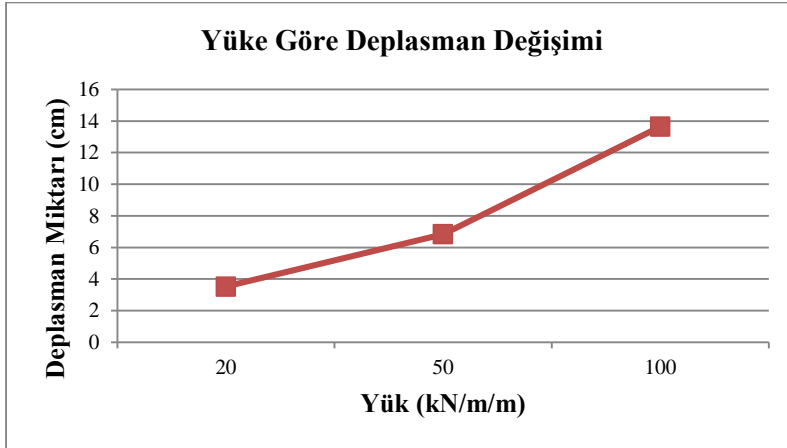
Çizelge 5.13. Analiz parametreleri

Model (Geogrid Lü=5m / La=7.5m)		Değer
Dolgu	$\phi$ (°)	35
	E (kN/m <sup>2</sup> )	40000
Zemin	$\phi$ (°)	45
	E (kN/m <sup>2</sup> )	80000
Geogrid	EA <sub>1</sub> (kN/m)	2000
Yüzey Elemanı	EI(kNm <sup>2</sup> /m)	8438
Palye Genişliği	m	5
Yük	q (kN/m/m)	Değişken

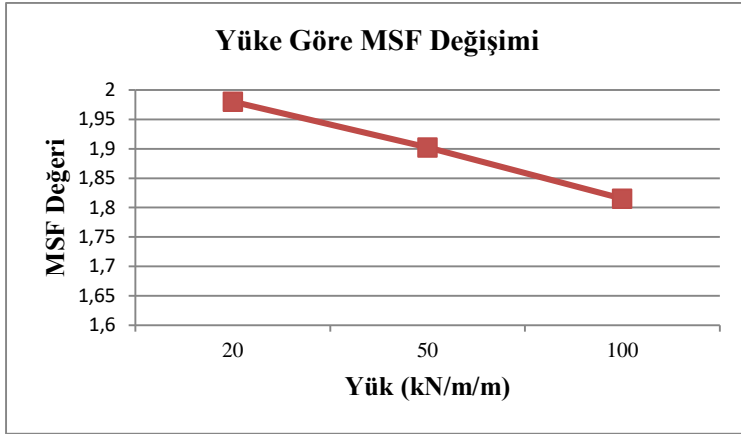
Çizelge 5.14. Değişen yük altında deplasman ve MSF değişimi

Yük (kN/m/m)	Deplasman (cm)	MSF
20	3.52	1.98
50	6.84	1.902
100	13.65	1.815

Beklendiği gibi sonuçlarda yük artımına karşılık deplasmanın arttığı (Şekil 5.42.), güvenlik katsayısının ise azaldığı (Şekil 5.43.) görülmektedir.

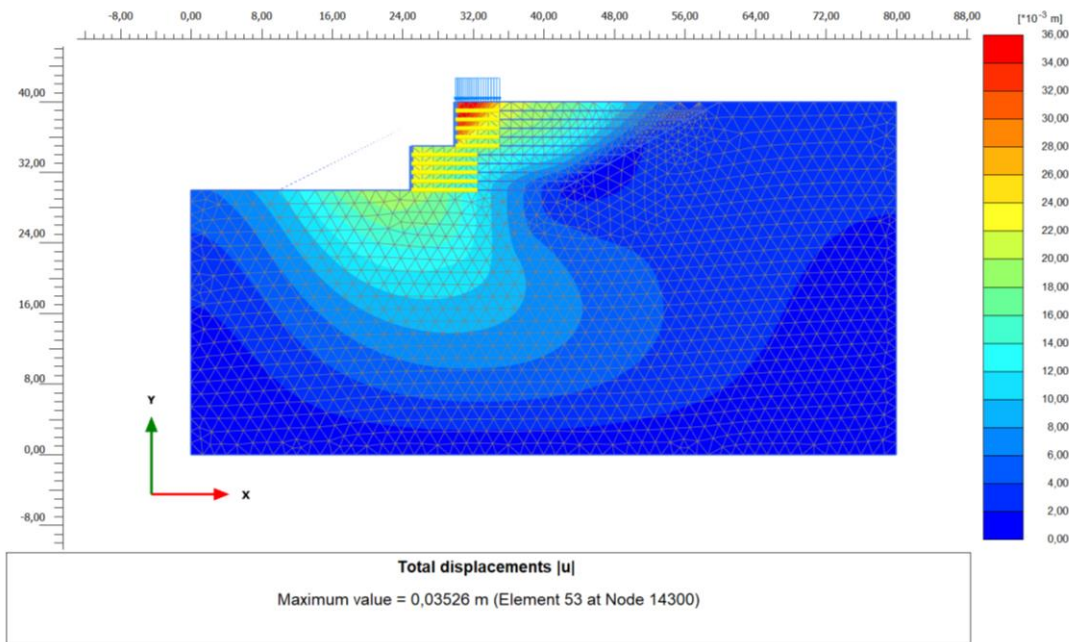


Şekil 5.42. Yüke göre deplasman değişimi

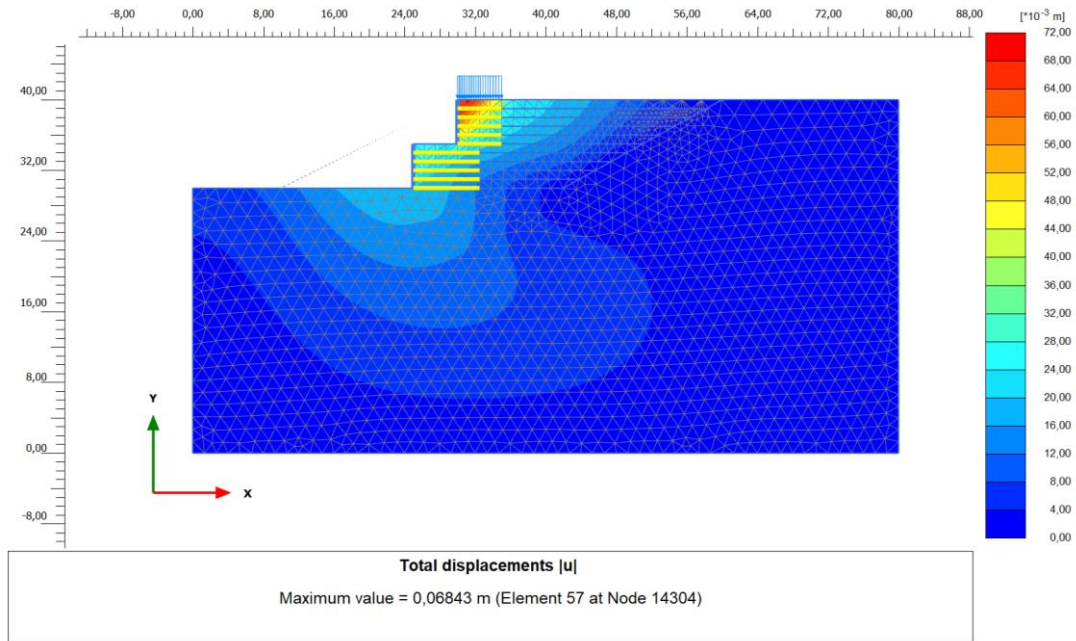


Şekil 5.43. Yüke göre MSF değişimi

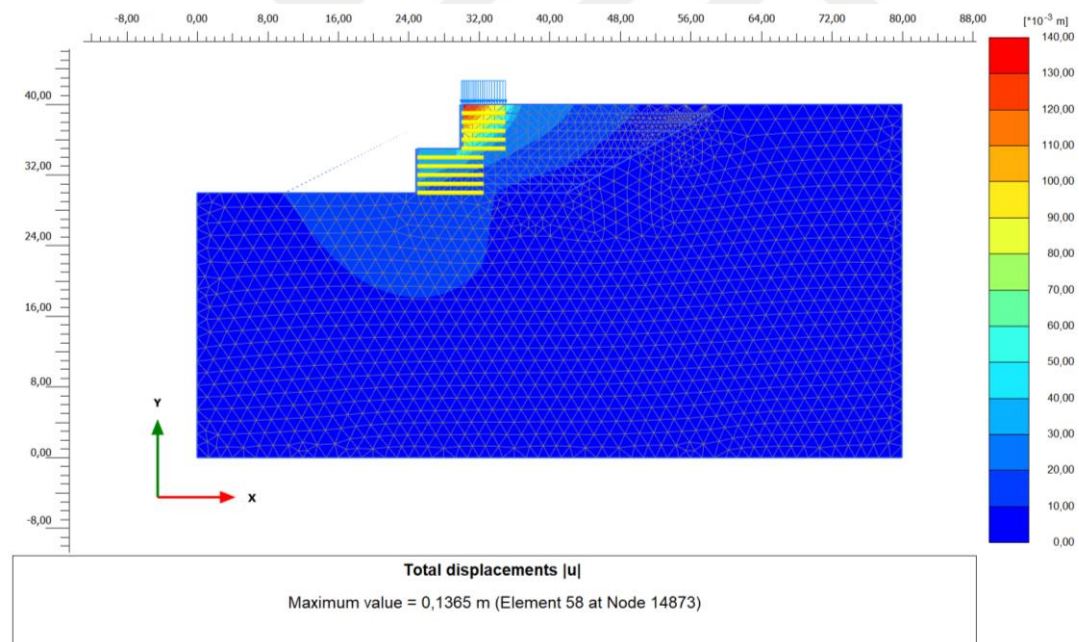
Sürşarj yükünün probleme etkisinin araştırıldığı Seri 3 analizlerinde deplasman konturları da dikkate alınarak Şekil 5.44.- Şekil 46.'de sunulmuştur.



Şekil 5.44.  $q=20$  kN/m/m'de analiz değerlerine göre elde edilen deplasman konturu



Şekil 5.45.  $q=50$  kN/m/m’de analiz değerlerine göre elde edilen deplasman konturu



Şekil 5.46.  $q=100$  kN/m/m’de analiz değerlerine göre elde edilen deplasman konturu

#### 5.4.4. Seri 4: Kademeli (Palyeli) Donatılı Duvarda Hassaslık Analizi

Bu çalışmada Model 3 üzerinde araştırma yapılmıştır. Model 3’de 10m yüksekliğindeki donatılı duvar iki parçalı palyeli olarak düşünülmüştür. Bu amaçla doğal zemin, dolgu malzemesi, yüzey elemanı ve donatı elemanının özellikleri belirli sınırlar arasında



seçilerek, bu sınırlar aralığında hassaslık analizleri yapılmıştır. Söz konusu parametrelerin minimum, maksimum ve referans değerleri Çizelge 5.15.'de sunulmaktadır. Bu parametreler oluşturulurken mevcut modellerde kullanılan parametreler referans olarak kabul edilmiştir. Referans parametrelere göre analizler yapıldıktan sonra minimum ve maksimum değerler arasında hassaslık analizi yapılarak parametrelerin sonuçlara etkisi incelenmiştir.

Çizelge 5.15. Kademeli (palyeli) donatılı duvar sensitivite analiz parametreleri

Model (Geogrid Lü=10m / La=15m)		Min.	Ref.	Maks.
Dolgu	$\phi$ (°)	20	35	45
	E (kN/m <sup>2</sup> )	20000	40000	80000
Zemin	$\phi$ (°)	30	45	55
	E (kN/m <sup>2</sup> )	40000	80000	120000
Geogrid	EA <sub>1</sub> (kN/m)	1000	2000	4000
Yüzey Elemanı	EI(kNm <sup>2</sup> /m)	1837.5	8438	23430
Yük	q (kN/m/m)	20		
Palye Genişliği	s (m)	5		

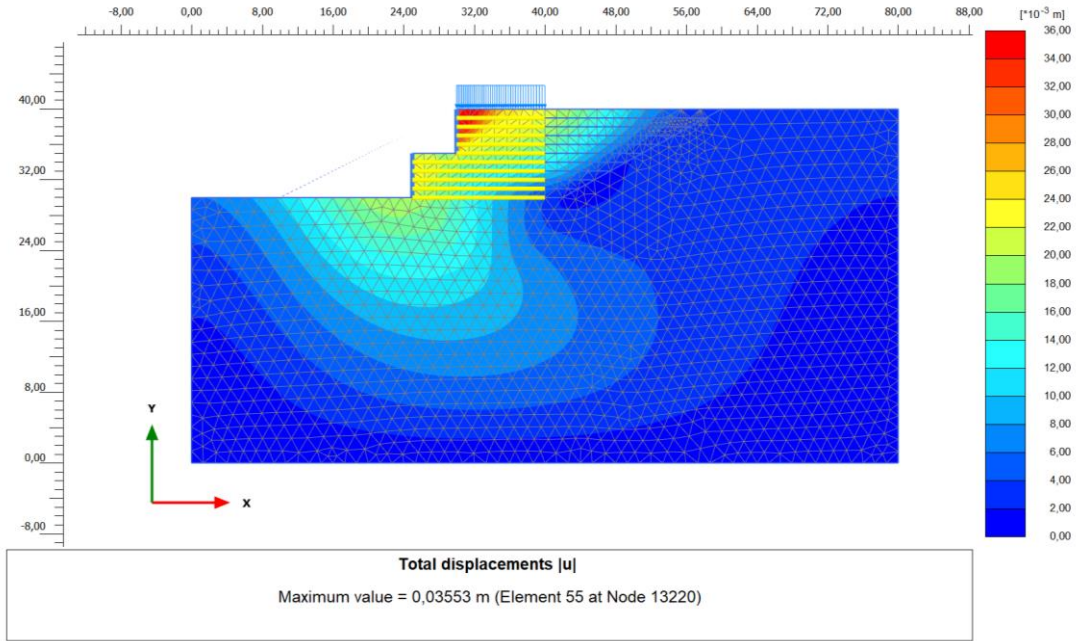
Analiz sonunda elde edilen deplasman ve güvenlik katsayısı değerleri Çizelge 5.16. da sunulmaktadır. Bu parametreler ışığında yapılan analizden elde edilen deplasman ve MSF değerlerinden dolgu malzemesinin kayma mukavemeti açısının etkin parametre olduğu ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 5.16. Kademeli donatılı duvar sensitivite analiz sonuçları

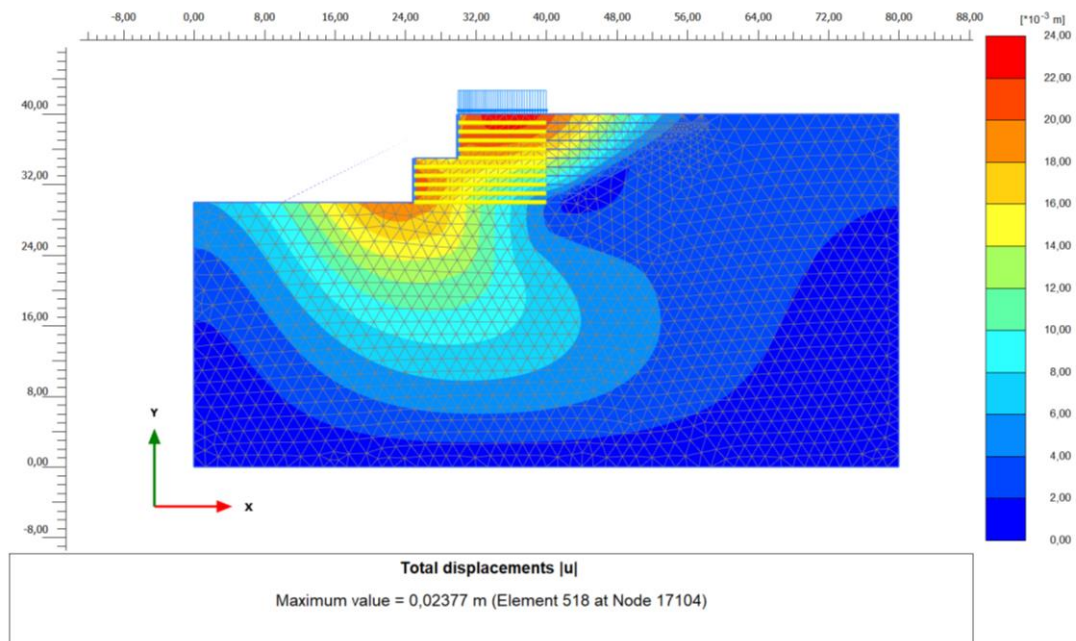
Model (Geogrid Lü=10m / La=15m)		Deplasman (%)	MSF (%)
Dolgu	$\phi$ (°)	68	52
	E (kN/m <sup>2</sup> )	11	8
Zemin	$\phi$ (°)	4	30
	E (kN/m <sup>2</sup> )	1	1
Geogrid	EA <sub>1</sub> (kN/m)	15	7
Yüzey Elemanı	EI(kNm <sup>2</sup> /m)	0	1

Referans değerlere göre yapılan analiz sonucunda elde edilen deplasman konturu Şekil 5.47.'de, maksimum değerlerin dikkate alındığı analiz sonucunda elde edilen deplasman konturu Şekil 5.48.'da ve minimum değerlere göre yapılan analiz sonuçları ise Şekil 5.49.'de sunulmaktadır. Maksimum değerlerin kullanıldığı durumda yapılan hassaslık

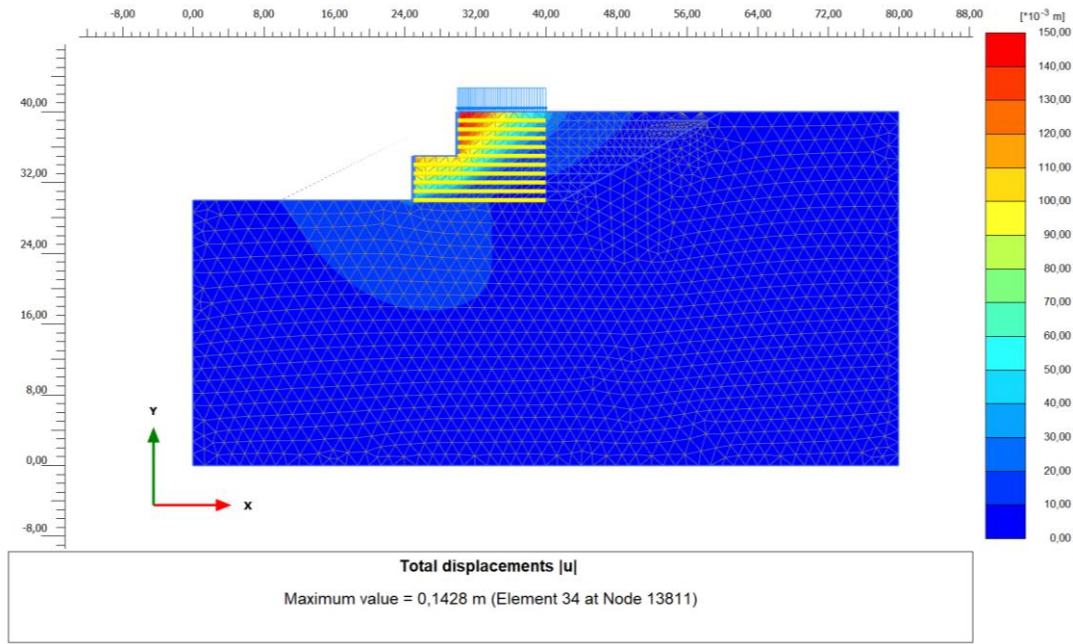
analizlerinde maksimum deformasyon değeri 2.4cm bulunurken, minimum değerde oluşan deformasyon 14.3cm mertebesindedir. Referans değerde ise deformasyon 3.5cm olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.47. Referans değerlere göre elde edilen ortalama deplasman konturu

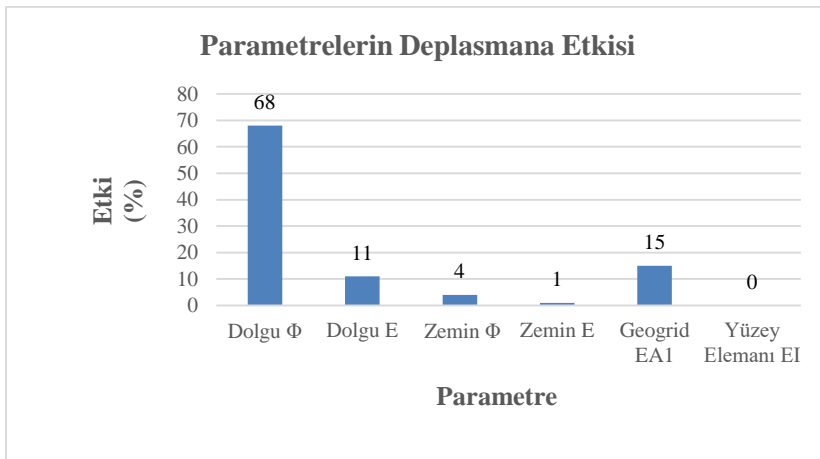


Şekil 5.48. Maksimum değerlere göre elde edilen minimum deplasman konturu



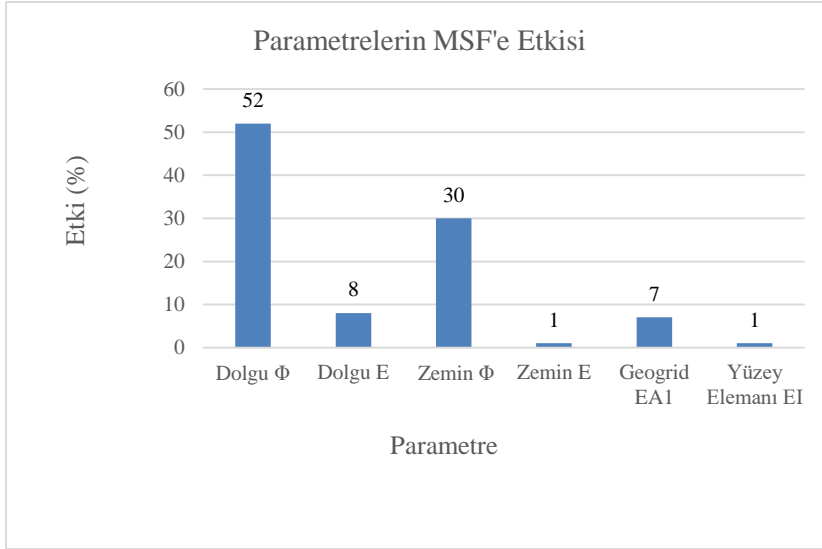
Şekil 5.49. Minimum değerlere göre elde edilen maksimum deplasman konturu

Seçilen parametrelerin deplasmana etkisi Şekil 5.50.'de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, duvar dolgusu kayma mukavemeti açısının sonuçlara etkisi %68, elastisite modülünün %11, doğal zemin kayma mukavemeti açısının %4, donatı elemanının aksenal rijitliğinin ise %15 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.50. Seçilen parametrelerin deplasman etkisi

Seçilen parametrelerin MSF etkisi Şekil 5.51.'de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, duvar dolgusu kayma mukavemeti açısının sonuçlara etkisi %52, elastisite modülünün %8, doğal zemin kayma mukavemeti açısının %30, donatı elemanının aksenal rijitliğinin ise %7 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.51. Seçilen parametrelerin MSF etkisi

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

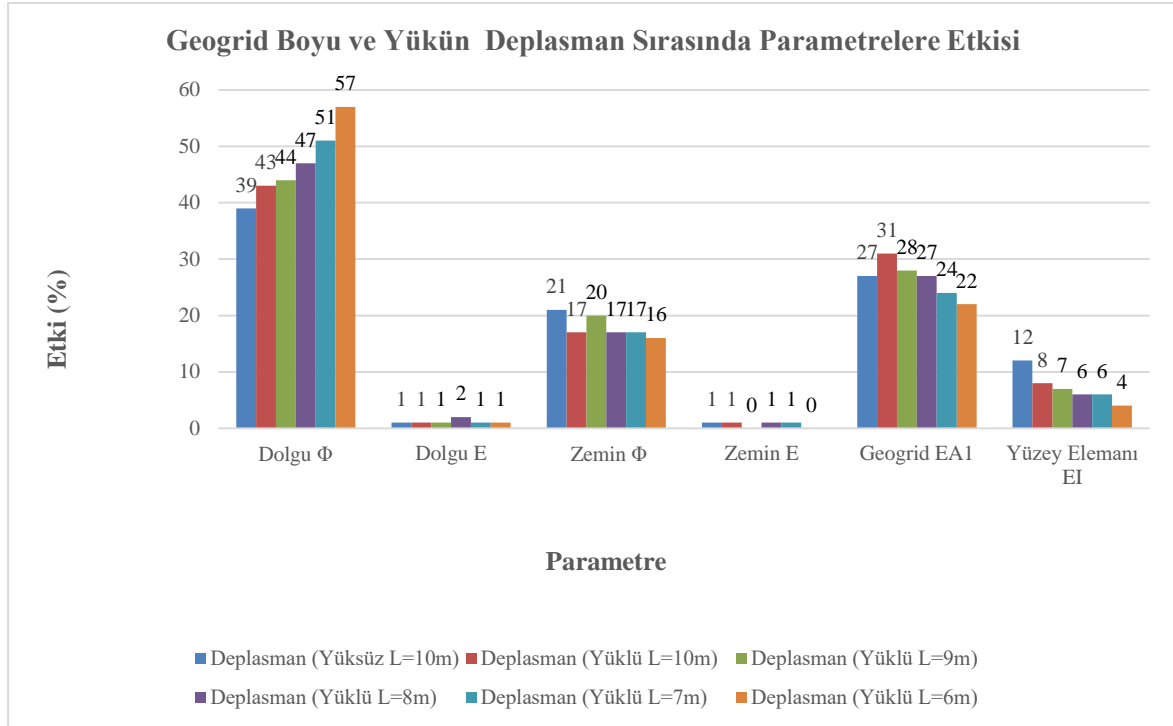
Bu çalışmada donatılı duvarları etkileyen parametreler üç farklı geometrik model üzerinde sonlu elemanlar programı kullanılarak analiz edilmiştir. İncelenen parametreler dolgu ve mevcut zeminin kayma mukavemeti açısı, donatı elemanının eksenel rijitliği ve yüzey elemanının eğilme rijitliğidir. Hassaslık analizi olarak bilinen yöntem kullanılarak parametrelerin davranışa etkisi incelenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda ulaşılan sonuçlar aşağıda sunulmaktadır;

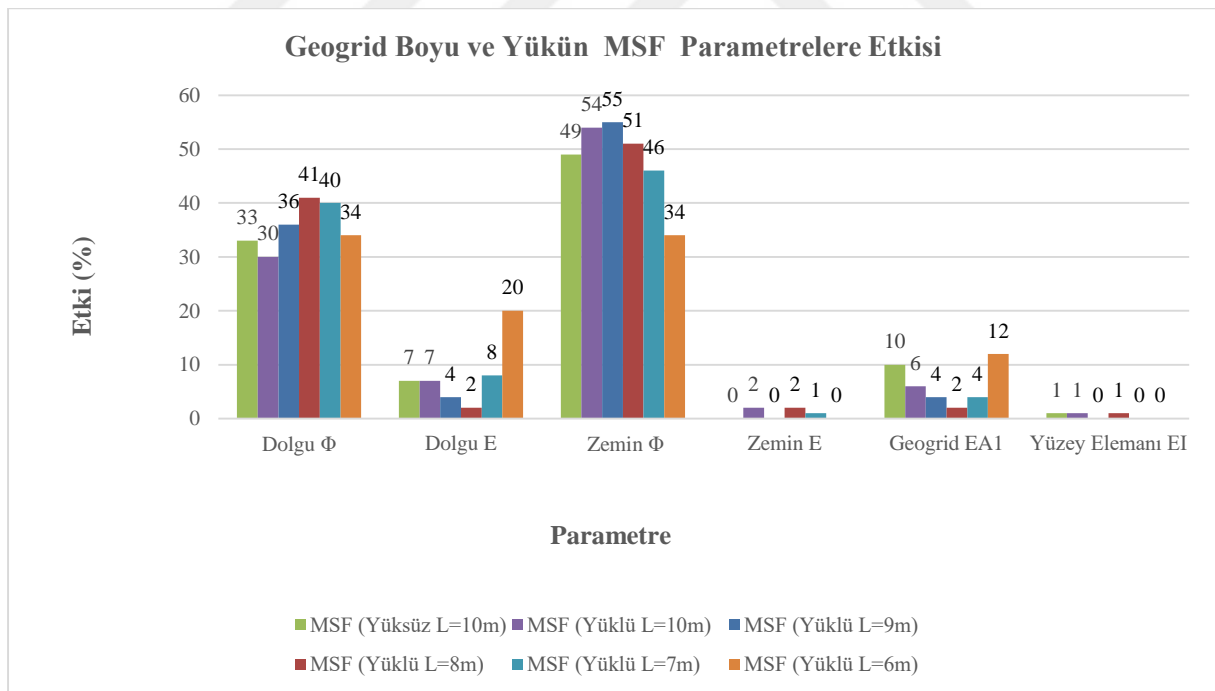
- 10 m yüksekliğinde donatılı bir duvar palyesiz yapıldığında, deplasman dikkate alındığında sistemi etkileyen en önemli parametreler; dolgu kayma mukavemeti açısı, zemin kayma mukavemeti açısı ve geogrid eksenel rijitliğidir. Sisteme sürşarj yükü etki ettirildiğinde ise etkin parametreler olarak dolgu kayma mukavemeti açısı ve geogrid eksenel rijitliği öne çıkmaktadır. Hassaslık analizinde deplasman dikkate alındığında sistemi etkileyen parametreler topluca Şekil 6.1.'de sunulmaktadır.
- Aynı problemde MSF dikkate alındığında sistemi etkileyen en önemli parametreler; dolgu kayma mukavemeti açısı ve zemin kayma mukavemeti açısıdır. Sisteme sürşarj yükü etki ettirildiğinde ise etkin parametreler olarak dolgu kayma mukavemeti açısı, zemin kayma mukavemeti açısı ve geogrid eksenel rijitliği, olarak ön plana çıkmaktadır. Hassaslık analizinde MSF dikkate alındığında sistemi etkileyen parametreler topluca Şekil 6.2.'de sunulmaktadır.
- Geogrid boyu değiştirilerek palyesiz 10 m duvarda yapılan sensitivite analizinde deplasmana etkileyen ana parametreler; dolgu kayma mukavemeti açısı, doğal zemin kayma mukavemeti açısı ve geogrid eksenel rijitliğidir. Geogrid eksenel rijitliği etkisi artıkça dolgu kayma mukavemeti açısının etkisi azalmaktadır. Zemin kayma mukavemeti açısı ve yüzey eleman etkisi yaklaşık sabit kalmaktadır.
- Geogrid boyu değiştirilerek palyesiz 10 m duvarda yapılan sensitivite analizinde güvenlik katsayısına etkileyen ana parametre doğal zemin kayma mukavemeti açısıdır. Yapılan analizlerde 10 m yüksekliğinde yapılan donatılı duvar için ideal geogrid boyu 8m'dir. Zira

dolgu kayma mukavemeti açısı o boya kadar artarken sonrasında azalmakta, geogrid etkisi o boya kadar azalırken sonrasında artmaktadır.

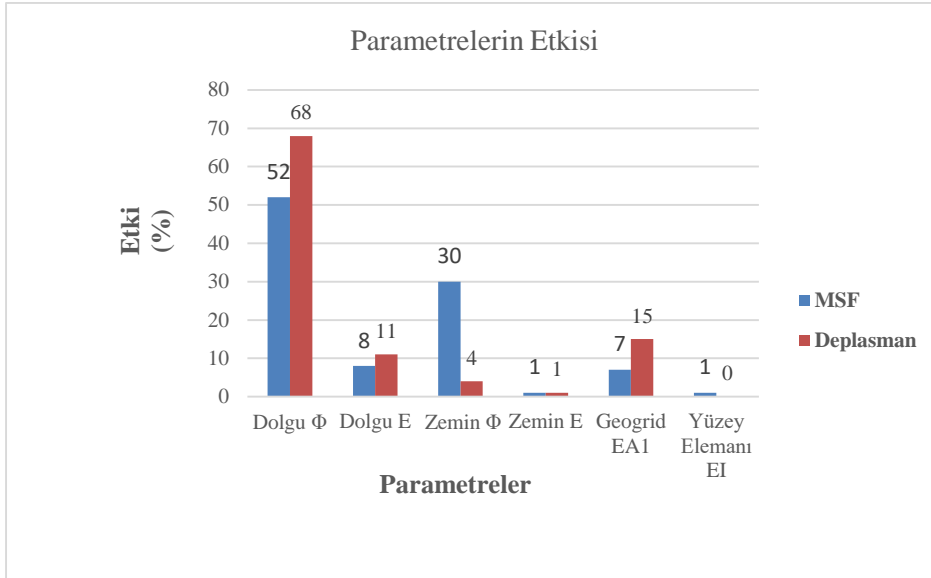
- Mühendislik uygulamalarında servis yükleri dikkate alınarak yapılan çözümlerde elastik bölgede kalındığından elastisite modülünün sisteme katkısı önemlidir ve bu değer kayma mukavemeti parametreleri ile doğrudan ilişkilidir.
- Tez çalışması kapsamında yapılan hassaslık analizlerinde elastisite modülünün etkisinin diğer parametrelere göre daha az olması sebebi doğal ve dolgu zeminlerin kayma mukavemeti parametrelerinin ön plana çıkmasıdır.
- Palyeli donatılı duvarlarda Sürşarj yükü 20 kN/m/m'den 100 kN/m/m'ye arttığında deplasman 3.9 katı artmaktadır.
- Palyeli donatılı duvarlarda s/H oranı artıkça deplasman azalmaktadır. s/H, 0.4 değerinden sonra deplasmandaki değişim azalmakta asimtota ulaşmakta olup s/H için optimum değer 0.5 alınabilir.
- Palyeli donatılı duvarda yapılan sensitivite analizinde deplasman dikkate alındığında dolgu kayma mukavemeti açısı, elastisite modülü ve geogrid eksenel rijitliği etkin rol oynarken, MSF dikkate alındığında dolgu ve doğal zemin kayma mukavemeti açısı etkili olmaktadır (Şekil 6.3.).



Şekil 6.1. Hassaslık analizinde kullanılan parametrelerin deplasmana etkisi



Şekil 6.2. Hassaslık analizinde kullanılan parametrelerin MSF'e etkisi



Şekil 6.3. Seçilen parametrelerin deplasman ve MSF etkisinin karşılaştırması

Çalışmada hassaslık analizleri, geoteknik mühendisliği uygulamalarında seçilen zemin ve malzeme özelliklerinin farklı sınırlar içinde çok sayıda analiz yapılmasına gerek duyulmadan bir model üzerinde hesap yaparak tasarımın risklerini ortaya koymasına oldukça önemlidir. Bu açıdan hassaslık analizleri geoteknik mühendisliğinde yeni çalışmaların hızlı ve efektif olarak yapılmasının önünü açacaktır.

### Öneriler

Bu çalışmada dikkate alınan geogrid donatılı duvar dikkate alınan parametreler ile birlikte küçük ölçekli laboratuvar model deney çalışmalarıyla tekrarlanabilir. Böylece bu çalışmada elde edilen sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırma imkânı bulunur.

Benzer çalışma hem sayısal hem deneysel olarak çok palyeli daha yüksek duvar çözümlerine de genişletilebilir.

Sayısal analizler farklı programlar yardımıyla tekrarlanıp plaxis programının karşılaştırması yapılabilir.

Donatılı duvar problemlerinin geleneksel dayanma yapıları ile bir model üzerinde ekonomik karşılaştırılması yapılabilir.



## KAYNAKLAR

1. Töremiş, E.İ., (2003). *Geotekstiller ve Plaxis Sonlu elemanlar Programı*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
2. Brorsson, I., Eriksson, L., (1986). *Long Term Properties of Geotextiles and Their Function as a Separator in Road Construction*, Vienna Austria.
3. Arenicz And Chowdhury, (1988). *Analysis of staged Construction for a Reinforced Earth Wall*, Geotechnical Engineering Congress.
4. Barret, B., Ruckman A., Richardson G., (1998). *Geotextile-Reinforced Retaining Walls Using Granular Backfills*, Geotechnical Fabrics Report
5. Shukla, S. K., (2002). *Geosynthetics and Their Applications*, Thomas Telford Publishing, London.
6. Koerner R. M., (1998). *Designing with Geosynthetics*, Prentice-Hall Inc, New Jersey.
7. Url-1, <http://www.geogridfabric.com/geogrid/biaxial-geogrid.html>, (07.04.2018).
8. Ingold, T.S. and Miller, K.S., (1998). *Geotextiles Handbook*, Thomas Telford Publishing, London
9. Giroud, J.P., (1986). *From Geotextiles To Geosynthetics: A Revolution in Geotechnical Engineering – 3rd International Conference on Geotextiles*, Vienna.
10. Url-2, <http://izoforte.com/index.php/portfolio-posts/geotekstil-keceler/>, (07.04.2018).
11. Url-4, <http://turkish.geosynthetic-materials.com/>, (07.04.2018).
12. Url-3, <http://www.jeomembran.net/>, (07.04.2018).
13. Url-4, <http://turkish.geosynthetic-materials.com/>, (07.04.2018).
14. Url-5, <http://www.cevkainsaat.com/resimler/69bb29a4e869e6efc6642b3ae0e886f0.jpg>, (07.04.2018).
15. Akinmunsuru, J.O., Akınbolade, J.A., (1981). *Stability of loaded footing on reinforced soil*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 107(6):819-827.
16. Patel, M.M., (1982). *Influence of Shape of Footings on the Performance of the Reinforced Sand Bed*, Proceedings of the Conference on Construction Practices and Instrumentation in Geotech. Eng., 1:265-269.
17. Fragaszy, J.R., Lawton, E., (1984). *Bearing Capacity Of Reinforced Sand Subgrades*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 110(10):1500-1507.
18. Guido, V.A., Biesiadecki, G.L., Sullivan, M.J., (1985). *Bearing Capacity Of A Geotextile Reinforced Foundation*, Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 3:1777-1780.

19. Khing, K.H., Das, B.M., Puri, V.K., Cook, E.E. ve Yen, S.C., (1993). *The Bearing Capacity of a Strip Foundation on Geogrid-reinforced Sand*, Geotextiles and Geomembranes, 12, 351-361.
20. Omar, M.T., Das, B.M., Puri, V.K. ve Yen, S.C., (1993). *Ultimate Bearing Capacity of Shallow Foundations on Sand with Geogrid Reinforcement*, Canadian Geotechnical Journal, 30, 545-549
21. Yetimoğlu, T., Wu, J.T.H., Sağlamer, A., (1994). *Bearing Capacity Of Rectangular Footings On Geogrid-Reinforced Sand*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 120(12):2083-2099.
22. Omar, M.T., Das, B.M., (1994). *The effects of foundation width on model tests for the bearing capacity of sand with geogrid reinforcement*, Geotechnical & Geological Engineering, Volume 12, Issue 2, 133–141
23. Shin, E.C., Das, B.M., (2000). *Experimental Study Of Bearing Capacity Of A Strip Foundation On Geogrid-Reinforced Sand*, Geosynthetics International
24. Shin, E.C., Das, B.M., Lee, E.S., Atalar, C., (2002). *Bearing Capacity Of Strip Foundation On Geogrid-Reinforced Sand*. Geotechnical and Geological Engineering, 20:169-180.
25. Laman, M., Yıldız, A.A., (2003). *Model Studies Of Ring Foundations On Geogrid Reinforced Sand*, Geosynthetics International, 10(5):142-152.
26. Patra, C.R., Das, B.M., Bhoi, M., Shin, E.C., (2006). *Eccentrically Loaded Strip Foundation On Geogrid-Reinforced Sand*, Geotextiles and Geomembranes,.
27. Berg, R.R., Bonaparte, R., Anderson, R.P., Choverly, V.E., (1986), *Design, Construction and Performance of The Geogrid Reinforced Soil Retaining Walls*, Third International Conference on Geotextiles, Vienna, 401-406.
28. Juran, I., Christopher, B., (1989), *Reinforced Soil Retaining Walls*, Journal of Geotechnical Engineering, 115,7, 905-925.
29. Lo, S.C.R., Xu, D.W., (1992), *Short Term Stability of Reinforced Embankment on Soft Clay: Modelling of Strain Softening and Reinforcement Extensibility*, Soil and Foundations, 32,1, 189-204
30. Rowe, R.K., Gnanendran, C.T., Landva, A.O., Valsangkar, A.J., (1995). *Construction and Performance of A Full-Scale Geotextile Reinforced Test Embankment*, Canadian Geotechnical Journal, 32,3, 512-534.
31. Porbaha, A ve Goodings, D.J., (1996). *Centrifuge Modelling of Geotextile-Reinforced Step Clay Slopes*, Canadian Geotechnical Journal 33, 696-704.
32. Porbaha, A., (1998). *Traces of Slip Surfaces in Reinforced Retaining Structures*, Soils and Foundations, 38,1 89-95.
33. Yardımcı, T., (2013). *Investigation Of Geosynthetic Reinforced Tiered Retaining Walls Using Finite Element Analysis*, Master of Science, Boğaziçi University, Institute of

- Science and Technology, İstanbul.
34. Başbuğ, E., (2011). *Dynamic Behaviour Of Geogrid Reinforced Segmental Block Walls Under Earthquake Loads*, Doctor of Philosophy, Boğaziçi University, Institute of Science and Technology, İstanbul.
  35. Selek, Ö., (2011). *Earthquake Behavior Of Geosynthetic-Reinforced Retaining Structures*, Doctor of Philosophy, Boğaziçi University, Institute of Science and Technology, İstanbul.
  36. İçöz, G., (2014). *Effect Of Cyclic Loading On Connection Strength Of Geosynthetic-Reinforced Structures*, Master of Science, Boğaziçi University, Institute of Science and Technology, İstanbul.
  37. Bajlan, H. G. F., (2016). *Numerical Analysis Of Geosynthetic Reinforced Earth Walls With Finite Element Method*, Master of Science, Dicle University, Institute of Science and Technology, Diyarbakır.
  38. Kotan, D., (2008). *Geotekstil Donatılı Zemin İstinat Duvarları İle Yamaçlarda Stabilitenin Arttırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
  39. Aslan, V.Z., (2007). *Design And Numerical Modeling Of Reinforced Earth Retaining Structures*, Master of Science, Boğaziçi University, Institute of Science and Technology, İstanbul.
  40. Sert, S., Önalp A., (2011), *Derin Kazılarda Hassaslık Ve Parametre Değişimi Analizi*, 4. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
  41. Keskin, M.S., 2009. *Güçlendirilmiş Kumlu Şevlere Oturan Yüzeysel Temellerin DeneySEL ve Teorik Analizi*. Doktora Tezi, Ç. Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana,
  42. Bildik, S., (2013). *Farklı Zemin Ve Yükleme Koşullarındaki Gömülü Boru Sistemlerinin Davranışının Araştırılması*, Doktora Tezi, Çukurova Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
  43. Potts, D.M. and Zdravković, L.T., (1999). *Finite Element Analysis In Geotechnical Engineering: Theory*, Thomas Telford, London, UK.
  44. Kılıç, H., (2000). *Yumuşak Zeminler Üzerine Oturan Dolgu Barajlarda Deformasyonların DeneySEL ve Nümerik Yöntemlerle Belirlenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,
  45. Yıldız, A., (2002). *Donatılı Zeminler Üzerine Oturan Yüzeysel Temellerin Analizi*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
  46. Kondner, R.L., (1963). *Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils*. Journal of Soil Mechanics and Foundations, 89(SM1):115-143.
  47. Duncan, M. and Chang, C.Y., (1970). *Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils*. Journal of Soil Mechanics and Foundations, 96(SM5):1629-1653

48. Plaxis, 2018. User Manual. 2D, (Edited by BRINKGREEVE, R.J.B.), Delft University of Technology&PLAXIS b.v., The Netherlands.
49. Potts, D.M. and Zdravković, L.T., (1999). *Finite Element Analysis In Geotechnical Engineering: Theory*, Thomas Telford, London, UK.



**EKLER**



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Çalık, Özcan  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 29.06.1983 / Of  
Medeni hali : Evli  
Telefon : (0532) 248 38 18  
Faks :  
e-mail : ozcancalik@gmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	İş Sağlığı ve Güvenliği	01.2017
Lisans	Jeoloji Mühendisliği	02.2009
Önlisans	Elektrik	06.2002
Lise	Fen Bilimleri	06.2000

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
01.2017-06.2018	Unitek İnşaat A.Ş.	Şantiye Şefi
02.2013-12.2016	Tuğlacılar A.Ş.	Proje Müd.
02.2010-02.2013	Temeltaş İnşaat A.Ş.	Proje Müd.

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

### Teşekkür ve Ödüller

18 Haziran 2010, Mühendislik Jeolojisi Uluslararası Türk Milli Komitesi, Erguvanlı Mühendislik Jeolojisi Ödülü, Bitirme Tezi Düzeyinde

### Hobiler

Kitap okumak, Seyahat etmek, Sinema ve tiyatro izlemek



*ĞELİŐİM ĞELİŐMEKTİR..*