



**GEOGRİD DONATILI İSTİNAT DUVARI
PROJESİNİN SONLU ELEMANLAR VE LİMİT
DENGİ YÖNTEMLERİ İLE ANALİZİ: BURSA
İLİ OSMANGAZİ İLÇESİ ÖRNEĞİ**

Yüksek Lisans Tezi

Mert TOS

Eskişehir 2024

**GEOGRİD DONATILI İSTİNAT DUVARI PROJESİNİN SONLU
ELEMENLAR VE LİMİT DENGİ YÖNTEMLERİ İLE ANALİZİ: BURSA İLİ
OSMANGAZİ İLÇESİ ÖRNEĞİ**

MERT TOS

YÜKSEK LİSANS Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. BURAK EVİRGEN

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ağustos 2024

*Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından onaylanan
“TÜBİTAK 2210-A Ulusal Yüksek Lisans Bursu” programı kapsamında desteklenmiştir.*

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

MERT TOS'un GEOGRİD DONATILI İSTİNAT DUVARI PROJESİNİN SONLU ELEMANLAR VE LİMİT DENGİ YÖNTEMLERİ İLE ANALİZİ: BURSA İLİ OSMANGAZİ İLÇESİ ÖRNEĞİ başlıklı çalışması 19/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ Anabilim dalında YÜKSEK LİSANS Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Doç. Dr. Burak EVİRGİN

Üye

: Prof. Dr. Mustafa TUNCAN

Üye

: Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

19/08/2024

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm YÜKSEK LİSANS ęrencisi MERT TOS, GEOGRİD DONATILI İSTİNAT DUVARI PROJESİNİN SONLU ELEMANLAR VE LİMİT DENGİ YÖNTEMLERİ İLE ANALİZİ: BURSA İLİ OSMANGAZİ İLÇESİ RNEğİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Daniřmanı

Doç. Dr. BURAK EVİRGEN

ÖZET

GEOGRİD DONATILI İSTİNAT DUVARI PROJESİNİN SONLU ELEMANLAR VE LİMİT DENGE YÖNTEMLERİ İLE ANALİZİ: BURSA İLİ OSMANGAZİ İLÇESİ ÖRNEĞİ

MERT TOS

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos 2024

Danışman: Doç. Dr. BURAK EVİRGİN

Bu çalışma kapsamında Bursa ili Osmangazi ilçesinde inşası planlanan maksimum yüksekliği 9,0 metre teşkil eden, donatılı istinat duvarı projesinin tüm aşamalarıyla geoteknik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sahada yapılan toplam 6 adet sondaj verisinden oluşturulan jeolojik profile göre sahadaki zemin birimlerinin geoteknik tasarım parametreleri seçilmiştir. Geogrid donatılı istinat duvarının iç ve dış stabilite kontrolleri Amerikan Karayolları Şartnamesi 'ne (AASHTO) göre el hesabıyla, limit denge yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışma kısmında farklı yüzey elemanı, "Mohr-Coulomb" ve "Hardening-Soil" dolgu malzemesi modeli ile tek aşamalı ve çok aşamalı modelleme senaryoları değerlendirilerek karşılaştırılmıştır. El hesabı ve limit denge yöntemi hesaplarında incelenen durum çerçevesinde güvenli sonuçlar veren metot değişkenlik göstermektedir. Plaxis 2D ile gerçekleştirilen parametrik analiz sonuçlarında, dolgu malzemesi ve yüzey elemanı değişkenlerine göre oturma miktarı açısından maksimum %12'lik fark elde edilmiştir. Geogridler üzerine gelen çekme gerilmelerinde dolgu malzemesi değişkeni açısından %5 fark oluşurken, yüzey elemanı parametresi içeren modellerde %35 fark oluşmaktadır. Özetle, tez kapsamında geogrid donatılı istinat duvarı tasarımı için örnek bir şablon teşkil etmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Geosentetikler, Geogrid, Toprakarme istinat duvarı, Limit denge analizi, Sonlu elemanlar yöntemi.

ABSTRACT

ANALYSIS OF A GEOGRID-REINFORCED RETAINING WALL PROJECT USING FINITE ELEMENT AND LIMIT EQUILIBRIUM METHODS: A CASE STUDY FROM OSMANGAZI DISTRICTİ, BURSA

MERT TOS

Department of CIVIL ENGINEERING

Programme in Geotechnics

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, August 2024

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. BURAK EVİRGEN

In this study, the geotechnical design of a reinforced retaining wall project with a maximum height of 9.0 meters, planned to be constructed in the Osmangazi district of Bursa province, was carried out in all stages. The geotechnical design parameters of the soil units on the site were selected according to the geological profile created from the data of a total of 6 boreholes drilled on the site. The internal and external stability checks of the geogrid-reinforced retaining wall were performed using calculations according to AASHTO method, the limit equilibrium method, and the finite element method. In the parametric study section, different surface elements, “Mohr-Coulomb” and “Hardening-Soil” type of fill material models and single-stage and multi-stage modeling scenarios were evaluated and compared. The method providing reliable results in manual calculations and limit equilibrium method calculations varies depending on the case under consideration. In the parametric analysis results performed with Plaxis 2D, a maximum of 12% difference was obtained in terms of the amount of settlement according to the fill material and surface element variables. While a 5% difference occurs in the tensile stresses on the geogrids in terms of the fill material variable, a 35% difference occurs in models containing the surface element parameter. In summary, this thesis aims to serve as an exemplary template for the design of geogrid-reinforced retaining walls.

Keywords: Geosynthetic, Geogrid, MSE wall, Limit equilibrium analysis, finite element method.

TEŞEKKÜR

Öncelikle, tez danışmanım sayın Doç. Dr. Burak Evirgen'e, bana her adımda rehberlik ettiği ve akademik yolculuğum boyunca desteğini esirgemediği için sonsuz teşekkür ederim. Onun bilgi ve deneyimi, bu çalışmanın tamamlanmasında büyük bir rol oynamıştır.

Ayrıca, bu süreçte her zaman yanımda olan ve bana destek veren aileme teşekkür ederim. Annem, babam ve kardeşlerim, sizlerin sevgi ve sabrı olmasaydı, bu aşamaya gelmem mümkün olmazdı. Sizlere minnettarım.

Gelecekteki eşim Maide Ceren Boz'a da özel bir teşekkür etmek istiyorum. Bana olan inancın ve verdiği moral, bu zorlu süreçte beni ayakta tuttu. Senin sevgin ve desteğin, bu tezin arkasındaki en büyük motivasyon kaynaklarından biri oldu.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana kattıklarından dolayı Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Elemanlarına teşekkür ediyorum.

TÜBİTAK 2210-A Ulusal Yüksek Lisans Burs Programı kapsamındaki burs desteğinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) sonsuz saygı, sevgi ve şükranlarımı sunarım. En derin teşekkürlerimi sunuyorum.

Yüksek lisans projesi için proje hakkında gerekli verileri paylaşan İstanbul Teknik A.Ş.'ye önemli katkılarından dolayı özel teşekkür borçluyuz.

MERT TOS

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

MERT TOS

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XIII
GÖRSELLER DİZİNİ	XVII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XVIII
1. GİRİŞ.....	1
2. TOPRAKARME İSTİNAT DUVARLARI	2
2.1. Tarihçe ve Gelişim.....	3
2.2. Yapısal Elemanlar	4
2.2.1. Dolgu malzemesi	4
2.2.2. Donatı elemanı	6
2.2.3. Yüzey elemanı (panel)	11
2.3. Yapım Aşamaları	12
2.4. Tasarım Kriterleri.....	13
3. LİTERATÜR TARAMASI.....	16
4. TOPRAKARME İSTİNAT DUVARI GEOTEKNİK TASARIM AŞAMALARI.....	25
4.1. Proje Alanı Jeolojik Profilin Oluşturulması.....	25
4.2. Yatay Eş Değer Deprem Katsayısı Hesabı.....	27

4.3. Proje Sahası Sıvılaşma Kontrolü	31
4.4. Geoteknik Parametrelerin Tespiti	34
4.5. Toprakarme İstinat Duvarının Amerikan Karayolları Şartnamesine göre el hesabıyla statik ve dinamik yükler altında tasarımı	37
4.5.1. Genel Bilgiler	37
4.5.2. Ön Tasarım	37
4.5.2.1. Donatı başlangıç uzunluğunun belirlenmesi	37
4.5.2.2. Topuk dolgusu yüksekliğinin belirlenmesi	38
4.5.3. Statik yükleme altında dış stabilite hesapları	38
4.5.3.1. Yatay basınç katsayısı hesabı	38
4.5.3.2. Sisteme etkileyen statik dış yüklerin hesabı	39
4.5.3.3. Duvar altı taban basıncı ve eksantrisitenin hesabı	39
4.5.3.4. Kayma tahkiki	41
4.5.3.5. Devrilme tahkiki	41
4.5.4. Dinamik yükleme altında dış stabilite hesapları	42
4.5.4.1. Sisteme etkileyen dinamik kuvvetlerin hesabı	42
4.5.4.2. Dinamik yükleme durumu kayma tahkiki	43
4.5.4.3. Dinamik yükleme durumu duvar altı taban basıncı ve eksantrisitenin hesabı	43
4.5.5. Statik yükleme altında iç stabilite hesapları	44
4.5.5.1. Statik yükleme kopma tahkiki	46
4.5.5.2. Statik yükleme sıyrılma tahkiki	47
4.5.5.3. Dinamik yükleme kopma tahkiki	47
4.5.5.4. Dinamik yükleme sıyrılma tahkiki	49
4.6. Toprakarme istinat duvarının limit denge metoduyla statik ve dinamik yükler altında tasarımı	51
4.6.1. Limit denge metoduyla iç stabilite tahkiki	52
4.6.2. Limit denge metoduyla dış stabilite tahkiki	56
4.7. Toprakarme istinat duvarının sonlu elemanlar yöntemiyle statik ve dinamik yükler altında tasarımı	59
4.7.1. Geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yöntemi	59
4.7.2. Toprakarme istinat duvarı plaxis 2d analizleri genel kabuller	60

4.7.3. Toprakarme istinat duvarı plaxis 2D analiz sonuçları, senaryo-1 (Plate yüzey elemanı, HS dolgu modeli, çok aşamalı modelleme).....	63
4.7.4. Toprakarme istinat duvarı Plaxis 2D analiz sonuçları, senaryo-2 (Plate yüzey elemanı, HS dolgu modeli, tek aşamalı modelleme)	71
4.7.5. Toprakarme istinat duvarı Plaxis 2D analiz sonuçları, senaryo-3 (Plate yüzey elemanı, MC dolgu modeli, tek aşamalı modelleme).....	78
4.7.6. Toprakarme istinat duvarı Plaxis 2D analiz sonuçları, senaryo-4 (Volume element yüzey elemanı, MC dolgu modeli, tek aşamalı modelleme)	85
4.7.7. Toprakarme istinat duvarı Plaxis 2D analiz sonuçları, senaryo-5 (Volume element yüzey elemanı, HS dolgu modeli, tek aşamalı modelleme)	92
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	100
KAYNAKÇA.....	107
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. Farklı uzunluklu donatılı şevler için kısa süreli analizler sonuçlarındaki güvenlik sayıları (Çiçek, Güler ve Yetimoğlu., 2015).....	24
Tablo 4.1. PGA değerleri için yerel zemin etki katsayısı F_{PGA} (Deprem Etkisi Altında Karayolu ve Demiryolu Tünelleri ile Diğer Zemin Yapılarının Tasarımı için Esaslar Yönetmeliği Tablo 2.1)	30
Tablo 4.2. SK-1 Sondajı sıvılaşma hesabı sonuçları.....	32
Tablo 4.3. Zemin Parametreleri Özet Tablo.....	36
Tablo 4.4. Analizlerde kullanılacak zemin parametresi özet tablo	37
Tablo 4.5. Statik ve dinamik yüklemeler altında gerçekleştirilen dış stabilite kontrolleri.....	44
Tablo 4.6. Toprakarme duvar inşaatında kullanılacak geogrid tipleri	45
Tablo 4.7. Toprakarme Duvar Statik ve Dinamik Yükleme Altında Geogrid Kopma Dayanımı Kontrolü.....	48
Tablo 4.8. Geogrid katmanları aktif donatı boyu L_e	49
Tablo 4.9. Dinamik Durum Sıyrılma Tahkiki Sonuçları.....	50
Tablo 4.10. MSEW İç Stabilite Hesap Sonuçları Özet Tablo.....	55
Tablo 4.11. Dolgu şevlerinin dış şev stabilitesi için en küçük güvenlik sayıları (EUROCODE 7 (EN 1997-1:2004)).....	56
Tablo 4.12. Şev stabilitesi analiz sonuçları	58
Tablo 4.13. Plaxis 2D modelinde kullanılan HS model zemin parametreleri.....	62
Tablo 4.14. Plaxis 2D modelinde toprakarme duvar yüzey elemanı volume element zemin parametreleri.....	62
Tablo 4.15. Plaxis 2D modelinde kullanılan MC model zemin parametreleri.....	62
Tablo 4.16. Plaxis 2D modelinde kullanılan plate eleman parametreleri	63
Tablo 4.17. Plaxis 2D Modelinde Kullanılan Plate Eleman Parametreleri.....	63
Tablo 4.18. Senaryo-1 geogrid çekme kuvvetleri- güvenlik katsayıları	70
Tablo 4.19. Senaryo-1 analiz sonucu uygunluk kontrolü	70
Tablo 4.20. Senaryo-2 geogrid çekme kuvvetleri- güvenlik katsayıları	77
Tablo 4.21. Senaryo-2 analiz sonucu uygunluk kontrolü	77
Tablo 4.22. Senaryo-3 geogrid çekme kuvvetleri- güvenlik katsayıları	84
Tablo 4.23. Senaryo-3 analiz sonucu uygunluk kontrolü	84

Tablo 4.24. Senaryo-4 geogrid çekme kuvvetleri- güvenlik katsayıları	91
Tablo 4.25. Senaryo-4 analiz sonucu uygunluk kontrolü	91
Tablo 4.26. Senaryo-5 geogrid çekme kuvvetleri- güvenlik katsayıları	98
Tablo 4.27. Senaryo-5 analiz sonucu uygunluk kontrolü	98



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Toprakarme İstinat Duvarı Genel Kesiti (Taylor vd. ,2023).....	4
Şekil 2.2. Geogrid sıyrılma direnci mekanizması (Koerner, (2005))	10
Şekil 2.3. Geogrid Donatılı İstinat Duvar İkinci Aşama Tipik Enkesit.....	12
Şekil 2.4. Geogrid Donatılı İstinat Duvarı İlk Sıra Geogridin Yerleştirilmesi Tipik Enkesit.....	13
Şekil 2.5. Geogrid Donatılı İstinat Duvarı İkinci Sıra Geogridin Yerleştirilmesi Tipik Enkesit.....	13
Şekil 2.6. MSE İstinat Duvarları İç Stabilite Göçme Mekanizmaları (Abdelmawla,2017)	14
Şekil 2.7. MSE İstinat Duvarı Dış Stabilite Göçme Mekanizmaları (Lim ve Tan,2005).....	15
Şekil 3.1. Analiz Geometrik Modeli (Wulandaria ve Tjandra (2015))	16
Şekil 3.2. Analiz Geometrik Modeli (Wulandaria ve Tjandra (2006))	17
Şekil 3.3. Geogrid Çekme Dayanımı-Güvenlik Katsayısı İlişkisi (Wulandaria ve Tjandra (2006))	17
Şekil 3.4. Geogrid Çekme Dayanımı-Dolgu Oturma İlişkisi (Wulandaria ve Tjandra (2006))	18
Şekil 3.5. Analiz Plaxis Modeli (Vashi, Patel ve Patel (2017)))	18
Şekil 3.6. Toplam Deplasman- Geogrid Aralığı İlişkisi (Vashi, Patel ve Patel (2017)).....	19
Şekil 3.7. Toplam Gerilme- Duvar Yüksekliği İlişkisi (Vashi, Patel ve Patel (2017)).....	19
Şekil 3.8. Yol dolgusu kesiti geometrileri (Karagül (2007)).....	20
Şekil 3.9. Oturma Analiz Sonuçları (Karagül, 2007)	20
Şekil 3.10. Geoduvlar sisteminin göçme güvenlik sayıları (H=13 m) (Polat (2020)).....	22
Şekil 3.11. Geosentetik Donatılı Dolgunun Geometrisi (Özköl (2006)).....	23
Şekil 4.1. SPT N' vs. Derinlik Grafiği	26
Şekil 4.2. Plastisite İndeksi (%) vs. Derinlik(m) Grafiği.....	26
Şekil 4.3. Proje Alanı Jeolojik Profili.....	27
Şekil 4.4. Tasarım Kesiti ve İdealize Zemin Profili	27
Şekil 4.5. TBDY 2018 Tablo 16.1.....	28

Şekil 4.6. AFAD Deprem Haritası Çıktıları DD-2 Deprem Düzeyi ZD Zemin	
Sınıfı; a: Genel Çıktılar, b: Spektral İvme Katsayıları.....	28
Şekil 4.7. AFAD Deprem Haritası Çıktıları DD-1 Deprem Düzeyi ZD Zemin	
Sınıfı; a: Genel Çıktılar, b: Spektral İvme Katsayıları.....	29
Şekil 4.8. İçsel sürtünme açısı seçimi (US Navy, 1982)	35
Şekil 4.9. Ön tasarım sonucu belirlenen analiz kesiti.....	45
Şekil 4.10. MSEW Analiz Çıktıları (a) Çıktı-1 (b) Çıktı-2 (c) Çıktı-3 (d) Çıktı-4	
(e) Çıktı-5.....	53
Şekil 4.11. Toprakarme İstinat Duvarı (H = 9.0 m) için uzun dönem – statik	
durum koşulunda en kritik göçme dairesi ve bu daire için hesaplanan	
güvenlik sayısı (FS:2.29>1.5)	57
Şekil 4.12. Toprakarme İstinat Duvarı (H = 9.0 m) için kısa dönem – statik durum	
koşulunda en kritik göçme dairesi ve bu daire için hesaplanan	
güvenlik sayısı (FS:3.43>1.3)	57
Şekil 4.13. Toprakarme İstinat Duvarı (H = 9.0 m) için DD-2 Deprem düzeyi kısa	
dönem – depremlili durum koşulunda en kritik göçme dairesi ve bu	
daire için hesaplanan güvenlik sayısı (FS:2.83>1.1)	58
Şekil 4.14. Toprakarme İstinat Duvarı (H = 9.0 m) için DD-1 Deprem düzeyi kısa	
dönem – depremlili durum koşulunda en kritik göçme dairesi ve bu	
daire için hesaplanan güvenlik sayısı (FS:2.15>1.1)	58
Şekil 4.15. Toprakarme duvar plaxis 2d analizleri şeması	61
Şekil 4.16. Plaxis analiz aşamaları-Başlangıç	64
Şekil 4.17. Plaxis analiz aşamaları-Adım 1	64
Şekil 4.18. Plaxis analiz aşamaları-Adım 2	64
Şekil 4.19. Plaxis analiz aşamaları-Adım 3	64
Şekil 4.20. Plaxis analiz aşamaları-Adım 4.....	65
Şekil 4.21. Plaxis analiz aşamaları-Son aşama.....	65
Şekil 4.22. Senaryo-1 analiz sonuçları (a) Deformasyon açığı (b) Toplam düşey	
deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam	
yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme	
kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti	
(g) Dinamik durum güvenlik sayısı analizi (FS:1,29>1,1) (h) Statik	
durum güvenlik sayısı analizi (FS:1,94>1,5).....	66

Şekil 4.23. Senaryo-2 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi (FS:1,87>1,5) (h) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi 1,34>1,1 (i) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi (FS:1,1>1,1) (i) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi (FS:2,40>1,3) 72

Şekil 4.24. Senaryo-3 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi (FS:1,97>1,5) (h)) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi (FS:2,55>1,3) (i) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi (FS:1,1>1,1) (i) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi 1,38>1,1 79

Şekil 4.25. Senaryo-4 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi (FS:2,99>1,3) (h)) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi (FS:1,98>1,5) (i) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi (FS:1,42>1,1) (i) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi 1,1>1,1 86

Şekil 4.26. Senaryo-5 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi (FS:2,95>1,3) (h)) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi (FS:2,00>1,5) (i) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi (FS:1,45>1,1) (i) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi 1,17>1,1 93

Şekil 5.1. El hesabı ve MSEW programıyla hesaplanan eksantrisite değerleri..... 100

Şekil 5.2. El hesabı ve MSEW programıyla hesaplanan kayma güvenliği faktörleri ..	101
Şekil 5.3. El Hesabı ve MSEW programıyla hesaplanan sıyırılma dayanımı güvenliği faktörleri.....	101
Şekil 5.4. Plaxis 2D analizleri senaryo-1 ve senaryo-2 sonuçları karşılaştırma özet tablo.....	102
Şekil 5.5. Plaxis 2D analizleri senaryo-1 ve senaryo-2 çekme dayanımı güvenlik faktörü	103
Şekil 5.6. Senaryo 2/3/4/5- Geogrid katmanları statik çekme dayanımı güvenlik sayısı	103
Şekil 5.7. Senaryo 2/3/4/5- geogrid katmanları dinamik çekme dayanımı güvenlik sayısı	104
Şekil 5.8. Senaryo 2/3/4/5- analiz sonucu oturma miktarları özet grafik	104
Şekil 5.9. Senaryo 2/3/4/5- analiz sonucu toptan göçme güvenlik sayıları özet grafik	105
Şekil 5.10. Tüm yöntemler statik çekme dayanımı güvenlik sayısı	105
Şekil 5.11. Tüm yöntemler dinamik çekme dayanımı güvenlik sayısı.....	106
Şekil 5.12. Plaxis 2D ve Slide programları toptan göçme güvenlik sayısı karşılaştırılması	106

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 2.1. Kompozit İstinat Duvarı Örneği (http-1).....	2
Görsel 2.2. Yaklaşım Dolgusu Toprakarme İstinat Duvarı Örneği (Taylor vd.,2023)	3
Görsel 2.3. Seattle Limanı yaklaşık 41 metre yüksekliğinde MSE İstinat Duvarı (http-2)	4
Görsel 2.4. Toprakarme İstinat Duvarı Örnek Dolgu Malzemesi (http-3).....	5
Görsel 2.5. Çelik Şerit Donatı kullanımında Panel elemana bağlantı detayı (http-4)	6
Görsel 2.6. Geotekstil Duvar İmalatı (http-5)	7
Görsel 2.7. Çeşitli Geotekstil Örnekleri (Sayed vd.,2016)	8
Görsel 2.8. Ekstrüde Çift Yönlü Geogrid (http-6)	9
Görsel 2.9. Dokuma Metoduyla Üretilen Polyester Geogrid (İstanbul Teknik A. Ş. Örgülü Geogrid İmalat Makinesi).....	9
Görsel 2.10. Tek Yönlü Geogrid, Çift Yönlü Geogrid, Üç Yönlü Geogrid (http-7)	10
Görsel 2.11. Geogrid ve zemin daneleri arasındaki kenetlenme (Tensar, 2009)	11
Görsel 2.12. Basit Modüler Blok Yüzey Elemanları Örnekleri (Kesim,1996).....	12
Görsel 4.1. Proje Alanında Yapılan Sondaj Çalışmaları.....	25
Görsel 4.2. Sıvılaşmaya Karşı Kafes Sistemi Uygulaması (Erol ve Kuruoğlu, 2023)	34

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	: Alpha
β	: Beta
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
y	: Yatay
d	: Düşey
SC	: Killı kım
SM	: Siltli kum
GC	: Killi çakıl
GM	: Siltli çakıl
SP	: Kötü derecelendirilmiş kum
GP	: Kötü derecelendirilmiş çakıl
H	: Yükseklik
L	: Boy
SPT	: Standart penetrasyon testi
UD	: Örselenmemiş numune
SK	: Sondaj kuyusu
TBDY	: Türkiye bina deprem yönetmeliği
AFAD	: İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü
DD-2	: 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem yer hareket düzeyi
DD-1	: 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem yer hareket düzeyi
k_{maks}	: Potansiyel yenilme kütleindeki maksimum deprem katsayısı
PGA	: Maksimum yer ivmesi
k_h	: Yatay eşdeğer deprem katsayısı
F_1	: 1,0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı
S_1	: 1,0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı
GS	: Güvenlik sayısı
S	: Duvar açıklığı
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
USCS	: Unified soil classification system
E	: Elastisite modülü

C_u	:	Drenajsız kayma mukavemeti
c'	:	Kohezyon
e	:	Eksantrsite
FS	:	Güvenlik katsayısı
FHWA	:	Federal highway administration
HS	:	Hardening Soil
MC	:	Mohr Coulomb
DSM	:	Derin Karıştırma Kolonu



1. GİRİŞ

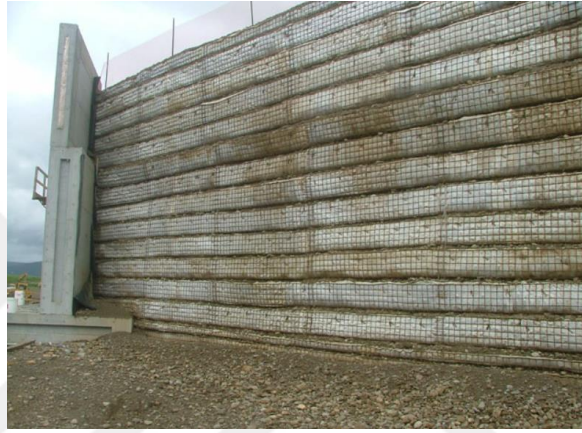
Bu tez çalışmasında, Bursa'da inşa edilecek olan toprakarme istinat duvarı projesi için Amerikan Karayolları Şartnamesi AASHTO (Yayın 5.8 1996)'ya göre el hesabıyla, limit denge analizi ve sonlu elemanlar yöntemi ile tasarım gerçekleştirilmiştir. İstanbul Teknik İnşaat A.Ş. firmasından yalnızca sondaj verileri ve maksimum duvar yüksekliği kesit çizimi temin edilmiştir. Tez kapsamında kullanılan metotlar ile karşılaştırılmalı analizler gerçekleştirilmiş, uygulama zorlukları ve kamulaştırma sınırı gibi proje şartları dikkate alınmamış olmakla birlikte firma tarafından hazırlanan uygulama projesi ile alakası bulunmamaktadır. Toprakarme istinat duvarı projesinin saha jeolojik profili oluşturulmuş ardından gerekli geoteknik analizler gerçekleştirilmiştir. Sahada sıvılaşma problemi tespit edilmiş ve derin iyileştirme kolonları ile zemin iyileştirme projesi hazırlanmıştır. Jeolojik profili ve geoteknik tasarım parametreleri belirlenen toprakarme istinat duvarının maksimum kesit yüksekliği 9,00 metre için tasarım gerçekleştirilmiştir.

Toprakarme istinat duvarları, geleneksel betonarme istinat duvarlarına kıyasla ekonomik, esnek ve daha hızlı inşa edilebilmeleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Toprakarme istinat duvarları, zemin kütlesi içinde yüksek mukavemetli polimer veya çelik malzemelerden yapılan donatı elemanlarının kullanılması ile oluşturulan yapı sistemleridir. Bu tür duvarlar hem yapısal stabiliteyi sağlamak hem de zemin deformasyonlarını kontrol etmek için tasarlanmaktadır. Donatı elemanı, zemin ile entegre olarak, zemin içindeki çekme gerilmelerini karşılar ve yapının dayanıklılığını artırır.

Çalışmada kullanılan yöntemlerden biri olan limit denge yöntemi; stabilite analizinde kullanılan geleneksel bir yaklaşımdır ve özellikle güvenlik katsayılarının hesaplanmasında etkilidir. Sonlu elemanlar yöntemi ise, daha ayrıntılı bir analiz sunarak, yapı elemanlarının ve zemin tabakalarının davranışını modelleme imkânı sağlar. Bu iki yöntemin birlikte kullanılması, daha güvenilir ve kapsamlı bir değerlendirme yapılmasına olanak tanır. Bu çalışma, toprakarme istinat duvarlarının tasarım ve analiz süreçlerine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

2. TOPRAKARME İSTİNAT DUVARLARI

Taş duvar, betonarme istinat duvarı, toprakarme istinat duvarı gibi birçok istinat duvarı çeşidi bulunmaktadır. Projenin gereksinimlerine göre istinat duvarı tipinin seçilmesi gerekmektedir. Toprakarme istinat duvarları ekonomik olması ve güvenilir mühendislik çözümleri sunmasından dolayı günümüzde tercih edilir konuma gelmiştir. İstinat duvarı projeleri tek tip duvar içerebildiği gibi bazı durumlarda kompozit çözümler de sunulabilmektedir. Betonarme ve toprakarme kompozit istinat duvarı örneği Görsel 2.1’de verilmiştir.



Görsel 2.1. Kompozit İstinat Duvarı Örneği (<http-1>)

Toprakarme istinat duvarları, zemin kütlelerinin stabilitesini artırmak amacıyla yüksek mukavemetli güçlendirme elemanları kullanılarak inşa edilen mühendislik yapılarıdır. Bu duvarlar, zemini güçlendirme elemanları ile bir arada tutarak, yapının dayanıklılığını ve uzun ömürlü olmasını sağlar. Donatı elemanları genellikle çelik şeritler, geogrid, geotekstil gibi malzemelerden yapılır ve bunlar dolgu malzemesi ile uyumlu şekilde çalışarak yapısal bütünlüğü sağlar.

Toprakarme istinat duvarlarının statik ve dinamik yükler altında davranışları birçok çalışmada deneysel olarak incelenmiş, yüksek performans gösterdiği tespit edilmiştir. Toprakarme istinat duvarları dolgu malzemesi, zemin donatısı ve yüzey elemanından oluşmaktadır. Zemin donatıları ile zemine çekme ve sıyırılma dayanımı kazandıran toprakarme istinat yapıları, yüzey elemanları ile de zeminin kaymasını engelleyerek düşey bir yüzey oluşturur.

Toprakarme istinat duvarları, karayolu ve demiryolu köprüleri, yaklaşım dolguları, karayolu ve demiryolu dolgu veya balast tabakasında yaygın olarak kullanılan

elemanlardır. Bu yapılar, ek olarak şevlerin stabilizasyonu arttırarak projede kullanılacak dolgu miktarını önemli ölçüde azaltır. Uygulama örneği Görsel 2.2’de verilmiştir.



Görsel 2.2. Yaklaşım Dolgusu Toprakarme İstinat Duvarı Örneği (Taylor vd.,2023)

2.1. Tarihçe ve Gelişim

Geoteknik problemlere karşı zemine güçlendirme elemanı eklenmesi sistematığıyla gerçekleştirilen zemin iyileştirme yöntemleri, tarih öncesi dönemlerden beri kullanılmaktadır. İnsanlık tarihinin eski dönemlerine bakıldığında kerpiç evlerde saman kullanımı, değişik harç karışımı denemeleri bu duruma verilebilecek örnekler niteliğindedir.

Toprakarme istinat duvarı modern anlamda ilk olarak 1960’ların başında Fransız mimar ve mühendis Henri Vidal tarafından ortaya atılmıştır. Çelik şeritlerle toprakarme istinat duvarı sistemi geliştirmiştir. Bu teknolojiyi kullanan ilk duvar, 1972 yılında Los Angeles şehrinde inşa edilmiştir. Günümüzde, Toprakarme istinat duvarları Amerika Birleşik Devletleri’nde ve dünya genelinde yaygın olarak kullanılmakta olup, çoğu dolgu durumunda tercih edilen duvar tipi haline gelmiştir. Amerika Birleşik Devletleri’nde inşa edilen en yüksek kalıcı toprakarme istinat duvarı, Görsel 2.3’de verilen 41 m’si zemin yüzeyindeki yaklaşık 46 metre yüksekliğindeki duvardır (Taylor vd.,2023).

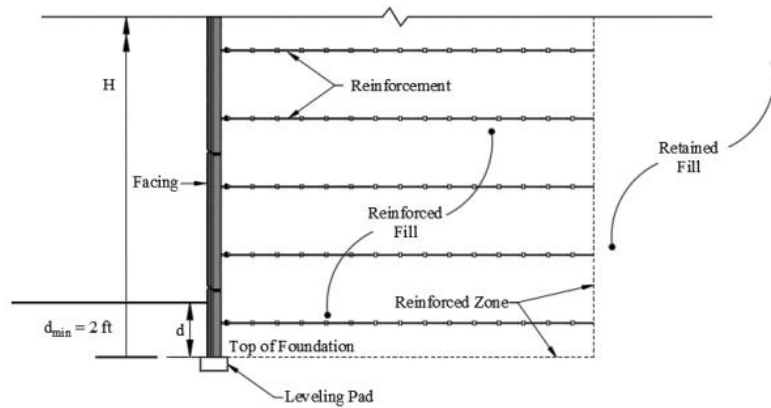


Görsel 2.3. *Seattle Limanı yaklaşık 41 metre yüksekliğinde MSE İstinat Duvarı (http-2)*

Toprakarme istinat duvarlarında geosentetik türevi geotekstillerin kullanımı ilk olarak 1971 yılında Fransa’da gerçekleştirilirken, geogridlerin kullanımı 1980’li yıllara dayanır. İlk geogrid kullanımına 1981 yılında Amerika Birleşik Devletleri’nde rastlanmakta olup 1983 yılında yaygınlaşmıştır. 1980’lerin başlarından bu yana, donatılı zemin yapılarında geosentetik malzemelerin kullanımı önemli ölçüde artmıştır (Taylor vd. ,2023).

2.2. Yapısal Elemanlar

Toprakarme istinat duvarları temel olarak yüzey elemanı, zemin donatısı, dolgu malzemesi ve topuk elemanından oluşmaktadır. Toprakarme istinat duvarının genel kesiti Şekil 2.1’te verilmiştir.



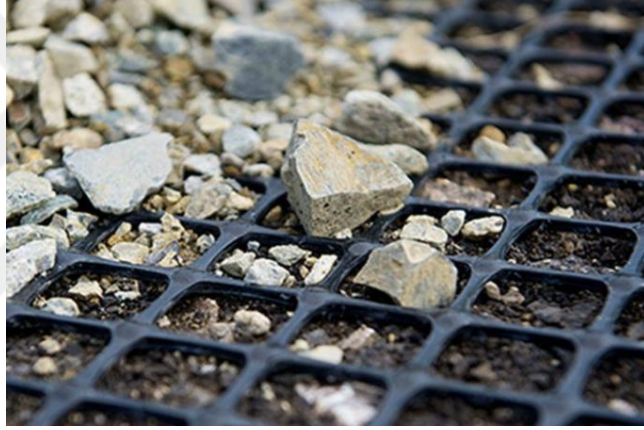
Şekil 2.1. *Toprakarme İstinat Duvarı Genel Kesiti (Taylor vd. ,2023)*

2.2.1. Dolgu malzemesi

Dolgu malzemesi, toprakarme istinat duvarının temel bileşenlerinden biridir ve genellikle yüksek drenaj kapasiteleri ve sıkıştırılabilirlik özellikleri nedeniyle granüler

malzemeler tercih edilir. Dolgu malzemesi, donatı elemanları ile birlikte çalışarak duvarın iç stabilitesini sağlar. Dolgu malzemesinin kalitesi, duvarın performansı ve dayanıklılığı açısından kritik öneme sahiptir.

Yaygın olarak kullanılan dolgu malzemeleri kırmataş, çakıl ve kumdur. Kırmataş, iyi derecelendirilmiş, temiz ve tek eksenli basınç dayanımı yüksek taşlardan oluşmaktadır. Donatı ile yüksek kenetlenme etkisi göstererek dolgu mukavemet özelliklerini artırır. Parçacıklı yapısıyla iyi drenaj sağlar. Çakıl, yuvarlak veya köşeli iri daneli malzemelerden oluşmaktadır. Kenetlenme etkisi kırmataştan sonra en yüksek dolgu malzemesidir. Kum, iyi derecelendirilmiş ve temiz olmalıdır. İnce daneli malzeme içermemelidir. Ekonomik olması sebebiyle toprakarme istinat duvarlarında yaygın olarak kullanılır. Örnek dolgu malzemesi görseli Görsel 2.4’de verilmiştir.



Görsel 2.4. Toprakarme İstinat Duvarı Örnek Dolgu Malzemesi (<http-3>)

Dolgu malzemesinin seçiminde drenaj, sıkıştırılabilirlik, mukavemet ve dayanıklılık olmak üzere 4 temel unsur bulunmaktadır. İstinat duvarlarının en yaygın göçme sebebi yetersiz drenaj koşulları sebebiyle dolgunun ağırlaşması ve artan basınçlar sonucunda yeterli mukavemetin sağlanmaması durumudur. Dolgu malzemesi, suyun hızlı bir şekilde drenajını sağlayarak hidrostatik basıncın oluşmasını önlemelidir. Bundan dolayı, granüler malzeme seçilmelidir. İnce daneli malzemenin geçirgenlik katsayısının düşük olmasından dolayı hızlı bir şekilde drenajı sağlayamamaktadır. İkinci şart, dolgu malzemesi yüksek sıkıştırılabilir nitelikte olmalıdır. Yeterince sıkıştırılmamış dolgu ile imal edilen toprakarme istinat duvarları donatı ile yeterli kenetlenmeyi sağlayamayarak göçme problemine neden olmaktadır. Üçüncü şart, dolgu malzemesi yüksek içsel sürtünme açısına ve yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olmalıdır. Son olarak, dolgu malzemesi çevresel koşullara ve kimyasal etkilere karşı dayanıklı olmalıdır.

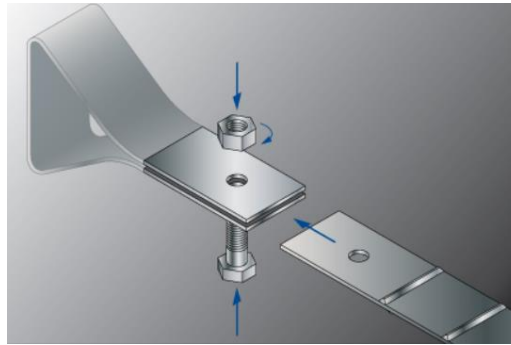
Dolgu malzemesinin uygunluğunu sağlamak için çeşitli testler yapılmaktadır. Bu testler malzemesinin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirler. Elek analizi, hidrometre analizi, proktor deneyi, CBR deneyi, kesme kutusu deneyi yaygın testlerdir.

2.2.2. Donatı elemanı

Zemin donatıları, dolgu malzemesi içine yerleştirilen, yüksek çekme ve sıyrılma dayanımına sahip elemanlardır. Genellikle çelik şeritler veya geosentetik malzemeler kullanılır.

Çelik şeritler, toprakarme istinat duvarların önemli takviye elemanlarından biridir. Yüksek mukavemetli çelik malzemelerden üretilen bu şeritler, ağır yüklerin taşınmasında üstün performans gösterir. Aşırı yüklü toprakarme istinat duvarlarında ve endüstriyel yapılar gibi yüksek önem arz eden mühendislik projelerinde tercih edilirler. Çelik şeritler, zemin içindeki çekme gerilmelerini karşılayarak yapının stabilitesini artırır ve deformasyonları minimize eder. Korozyona karşı dayanıklılık sağlamak amacıyla genellikle galvanizlenmiş veya özel kaplamalarla korunmuş çelik malzemeler kullanılır. Bu sayede uzun ömürlü ve çevresel etkilere karşı dirençli bir takviye elemanı elde edilir. Çelik şeritlerin montajı ve yerleştirilmesi, esneklik gerektiren uygulamalara göre daha fazla işçilik ve özen gerektirir, ancak sağladıkları yüksek mukavemet ve dayanıklılık, bu dezavantajları telafi eder. Dolayısıyla, çelik şeritler, ağır yüklerin ve yüksek duvarların bulunduğu projelerde güvenilir ve etkili bir çözüm sunar.

Toprakarme istinat duvarlarında çelik şeritlerin panel elemanına montajı bağlantı elemanı ile gerçekleştirilmektedir. Bu bağlantı elemanının dayanımını da istinat duvarı tasarımında önem arz etmektedir. Çelik şeritlerle inşa edilen toprakarme istinat duvarlarında göçme genel olarak bağlantı elemanlarında meydana gelmektedir. Panel elemanına bağlantı detayı Görsel 2.5’de verilmiştir.



Görsel 2.5. Çelik Şerit Donatı kullanımında Panel elemana bağlantı detayı (<http-4>)

Geosentetik donatılar sürdürülebilirlik, maliyet, mukavemet vb. avantajlarından dolayı günümüz inşaat projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Temel altı taşıma gücü artışı, karayolu ve demiryolu güzergâh dolgusu mukavemet artışı ve şev stabilizasyonlarında güvenli şev tasarımı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Geogrid ve geotekstil en çok kullanılan geosentetik donatı çeşitleridir. Geosentetik donatılar, istinat duvarlarında ankraj görevi görerek zeminden aktarılan gerilmeleri karşılayıp, yüksek çekme mukavemeti sayesinde zeminin kayma dayanımını arttırırken aynı zamanda zeminin stabilizasyon özelliklerini iyileştirir ve deformasyonları azaltır.

Geotekstil donatılar, zemine çekme dayanımı kazandırmasının yanı sıra zemin yapısında suyun drenajına katkı sağlar. Bohçalama metoduyla inşa edilen geotekstil donatılı duvarlar, statik ve dinamik yükler altında yüksek şev stabilizasyonu sağlarken aynı zamanda suyun duvar dolgusuna girişini de engellemektedir. Bohçalama metoduyla inşa edilen örnek geotekstil donatılı istinat duvarı Görsel 2.6’da verilmiştir.



Görsel 2.6. Geotekstil Duvar İmalatı (<http-5>)

Geotekstiller, ham madde, üretim metodu, uygulama alanına göre farklılık gösteren esnek ve kumaş görünümündeki malzemelerdir. Çeşitli geotekstil örnekleri Görsel 2.7’de yer almaktadır. Geotekstil donatıların bir diğer önemli rolü ayırma fonksiyonudur. Dolgu malzemelerinin yumuşak zemin üzerine inşa edilmesi durumunda batma problemi yaşanmaktadır. Geotekstil donatılar ayırma fonksiyonu ile batma problemini ortadan kaldırmaktadır. Ayırma fonksiyonu sayesinde geogrid, geohücre donatılarla kompozit kullanılarak diğer donatı elemanlarının korumasında da önemli rol oynarlar.



Görsel 2.7. Çeşitli Geotekstil Örnekleri (Sayed vd.,2016)

Geogridler, yüksek çekme mukavemeti ve düşük deformasyon özelliklerini içeren, üzerinde ızgara şeklinde boşluklu modellemeye sahip, donatılı zemin uygulamalarında kullanılan, geosentetik malzemeden üretilmiş zemin iyileştirme yapı elemanıdır. Geogridlerin çalışma prensibi kenetlenme üzerinedir. Geogridler, dolgu malzemesi ile kenetlenerek aderans oluşturup, zeminin kayma direncini artırır. Ek olarak yüksek çekme mukavemeti sayesinde statik ve dinamik yüklemeler altında gelen çekme gerilmelerine karşı dayanıklıdır.

Gün geçtikçe kullanımı ve kullanım alanı yaygınlaşan geogridler geoteknik mühendisliğinin önemli bir parçası haline gelmiştir. Asfaltlarda meydana gelen yansıma çatlaklarını engellemek, donatılı istinat yapılarında şev stabilizasyonunu sağlamak, temel altı taşıma gücünü arttırmak gibi birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Geogridlerden yüksek verim alabilmek için projelendirilmeli, uygulama aşamaları kontrol edilmeli, kalite kontrol şartlarına uygun olmalıdır. Geogridlerin, düşük maliyet, sürdürülebilirlik, imalat kolaylığı, çevre dostu olması ve sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklı olması gibi çeşitli avantajları bulunmaktadır.

Geogridlerin sınıflandırılmasındaki en önemli etken, üretim yöntemidir. Çekme dayanımı geogridin üretim yöntemine göre şekillenmektedir. Ekstrüde, dokuma ve kaynak yöntemi ile üretilen geogridler olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilir.

Ekstrüde geogridler, istenilen ızgara açıklığı doğrultusunda polimer hammaddeye delinme işlemi uygulanır ve gerdirilerek malzemeye çekme dayanımı kazandırılır. Ekstrüde geogrid örneği Görsel 2.8’de verilmiştir. Bu yöntem sayesinde birleşim bölgelerinde yüksek çekme dayanımı elde edilir. En yaygın kullanılan geogrid tipi ekstrüde yöntemiyle üretilmiş geogridlerdir.



Görsel 2.8. Ekstrüde Çift Yönlü Geogrid (<http-6>)

Dokuma geogridler ise hammaddenin enine ve boyuna nervürlerin birbirine dokunduktan sonra, örgü yoluyla çaprazları birleştirilerek üretilirler. Dokuma metoduyla üretilen polyester geogrid örneği Görsel 2.9’da verilmiştir. Dokuma geogridlerin üretiminde kullanılan en yaygın iki malzeme polyester ve cam elyafıdır. Cam elyaf geogridler yüksek ve düşük sıcaklığa dayanıklı olmasından dolayı bitüm kaplı asfaltın içinde kullanılmaktadır. Genellikle karayolu inşaatı, karayolu asfalt tamiri, kaldırım uygulamalarında kullanılmaktadır. Geri dönüştürebilir çevre dostu bir malzemedir. Polyester örme geogridler ise cam elyaf örme geogridlere benzer şekilde yüksek ısı direncine ve uzun ömürlü kullanıma sahiptir. Cam elyaf örme geogride göre dolgu malzemesi ile daha iyi kenetlenmeye ve daha iyi korozyon direncine sahip olduğu için daha yüksek performans sağlar. Polyester örme geogridler demiryolu, karayolu inşaatları ve zemin taşıma kapasitesini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır.



Görsel 2.9. Dokuma Metoduyla Üretilen Polyester Geogrid (İstanbul Teknik A. Ş. Örgülü Geogrid İmalat Makinesi)

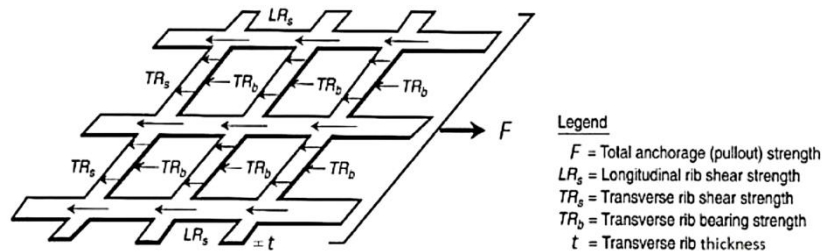
Kaynak metoduyla üretilen geogridler genellikle dik açılarda, iki veya daha fazla aksa sahip geogridin birleşim noktalarının kaynaklanmasıyla üretilir. Kaynak (yapıştırma) işlemi genellikle kimyasal maddeler yardımıyla yapılmaktadır. Kaynak metodunda gözenek açıklığı ve şeklini ayarlamak daha kolay olsa bile yüksek dayanımlar elde etmek diğer metotlara göre oldukça zordur.

Geogridler donatı geometrisi ve çekme doğrultusuna göre tek yönlü geogrid, çift yönlü geogrid ve üç yönlü geogrid şeklinde sınıflandırılırlar. Tek, çift ve üç Eksenli geogridlerin görünümü Görsel 2.10'de yer almaktadır. Tek yönlü geogridler, çekme mukavemeti açısından bir yönü diğer yönüne oranla çok daha güçlü olan geogridlerdir. Dolayısıyla, daha çok yanal toprak basıncı içeren istinat projeleri ile park ve bahçe düzenlemeleri gibi peyzaj çalışmalarında kullanılmaktadır. Çift yönlü geogridler, her iki yönde de mukavemet gerektiren; temel oturmalarının engellenmesi, havalimanı temellerinin taşıma kapasitesinin artırılması, karayolları genişletme projeleri gibi yüksek miktarda kazı- dolgu içeren çalışmalarda kullanılmaktadır. Diğer taraftan üç yönlü geogridler, tek yönlü ve çift yönlü geogridlere göre çoğu zaman en efektif stabilizasyonu sağlayan geogridlerdir (Yu vd,2010).



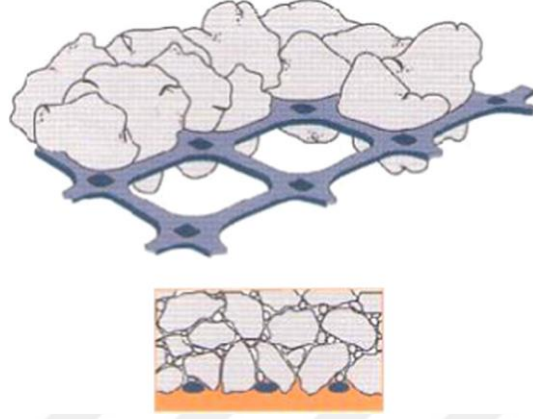
Görsel 2.10. Tek Yönlü Geogrid, Çift Yönlü Geogrid, Üç Yönlü Geogrid (<http://7>)

Geogridlerin sıyırılma dayanımı yapılan çalışmalar neticesinde kenetlenme etkisi, zemin-geogrid ara yüz sürtünmesi ve enine nervürlerin oluşturduğu pasif dirençten oluşmaktadır. Geogridlerin sıyırılma direnci mekanizması Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Geogrid sıyırılma direnci mekanizması (Koerner, (2005))

Çekme dayanımı ise üretimde kullanılan malzeme ve üretim şekline göre değişmektedir. Yetersiz sıyrılma dayanımı sonucunda geogrid zeminden sıyrılarak göçme mekanizması oluşmakta, yetersiz çekme dayanımı sonucunda ise geogrid koparak çökme mekanizması oluşmaktadır. Geogridlerin kenetlenme etkisi Görsel 2.11’te yer almaktadır.

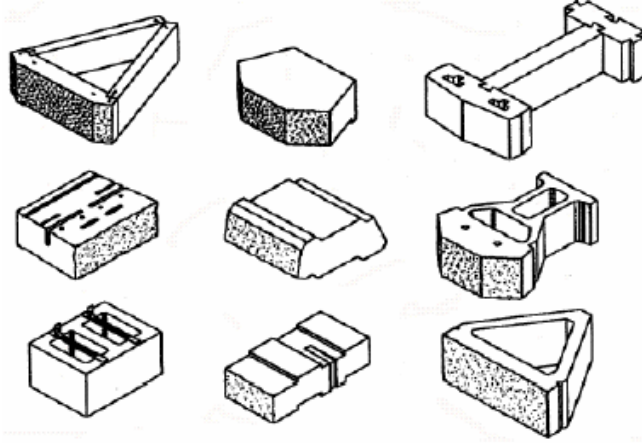


Görsel 2.11. Geogrid ve zemin daneleri arasındaki kenetlenme (Tensar, 2009)

2.2.3. Yüzey elemanı (panel)

Toprakarme istinat duvarlarının yüzey elemanları, duvarın dış görünümünü oluşturan ve dolgunun yanal deplasmanını engelleyen kritik bileşenlerdir. Yüzey elemanları, toprakarme istinat duvarlarının estetik ve fonksiyonel performansını artırır. Yaygın olarak kullanılan yüzey elemanları arasında prefabrike beton paneller, kuru döküm modüler bloklar, ıslak döküm büyük modüler bloklar, gabionlar ve esnek kaynaklı tel örgü bulunmaktadır. Bu elemanlar, sadece dolgunun ara katmanlardan dışarı çıkmasını önlemekle kalmaz, aynı zamanda duvarın stabilitesini ve dayanıklılığını da artırır. Modüler blok yüzey elemanı örnekleri Görsel 2.12’te verilmiştir.

Prefabrike beton paneller, yüksek mukavemetleri ve düzgün yüzeyleriyle dikkat çekerken, modüler bloklar ve gabionlar, montaj kolaylığı ve uyarlanabilirlikleriyle öne çıkar. Esnek kaynaklı tel örgü ise eğimli yüzeylerde ve düzensiz şekilli duvarlarda kullanılabilir. Yüzey elemanlarının seçimi, projenin gereksinimlerine ve estetik tercihlere bağlı olarak yapılır. Dolayısıyla, toprakarme istinat duvarlarının yüzey elemanları hem teknik performans hem de görsel bütünlük açısından hayati bir rol oynar.



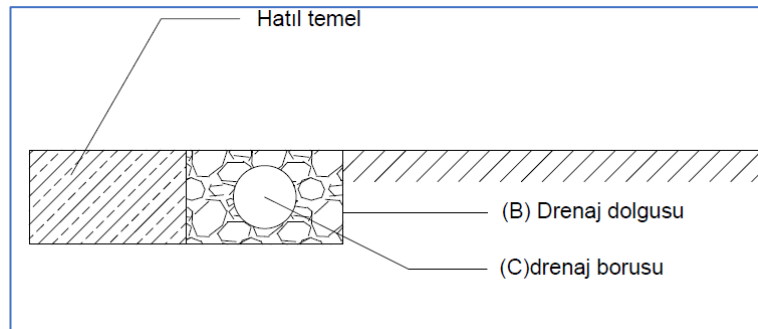
Görsel 2.12. Basit Modüler Blok Yüzey Elemanları Örnekleri (Kesim, 1996)

2.3. Yapım Aşamaları

Bu bölümde tipik bir geogrid donatılı toprakarme istinat duvarının imalat aşamalarından kısaca bahsedilmiştir. Toprakarme istinat duvarının yapım aşamaları 4 kısımdan oluşmaktadır.

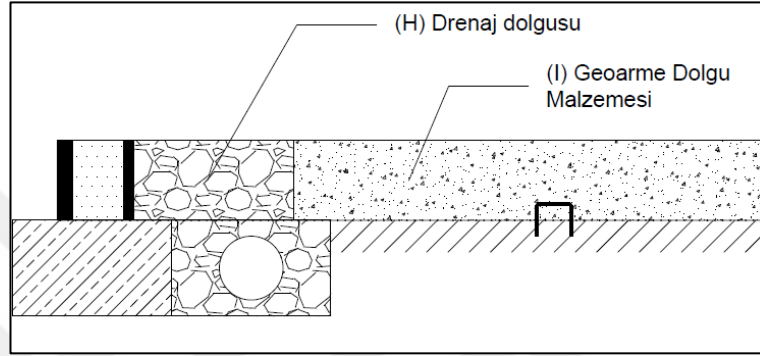
İlk olarak toprakarme istinat duvarının inşa edileceği alanın temel zemini inşaata uygun hale getirilir. İstinat duvarı projesinin yüzeysel veya derin temel olarak projelendirilmesi durumuna göre gerekli temel kazısı yapılır ve temel zemini tesviye edilip sıkıştırılır. Temel zemini uygun konuma getirildikten sonra ikinci aşama olan hatıl temel imalatına geçilir.

İkinci aşamada projedeki hatıl boyutlarına uygun olarak bir hendek kazılır. Hatıl demirli olarak dökülür. Hatılın dolgu tarafına proje boyutlarına uygun drenaj dolgusu imal edilir. Drenaj dolgusunun içine proje boyutlarına uygun çapta drenaj borusu yerleştirilir. Bu aşamanın tipik enkesiti Şekil 2.3'te verilmiştir. Hatıl temel imalatı tamamlandıktan sonra üçüncü aşama olarak toprakarme istinat duvar dolgu ilk katmanının imalatına geçilir.

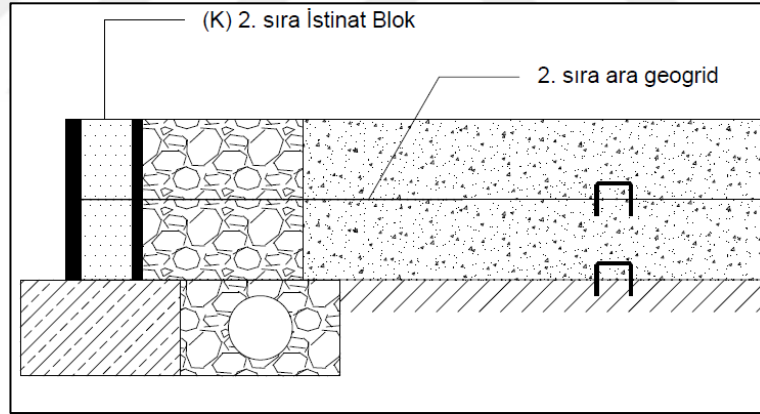


Şekil 2.3. Geogrid Donatılı İstinat Duvar İkinci Aşama Tipik Enkesit

Üçüncü aşamada birinci sıra geogrid katmanı yerleştirilir. Geogridler yerleştirilirken u-demirler çakılarak sabitlenir. Birinci sıra geogrid üzerine yüzey elemanı yerleştirilir. Yüzey elemanlarının içi drenaj dolgusu ile doldurulur. İstinat blokların hemen arkasında projede belirtilen genişlikte drenaj dolgusu yerleştirilir. Ardından toprakarme dolgu malzemesi yerleştirilerek, sıkıştırma işlemi uygulanır. Tüm toprakarme duvar katmanları bu sırayla uygulanarak tamamlanır. Bu aşamayla ilgili enkesitler Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.4. Geogrid Donatılı İstinat Duvarı İlk Sıra Geogridin Yerleştirilmesi Tipik Enkesit



Şekil 2.5. Geogrid Donatılı İstinat Duvarı İkinci Sıra Geogridin Yerleştirilmesi Tipik Enkesit

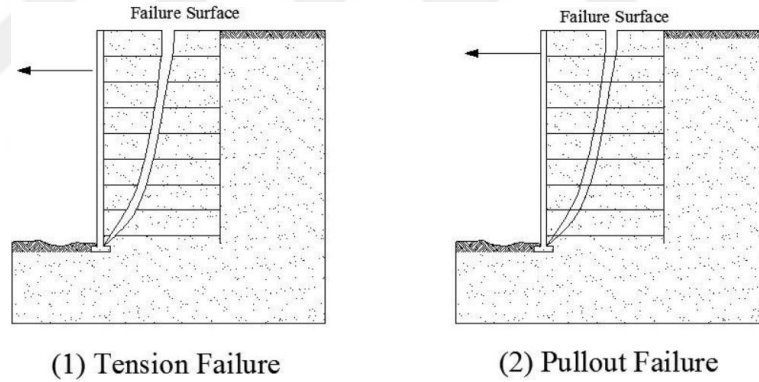
Dördüncü aşamada proje boyutlarına uygun duvar bitirme donatısı yüzey elemanların içine sabitlenerek duvar imalatı tamamlanır. Dolgu duvar üzerine inşa edilecek olan karayolu, kaldırım vb. yapıların inşaatına başlanır.

2.4. Tasarım Kriterleri

Toprakarme istinat duvarı tasarımında kullanılan en yaygın şartname Amerikan Karayolları Şartnamesi AASHTO (Yayın 5.8 1996)’dir. Toprakarme istinat duvarları el hesabı, limit denge analizleri ve sonlu eleman yöntemi kullanılarak tasarımları gerçekleştirilmektedir. Limit denge analizleri pratik ve güvenilir çözümler sunması

açısından günümüzde toprakarme istinat duvarı tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır.

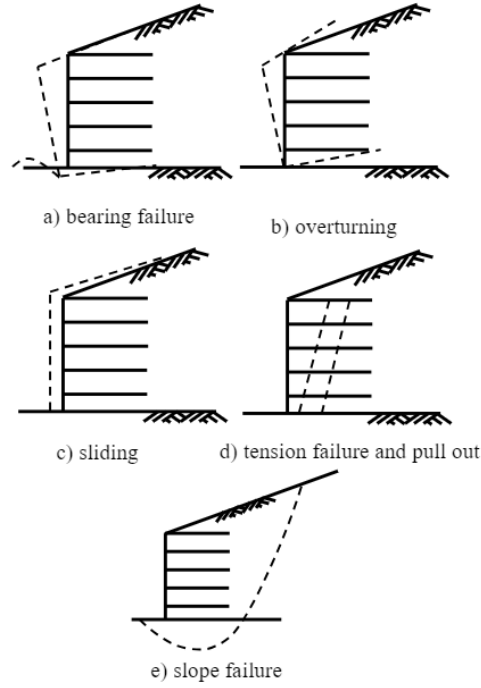
Toprakarme istinat duvarı tasarımı iç stabilite analizleri ve dış stabilite analizleri olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. İç stabilite analizlerinde iki durum incelenmektedir. Dolgu yüklemeleri altında zemin donatısına gelen çekme ve sıyrılma gerilmeleri sonucunda donatı kopabilir veya sıyrılabilir. İç stabilite tahkiklerinde, statik ve dinamik yüklemeler altında donatıya gelen çekme ve sıyrılma gerilmeleri hesaplanır. Sıyrılma ve çekmeye karşı dayanım değerleri bu gerilme değerlerine bölünerek güvenlik katsayısı elde edilir. Amerikan Karayolları Şartnamesi AASHTO (Yayın 5.8 1996) 'ne göre statik yükler altında sıyrılmaya karşı güvenlik katsayısı en az 1,5 ve kopmaya karşı güvenlik katsayısı 1,3 olmalıdır. Dinamik yükleme durumu için statik durum güvenlik katsayılarının %75'inin sağlanması yeterlidir. Toprakarme istinat duvarlarının iç stabilite göçme mekanizmaları Şekil 2.6'de verilmiştir. Son olarak yüzey elemanının kopması ve aşırı deformasyonu kontrol edilir.



Şekil 2.6. MSE İstinat Duvarları İç Stabilite Göçme Mekanizmaları (Abdelmawla, 2017)

Dış stabilite analizleri derin taban göçmesi, taşıma göçmesi, kayma göçmesi ve devrilme göçmesi olmak üzere 4 ana başlıkta incelenir. Derin taban göçmesi, zayıf geri dolgu malzemesi ve yumuşak temel tabakasının varlığında gerçekleşir. Taşıma kapasitesi yetersizliği, temel zemininin düşük kayma dayanımına sahip olması durumunda oluşur. Kayma göçmesi durumu donatılı zeminin taban bloğu boyunca kayma durumunu temsil etmektedir. Dolgu yüklerinden kaynaklı dengenin sağlanamaması durumunda ise devrilme göçmesi oluşmaktadır. Amerikan Karayolları Şartnamesi AASHTO (Yayın 5.8 1996) 'ne göre statik yüklemeler altında taşıma gücü güvenlik katsayısı 2,5, kayma tahkiki güvenlik katsayısı 1,5, devrilme tahkiki güvenlik katsayısı 2'dir. Dinamik yükleme durumu için statik durum güvenlik katsayılarının %75'inin sağlanması

yeterlidir. Toprakarme duvar maksimum yanal deplasman limiti 12 cm, maksimum toplam oturma limiti 7,5 cm, maksimum farklı oturma limiti 3,2 cm'dir. Toprakarme istinat duvarlarının dış stabilite göçme mekanizmaları Şekil 2.7'de verilmiştir. İç ve dış stabilite analizleri sonucunda yeterli dayanım sayısının elde edilmemesi durumunda donatı aralığı düşürülebilir ve donatı boyu uzatılabilir. İç ve dış stabilite koşullarının tümü sağlanmalıdır.

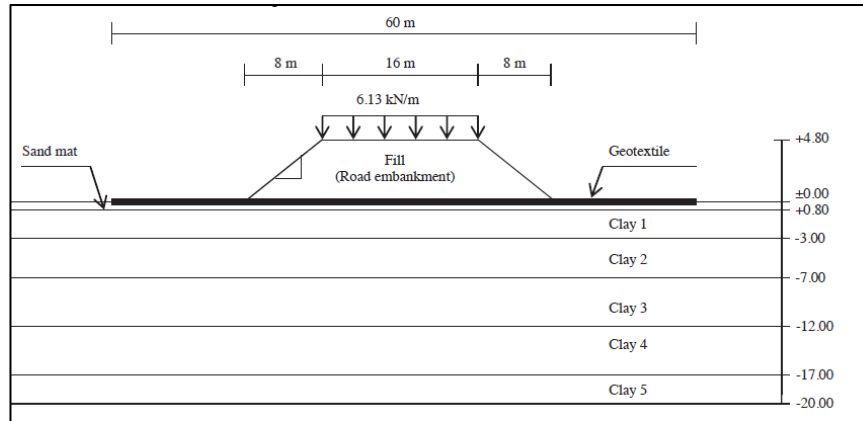


Şekil 2.7. MSE İstinat Duvarı Dış Stabilite Göçme Mekanizmaları (Lim ve Tan,2005)

3. LİTERATÜR TARAMASI

Toprakarme istinat duvarları ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Toprakarme istinat duvarların statik yüklemeler altında davranışı, dinamik yüklemeler altında performansı vb. konuları içeren birçok deneysel çalışma mevcuttur. Bu çalışmaları toprakarme istinat duvarlarının modellenmesiyle nümerik çalışmalar takip etmiştir. Bu bölümde toprakarme istinat duvarlarının limit denge yöntemiyle ve sonlu elemanlar yöntemiyle tasarımıyla alakalı çalışmalar özet olarak verilmiştir.

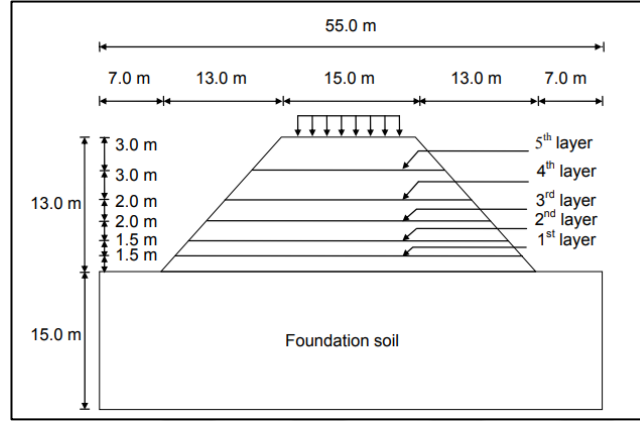
Wulandaria ve Tjandra (2015) tarafından yapılan çalışmada, 4 metre yüksekliğinde 2y:1d şev eğimiyle inşa edilen yol dolgusunun temeline yerleştirilen geotekstilin Plaxis 2D programında modellenerek dolgu performansına etkisi araştırılmıştır. Sahanın jeolojik profili kil birimlerden oluşmaktadır. Trafik yükü 6.13 kN/m alınmıştır. Sahanın geometrik modeli Şekil 3.1’de verilmiştir. Geotekstil çekme dayanımı 0-1000 kN/m arasında değerler verilerek analizler tekrarlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda geotekstilin çekme dayanımı arttıkça temel tabanında meydana gelen oturmalar göz ardı edilir derecede azalmıştır. Geotekstil çekme dayanımının dolgu oturmalarına önemli derecede etkili olmadığı sonucuna varılmıştır. Fakat, çekme dayanımı 800 kN/m değerine kadar güvenlik katsayısına olumlu etkide bulunmuş, bu değerden sonra düşmüş ve sabit devam etmiştir. Optimum çekme dayanımını etkileyen temel faktörün güvenlik sayısı olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.1. Analiz Geometrik Modeli (Wulandaria ve Tjandra (2015))

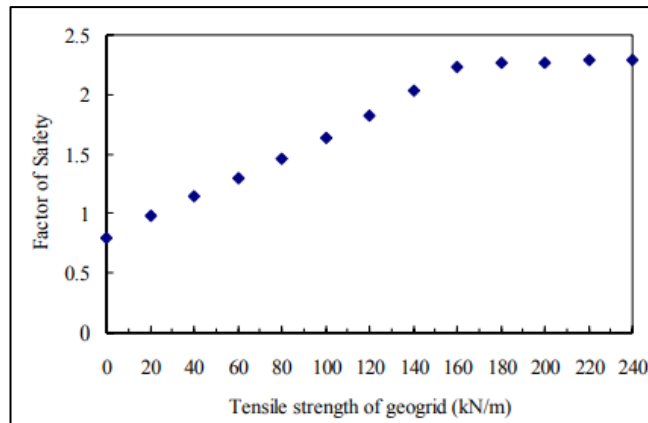
Wulandaria ve Tjandra (2006) tarafından yapılan diğer bir çalışmada, 13 metre yüksekliğinde 1y:1d şev eğimiyle inşa edilen 5 katmanlı tek eksenli geogrid donatılı dolgu modelinin FLAC programında sayısal analizleri gerçekleştirilmiş ve geogrid çekme dayanımının dolgu şev özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Sahanın jeolojik profili kum

birimlerden oluşmaktadır. Trafik yükü 50 kPa seçilmiştir. Sahanın geometrik modeli Şekil 3.2’de verilmiştir. Geogrid çekme dayanımı tüm katmanlar için aynı olacak şekilde 20-240 kN/m değerleri arasında değişmektedir.



Şekil 3.2. Analiz Geometrik Modeli (Wulandaria ve Tjandra (2006))

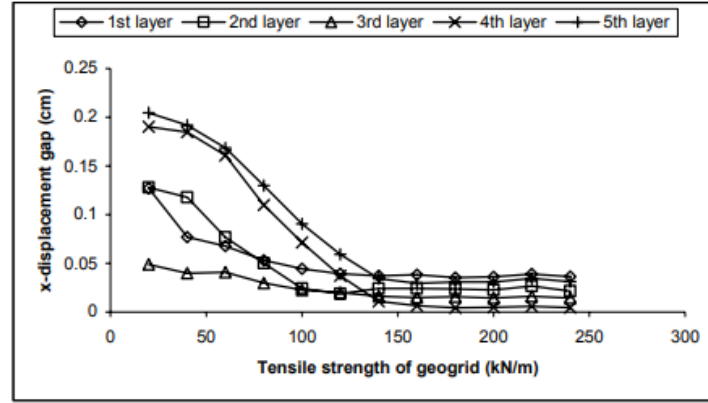
FLAC programında modellenen geometri doğrultusunda yapılan analizler sonucunda geogrid çekme dayanımının, şev güvenlik katsayısı, gerilme dağılımı ve dolgu oturmalarına etkisi incelenmiştir. Geogrid dayanımı arttıkça şevin güvenlik katsayısı önemli ölçüde artmıştır. Geogrid çekme dayanımı değeri 180 kN/m değerinden sonra sabit devam etmiştir. Geogrid çekme dayanımına karşılık gelen güvenlik katsayıları Şekil 3.3’te verilmiştir (Wulandaria ve Tjandra (2006)).



Şekil 3.3. Geogrid Çekme Dayanımı-Güvenlik Katsayısı İlişkisi (Wulandaria ve Tjandra (2006))

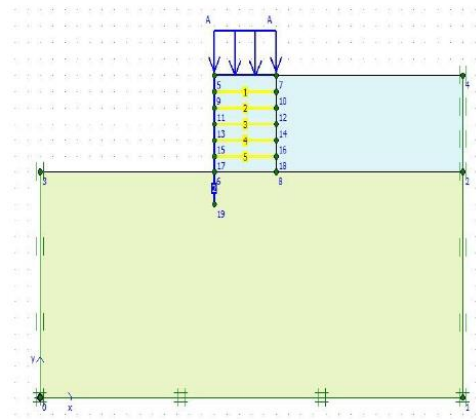
Geogrid katmanlarında maksimum gerilmenin en alt katmanda oluşmasına ek olarak üst katmanlara çıkıldıkça geogrid üzerindeki gerilme artış değeri azalmaktadır. Geogridlerin çekme dayanımı arttıkça oturma miktarı önemli ölçüde azalmaktadır. Geogrid çekme mukavemetine göre meydana gelen oturma miktarı Şekil 3.4’te verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda çalışma geometrisi için minimum güvenlik

katsayısı değerini sağlayan optimum çekme dayanımının 100 kN/m olduğu tespit edilmiştir. İlk katman için en az 100 kN/m, ikinci ve üçüncü katmanlar için en az 80 kN/m, dördüncü ve beşinci katmanlar için 60 kN/m çekme dayanıma sahip geogrid kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır (Wulandaria ve Tjandra (2006)).



Şekil 3.4. Geogrid Çekme Dayanımı-Dolgu Oturma İlişkisi (Wulandaria ve Tjandra (2006))

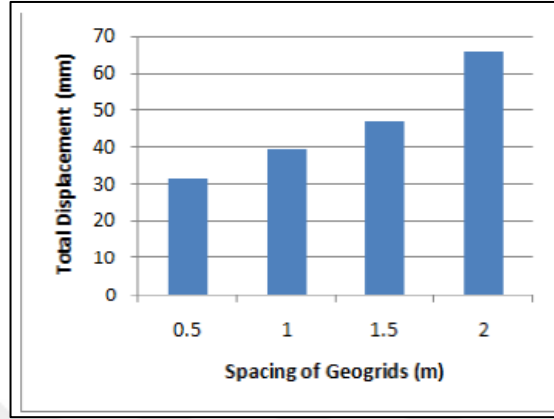
Vashi, Patel ve Patel (2017) tarafından yapılan çalışmada, toprakarme istinat duvarı projesi Plaxis 2D programında modellenerek toprakarme istinat duvarı yüksekliği ve donatı aralığının toprakarme performansına etkisini araştırmıştır. Kullandığı modelde geogridlerin aksel rijitliği sabit 1000 kN/m olarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar modelinde Mohr Coulomb malzeme modeli kullanmıştır. Dolgu malzemesi drenajlı durum için modellenmiştir. Toprakarme duvar modelinde yüzey elemanını “plate” eleman tanımlamıştır. Temel zemini yumuşak kilden oluşmaktadır. Çalışmanın Plaxis 2D modeli Şekil 3.5’te verilmiştir.



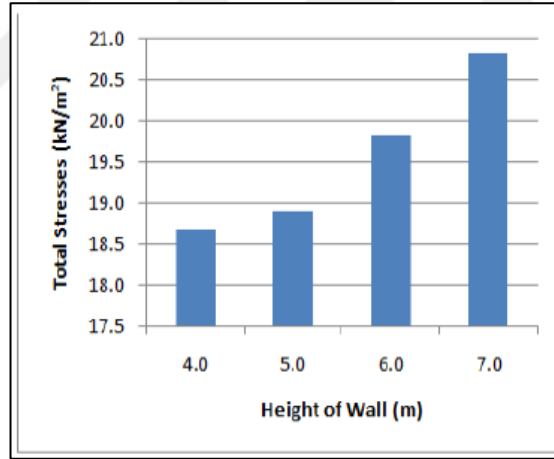
Şekil 3.5. Analiz Plaxis Modeli (Vashi, Patel ve Patel (2017))

Yapılan analizler sonucunda geogrid aralığı arttığında toprakarme istinat duvarında meydana gelen oturmalar önemli ölçüde artmaktadır. Geogrid aralıklarının artması ayrıca

geogride gelen çekme gerilmelerini arttırmakta, duvar yüksekliği arttıkça aradaki fark açılmaktadır. Geogrid aralığı, toplam oturma arasındaki analiz sonuçları Şekil 3.6’da verilmiştir. Duvar yüksekliğinin en etkili olduğu parametre toplam gerilme ve geogrid katmanları üzerinde oluşan maksimum çekme kuvvetidir. Duvar yüksekliği, toplam gerilme arasındaki analiz sonuçları Şekil 3.7’de verilmiştir (Vashi, Patel ve Patel (2017)).

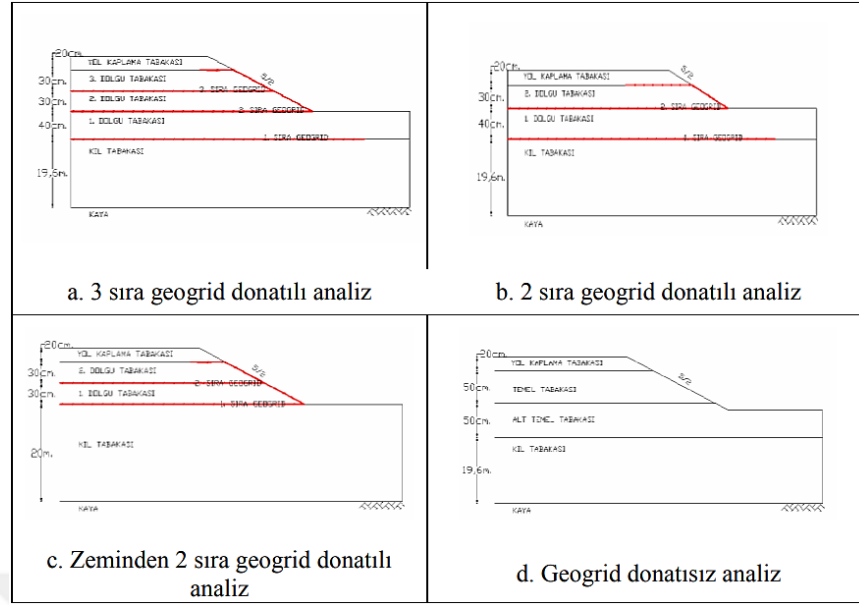


Şekil 3.6. Toplam Deplasman- Geogrid Aralığı İlişkisi (Vashi, Patel ve Patel (2017))



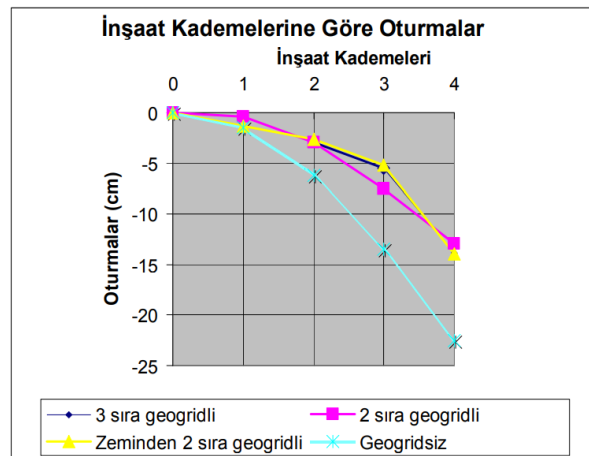
Şekil 3.7. Toplam Gerilme- Duvar Yüksekliği İlişkisi (Vashi, Patel ve Patel (2017))

Karagül (2007) tarafından yapılan çalışmada, geogrid donatılı dolguların performansı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. 1,2 metre yüksekliğinde 5y/2d eğimli şeve sahip dolgu kesiti 4 farklı senaryoda oluşturulmuştur. 1. senaryo geogrid donatısız durum, 2. senaryo 2 sıra geogrid donatılı durum, 3. senaryo zeminden 2 sıra geogrid donatılı durum ve 4. senaryo 3 sıra geogrid donatılı durumu temsil etmektedir. Senaryoların kesit geometrileri Şekil 3.8’de yer almaktadır.



Şekil 3.8. Yol dolgusu kesiti geometrileri (Karağül (2007))

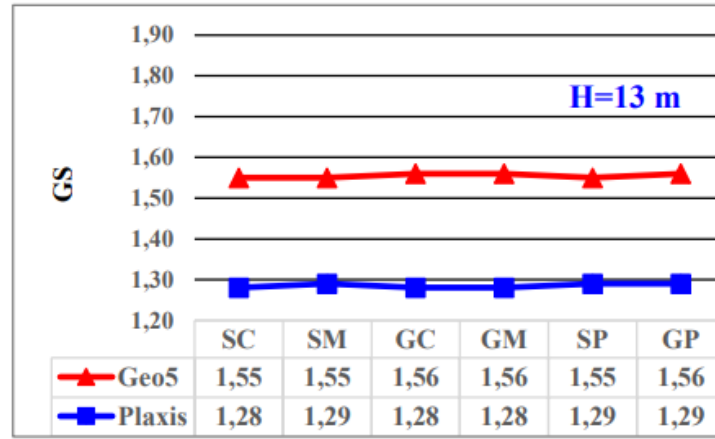
Geogrid donatılı dolgu kesiti kil birime oturmaktadır. Geogridlerin çekme dayanımı 40 kN/m'dir. Yapılan hesaplamalar sonucunda en fazla oturma geogridsiz yapılan yol dolgusunda oluşmuştur. En düşük oturma değeri zeminden 2 sıra geogrid donatılı sistemde meydana gelmiştir. Sistemlerin oturma değerleri Şekil 3.9'da yer almaktadır. Optimum çözüm olarak bulunan zeminden 2 sıra geogrid donatılı sistem ile geogrid donatısız durumu temsil eden sistemlerin maliyeti hesaplanmıştır. Geogrid donatı kullanılması halinde dolgu kalınlıkları azaltılacağından %41 oranında maliyet düşmektedir. Sonuç olarak, geogridlerin yol dolgusunda kullanımı dolguların şev mukavemet özelliklerini arttırırken ek olarak daha ekonomik çözümler sunmaktadır (Karağül, 2007).



Şekil 3.9. Oturma Analiz Sonuçları (Karağül, 2007)

Polat (2020) tarafından yapılan çalışmada, limit denge analizleri için Geo5 ve sonlu elemanlar yöntemi için Plaxis 2D programlarını kullanarak duvar yüksekliği ve dolgu zemini için 6 farklı senaryo (SC, SM, GC, GM, SP, GP) üzerine analizler gerçekleştirmiştir. Analizlerde kullanılan duvar yüksekliği 5, 7, 10, 13 ve 15 metredir. Farklı duvar yükseklikleri (H) ve dolgu zemini için donatı boyu (L) ve donatı aralığı hesabı yapılmıştır. Duvar tepe noktasında bulunan donatı boyu değeri kullanılmıştır. Tüm dolgularda duvar yüksekliği arttıkça, donatı aralığı azalmaktadır. Ek olarak, donatı aralıkları zeminin rijitliği ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Hesaplanan donatı boyları aynı şekilde duvar yüksekliği ile doğru orantılı, zemin rijitliği ile ters orantılı olacak şekilde artmaktadır. Fakat, L/H oranları incelendiğinde artan duvar yüksekliği ile düşük rijitlikteki dolgular için L/H oranı düşmekte, orta rijitlikteki dolgular için sabit, yüksek rijitlikteki dolgular için artarak devam etmekte ve tüm dolgular için belli bir duvar yüksekliğinden sonra L/H oranı sabit olarak ilerlemektedir. Donatı aralığının hesapları etkilememesi için tüm analizlerde 0,4 m ve tek tip donatı kullanılmıştır.

Geo5 programıyla yapılan limit denge analiz sonuçlarına bakıldığında, duvar yüksekliği arttıkça toptan göçme güvenlik sayısı düşmektedir. Toprakarme istinat duvarının sıyrılma dayanımında dolgu zemini rijitliği arttıkça önemli bir artış bulunmaktadır. İç stabilite ve dış stabilite tahkikleri incelendiğinde dolgu zemininin dış stabiliteye önemli bir etki göstermezken, iç stabilite hesaplarında ciddi etkisi bulunmaktadır. Toptan göçme güvenlik sayıları, artan zemin rijitliğine bağlı az da olsa artış göstermiştir. Plaxis programıyla yapılan sonlu elemanlar yöntemi analizi sonuçlarına bakıldığında ise dolgu zemini değişimi toptan göçme güvenlik sayılarında önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Limit denge analiz yöntemine göre toptan güvenlik sayıları daha düşük hesaplanmış olup, dolgu zemini ile çok değişmemesi tutarlıdır. 13 metre duvar yüksekliği için karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 3.10'da yer almaktadır. Genel sonuçlara bakıldığında, dolgu sınıfının toprakarme duvar iç stabilite dayanımını önemli ölçüde etkilediğini ve dış stabilite üzerinde etkisinin az olduğu sonucuna varılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ve limit denge analizi ile yapılan sonuçlar karşılaştırıldığında, sonlu elemanlar yöntemi daha düşük güvenlik sayıları vermekle birlikte daha güvenli tasarım sunmaktadır. Dolgu sınıfının toptan göçme güvenlik sayısına etkisinin çok az olduğu sonucuna varılmıştır.



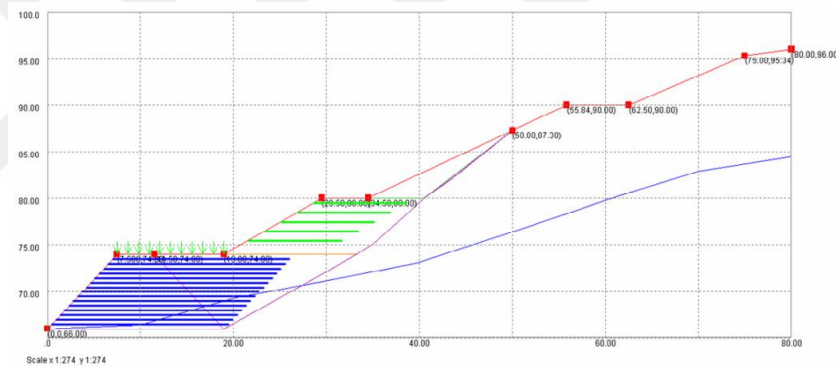
Şekil 3.10. Geoduvvar sisteminin göçme güvenlik sayıları ($H=13$ m) (Polat (2020))

Najari (2017) tarafından yapılan çalışmada, kaya yarmasının üzerine inşa edilen yol dolgusu farklı senaryolarla limit denge analizi kullanarak Slide programıyla incelenmiştir. Kaya yarma üzerine inşa edilecek dolgunun kazıklı duvar ve geogridli toprakarme duvar ihtimalleri modellenmiştir. Kaya şevi üzerine yapılan analizler sonucunda kazıklı istinat duvarı ile yapılacak istinat duvarında daha yüksek güvenlik sayıları elde etmiştir. Diğer taraftan iki senaryo da yeterli güvenlik sayılarını sağlamaktadır. Kazıkların yapım zorlukları ve maliyeti dikkate alındığında geogrid donatılı istinat duvarı bu durumda daha efektif çözüm sunmaktadır.

Taban zemini üzerinde inşa edilecek yol dolgusu için yapılan analiz sonuçlarına göre, dolgunun şev eğimi yükseldikçe güçlendirme elemanı olmadan inşa edilmesi yeterli güvenli sağlamamaktadır. Ek olarak 1y:1d eğimli geogrid donatılı şev, 2y:1d donatısız şeve göre elde edilen güvenlik sayıları daha yüksektir. Güzergâh dolgularında, inşa edilecek güzergâh uzunluğuna göre geogrid donatılı şev kullanılması inşaat aşamasında kullanılacak dolgu miktarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu durum geogrid donatılı şev tasarımını ekonomik ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Ek olarak geogrid donatılı şevlerin deprem performansı oldukça yüksektir. Dinamik yük altında geogrid donatılı şevlerin güvenlik sayıları bu durumu desteklemektedir.

Özköl (2006) tarafından yapılan çalışmada, Çorlu bölgesinde bir sanayi tesisini de sınırları içinde bulunduran arazide karşılaşılan yüzeysel akmalara karşı şevin güvenliğini sağlamak için geosentetik donatılı, zemin çivili ve ankrajlı iksa projesi hazırlanmıştır. OASYS Slope programında analizleri gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Zemin profili kumdan oluşmaktadır.

Zemin çivisi ve ankraj ile yapılan çözümlere bakıldığında, uygulama açısından maksimum 30 metre uygun görülmüş, ancak güvenlik sayıları yeterli gelmemiştir. Oluşan kayma kamasının içinde kalan iyileştirme elemanları şev tasarımının güvenliği açısından yetersiz kalmıştır. Şevin temel probleminin yapılan analizler sonucunda toptan göçme olduğu anlaşılmıştır. Çözüm için şevin önüne ve topuk bölgesine dolgu yapılarak yeterli güvenliğin sağlanması çalışılmıştır. Şevin önüne yapılan topuk dolguları ilk olarak geosentetik donatısız olarak analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda güvenlik katsayısı 1,365 elde edilmiş ve şev stabilizasyonu için yeterli güvenlik sayısı elde edilememiştir. Toptan göçmeye karşı güvenlik sağlanırken, dolgu iç stabilitesinde problemler bulunmaktadır. Geosentetik donatılı dolgu şevleriyle yapılan analiz sonucunda yeterli güvenlik sayısı elde edilmiştir. Ek olarak dinamik durum tahkiki de kontrol edilmiştir. Geosentetik donatılı topuk dolgusu ile şev güvenli hale gelmektedir. Yapılan tasarımın geometrisi Şekil 3.11’de verilmiştir (Özköl, 2006).



Şekil 3.11. Geosentetik Donatılı Dolgunun Geometrisi (Özköl (2006))

Çiçek, Güler ve Yetimoğlu (2015) tarafından yapılan çalışmada, donatısız koşulda göçen dolgu şevinin farklı donatı boyları, donatı aralığı ve şev eğimiyle Plaxis v8 programıyla sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş ve şev güvenlik sayısına etkisi araştırılmıştır. 10 metrelik kil tabakasının üzerine 5 metrelik kum dolgu zemin üzerine inşa edilen kum dolgunun kesitinde yer altı su seviyesi -3 metrededir. Dolgu zemin için “Hardening Soil”, taban zemini için “Mohr-Coulomb” kullanılmıştır.

Analiz sonuçlarına göre kullanılan modelde taban zemini yumuşak kil birimden oluştuğundan, geosentetik donatı kullanılması durumunda şevin toptan göçmeye karşı güvenliğini önemli ölçüde arttırmıştır. Geosentetik donatılar, şevin stabilizasyon özelliklerini iyileştirerek dolgularda temel tabanında daha geniş kayma daireleri oluşturmuştur. Drenajlı durum güvenlik katsayısı drenajsız durum güvenlik katsayısına

göre yüksektir. Bu durum, konsolidasyon oturmalarından kaynaklanmaktadır. Donatı boyuyla ilgili yapılan analiz sonuçlarında, donatının şev seddesi boyunca serilmesi durumunda güvenlik sayısında yaklaşık 2 kat iyileşme görülmüştür. Sonuç olarak, geosentetik donatıların şevlerin stabilizasyonuna önemli etkide katkı sağladığı ve şev seddelerinde tamamının donatı serilmesinin diğer senaryolara göre şev mukavemet parametrelerini yaklaşık 2 kat arttığı sonucuna varılmıştır. Çok geniş olmayan şevlerin geosentetik donatılı tasarımında bu durum göz önünde bulundurularak tam boy geosentetik donatı serilmesi efektif ve ekonomik bir çözüm sunacaktır. Farklı uzunluklardaki donatılı şevler için kısa süreli analizler sonucunda elde edilen güvenlik sayıları Tablo 3.1’de verilmiştir (Çiçek, Güler ve Yetimoğlu, 2015).

Tablo 3.1. Farklı uzunluklu donatılı şevler için kısa süreli analizler sonuçlarındaki güvenlik sayıları (Çiçek, Güler ve Yetimoğlu., 2015)

Donatı Uzunluğu	Güvenlik Sayısı
4m	1.33
5m	1.41
6m	1.47
7m	1.52
Karşıdan Karşıya	2.71

4. TOPRAKARME İSTİNAT DUVARI GEOTEKNİK TASARIM AŞAMALARI

4.1. Proje Alanı Jeolojik Profilin Oluşturulması

Proje sahasında yer alan jeolojik birimlerin geoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan sondajlarda alınan örselenmiş (SPT) ve örselenmemiş (UD) numunelerle laboratuvar deneyleri yapılmış ve jeolojik profili oluşturulmuştur. Deney sonuçları İstanbul Teknik A.Ş. firmasının izni ile kullanılmış olup, tez kapsamında firmanın tasarımından bağımsız yeni ve özgün bir tasarım yapılmıştır.

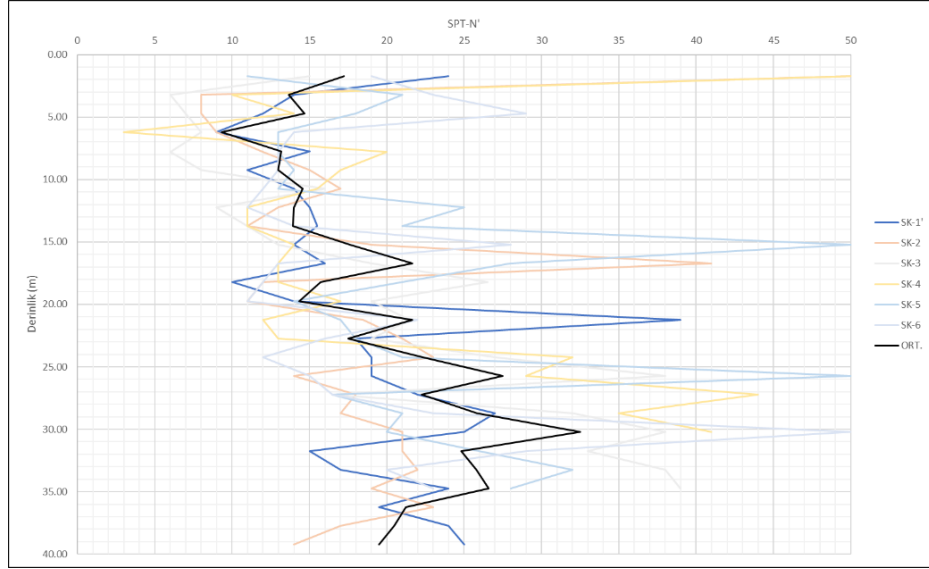
Sahanın jeolojik profilinin oluşturulması geoteknik tasarım aşamalarının ilk adımıdır ve tasarımın en önemli kısmını temsil etmektedir. Güvenli bir geoteknik tasarımın gerçekleştirilmesi için sahanın jeolojik profilinin gerçeğe en yakın şekilde oluşturulması gerekmektedir. Jeolojik profil oluşturulurken tüm saha ve laboratuvar deneyleri birlikte ele alınmalıdır. Birimlerin zemin ve kaya nitelikte olması, kumlarda sıkılık, killerde sertlik dereceleri, plastik ve plastik olmayan davranış göstermeleri vs. gibi tüm etkenler göz önünde bulundurularak sahada birimler bağdaştırılmalıdır. Sonucunda sahanın idealize zemin profili oluşturularak geoteknik tasarım gerçekleştirilmelidir.

Bu çalışma kapsamında 6 sondaj verisinden yararlanılarak sahanın jeolojik profili oluşturulmuştur. Proje alanı sondaj planı Görsel 4.1’de verilmiştir. Proje alanı genel olarak az çakıllı kumlu siltli kil ve az çakıllı killi siltli kum ara bantlarından oluşmaktadır.

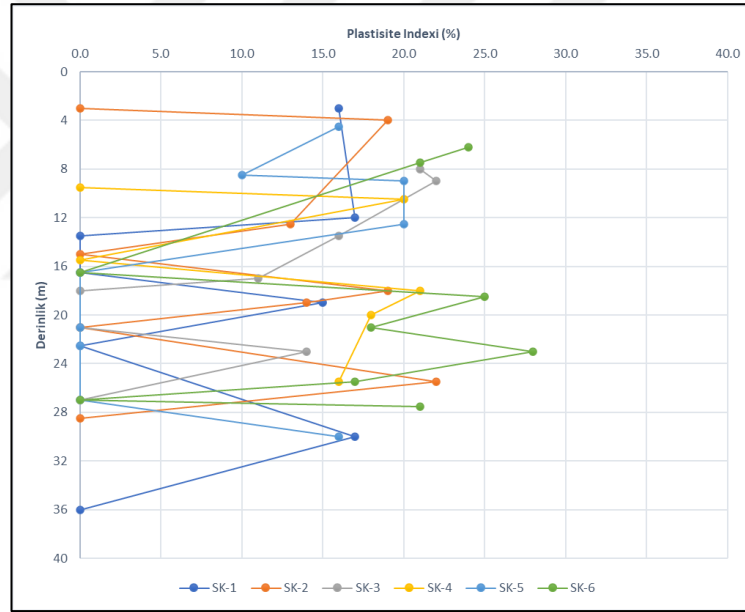


Görsel 4.1. Proje Alanında Yapılan Sondaj Çalışmaları

Sondaj çalışmaları sonucunda yapılan saha ve laboratuvar deneyleri sonuçları özet olarak Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’teki gibidir.

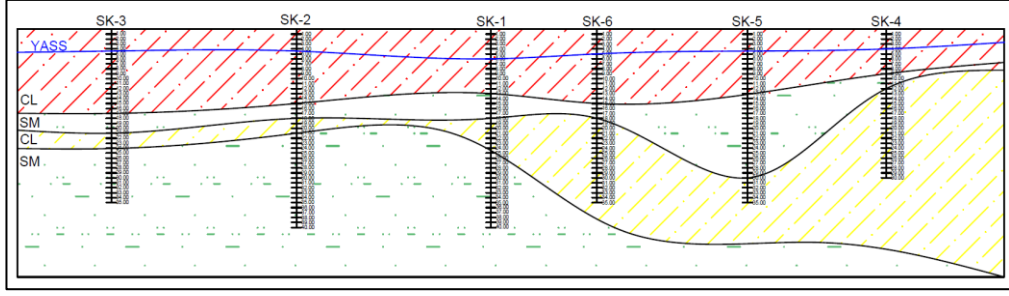


Şekil 4.1. *SPT N' vs. Derinlik Grafiği*



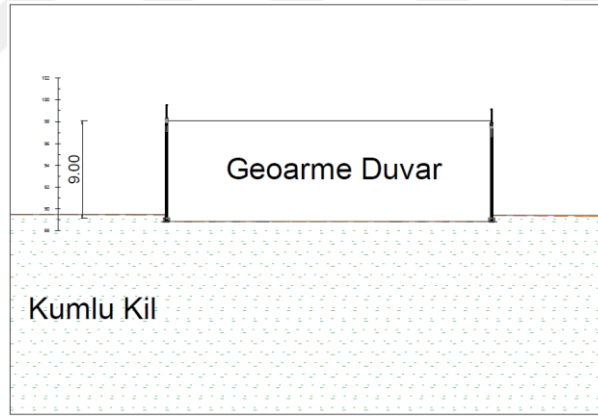
Şekil 4.2. *Plastisite İndeksi (%) vs. Derinlik(m) Grafiği*

Saha ve deney sonuçları doğrultusunda benzer birimler özdeşleştirilerek oluşturulan idealize zemin profili Şekil 4.3'te verilmiştir. Sahada yer altı su seviyesi 4,5 metrede tespit edilmiştir.



Şekil 4.3. Proje Alanı Jeolojik Profili

Proje kapsamında inşa edilecek olan toprakarme istinat duvar enine kesitleri incelenerek maksimum duvar yüksekliğinin 9,0 metre olduğu tespit edilmiştir. Tasarım aşamaları bu kesit üzerine ilerleyecektir. İlgili kesite SK-1, SK-2 ve SK-3 sondajlarının yakınlığı ve jeolojik profilde bulunan birimler sertlik, kıvam bakımından benzer özellik gösterdiğinden dolayı güvenli tarafta kalmak için hesaplamalarda tüm alan “kumlu kil” birim olarak ele alınacaktır. Toprakarme istinat duvarı tasarımında kullanılacak zemin profili Şekil 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.4. Tasarım Kesiti ve İdealize Zemin Profili

4.2. Yatay Eş Değer Deprem Katsayısı Hesabı

En son 1996 yılında yürürlüğe giren Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası, AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı tarafından yenilenmiş, 18 Mart 2018 tarih ve 30364 sayılı (mükerrer) Resmî Gazete ’de yayımlanmıştır. Yeni harita 1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Yeni harita, en güncel deprem kaynak parametreleri, deprem katalogları ve yeni nesil matematiksel modeller dikkate alınarak kapsamlı ve ayrıntılı verilerle hazırlanmıştır. Yeni haritada, bir önceki haritadan farklı olarak deprem bölgeleri yerine en büyük yer ivmesi değerleri gösterilmiş ve “deprem bölgesi” kavramı ortadan

kaldırılmıştır. TBDY 2018 Tablo 16.1'e göre belirlenmiş yerel zemin sınıfına göre koordinat bazlı deprem verisi sunmaktadır. Proje alanıyla ilgili çıktılar Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir. Sahanın yerel zemin sınıfı SPT test sonuçları kullanılarak belirlenmiştir. 30 metredeki ortalama SPT Sayısı 18'dir. Bu veri doğrultusunda sahanın yerel zemin sınıfı ZD (orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları) olarak belirlenmiştir. Detaylar Şekil 4.5'de verilmiştir.

Tablo 16.1 – Yerel Zemin Sınıfları				
Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(F_s)_a$ [m/s]	$(N_{60})_a$ [darbe/30 cm]	$(c_u)_a$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	–	–
ZB	Az ayrışmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500	–	–
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 – 360	15 – 50	70 – 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25$ kPa) içeren profiller	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında cökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas kiler, geçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turla ve veya organik içeriği yüksek kiler, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) kiler, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı kiler.			

Şekil 4.5. TBDY 2018 Tablo 16.1




Türkiye Deprem Tehlike Haritaları
İnteraktif Web Uygulaması

Kullanıcı Girdileri

Rapor Başlığı:	YL- MERTTOS
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-2 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
Yerel Zemin Sınıfı	ZD Orta sıkı - sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları
Enlem:	40.225134°
Boylam	29.071978°

Çıktılar

$S_s = 0.885$	$S_1 = 0.233$	$PGA = 0.371$	$PGV = 22.372$
---------------	---------------	---------------	----------------

S_s : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]
 S_1 : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]
 PGA : En büyük yer ivmesi [g]
 PGV : En büyük yer hızı [cm/san]

a.

Tasarım Spektral İvme Katsayıları

$S_{DS} = S_s F_s = 0.885 \times 1.146 = 1.014$ $S_{D1} = S_1 F_1 = 0.233 \times 2.134 = 0.497$
--

S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]
 S_{D1} : 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

b.

Şekil 4.6. AFAD Deprem Haritası Çıktıları DD-2 Deprem Düzeyi ZD Zemin Sınıfı; a: Genel Çıktılar, b: Spektral İvme Katsayıları




Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması

Kullanıcı Girdileri

Rapor Başlığı:	YL-MERTTOS		
Deprem Yer Hareketi Düzeyi:	DD-1	50 yılda aşılma olasılığı %2 (tekrarlanma periyodu 2475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi	
Yerel Zemin Sınıfı	ZD	Orta sıkı - sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	
Enlem:	40.225134°		
Boylam:	29.071978°		

a.

Çıktılar			
$S_S = 1.707$	$S_1 = 0.441$	$S_{DS} = 1.707$	$S_{D1} = 0.820$
$PGA = 0.692$	$PGV = 42.485$		
S_S : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz] S_1 : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz] S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz] S_{D1} : 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz] PGA : En büyük yer ivmesi [g] PGV : En büyük yer hızı [cm/sn]			

b.

Şekil 4.7. AFAD Deprem Haritası Çıktıları DD-1 Deprem Düzeyi ZD Zemin Sınıfı; a: Genel Çıktılar, b: Spektral İvme Katsayıları

Yatay eşdeğer deprem katsayısı (k_h) şev stabilitesi analizlerinde deprem etkisini yansıtmak amacıyla kullanılan deprem durumundaki ortaya çıkan ortalama ivmeyi temsil etmektedir. k_h değeri deprem performans kriterine, tasarım yer hareketine ve şev yüksekliğine bağlı olup “Deprem Etkisi Altında Karayolu ve Demiryolu Tünelleri ile Diğer Zemin Yapılarının Tasarımı için Esaslar Yönetmeliği” Denklem 4.1 ile hesaplanmaktadır.

$$k_{maks} = F_{PGA} \times (PGA/g) \quad (4.1a)$$

$$k_h = 0.5 \times \alpha \times k_{maks} \quad (4.1b)$$

$$\alpha = 1 - 0.0328H(1 - 0.5\beta) \quad (4.1c)$$

$$\beta = \frac{F_1 \times S_1}{k_{maks}} \quad (4.1d)$$

Burada; k_{maks} : potansiyel yenilme kütleindeki maksimum deprem katsayısı (zemin sınıfına bağlı düzeltilmiş maksimum yer ivmesi katsayısı), H : şev yüksekliği [m], α : şev yüksekliği azalım katsayısı, β : ivme tepki spektrumu şekil katsayısı, PGA : maksimum yer ivmesi (22/01/2018 tarih ve 2018/11275 sayılı Bakanlar Kurulu kararı ile yürürlüğe konulan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları'ndan alınacaktır), F_{PGA} : PGA için yerel zemin etki katsayısı (Tablo 2.1), F_1 : 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı (Tablo 2.2) ve S_1 : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı (22/01/2018 tarih ve 2018/11275 sayılı Bakanlar Kurulu kararı ile yürürlüğe konulan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları'ndan alınacaktır).

Denklemler, “Deprem Etkisi Altında Karayolu ve Demiryolu Tünelleri ile Diğer Zemin Yapılarının Tasarımı için Esaslar Yönetmeliği” Madde 2.3.’e göre şev duraylılığı değerlendirmelerinde DD-1 ve DD-2 depremleri için yapılır. Burada; DD-2: 50 yılda %10 aşılma olasılığı olarak tanımlanan (tekrarlanma periyodu, $T_r=475$ yıl) deprem yer hareketi düzeyi ve DD-1:50 yılda %2 aşılma olasılığı (tekrarlanma periyodu, $T_r=2475$ yıl) olarak tanımlanan deprem yer hareket düzeyidir. Şev duraylılığı analizlerinde, her iki deprem düzeyi için de $GS=1.1$ ’in üstünde güvenlik katsayıları elde etme durumunda kalıcı şev yer değiştirmeleri oluşmaz.

Tablo 4.1. PGA değerleri için yerel zemin etki katsayısı F_{PGA} (Deprem Etkisi Altında Karayolu ve Demiryolu Tünelleri ile Diğer Zemin Yapılarının Tasarımı için Esaslar Yönetmeliği Tablo 2.1)

Yerel Zemin Sınıfı	$PGA \leq 0.1g$	$PGA = 0.2g$	$PGA = 0.3g$	$PGA = 0.4g$	$PGA = 0.5g$	$PGA \geq 0.6g$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.6	1.6	1.1	1.1	1.1
ZE	2.4	1.	1.4	1.2	1.1	1.1
ZF	18/3/2018 tarihli ve 30364 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nde belirtildiği şekilde sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

DD2 deprem düzeyi için 0,371 g PGA ve 1,2 F_{PGA} değerleri ile Denklem 4.1a kullanılarak k_{maks} 0,45 g olarak hesaplanmıştır. 0,497 g S_{D1} ve 0,45 g k_{maks} değerleri ile Denklem 4.1d kullanılarak β 1,10 olarak hesaplanmıştır. Maksimum dolgu yüksekliği 9,0 metre ve 1,10 β değerleri ile Denklem 4.1c kullanılarak α 0.87 olarak hesaplanmıştır. Tüm bu değerler ile Denklem 4.1b kullanılarak k_h 0.2 g olarak hesaplanmıştır.

DD1 deprem düzeyi için 0,692 g PGA ve 1,1 F_{PGA} değerleri ile Denklem 4.1a kullanılarak k_{maks} 0,76 g olarak hesaplanmıştır. 0,820 g S_{D1} ve 0,76 g k_{maks} değerleri ile Denklem 4.1d kullanılarak β 0,81 olarak hesaplanmıştır. Maksimum dolgu yüksekliği 9,0 metre ve 0.81 β değerleri ile Denklem 4.1c kullanılarak α 0.82 olarak hesaplanmıştır. Tüm bu değerler ile Denklem 4.1b kullanılarak k_h 0.3 g olarak hesaplanmıştır.

4.3. Proje Sahası Sıvılaşma Kontrolü

Sismik zemin sıvılaşması; yeraltı su seviyesinin altında yer alan ve yüzeyden 20 m derinliğe kadar olan kohezyonsuz ya da düşük kohezyonlu zeminlerin deprem sarsıntısı altında, boşluk suyu basıncındaki artışa paralel kayma mukavemeti ve rijitliğindeki düşüş olarak tanımlanır. Zemin sıvılaşması sırasında ve sonrasında büyük mertebelerde kalıcı zemin deformasyonları ve sıfır zemin efektif gerilme durumları gerçekleşebilir. Literatürde yapılan çalışmalar, yer altı su seviyesinin altında bulunan özellikle iri taneli kohezyonsuz zeminlerin yüzeyden itibaren ilk 20 m derinlikte sıvılaşmaya maruz kalabileceğini göstermektedir. Araştırma çalışmaları sonucunda sahada mekanik özellikleri belirlenen zemin birimlerinin düşük SPT sayıları, düşük plastisite oranı ve yer altı suyu seviyesinin yüksek olması nedeniyle “TBDY 2018 EK 16B – Basitleştirilmiş Zemin Sıvılaşma Değerlendirmesi” yöntemine göre sıvılaşma tahkiki yapılmıştır. Sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu Denklem 4.2’de tanımlanmıştır.

$$\tau_r / \tau_{deprem} \geq 1,10 \quad (4.2)$$

τ_r : Sıvılaşma Direnci

τ_{deprem} : Zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesi

Sıvılaşma direncinin birimi kPa’dır ve Denklem 4.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\tau_r = CRR_{M7.5} \times C_M \times \sigma'_{V0} \quad (4.3)$$

$CRR_{M7.5}$: $M_w = 7,5$ olan depreme karşı gelen çevrimsel dayanım oranı (Denklem 4.4)

C_M : Tasarım depremi moment büyüklüğü düzeltme katsayısı (Denklem 4.5)

σ'_{v0} : Efektif düşey gerilme

$$CRR_{M7.5} = \frac{1}{34 - N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{[10N_{1,60f} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (4.4)$$

$$C_M = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}} \quad (4.5)$$

Zeminde oluşan kayma gerilmesi Denklem 4.6 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\tau_{deprem} = 0.65\sigma_{v0}(0.4S_{DS})r_d \quad (4.6)$$

σ_{v0} : Sıvılaşma değerlendirmesi yapılan derinlikteki toplam düşey gerilme

S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı

r_d : İlgili derinlikteki gerilme azaltma katsayısı

Gerilme azaltma katsayısı değerlendirmesi yapılan derinliğe (z) bağlı olarak Denklem 4.7 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$r_d = 1,0 - 0,00765z \quad (4.6)$$

Sıvılaşma hesaplamaları $M_w=7.0$, Yer altı su seviyesi 4,5 metre ve $S_{DS}=1.014$ g değerleri ile hesaplanmıştır. Sıvılaşma analiz hesaplarında laboratuvar ve saha deneyleri sonuçlarına göre en kritik sondajı temsil eden SK1 sondaj verileri kullanarak yapılmış ve güvenli tarafta kalmak için tüm güzergâh için bu sonuçlar dikkate alınmıştır. Sıvılaşma sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. SK-1 Sondajı sıvılaşma hesabı sonuçları

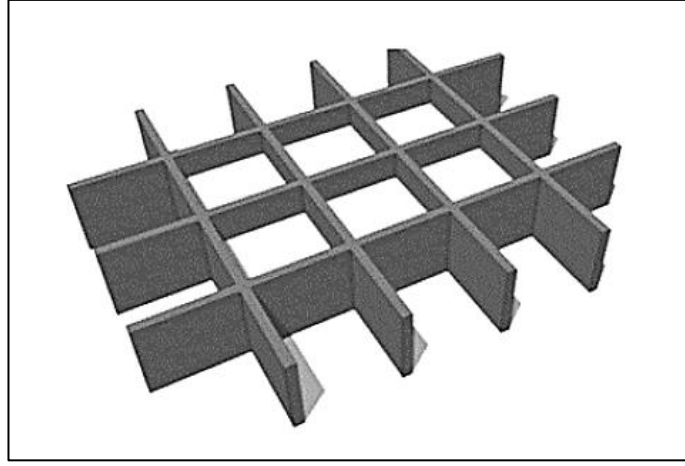
Derinlik	$N_{1,60f}$	$CRR_{M7.5}$	C_M	τ_r	r_d	τ_{deprem}	$\frac{\tau_r}{\tau_{deprem}}$	Sıvılaşma Var/Yok
1,73	-	-	-	-	-	-	-	-
3,23	-	-	-	-	-	-	-	-
4,73	22	0,24	1,19	24,96	0,96	22,78	1,10	Var

Tablo 4.2. (Devam) SK-1 Sondajı sıvılaşma hesabı sonuçları

6,23	17	0,18	1,19	21,35	0,95	29,29	0,73	Var
7,73	24	0,27	1,19	35,97	0,94	35,63	1,01	Var
9,23	19	0,20	1,19	29,57	0,93	41,73	0,71	Var
10,73	22	0,24	1,19	38,99	0,89	46,26	0,84	Var
12,23	22	0,24	1,19	42,50	0,85	50,19	0,85	Var
13,73	21	0,23	1,19	44,09	0,81	53,57	0,82	Var
15,23	17	0,18	1,18	37,14	0,77	56,37	0,66	Var
16,73	21	0,23	1,19	50,82	0,73	58,61	0,87	Var
18,23	13	0,14	1,19	32,98	0,69	60,27	0,55	Var
19,73	16	0,17	1,19	42,53	0,65	61,37	0,69	Var
21,23	39	-	-	-	-	-	-	-

Yapılan hesaplamalar sonucunda 0.00-20.00 metre derinlikte katmanın sıvılaşabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Sıvılaşma probleminin giderilmesi için piyasada yaygın olarak kullanılan “Derin Karıştırma Kolonu” projesi hazırlanmıştır. Güzergâh boyunca toprakarme duvarın oturacağı zemin birimi sıvılaşabilir katman kalınlığı (20,0 m) derinliğinde derin karıştırma kolonları ile zemin iyileştirilerek sıvılaşma probleminin oluşması engellenecektir.

Boulanger (2012) ve Babasaki vd. (1991) sıvılaşmaya karşı önlem olarak belli bir karelaajla uygulanan tekil DSM kolonları yerine Görsel 4.2’de gösterilen bindirmeli kolonlarda oluşan paneller ile teşkil edilen kafes sistemini önermektedir. Bu sistemin tekil kolonlara oranla iyileştirilen bölgede rijitliğin artırılması ve kafes hücreleri içerisinde hapsolan zeminde kesme birim deformasyonlarını azaltma yönünde daha etkin olduğunu vurgulanmaktadır. Uygulamanın etkinliği duvar malzemelerinin rijitliği, duvar kalınlığı, duvar yüksekliği ve duvarlar arasındaki net açıklığa bağlı olduğu ifade edilmektedir. (Boulanger, 2021).



Görsel 4.2. Sıvılaşmaya Karşı Kafes Sistemi Uygulaması (Erol ve Kuruoğlu, 2023)

Kafes sisteminin etkili olabilmesi için temiz duvar açıklığının (S) duvar yüksekliğine (H) oranının ($S < 0.8H$) olması koşulu öngörülmektedir (Kitazume, 2016; Ishii vd. 2017; Koga vd. 1988). Güzergâh boyunca kafes sistemi şeklinde 20 cm kesişmeli ve 60 cm çapında Derin Karıştırma Kolonu uygulaması projelendirilmiştir.

4.4. Geoteknik Parametrelerin Tespiti

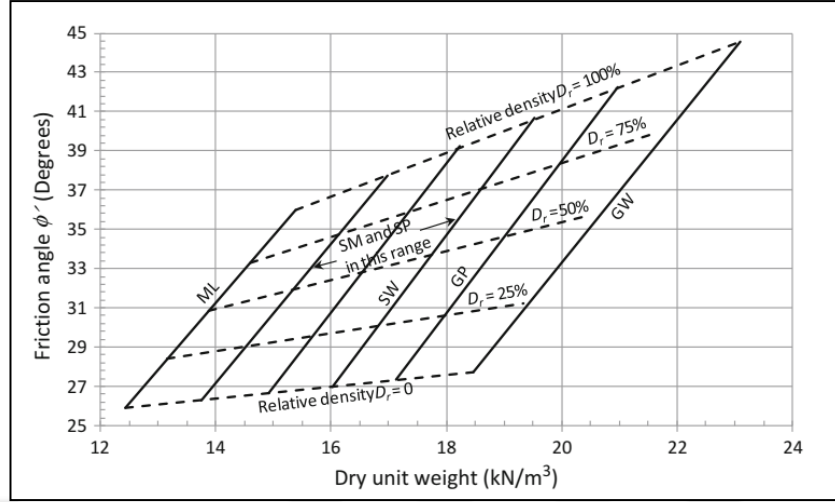
Proje alanı temel zemini genel olarak “SM” zemin sınıfına sahip plastik olmayan siltli kum birimden oluşmaktadır. Kısa dönem ve uzun dönem mukavemet parametresini içsel sürtünme açısı temsil etmektedir. Katmanın kohezyon değeri güvenli tarafta kalmak için 0 alınmıştır.

İri taneli zeminlerde (çakıl ve kumlar), örselenmemiş numune almaktaki zorluklar sebebi ile kayma mukavemetini (içsel sürtünme açısı, ϕ) belirlemenin en iyi yolu literatürde önerilen ve saha çalışmalarını temel alan yöntemleri kullanmaktır. Zemin biriminin içsel sürtünme açısını belirlemek için Denklem 4.7’de verilen OCDI – Japan (2002) ve Şekil 4.8’de verilen US Navy (1982) tarafından önerilen yöntemler kullanılmıştır.

$$\phi = 25 + 3,2 \sqrt{\frac{100 \times N_{50}}{70 + \sigma'_v}} \quad (4.6)$$

N_{50} : Teorik serbest düşme tokmak enerjisinin %50’sine göre düzeltilmiş darbe sayısı

σ'_v : İlgili derinlik katman ortası derinliği efektif gerilme değeri



Şekil 4.8. İçsel sürtünme açısı seçimi (US Navy, 1982)

Zemin biriminin deformasyon parametresi için Denklem 4.7’de verilen Janbu (1998) tarafından önerilen yöntemden faydalanılmıştır.

$$E_m = \frac{E_t}{(1 - \nu) \times (1 + \nu) \times (1 - 2\nu)} \quad (4.6)$$

E_t : 2D Elastisite Modülü

ν : Poisson Oranı

Denklem 4.7 kullanılarak E_t hesaplanmıştır.

$$E_t = m \times s_r \times (s'_v/s_r)^{1-j} \quad (4.7)$$

m : Modül sayısı

s_r : Referans gerilme=100 kPa

s'_v : Efektif gerilme

j : Gerilme katsayısı (0,5)

Bu bağlamda zemin birimlerinin mukavemet ve deformasyon parametreleri seçilmiştir. Parametreler seçilirken ilk 20 metrenin derin karıştırma kolonuyla iyileştirilen alan olarak düşünülüp kompozit zemin kabulüyle parametreleri seçilmiştir. Siltli kum birimin parametreleri seçilirken güvenli tarafta kalmak (0.00-20.00 metreler arasındaki verilerde ortalamaya dahil edilmiştir) için 40 metre gibi düşünülerek parametreler

seçilmiştir. Geoteknik değerlendirmelerde kullanılan olan zemin parametrelerinin özeti Tablo 4.3'deki gibidir.

Tablo 4.3. Zemin Parametreleri Özet Tablo

Zemin Birimi	Katman Kalınlığı (m)	USCS	Birim Ağırlığı (kN/m ³)	Hacim	c'(kPa)	$\phi(^{\circ})$	E(kPa)
Az Killi Siltli Kum (SM)	0,00-40,00	SM	20		0	31	50000

Gerçekleştirilen iç ve dış stabilite analizlerinde kompozit temel yaklaşımı göz önünde bulundurulmuştur. Buna göre, birim karelaç için alan oranı Denklem 4.8 ile hesaplanmıştır.

$$a = \frac{(\pi \times d^2/4)}{s^2} \quad (4.8)$$

a : Alan oranı

d : Kolon çapı (m)

s : Kolonlar arası mesafe (m)

Kolon çapı 0,60 metre ve Kolonlar arası mesafe 2,30 metre değerleri ile Denklem 4.8 kullanılarak alan oranı 0,053 olarak hesaplanmıştır.

Kompozit sistem için eşdeğer kohezyon Denklem 4.9 ile hesaplanmıştır.

$$c_{eşdeğer} = (\alpha \times s_{DSMkolon}) - (1 - \alpha) \times c_{zemin} \quad (4.9)$$

$c_{eşdeğer}$: Eşdeğer kohezyon (kPa)

$s_{dsmkolon}$: Tekil kolon dayanımı (kPa)

c_{zemin} : Zemin kohezyon değeri (kPa)

Derin karıştırma kolonu tek eksenli basınç dayanımı $q = 862$ kPa olarak kabul edilmiştir. Tekil kolon dayanımı tek eksenli basınç dayanımının yarısı ($s_{dsmkolon} = 431$ kPa) ve zemin için $c' = 0$ olarak kabul edilmiştir.

$c_{eşdeğer}$:

$$c_{eşdeğer} = (0,053 \times 431) - (1 - 0,053) \times 0 = 23 \text{ kPa}$$

Buna göre, iç ve dış stabilite analizlerinde temel zemini kayma dayanımı parametreleri olarak içsel sürtünme açısı 31° , drenajsız kohezyon (C_u) dayanımı 230 kPa ve efektif kohezyon (c') 23 kPa değerleri girilmiştir. Literatürde önerilen değerler doğrultusunda elastisite modülü 200 MPa seçilmiştir. Toprakarme duvar dolgusu için içsel sürtünme açısı 34° , drenajsız kohezyon dayanımı 5 kPa ve elastisite modülü 100 MPa seçilmiştir. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri özet tablosu Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.4. Analizlerde kullanılacak zemin parametresi özet tablo

Katman	Birim hacim ağırlığı (kN/m ³)	C_u (kPa)	c' (kPa)	$\phi(^{\circ})$	E (kPa)
DSM Kolon	20	230	23	31	200000
Az killi siltli kum	20	-	0	31	50000
Toprakarme dolgu	20	-	5	34	100000

4.5. Toprakarme İstinat Duvarının Amerikan Karayolları Şartnamesine göre el hesabıyla statik ve dinamik yükler altında tasarımı

4.5.1. Genel Bilgiler

Toprakarme duvar güzergâh dolgularının stabilitelerinin sağlanması amacıyla inşa edilmektedir. Toprakarme istinat duvarı maksimum duvar yüksekliği 9.00 metredir. Analizlerde maksimum duvar kesiti kullanılmıştır. Geogrid tipi olarak polyester örgülü geogrid seçilmiştir. İstinat duvarı yüzey elemanı olarak 25 cm yüksekliğinde 40 cm kalınlığında monoblok eleman kullanılmıştır. İstinat duvarı temeli 30 cm $\times$ 50 cm boyutlarında hatıl temelden oluşmaktadır. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri Tablo 4.4'te verilmiştir. Bu bölümdeki tüm hesaplamalar Amerikan Karayolları Şartnamesi AASHTO (Yayın 5.8 1996)'ne göre yapılmıştır.

4.5.2. Ön Tasarım

4.5.2.1. Donatı başlangıç uzunluğunun belirlenmesi

Donatı boyu başlangıç uzunluğu Denklem 4.10'da verilen şartı sağlaması gerekmektedir.

$$L = 0,7H \geq 2,5 \text{ m} \quad (4.10)$$

L : Donatı boyu uzunluğu (m)

H : Duvar yüksekliği (m)

$$L \geq 0,7H = 0,7 \times 9 = 6,3 \text{ m}$$

Hesaplamalara donatı boyu uzunluğu 8,5 m değeri ile başlanmasına karar verilmiştir.

4.5.2.2. Topuk dolgusu yüksekliğinin belirlenmesi

Topuk dolgusu yüksekliği Denklem 4.11’de verilen şartı sağlaması gerekmektedir.

$$D = \frac{H}{20} \geq 0.5 \text{ m} \quad (4.11)$$

D : Topuk dolgusu yüksekliği (m)

H : Duvar yüksekliği (m)

$$D \geq \frac{H}{20} = \frac{9}{20} = 0,45 \text{ m} = 0,5 \text{ m}$$

Topuk dolgusu yüksekliği 0,8 metre olmasına karar verilmiştir.

4.5.3. Statik yükleme altında dış stabilite hesapları

4.5.3.1. Yatay basınç katsayısı hesabı

Düşey yüzölçümlü duvarların dış stabilite analizi yapılırken, donatılı zemin yapısının rijit bir kütle gibi davrandığı varsayılmalı ve yanal zemin basınçlarının duvarın arkasındaki düşey bir düzleme etki ettiği göz önünde bulundurulmalıdır. Toprakarme istinat duvarıyla inşa edilen dolgularda yatay basınç katsayısı Denklem 4.12 ile hesaplanmıştır.

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad (4.11)$$

K_a : Yatay basınç yatak katsayısı

ϕ : İçsel sürtünme açısı (°)

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{34}{2}\right) = 0,28$$

4.5.3.2. Sisteme etkiyen statik dış yüklerin hesabı

Toprakarme istinat duvarında statik yükler; donatılı zemin kütlesi, yanal zemin kuvveti ve sürşarjdan dolayı oluşan yanal zemin kuvvetinden oluşmaktadır. Bu kuvvetler Denklem 4.12, Denklem 4.13 ve Denklem 4.14 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V_1 = \gamma_f \times H \times L \quad (4.12)$$

V_1 : Donatılı zemin kütlesi (kN)

γ_f : Zemin birim hacim ağırlığı (kN/ m³)

H : Toprakarme duvar yüksekliği (m)

L : Toprakarme duvar genişliği (m)

$$V_1 = \gamma_f \times H \times L = 20 \times 9 \times 8,5 = 1530 \text{ kN}$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \times \gamma_f \times H^2 \times K_a \quad (4.13)$$

F_1 : Yanal zemin kuvveti (kN)

K_a : Yatay basınç yatak katsayısı

$$F_1 = \frac{1}{2} \times \gamma_f \times H^2 \times K_a = \frac{1}{2} \times 20 \times 9^2 \times 0,28 = 227 \text{ kN}$$

$$F_2 = q \times H \times K_a \quad (4.13)$$

F_1 : Yanal zemin kuvveti (kN)

q : Sürşarj yükü (kN)

$$F_2 = q \times H \times K_a = 20 \times 9 \times 0,28 = 50 \text{ kN}$$

4.5.3.3. Duvar altı taban basıncı ve eksantrisitenin hesabı

Bileşke düşey kuvvetin (R) kütlenin orta noktasına göre momenti, sisteme etkiyen kuvvetlerin topuk noktasına göre momentine eşit olmalıdır. Bu eşitlikten eksantrisite (e) hesaplanır. Bu yaklaşım Meyerhof tarafından önerilmiştir ve eksantrik yükleme durumunda tabanda (L -2e) olarak tanımlanan alanda üniform bir basıncın oluştuğunu varsaymaktadır. Meyerhof yaklaşımına göre eksantrisite hesabı Denklem 4.14'de verilmiştir.

$$e = \frac{F_1 \times \frac{h}{3} + F_2 \times \frac{h}{2}}{R} \quad (4.14)$$

e : Eksantrite (m)

R : Bileşke düşey kuvvet (kN)

$$e = \frac{F_1 \times \frac{h}{3} + F_2 \times \frac{h}{2}}{R} = \frac{227 \times 3 + 50 \times 4,5}{1550} = 0,59 \text{ m}$$

Eksantrite kaya olmayan temel zemini için $L/6$, kaya olan temel zemininde $L/4$ değerinden küçük olmalıdır. Eksantritenin sınır değerlerden büyük olması durumunda donatı boyu uzatılmalıdır. Eksantrite kontrolü Denklem 4.15’le yapılmıştır.

$$e < L/6 \quad (4.15)$$

$$e = 0,59 \text{ m} < \frac{L}{6} = 1,42 \text{ m}$$

Hesaplanan eksantrite değerine göre meyerhof taban basıncı değeri Denklem 4.16 ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_v = \frac{R}{L - 2e} \quad (4.16)$$

σ_v : Meyerhof taban basıncı (kPa)

$$\sigma_v = \frac{R}{L - 2e} = \frac{1150}{8,5 - 2 \times 0,59} = 212 \text{ kPa}$$

Hesaplanan taban basıncı değerine göre taşıma kapasitesi kontrolü Denklem 4.17 ve Denklem 4.18 ile gerçekleştirilmiştir. Taşıma gücü güvenlik katsayısı 2,5’tur.

$$q_{nihil} = 5,14 \times c_u > \sigma_v \quad (4.17)$$

q_{nihil} : Nihai taşıma gücü (kPa)

c_u : Drenajsız kayma mukavemeti (kPa)

$$q_{em} = \frac{5,14 \times c_u}{FS} > \sigma_v \quad (4.18)$$

q_{em} : İzin verilebilir taşıma gücü (kPa)

FS : Güvenlik katsayısı=2,5

$$q_{em} = \frac{5,14 \times c_u}{FS} = \frac{5,14 \times 230}{2,5} = 590 \text{ kPa} > \sigma_v = 212 \text{ kPa}$$

Toprakarme duvar boyutlarına göre statik durum eksantrisite ve taşıma gücü sınır değerleri karşılamaktadır.

4.5.3.4. Kayma tahkiki

Toprakarme duvar kayma tahkikleri Denklem 4.19 ile gerçekleştirilmiştir. Kayma stabilitesi güvenlik katsayısı minimum 1,5 olmalıdır.

$$GS_{kayma} = \frac{\sum P_R}{\sum P_d} \geq 1,5 \quad (4.19a)$$

GS_{kayma} : Kayma stabilitesi güvenlik katsayısı

$\sum P_R$: Yatay direnç kuvvetleri (kN)

$\sum P_d$: Yatay kaydırma kuvvetleri (kN)

$$\sum P_R = F_T \quad (4.19b)$$

$$\sum P_d = R \times \tan 31 \quad (4.19c)$$

$$GS_{kayma} = \frac{\sum P_R}{\sum P_d} = \frac{227}{1150 \times 0,60} = 3,04 > 1,50$$

Hesaplamalar sonucunda elde edilen statik durum kayma stabilitesi güvenlik katsayısı yeterlidir.

4.5.3.5. Devrilme tahkiki

Toprakarme duvar devrilme tahkikleri Denklem 4.20 ile gerçekleştirilmiştir. Devrilme tahkiki güvenlik katsayısı minimum 2,0 olmalıdır.

$$GS_{devrilme} = \frac{\sum M_R}{\sum M_0} \geq 2,0 \quad (4.20)$$

$GS_{devrilme}$: Devrilme tahkiki güvenlik katsayısı

ΣM_R : Devrilmeye karşı çalışan momentler toplamı (kNm)

ΣM_0 : Devirmeye çalışan momentlerin toplamı (kNm)

$$GS_{devrilme} = \frac{\Sigma M_R}{\Sigma M_0} = \frac{V_1 \times \frac{L}{2} + q \times \frac{L}{2}}{F_1 \times \frac{h}{3} + F_2 \times \frac{h}{2}} = \frac{6588}{906} = 7,27 \geq 2,0$$

Hesaplamalar sonucunda elde edilen statik durum devrilme tahkiki güvenlik katsayısı yeterlidir.

4.5.4. Dinamik yükleme altında dış stabilite hesapları

Statik yüklemeler açısından yapılan güvenlik tahkikleri sonucunda 9 metre yüksekliğinde toprakarme duvar için 8,5 metre geogrid boyu uzunluğu dış stabilite açısından yeterli olduğu tespit edilmiştir. Bu bölümde dinamik yükleme altında toprakarme istinat duvarının dış stabilite kontrolleri gerçekleştirilecektir. Sismik durum güvenlik sayıları statik durum güvenlik sayılarının %75'ine tekabül etmektedir. Sisteme etkiyen pik ivme değeri Denklem 4.21' ile hesaplanmıştır.

$$A_m = (1,45 - A) \times A \quad (4.21)$$

A_m : Sisteme etkiyen pik ivme (g)

A : DD-2 Hareket düzeyi yatay deprem katsayısı: 0,2 g

$$A_m = (1,45 - 0,2) \times 0,20 = 0,25 \text{ g}$$

4.5.4.1. Sisteme etkiyen dinamik kuvvetlerin hesabı

Toprakarme duvarlarda dinamik durumda güvenlik tahkikleri gerçekleştirilirken statik yüklemelere ek olarak deprem durumunda oluşan yatay dinamik kuvvetler dikkate alınır. Deprem anında toprakarme duvarlarda ağırlığından dolayı atalet kuvveti P_{IR} ve arka dolgu itki kuvvetinden meydana gelen P_{AE} kuvveti oluşur. Bu iki kuvvetin aynı anda maksimum değerlerinin etki etme ihtimalinin düşük olması sebebiyle güvenlik hesaplamalarında P_{IR} 'nin tamamı, P_{AE} 'nin %50'si etki ettirilir. P_{IR} ve P_{AE} kuvvetleri Denklem 4.22 ile hesaplanmıştır.

$$P_{IR} = 0,5 \times A_m \times \gamma_F \times H^2 \quad (4.21a)$$

$$P_{AE} = 0,375 \times A_m \times \gamma_F \times H^2 \quad (4.21b)$$

$$P_{IR} = 0.5 \times A_M \times \gamma_F \times H^2 = 0.5 \times 0.25 \times 20 \times 81 = 203 \text{ kN}$$

$$P_{AE} = 0.375 \times A_M \times \gamma_F \times H^2 = 0.375 \times 0.25 \times 20 \times 81 = 152 \text{ kN}$$

4.5.4.2. Dinamik yükleme durumu kayma tahkiki

Kayma tahkiki için statik yükleme durumundaki kabuller geçerlidir. Statik yüklere dinamik yükler ilave edilmiştir. Dinamik durum kayma tahkiki Denklem 4.22 ile gerçekleştirilmiştir.

$$GS_{kayma} = \frac{\sum P_R}{\sum P_d} \geq 1,125 \quad (4.22a)$$

GS_{kayma} : Kayma stabilitesi güvenlik katsayısı

$\sum P_R$: Yatay direnç kuvvetleri (kN)

$\sum P_d$: Yatay kaydırma kuvvetleri (kN)

$$\sum P_R = F_1 + F_2 + P_{IR} + 0,5 P_{AE} \quad (4.22b)$$

$$\sum P_d = R \times \tan 31 \quad (4.22c)$$

$$GS_{kayma} = \frac{\sum P_R}{\sum P_d} = \frac{506}{1150 \times 0,60} = 1,36 > 1,125$$

Hesaplamalar sonucunda elde edilen dinamik durum kayma stabilitesi güvenlik katsayısı yeterlidir.

4.5.4.3. Dinamik yükleme durumu duvar altı taban basıncı ve eksantrisitenin hesabı

Eksantrisite hesabı için statik yükleme durumundaki kabuller geçerlidir. Statik yüklere dinamik yükler ilave edilmiştir. Dinamik yükleme koşullarında eksantrisitenin $L/3$ 'ten küçük olması durumu kontrol edilir. Sınır değerler aşıldığı durumda donatı boyu artırılmalıdır. Eksantrisite kontrolü Denklem 4.23'le yapılmıştır.

$$e < L/3 \quad (4.23)$$

$$e = \frac{F_1 \times \frac{h}{3} + F_2 \times \frac{h}{2} + 0,5 \times P_{AE} \times 0,6H + P_{IR} \times 0,5H}{R} = \frac{2229}{1550} = 1,44 \text{ m}$$

$$e = 1,44 \text{ m} < \frac{L}{3} = 2,83 \text{ m}$$

Hesaplanan eksantrisite değerine göre meyerhof taban basıncı değeri Denklem 4.16 ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_v = \frac{R}{L - 2e} = \frac{1550}{8,5 - 2 \times 2,83} = 545 \text{ kPa}$$

Hesaplanan taban basıncı değerine göre taşıma kapasitesi kontrolü Denklem 4.17 ve Denklem 4.18 ile gerçekleştirilmiştir. Taşıma gücü güvenlik katsayısı 1,88'dir.

$$q_{em} = \frac{5,14 \times c_u}{FS} = \frac{5,14 \times 230}{1,88} = 628 \text{ kPa} > \sigma_v = 545 \text{ kPa}$$

Toprakarme duvar boyutlarına göre dinamik durum eksantrisite ve taşıma gücü sınır değerleri karşılamaktadır.

Toprakarme duvar maksimum duvar yüksekliği 9,0 metre ve 8,5 metre donatı uzunluğu ile gerçekleştirilen statik ve dinamik durum dış stabilite kontrolleri gerçekleştirilmiş yeterli bulunmuştur. Gerçekleştirilen kontroller özet olarak Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Statik ve dinamik yüklemeler altında gerçekleştirilen dış stabilite kontrolleri

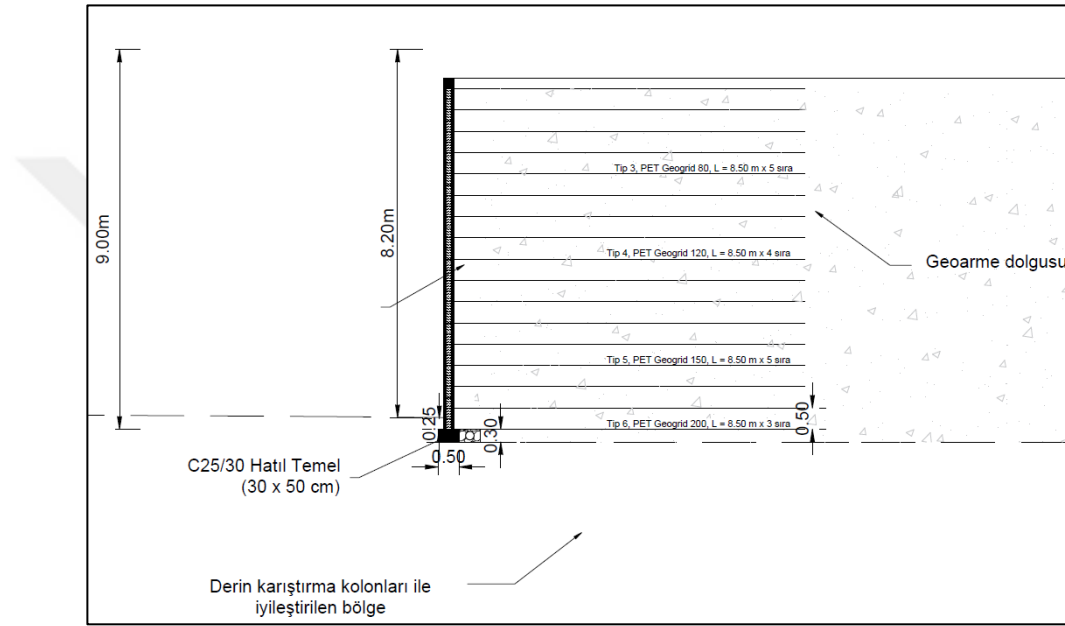
El hesabı	Kontrol başlığı	Hesaplanan değer	Yeterlilik koşulu	Sonuç
Statik Durum	Eksantrisite	0,59	<1,42	Uygundur
	Taşıma gücü tahkiki	5,57	>2,5	Uygundur
	Kayma kontrolü	3,04	>1,5	Uygundur
	Devrilme	7,27	>2,0	Uygundur
Dinamik Durum	Kayma kontrolü	1,36	>1,125	Uygundur
	Taşıma gücü tahkiki	2,17	>1,88	Uygundur
	Eksantrisite	1,44	<2,83	Uygundur

4.5.5. Statik yükleme altında iç stabilite hesapları

Statik ve dinamik yükler altında yapılan dış stabilite kontrolleri sonrasında donatı 9,0 metre duvar yüksekliğinin teşkil ettiği durumda donatı boyunun 8,5 metre olmasına

karar verilmiştir. Bu bölümde statik yüklemeler altında donatının iç stabilite kontrolleri gerçekleştirilerek donatı aralığına ve mukavemetine karar verilecektir.

Proje kapsamında 4 tip geogrid kullanılmıştır. Geogridlerin toprakarme duvardaki yerleşimi ön tasarım olarak belirlenmiştir. Hesaplamalar sonucunda güvenliği teyit edilerek, yetersiz çıkması durumunda geogrid çekme dayanımı, aralığı vs. değiştirilecektir. Analiz kesiti Şekil 4.9'da verilmiştir. Kullanılacak geogridlerin detaylı bilgileri Tablo 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Ön tasarım sonucu belirlenen analiz kesiti

Tablo 4.6. Toprakarme duvar inşaatında kullanılacak geogrid tipleri

Tip	Çekme mukavemeti (min., kN/m)	Rulo uzunluğu (m)	Rulo genişliği (m)	Gözenek aralığı (mm)
Tip 3, 80 kN/m Polyester Geogrid	>80	50-100	≥ 5,20	25-40
Tip 4, 120 kN/m Polyester Geogrid	>120	50-100	≥ 5,20	25-40
Tip 5, 150 kN/m Polyester Geogrid	>150	50-100	≥ 5,20	25-40
Tip 6, 200 kN/m Polyester Geogrid	>200	50-100	≥ 5,20	25-40

Toprakarme duvarlarda iç stabilite problemleri kopma ve sıyrılma olmak üzere iki durumda gerçekleşmektedir. Geogridler katmanlarına gelen çekme ve sıyrılma yüklemeleri hesaplanarak yeterli mukavemete sahip geogridler seçilecektir. Toprakarme

duvar yapılarında statik durumda sıyrılmaya karşı güvenlik sayısı en az 1,5, kopmaya karşı güvenlik katsayısı en az 1,3 olmalıdır.

4.5.5.1. Statik yükleme kopma tahkiki

Toprakarme istinat duvarlarında ilk olarak kopma tahkiki gerçekleştirilir. Her bir geogrid katmanı için çekme gerilmeleri izin verilen sınır değerlerde olmalıdır. Çekmeye karşı güvenlik katsayıları kontrol edilerek en az 1,3 olması sağlanacak şekilde geogrid mukavemet değerleri seçilmiştir. Çekme ve sıyrılmaya güvenlik katsayısı hesabında izin verilebilir çekme dayanımları kullanılmıştır. Denklem 4.24 kullanılarak her bir geogrid katmanına gelen çekme gerilmeleri hesaplanmış ve çekmeye karşı güvenlik sayıları hesaplanmıştır. Sonuçlar özet olarak Tablo 4.7’de verilmiştir.

$$T_{maks} = \frac{\sigma_h S_v}{R_c} \quad (4.24a)$$

$$\sigma_v = \gamma_r Z \quad (4.24b)$$

$$\sigma_h = K_a \sigma_v \quad (4.24c)$$

σ_v : İlgili derinlik efektif gerilme (kPa)

S_v : Donatı düşey aralık mesafesi (m)

R_c : 0,8

γ_r : Donatılı zemin birim hacim ağırlığı (kN/m³)

K_a : Aktif yatay basınç katsayısı

Z : Donatı katman yüksekliği

$$T_{emn} = \frac{T_{ult}}{RF_d \times RF_{id} \times RF_c \times GS_{kopma}} \quad (4.24d)$$

T_{ult} : Geogrid nihai çekme dayanımı (kN/m)

T_{emn} : Geogrid emniyetli çekme dayanımı (kN/m)

RF_d : Zamana karşı dayanıklılık faktörü (1,15)

RF_{id} : İmalat hasarı azaltma faktörü (1,35)

RF_c : Yorulma azaltma faktörü (1,80)

GS_{kopma} : 1,3

4.5.5.2. Statik yükleme sıyrılma tahkiki

Toprakarme istinat duvarlarında ikincil olarak sıyrılma tahkiki gerçekleştirilir. Her bir geogrid katmanı için sıyrılma gerilmeleri izin verilen sınır değerlerde olmalıdır. Sıyrılmaya karşı güvenlik katsayıları kontrol edilerek en az 1,5 olması sağlanacak şekilde geogrid mukavemet değerleri seçilmiştir. Denklem 4.25 kullanılarak her bir geogrid katmanına gelen sıyrılma gerilmeleri hesaplanmış ve sıyrılmaya karşı güvenlik sayıları hesaplanmıştır. Sonuçlar özet olarak Tablo 4.9'da verilmiştir.

$$T_{maks} \leq \frac{1}{GS_{Sıyrılma}} F^* \gamma Z_p L_e C R_c \alpha \quad (4.25a)$$

$GS_{Sıyrılma}$: 1,5

T_{maks} : Donatılarda oluşan maksimum çekme gerilmesi (kN/m)

C : Yüzey sayısı=2

α : Ölçü düzeltme faktörü=0,8

F^* : Sürtünme katsayısı=0,56

R_c : Kaplama sayısı=0,8

γZ_p : Örtü basıncı (kPa)

L_e : Donatının direnç bölgesi içerisinde kalan boyu (m)

L_a : Donatının aktif bölge içerisinde kalan boyu (m)

$$L_a = (H - z) \div \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (4.25b)$$

φ : Toprakarme dolgu içsel sürtünme açısı (°)

4.5.5.3. Dinamik yükleme kopma tahkiki

Dinamik yükleme altında kopma tahkiki gerçekleştirilirken statik durumdaki kabuller geçerlidir. Ek olarak aktif bölgenin ağırlığından dolayı deprem anında oluşan atalet kuvveti sisteme etki ettirilir. Statik ve dinamik yüklemeden kaynaklı çekme

gerilmeleri toplanarak, toplam maksimum çekme gerilmesi elde edilir. Dinamik yükler altında çekme gerilmesi kontrolleri Denklem 4.26 kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar özet olarak Tablo 4.7’de verilmiştir. Dinamik durum kopma dayanımı güvenlik katsayısı 0,98’dir.

$$T_{md} = P_i \frac{L_{ei}}{\sum_{i=1}^n L_{ei}} \quad (4.26a)$$

L_{ei} : i. Sıradaki donatı aktif boyu)

P_i : Aktif bölge ağırlığından kaynaklı atalet momenti (kN/m)

$$P_i = A_m \times W_a \quad (4.26b)$$

A_m : Sisteme etkiyen pik ivme (g)

W_a : Aktif bölgenin ağırlığı (kN/m)

Tablo 4.7. Toprakarme Duvar Statik ve Dinamik Yükleme Altında Geogrid Kopma Dayanımı Kontrolü

#	Geogrid derinliği	T _{mus} (kN/m)	T _{max} (kN/m)	T _{md} (kN/m)	T _{toplam} (kN/m)	F _{Skopma} (Statik)	F _{Skopma} (Dinamik)
1	0,50	71,57	29,75	4,19	33,94	2,41	2,11
2	1,00	71,57	28,00	4,47	32,47	2,56	2,20
3	1,50	71,57	26,25	4,74	30,99	2,73	2,31
4	2,00	53,70	24,50	5,02	29,52	2,19	1,82
5	2,50	53,70	22,75	5,30	28,05	2,36	1,91
6	3,00	53,70	21,00	5,58	26,58	2,56	2,02
7	3,50	53,70	19,25	5,86	25,11	2,79	2,14
8	4,00	53,70	17,50	6,13	23,63	3,07	2,27
9	4,50	42,90	15,75	6,41	22,16	2,72	1,94
10	5,00	42,90	14,00	6,69	20,69	3,06	2,07
11	5,50	42,90	12,25	6,97	19,22	3,50	2,23
12	6,00	42,90	10,50	7,25	17,75	4,09	2,42
13	6,50	28,60	8,75	7,52	16,27	3,27	1,76
14	7,00	28,60	7,00	7,80	14,80	4,09	1,93
15	7,50	28,60	5,25	8,08	13,33	5,45	2,15
16	8,00	28,60	3,50	8,36	11,86	8,17	2,41
17	8,50	28,60	1,75	8,63	10,38	16,34	2,75

4.5.5.4. Dinamik yükleme sıyrılma tahkiki

Dinamik yükleme altında sıyrılma tahkiki gerçekleştirilirken statik durumdaki kabuller geçerlidir. Ek olarak aktif bölgenin ağırlığından dolayı deprem anında oluşan atalet kuvveti sisteme etki ettirilir. Statik ve dinamik yüklemeden kaynaklı sıyırmaya çalışan kuvvetler toplanarak, toprakarme duvara dinamik durumda gelen toplam sıyrılma kuvveti elde edilir. Dinamik yükler altında çekme gerilmesi kontrolleri Denklem 4.27 kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar özet olarak Tablo 4.9’da verilmiştir. Dinamik durum kopma dayanımı güvenlik katsayısı 1,125’dir.

$$T_{maks} \leq \frac{0,80}{GS_{Sıyrılma(dinamik)}} F^* \gamma Z_p L_e C R_c \alpha \quad (4.27a)$$

$GS_{Sıyrılma(dinamik)}$: 1, 125

T_{maks} : Donatılarda oluşan maksimum çekme gerilmesi (kN/m)

C : Yüzey sayısı=2

α : Ölçü düzeltme faktörü=0,8

F^* : Sürtünme katsayısı=0,56

R_c : Kaplama sayısı=0,8

γZ_p : Örtü basıncı (kPa)

L_e : Donatının direnç bölgesi içerisinde kalan boyu (m)

L_a : Donatının aktif bölge içerisinde kalan boyu (m)

$$L_a = (H - z) \div \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (4.27b)$$

φ : Toprakarme dolgu içsel sürtünme açısı (°)

Aktif donatı boyu geogrid katmanına göre Denklem 4.27b kullanılarak hesaplanmıştır. Özet tablo Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.8. Geogrid katmanları aktif donatı boyu L_e

#	Geogrid derinliği	T_{max} (kN/m)	T_{md} (kN/m)	T_{toplam} (kN/m)	L_a (m)	L_e (m)
1	0,50	29,75	4,19	33,94	0,27	8,24

Tablo 4.8. (Devam) Geogrid katmanları aktif donatı boyu L_e

2	1,00	28,00	4,47	32,47	0,53	7,97
3	1,50	26,25	4,74	30,99	0,80	7,71
4	2,00	24,50	5,02	29,52	1,06	7,44
5	2,50	22,75	5,30	28,05	1,33	7,18
6	3,00	21,00	5,58	26,58	1,59	6,91
7	3,50	19,25	5,86	25,11	1,86	6,65
8	4,00	17,50	6,13	23,63	2,12	6,38
9	4,50	15,75	6,41	22,16	2,39	6,12
10	5,00	14,00	6,69	20,69	2,65	5,85
11	5,50	12,25	6,97	19,22	2,92	5,59
12	6,00	10,50	7,25	17,75	3,18	5,32
13	6,50	8,75	7,52	16,27	3,45	5,06
14	7,00	7,00	7,80	14,80	3,71	4,79
15	7,50	5,25	8,08	13,33	3,98	4,53
16	8,00	3,50	8,36	11,86	4,24	4,26
17	8,50	1,75	8,63	10,38	4,51	4,00

Tablo 4.9. Dinamik Durum Sıyırılma Tahkiki Sonuçları

#	Geogrid derinliği	Statik sıyırılma dayanımı (kN/m)	FS _{sıyırılma} (Statik)	Dinamik sıyırılma dayanımı (kN/m)	FS _{sıyırılma} (Dinamik)
1	0,50	1003,06	33,72	802,87	23,66
2	1,00	913,68	32,63	731,33	22,53
3	1,50	828,09	31,55	662,82	21,39
4	2,00	746,31	30,46	597,36	20,23
5	2,50	668,32	29,38	534,93	19,07
6	3,00	594,12	28,29	475,55	17,89
7	3,50	523,73	27,21	419,20	16,70
8	4,00	457,13	26,12	365,89	15,48
9	4,50	394,33	25,04	315,63	14,24
10	5,00	335,32	23,95	268,40	12,97
11	5,50	280,12	22,87	224,21	11,67
12	6,00	228,71	21,78	183,06	10,32
13	6,50	181,10	20,70	144,95	8,91
14	7,00	137,28	19,61	109,88	7,42
15	7,50	97,26	18,53	77,85	5,84
16	8,00	61,05	17,44	48,86	4,12

Tablo 4.9. (Devam) Dinamik Durum Sıyırılma Tahkiki Sonuçları

17	8,50	28,62	16,36	22,91	2,21
----	------	-------	-------	-------	------

Yapılan kontroller sonrasında tasarım statik ve dinamik durum, iç ve dış stabilite tahkikleri yeterli bulunmuştur. Bir sonraki aşama olarak tasarım limit denge analiz yöntemleriyle stabilite tahkikleri gerçekleştirilecektir.

4.6. Toprakarme istinat duvarının limit denge metoduyla statik ve dinamik yükler altında tasarımı

Limit denge analizi, geoteknik mühendisliğinde özellikle şev stabilite problemlerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu analiz, zemin kütlelerinin veya yapının dengesini, dış kuvvetlerin etkisi altında inceler ve olası kayma yüzeyleri boyunca denge şartlarını sağlar.

Limit denge analizlerinin 3 temel ana prensibi vardır. İlk olarak zemin kütlelerinin kaymasını önlemek için kuvvet ve moment dengesi ile denge şartını sağlar. İkinci olarak zemin kütlelerinin kayma direnci, içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinden meydana gelen Mohr-Coulomb kayma mukavemeti kriteri ile belirlenir. Son olarak, sistemin dengesini sağlamak için bir güvenlik katsayısı hesaplar. Güvenlik katsayısı, zemin mukavemetinin mevcut gerilmelere bölünmesiyle elde edilir. $FS=1$, dengenin sınırında olduğunu gösterir. $FS>1$, güvenli bir durumu; $FS<1$ ise potansiyel bir kaymayı işaret eder.

Bishop's Yöntemi, Janbu Yöntemi, Spencer Yöntemi ve GLE/Morgenstern-Price Yöntemi limit denge analiz yöntemleri içerisinde en çok kullanılan yöntemlerdir. Bishop's yöntemi, özellikle dairesel kayma yüzeyleri için uygundur ve hem yatay kuvvet hem de moment dengesini sağlar. Güvenlik katsayısı, zemin kütlelerinin her dilimi için hesaplanır ve tüm dilimlerin dengesi sağlanır. Janbu'nun yöntemi, dairesel ve doğrusal olmayan kayma yüzeyleri için genel olarak uygulanabilir ve hem yatay hem de düşey kuvvet dengesini sağlar. Güvenlik katsayısı, zemin kütlelerinin her dilimi için hesaplanır ve tüm dilimlerin dengesi sağlanır. Spencer'ın yöntemi, kayma yüzeyleri boyunca hem yatay hem de eğik kuvvet dengesini sağlar ve kesme kuvvetleri ile moment dengesini aynı anda dikkate alır. Güvenlik katsayısı, zemin kütlelerinin her dilimi için hesaplanır ve tüm dilimlerin dengesi sağlanır. Bu yöntem, daha karmaşık ve kesin sonuçlar verir. GLE veya Morgenstern-Price yöntemi, zemin stabilitesi analizinde kullanılan gelişmiş bir yöntemdir. Yatay ve düşey kuvvet dengesini sağlarken moment dengesini de dikkate alır

ve dilimler arasındaki ara yüzey kuvvetlerini detaylı bir şekilde analiz eder. Bu yöntem, özellikle karmaşık kayma yüzeyleri ve zemin profilleri için uygundur ve güvenlik katsayısının hesaplanmasında yüksek doğruluk sağlar (Abramson vd.,2001).

Toprakarme istinat duvarı limit denge analizlerinde kuvvet dengesini dikkate alması ve karmaşık kayma yüzeyleri için uygun olması sebebiyle Spencer ve GLE/Morgenstern-Price yöntemleri kullanılır.

İç stabilite analizleri MSEW 3.0 (Mechanically Stabilized Earth Wall) yazılımı kullanılarak, dış stabilite analizleri Rocscience SLIDE 6.0 yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

4.6.1. Limit denge metoduyla iç stabilite tahkiki

Tasarımda kullanılan zemin parametreleri, sabit ve hareketli yük varsayımları ve diğer ayrıntıların ışığında imal edilecek toprakarme duvarlar için iç stabilite kontrolleri yapılmıştır. İç stabilite kontrolleri AASHTO tarafından önerilen FHWA şartnamesine uygun ve bir limit denge yöntemi yazılımı olan Adama Engineering MSEW 3.0 (Mechanically Stabilized Earth Wall) kullanılarak yapılmıştır. MSEW 3.0 yazılımı bir toprakarme duvar için tanımlanmış olan iç stabilite sorunlarına karşı güvenlik sayılarını vermektedir. MSEW 3.0 yazılımı kullanılarak imal edilecek toprakarme duvarların tasarımı iç stabilite açısından kontrol edilmiş; geogrid tipleri, geogrid boyları ve duvar ön yüzey elemanları belirlenmiştir. İç stabilite analizlerinde toprakarme duvar sistemi için güvenlik kriterlerinin AASHTO 2002 ASD (FHWA-NHI-00-043) standardına uygun olması şartı aranmıştır. Analiz sonuçları İstanbul Teknik İnşaat A.Ş. şirketinin onayıyla akademik çalışmaya istinaden temin edilmiştir.

Adama Engineering MSEW 3.0, geoteknik mühendislikte mekanik stabilize edilmiş zemin (MSE) duvarlarının tasarımı ve analizi için kullanılan ileri düzey bir yazılımdır. Program, çeşitli tasarım ve analiz yöntemlerini destekler ve MSE duvarlarının güvenli ve ekonomik bir şekilde tasarlanmasına yardımcı olur. Kullanıcı dostu arayüzü, esnek modelleme seçenekleri, detaylı raporlama yetenekleri ve güçlü analiz kapasitesi ile MSEW 3.0, geoteknik mühendislik projelerinde yaygın olarak tercih edilen bir yazılımdır. Program, güvenlik katsayısının hesaplanması ve stabilite analizlerinde yüksek doğruluk sağlar.

Analiz çıktıları Şekil 4.10'da verilmiştir.

SOIL DATA	
REINFORCED SOIL	
Unit weight, γ	20.0 kN/m ³
Design value of internal angle of friction, ϕ	34.0 °
RETAINED SOIL	
Unit weight, γ	20.0 kN/m ³
Design value of internal angle of friction, ϕ	34.0 °
FOUNDATION SOIL (Considered as an equivalent uniform soil)	
Equivalent unit weight, γ_{equiv}	20.0 kN/m ³
Equivalent internal angle of friction, ϕ_{equiv}	31.0 °
Equivalent cohesion, c_{equiv}	23.0 kPa
Water table is at wall base elevation	
LATERAL EARTH PRESSURE COEFFICIENTS	
K_a (internal stability) = 0.2827 (if batter is less than 10°, K_a is calculated from eq. 15. Otherwise, eq. 38 is utilized) Inclination of internal slip plane, $\psi = 62.00^\circ$ (see Fig. 28 in DEMO 82). K_a (external stability) = 0.2827 (if batter is less than 10°, K_a is calculated from eq. 16. Otherwise, eq. 17 is utilized)	
BEARING CAPACITY	
Bearing capacity coefficients (calculated by MSEW): $N_c = 32.67$ $N_\gamma = 25.99$	
SEISMICITY	
Maximum ground acceleration coefficient, $A = 0.371$	
Design acceleration coefficient in Internal Stability: $K_h = A_m = 0.400$	
Design acceleration coefficient in External Stability: $K_{h,d} = 0.236 \Rightarrow K_h = A_m = 0.236$	
(K _h in External Stability is based on allowable displacement, $d = 25$ mm, using FHWA-NHI-00-043 equation)	
$K_{ae} (K_h > 0) = 0.4390$ $K_{ae} (K_h = 0) = 0.2827$ $\Delta K_{ae} = 0.1563$ Seismic soil-geogrid friction coefficient, F^* is 80.0% of its specified static value.	

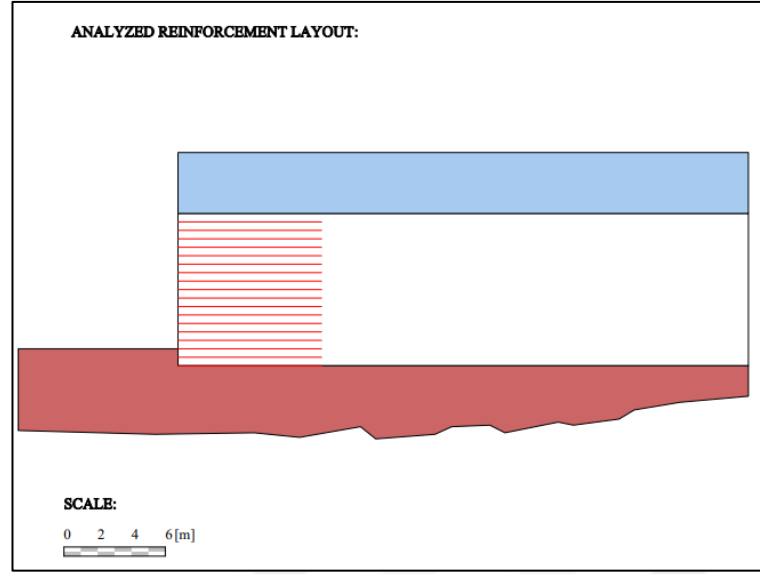
(a)

INPUT DATA: Geogrids (Analysis)					
D A T A	Geogrid type #1	Geogrid type #2	Geogrid type #3	Geogrid type #4	Geogrid type #5
Tult [kN/m]	40.0	60.0	80.0	120.0	150.0
Durability reduction factor, RFd	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
Installation-damage reduction factor, RFid	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35
Creep reduction factor, RFC	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80
Fs-overall for strength	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Coverage ratio, Rc	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Friction angle along geogrid-soil interface, ρ	24.22	24.22	24.22	24.22	24.22
Pullout resistance factor, F^*	0.67 · tan ϕ	0.67 · tan ϕ	0.67 · tan ϕ	0.67 · tan ϕ	0.67 · tan ϕ
Scale-effect correction factor, α	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

Variation of Lateral Earth Pressure Coefficient With Depth	
Z	K / K _a
0 m	1.00
1 m	1.00
2 m	1.00
3 m	1.00
4 m	1.00
5 m	1.00
6 m	1.00

(b)

Şekil 4.10. MSEW Analiz Çıktıları (a) Çıktı-1 (b) Çıktı-2 (c) Çıktı-3 (d) Çıktı-4 (e) Çıktı-5



(c)

DIRECT SLIDING for GIVEN LAYOUT (for GEOGRID reinforcements)						
Along reinforced and foundation soils interface: $F_s\text{-static} = 3.605$ and $F_s\text{-seismic} = 2.002$						
#	Geogrid Elevation [m]	Geogrid Length [m]	F_s Static	F_s Seismic	Geogrid Type #	Product name
1	0.00	8.50	2.405	1.335	5	Fortex 150
2	0.50	8.50	2.520	1.409	5	Fortex 150
3	1.00	8.50	2.646	1.492	5	Fortex 150
4	1.50	8.50	2.787	1.585	4	Fortex 120
5	2.00	8.50	2.945	1.691	4	Fortex 120
6	2.50	8.50	3.121	1.811	4	Fortex 120
7	3.00	8.50	3.322	1.951	4	Fortex 120
8	3.50	8.50	3.552	2.115	4	Fortex 120
9	4.00	8.50	3.819	2.308	3	Fortex 80
10	4.50	8.50	4.133	2.542	3	Fortex 80
11	5.00	8.50	4.509	2.830	3	Fortex 80
12	5.50	8.50	4.969	3.193	3	Fortex 80
13	6.00	8.50	5.549	3.667	2	Fortex 60
14	6.50	8.50	6.312	4.313	2	Fortex 60
15	7.00	8.50	7.378	5.253	2	Fortex 60
16	7.50	8.50	9.018	6.761	2	Fortex 60
17	8.00	8.50	12.024	9.640	2	Fortex 60
18	8.50	8.50	20.290	17.812	2	Fortex 60

ECCENTRICITY for GIVEN LAYOUT						
At interface with foundation: e/L static = 0.0753, e/L seismic = 0.1586; Overturning: $F_s\text{-static} = 6.64$, $F_s\text{-seismic} = 3.15$						
#	Geogrid Elevation [m]	Geogrid Length [m]	e/L Static	e/L Seismic	Geogrid Type #	Product name
1	0.00	8.50	0.0753	0.1586	5	Fortex 150
2	0.50	8.50	0.0682	0.1421	5	Fortex 150
3	1.00	8.50	0.0614	0.1264	5	Fortex 150
4	1.50	8.50	0.0550	0.1117	4	Fortex 120
5	2.00	8.50	0.0489	0.0979	4	Fortex 120
6	2.50	8.50	0.0432	0.0850	4	Fortex 120
7	3.00	8.50	0.0377	0.0730	4	Fortex 120
8	3.50	8.50	0.0326	0.0619	4	Fortex 120
9	4.00	8.50	0.0279	0.0517	3	Fortex 80
10	4.50	8.50	0.0234	0.0423	3	Fortex 80
11	5.00	8.50	0.0193	0.0339	3	Fortex 80
12	5.50	8.50	0.0155	0.0264	3	Fortex 80
13	6.00	8.50	0.0121	0.0198	2	Fortex 60
14	6.50	8.50	0.0090	0.0141	2	Fortex 60
15	7.00	8.50	0.0063	0.0094	2	Fortex 60
16	7.50	8.50	0.0040	0.0055	2	Fortex 60
17	8.00	8.50	0.0020	0.0026	2	Fortex 60
18	8.50	8.50	0.0006	0.0007	2	Fortex 60

(d)

Şekil 4.10. (Devam) MSEW Analiz Çıktıları (a) Çıktı-1 (b) Çıktı-2 (c) Çıktı-3 (d) Çıktı-4 (e) Çıktı-5

RESULTS for STRENGTH									
Live Load included in calculating Tmax									
#	Geogrid Elevation [m]	Tavailable [kN/m]	Tmax [kN/m]	Tmd [kN/m]	Specified minimum Fs-overall static	Actual calculated Fs-overall static	Specified minimum Fs-overall seismic	Actual calculated Fs-overall seismic	Product name
1	0.00	53.7	15.02	13.05	N/A	3.574	N/A	2.411	Fortex 150
2	0.50	53.7	28.98	12.64	N/A	1.852	N/A	1.491	Fortex 150
3	1.00	53.7	27.56	12.23	N/A	1.947	N/A	1.562	Fortex 150
4	1.50	42.9	26.15	11.82	N/A	1.642	N/A	1.312	Fortex 120
5	2.00	42.9	24.74	11.41	N/A	1.736	N/A	1.382	Fortex 120
6	2.50	42.9	23.32	11.01	N/A	1.841	N/A	1.459	Fortex 120
7	3.00	42.9	21.91	10.60	N/A	1.960	N/A	1.545	Fortex 120
8	3.50	42.9	20.50	10.19	N/A	2.095	N/A	1.642	Fortex 120
9	4.00	28.6	19.08	9.78	N/A	1.500	N/A	1.168	Fortex 80
10	4.50	28.6	17.67	9.37	N/A	1.620	N/A	1.251	Fortex 80
11	5.00	28.6	16.26	8.97	N/A	1.761	N/A	1.348	Fortex 80
12	5.50	28.6	14.84	8.56	N/A	1.929	N/A	1.461	Fortex 80
13	6.00	21.5	13.43	8.15	N/A	1.599	N/A	1.196	Fortex 60
14	6.50	21.5	12.02	7.74	N/A	1.787	N/A	1.316	Fortex 60
15	7.00	21.5	10.60	7.33	N/A	2.025	N/A	1.463	Fortex 60
16	7.50	21.5	9.19	6.93	N/A	2.337	N/A	1.647	Fortex 60
17	8.00	21.5	7.77	6.52	N/A	2.762	N/A	1.884	Fortex 60
18	8.50	21.5	9.01	6.11	N/A	2.383	N/A	1.731	Fortex 60

RESULTS for PULLOUT												
Live Load included in calculating Tmax												
NOTE: Live load is not included in calculating the overburden pressure used to assess pullout resistance.												
#	Geogrid Elevation [m]	Coverage Ratio	Tmax [kN/m]	Tmd [kN/m]	Le [m] (see NOTE)	La [m]	Avail.Static Pullout, Pr [kN/m]	Specified Static Fs	Actual Static Fs	Avail.Seism. Pullout, Pr [kN/m]	Specified Seismic Fs	Actual Seismic Fs
1	0.00	1.000	15.02	13.05	8.50	0.00	1223.6	N/A	81.471	978.9	N/A	34.879
2	0.50	1.000	28.98	12.64	8.23	0.27	1125.9	N/A	38.853	900.7	N/A	21.643
3	1.00	1.000	27.56	12.23	7.97	0.53	1032.4	N/A	37.453	825.9	N/A	20.754
4	1.50	1.000	26.15	11.82	7.70	0.80	942.3	N/A	36.034	753.9	N/A	19.853
5	2.00	1.000	24.74	11.41	7.44	1.06	856.5	N/A	34.622	685.2	N/A	18.952
6	2.50	1.000	23.32	11.01	7.17	1.33	774.1	N/A	33.188	619.3	N/A	18.038
7	3.00	1.000	21.91	10.60	6.90	1.60	695.8	N/A	31.758	556.7	N/A	17.124
8	3.50	1.000	20.50	10.19	6.64	1.86	621.1	N/A	30.304	496.9	N/A	16.193
9	4.00	1.000	19.08	9.78	6.37	2.13	550.5	N/A	28.848	440.4	N/A	15.257
10	4.50	1.000	17.67	9.37	6.11	2.39	483.5	N/A	27.362	386.8	N/A	14.302
11	5.00	1.000	16.26	8.97	5.84	2.66	420.3	N/A	25.855	336.2	N/A	13.331
12	5.50	1.000	14.84	8.56	5.58	2.92	361.1	N/A	24.331	288.9	N/A	12.346
13	6.00	1.000	13.43	8.15	5.31	3.19	305.6	N/A	22.759	244.5	N/A	11.330
14	6.50	1.000	12.02	7.74	5.04	3.46	254.1	N/A	21.148	203.3	N/A	10.289
15	7.00	1.000	10.60	7.33	4.78	3.72	206.3	N/A	19.455	165.0	N/A	9.200
16	7.50	1.000	9.19	6.93	4.51	3.99	162.4	N/A	17.671	129.9	N/A	8.061
17	8.00	1.000	7.77	6.52	4.25	4.25	122.2	N/A	15.718	97.8	N/A	6.840
18	8.50	1.000	9.01	6.11	3.98	4.52	85.9	N/A	9.537	68.8	N/A	4.547

(e)

Şekil 4.10. (Devam) MSEW Analiz Çıktıları (a) Çıktı-1 (b) Çıktı-2 (c) Çıktı-3 (d) Çıktı-4 (e) Çıktı-5

MSEW programıyla gerçekleştirilen iç stabilite tahkikleri sonucunda tasarım iç stabilite başlıkları altında yeterli güvenliği sağlamaktadır. Analizlerden elde edilen maksimum değerler özet olarak Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10. MSEW İç Stabilite Hesap Sonuçları Özet Tablo

MSEW	Kontrol başlığı	Hesaplanan değer	Yeterlilik koşulu	Sonuç
Statik Durum	Eksantrisite	0,64	<1,42	Uygundur
	Kayma kontrolü	2,41	>1,5	Uygundur
	Kopma kontrolü	1,5	>1,3	Uygundur
	Sıyırılma kontrolü	9,5	>1,5	Uygundur
Dinamik Durum	Eksantrisite	1,35	<2,83	Uygundur
	Kayma kontrolü	1,34	>1,125	Uygundur
	Kopma kontrolü	1,17	>0,98	Uygundur
	Sıyırılma kontrolü	4,5	>1,125	Uygundur

4.6.2. Limit denge metoduyla dış stabilite tahkiki

Toprakarme duvarların dış stabilite kontrolleri kapsamında; tasarlanan tip enkesitler için şev stabilitesi analizleri yapılmıştır. Statik durum ve depremli durum için şev stabilite analizleri limit denge yöntemi ile çalışan Rocscience SLIDE 6.0 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Şev stabilitesi analizlerine ilişkin ayrıntılar aşağıda verilmiştir.

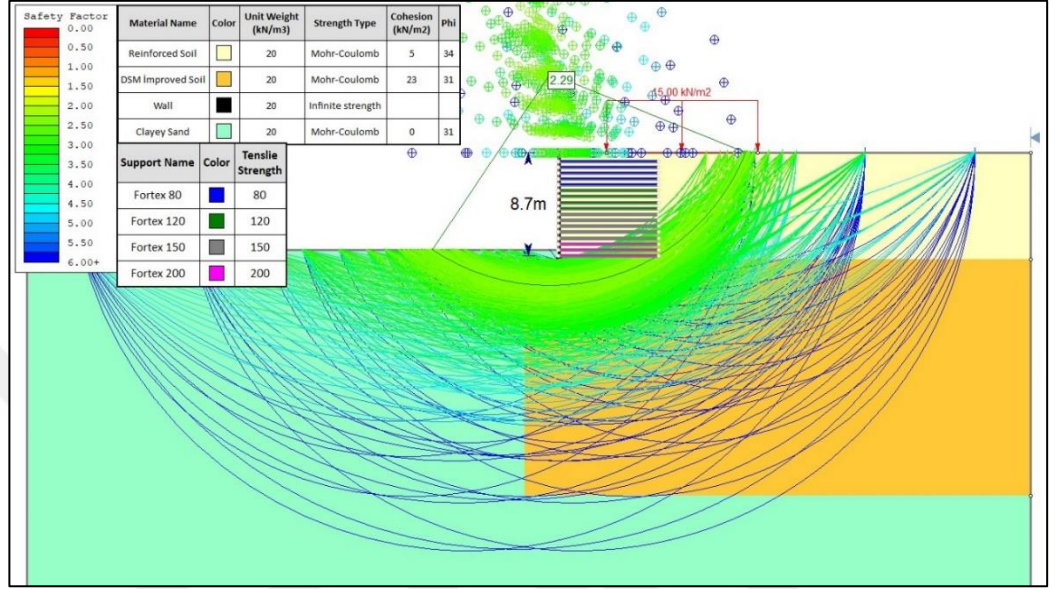
Rocscience SLIDE 6.0, geoteknik mühendislikte şev stabilitesi analizleri için kullanılan ileri düzey bir yazılımdır. Program, çeşitli limit denge analiz yöntemlerini destekler ve karmaşık zemin stabilitesi problemlerini çözmek için güçlü bir araç sunar. Kullanıcı dostu arayüzü, esnek modelleme seçenekleri, detaylı raporlama yetenekleri ve güçlü analiz kapasitesi ile SLIDE 6.0, geoteknik mühendislik projelerinde yaygın olarak tercih edilen bir yazılımdır. Program, güvenlik katsayısının hesaplanması ve stabilite analizlerinde yüksek doğruluk sağlar (Rocscience Inc., 2024).

İç stabilite analizleri sonucunda belirlenmiş olan geogrid tipleri ve geogrid boyları kullanılarak uzun dönemde şev göçmesine karşı güvenlik sayıları statik ve depremli durumlar için hesaplanmıştır. Yol dolguları (toprakarme duvarlar) üzerinde 15 kPa büyüklüğünde hareketli yayılı yük tanımlanmıştır. Şev stabilite analizleri Spencer Yöntemi ve GLE / Morgenstern – Price Yöntemi ile yapılmıştır. Dolgu ve taban zemini Mohr-Coloumb modeli kullanılmış, yüzey elemanı sonsuz rijit hacim elemanı olarak tanımlanmıştır. Dış stabilite analizlerinde toprakarme duvar sistemi için en küçük güvenlik sayısının uzun dönem – statik durum koşulunda $F_{smin} \geq 1.5$, kısa dönem statik durum koşulunda $F_{smin} \geq 1.3$ ve uzun dönem – depremli durum koşulunda $F_{smin} \geq 1.1$ olması şartı aranmıştır. Analiz sonucunda aranan güvenlik katsayıları özet tablosu Tablo 4.11’de verilmiştir.

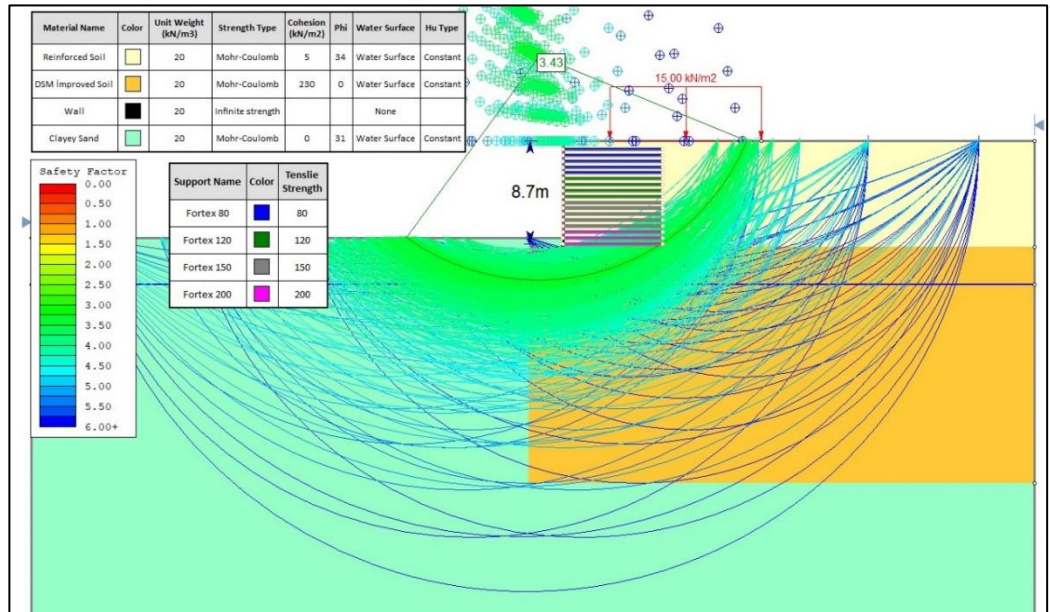
Tablo 4.11. Dolgu şevlerinin dış şev stabilitesi için en küçük güvenlik sayıları (EUROCODE 7 (EN 1997-1:2004))

Durum	Minimum güvenlik sayısı
Kısa Dönem-Statik	1.30
Uzun Dönem-Statik	1.50
DD1-Depremli	1.10
DD-2 Depremli	1.10

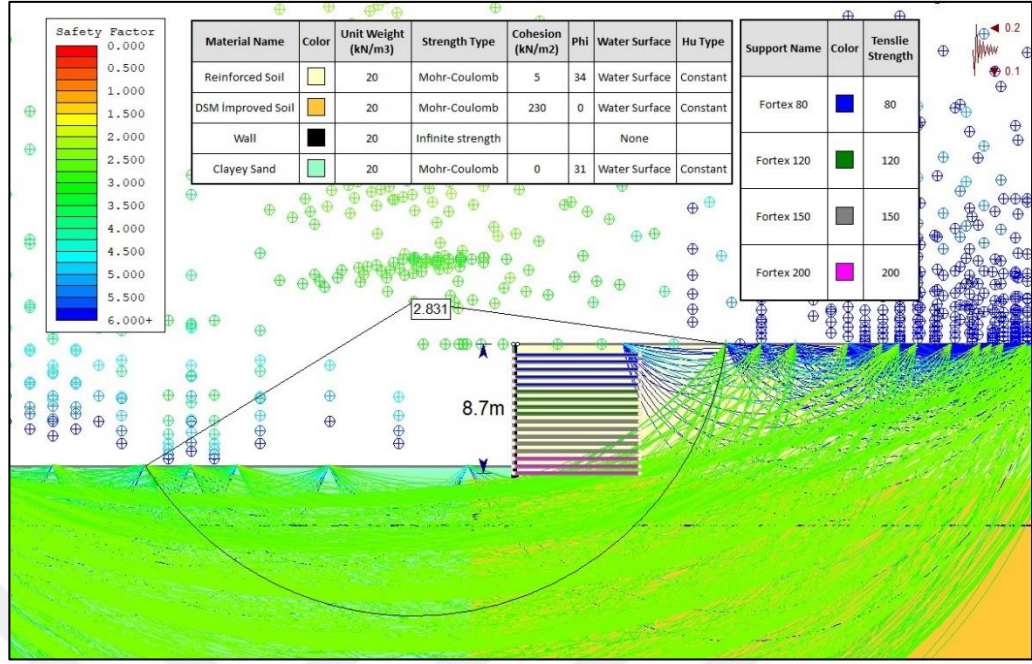
Yapılan analizler sonucunda statik durum-uzun dönem analiz sonuçları Şekil 4.11’de, statik durum-kısa dönem analiz sonuçları Şekil 4.12’de, DD-2 deprem düzeyi dinamik durum analiz sonuçları Şekil 4.13’de, DD-1 deprem düzeyi dinamik durum analiz sonuçları Şekil 4.14’te verilmiştir.



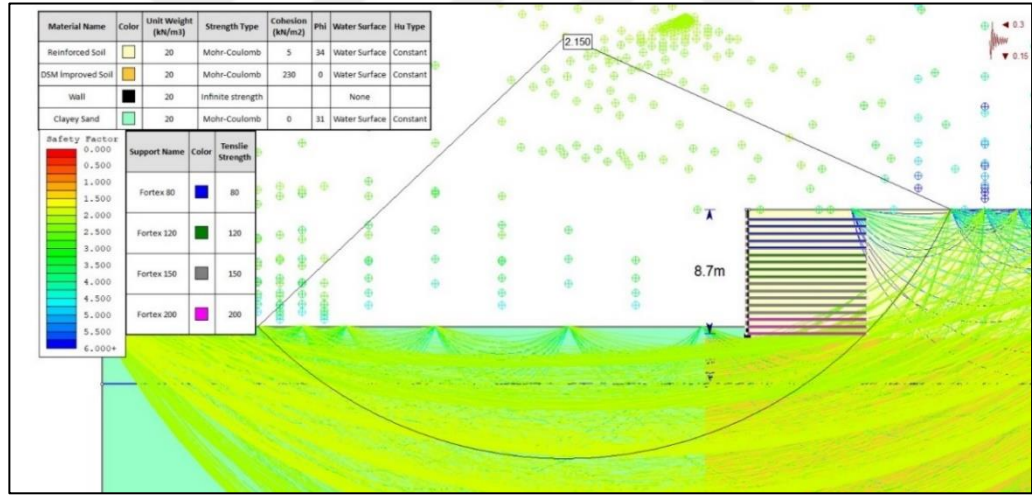
Şekil 4.11. Toprakarme İstinat Duvarı ($H = 9.0$ m) için uzun dönem – statik durum koşulunda en kritik göçme dairesi ve bu daire için hesaplanan güvenlik sayısı ($FS:2.29 > 1.5$)



Şekil 4.12. Toprakarme İstinat Duvarı ($H = 9.0$ m) için kısa dönem – statik durum koşulunda en kritik göçme dairesi ve bu daire için hesaplanan güvenlik sayısı ($FS:3.43 > 1.3$)



Şekil 4.13. Toprakarme İstinat Duvarı ($H = 9.0\text{ m}$) için DD-2 Deprem düzeyi kısa dönem – depremli durum koşulunda en kritik göçme daresi ve bu daire için hesaplanan güvenlik sayısı ($FS:2.83 > 1.1$)



Şekil 4.14. Toprakarme İstinat Duvarı ($H = 9.0\text{ m}$) için DD-1 Deprem düzeyi kısa dönem – depremli durum koşulunda en kritik göçme daresi ve bu daire için hesaplanan güvenlik sayısı ($FS:2.15 > 1.1$)

Şev stabilitesi analizleri sonucunda elde edilen güvenlik sayıları özet olarak Tablo 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4.12. Şev stabilitesi analiz sonuçları

Tasarım	Durum	FS (minimum)	FS (hesaplanan)
Toprakarme İstinat Duvarı	Uzun dönem-statik	1,5	2,29
	Kısa dönem-statik	1,3	3,43
	DD2 depremli	1,1	2,83
	DD1 depremli	1,1	2,15

Limit denge yöntemleriyle yapılan iç ve dış stabilitesi analizleri sonucunda tasarım kesitinin yeterli dayanım kriterlerini sağladığı sonucuna varılmıştır. Bir sonraki adım tasarım sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri gerçekleştirecek yeterliliği test edilecektir.

4.7. Toprakarme istinat duvarının sonlu elemanlar yöntemiyle statik ve dinamik yükler altında tasarımı

4.7.1. Geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), mühendislik ve fizik problemlerinin çözümünde kullanılan güçlü bir sayısal analiz yöntemidir. Karmaşık geometrilere ve malzeme özelliklerine sahip yapıların davranışını modellemek için geliştirilmiştir. FEM, sürekli bir ortamı sonlu elemanlara böler. Her bir elemanın davranışını tanımlayan denklemler geliştirir. Yapının genel davranışı, bu elemanların birleştirilmesiyle elde edilir. Bir problemin çözümü, sınır koşullarının eklenmesiyle elde edilir. Yöntem başlangıçta uçak yapılarının analizinde kullanılmak üzere geliştirilmiş olsa da bugün mühendislikte geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir (Zienkiewicz, Taylor ve Zhu, 2013).

Temel olarak, FEM'in çalışma prensibi, problemin ayrıklaştırılması ve daha sonra bu süreçte eleman denklemlerinin oluşturulmasıdır. Ayrıklaştırma, analiz edilecek sonlu yapının sonlu elemanlar adı verilen küçük elemanlara bölünmesiyle elde edilir. Daha sonra her eleman için daha fazla fiziksel denklem uygulanır. Bu denklemler, her bir eleman için mekanik veya termal davranışı tanımlar ve eleman denklemleri daha sonra yapının genel matrisinde toplanır. Yapıyı oluşturan tüm elemanların tüm etkileşimleri bu matrise yerleştirilir. Tüm küresel matris denklemleri, sınır koşullarının ve yüklerin eklenmesiyle ortaya çıkar. Sayısal yöntemlerle çözülür. Bu yaklaşım, karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde yüksek doğruluk sağlar (Cook vd.,2001).

Geoteknik mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Analizi (FEM), zemin ve yapı etkileşimlerini anlamak ve çözmek için kullanılan güçlü bir yöntemdir. Bu analiz yöntemi, karmaşık geometrilere sahip zemin ve yapı modellerini inceleyerek, gerilme, deformasyon ve stabilite analizlerini gerçekleştirir. Geoteknik mühendisleri, FEM kullanarak temel tasarımı, şev stabilitesi, tünel kazıları ve destek sistemlerinin performansını değerlendirebilirler. Zeminlerin heterojen doğası ve sınır koşullarının karmaşıklığı göz önüne alındığında, FEM, mühendislerin daha güvenilir ve ayrıntılı analizler yapmalarına olanak tanır.

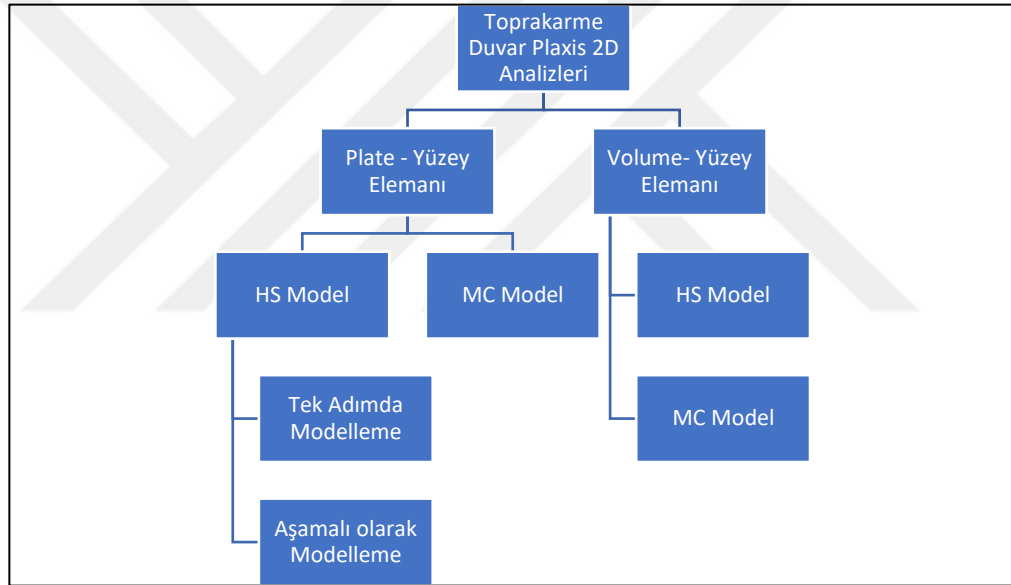
PLAXIS 2D, iki boyutlu geoteknik analizler için geliştirilmiş sonlu elemanlar tabanlı bir yazılımdır. Zemin mekaniği ve geoteknik mühendislik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılır. PLAXIS 2D, şev stabilitesi, temel tasarımı, kazık ve duvar analizi, tünel kazıları, yeraltı suyu akışı, konsolidasyon ve dinamik yükleme gibi geniş bir yelpazedeki mühendislik problemlerine çözümler sunar.

PLAXIS 2D, farklı zemin ve yapı elemanlarının davranışlarını modellemek için geniş bir malzeme modeli yelpazesi sunar. Bu modellerin her biri, belirli mühendislik sorunlarına ve zemin koşullarına uygun olarak tasarlanmıştır. Plaxis 2D yazılımında kullanılan malzeme modelleri arasında Lineer Elastik, Mohr-Coulomb ve Hardening Soil modelleri bulunur. Lineer Elastik model, malzemenin yük altında doğrusal ve geri dönüşümlü bir şekilde deformasyon gösterdiği basit bir modeldir. Bu modelde, malzemenin elastisite modülü ve Poisson oranı gibi temel parametreler kullanılır. Mohr-Coulomb modeli, zeminlerin kesme mukavemeti ve plastik davranışını açıklayan yaygın bir modeldir. Bu model, içsel sürtünme açısı, kohezyon, elastisite modülü ve Poisson oranı gibi parametreleri içerir. Mohr-Coulomb, basitliği nedeniyle sıkça kullanılır, ancak sınırlı sayıda parametre ile davranışları tam olarak yansıtamayabilir. Hardening Soil modeli ise, zeminlerin hem sertleşme hem de plastikleşme davranışını daha gerçekçi bir şekilde modelleyen gelişmiş bir modeldir. Bu model, yükleme ve boşaltma döngülerinde zemin sertliğinin değişimini ve yoğunlaşma etkilerini dikkate alır. Hardening Soil modeli, malzeme parametreleri olarak genellikle oedometrik modül, efektif kohezyon, içsel sürtünme açısı ve rijitlik parametrelerini içerir. Bu üç model, zeminlerin mekanik davranışını farklı derecelerde doğrulukla simüle etmek için kullanılır ve projelerin gereksinimlerine göre seçilir (Bentley Systems, 2024).

4.7.2. Toprakarme istinat duvarı plaxis 2d analizleri genel kabuller

Toprakarme istinat duvarının geometrisi Şekil 4.9'te yer almaktadır. Analiz kesitinde modellenmesi gereken 3 farklı zemin, 4 farklı geogrid ve toprakarme duvar yüzey elemanı mevcuttur. Toprakarme istinat duvarların Plaxis 2D programında analizleriyle ilgili birçok karmaşa bulunmaktadır ve tam davranışı yakalamak oldukça zordur. Bu bölümde toprakarme istinat duvarı Plaxis 2D programıyla tasarım kriterleri incelenecek ve aynı zamanda farklı modelleme tipleriyle modellenerek sonuçlar kıyaslanacaktır. Böylece toprakarme duvarların Plaxis 2D programında modellenmesi hakkında literatüre katkı sağlanacaktır.

Toprakarme istinat duvarlarını Plaxis 2D programında modellerken karşılaşılan ilk problem dolgu zeminini hangi malzeme modeliyle tanımlanması gerektiğidir. Genel görüş dolgu zeminin “Hardening Soil” modeli seçilerek tanımlanması gerektiği yönündedir. Bu tez kapsamında dolgu malzemesi “Mohr Coloumb (MC)” ve “Hardening Soil (HS)” zemin modelleri kullanarak analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. İkinci temel problem yüzey elemanının “plate” eleman mı yoksa “volume element” olarak mı tanımlanması konusudur. İki farklı senaryo da kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Üçüncü olarak toprakarme istinat duvarı adım adım modellenmiş ve tek bir adımda modellenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen analizlerin daha iyi anlaşılması için şema oluşturulmuştur. Oluşturulan şema Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.15. Toprakarme duvar plaxis 2d analizleri şeması

HS modeliyle yapılan analizlerin tümü Tablo 4.13’de verilmiştir. Toprakarme duvar yüzey elemanı için hacim elemanı (volume element) modellendiği durumda kullanılan parametreler Tablo 4.14’te verilmiştir. Bu durumda arayüz (interface) elemanı tanımlanmamıştır. Yüzey elemanın “plate” eleman olarak modellendiği durumda kullanılan parametreler Tablo 4.15’te verilmiştir. “Plate” elemanların zemin ile temas ettiği yüzeylere arayüz tanımlanmıştır. Analizlerde kullanılan MC Model zeminler için parametre girdileri Tablo 4.16’te yer almaktadır. Zeminler tanımlanırken arayüz katsayısı değeri tüm zemin modelleri için 0.7 alınmıştır. Toprakarme duvar temel elemanı için “plate” eleman olarak modellenmesi durumunda kullanılan parametreler de Tablo 4.17’te

verilmiştir. Temelin zeminle temas ettiği yüzeye arayüz tanımlanmıştır. Tüm analizlerde “15 Noded” element ve Plane Strain model kullanılmıştır. Mesh özelliği “very fine” seçilmiştir. Dinamik durumlar için drenajsız-kısa dönem parametreleri kullanılmıştır. Geogrid çekme kuvveti kontrolleri DD-2 deprem düzeyi için gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.13. *Plaxis 2D modelinde kullanılan HS model zemin parametreleri*

Zemin	Mode l	Drenaj Tipi	γ (kN/m ³)	E ₅₀ (kN/m ²)	E _{oed} (kN/m ²)	E _{ur} (kN/m ²)	c' (kN/m ²)	ϕ°	$\psi(psi)$
Toprakarme dolgu/1	HS	Drained	20	100000	100000	300000	5	34	4

Tablo 4.14. *Plaxis 2D modelinde toprakarme duvar yüzey elemanı volume element zemin parametreleri*

Zemin	Model	γ (kN/m ³)	E'ref (kN/m ²)	η
Wall/ volume element	Lineer elastik	24	20E06	0.2

Tablo 4.15. *Plaxis 2D modelinde kullanılan MC model zemin parametreleri*

Zemin	Model	Drenaj tipi	γ (kN/m ³)	Eref (kN/m ²)	η	c' (kN/m ²)	ϕ°	ψ (psi)	Su (kPa)
Toprakarme dolgu/2	MC	Drained	20	100000	0.3	5	34	4	
Kili kum	MC	Drained	20	50000	0.3	0	31	1	
DSM kolon/1	MC	Drained	20	200000	0.3	23	31	1	
DSM kolon/2	MC	Undrained B	20	200000	0.3	0	0	0	230

Tablo 4.16. *Plaxis 2D modelinde kullanılan plate eleman parametreleri*

Plate Eleman	Malzeme Tipi	W (kN/m/m)	EA (kN/m)	EI (kNm ² /m)	η
Duvar	Elastic	1.60	6E06	80E09	0.3
Temel	Elastic	1.60	4.50E06	33.75E03	0.2

Geogridlerin parametreleri İstanbul Teknik A.Ş.’den temin edilmiştir (Tablo 4.17). Geogrid eleman modeli kendiliğinden kilitleme ile mukavemetli arayüz sağladığından dolayı ekstra arayüz elemanı kullanılmamıştır.

Tablo 4.17. *Plaxis 2D Modelinde Kullanılan Plate Eleman Parametreleri*

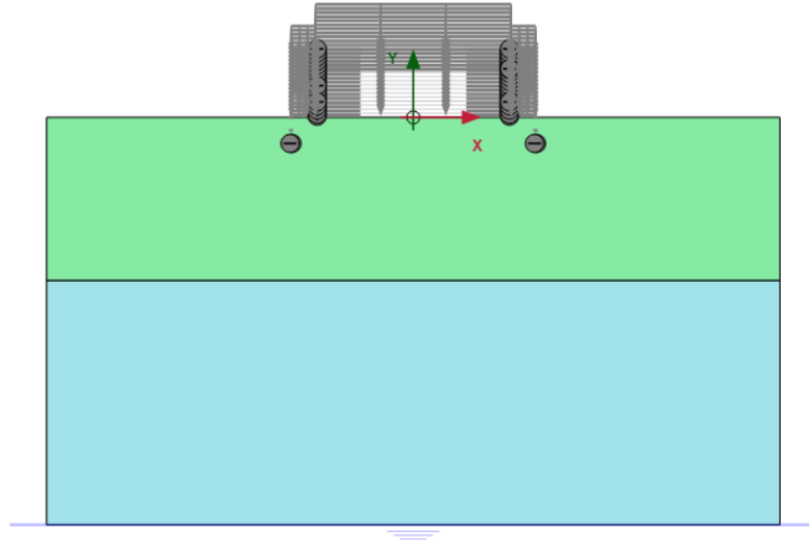
Plate eleman	Malzeme tipi	EA (kN/m)
Fortex 80	Elastik	1600
Fortex 120	Elastik	2400
Fortex 150	Elastik	3000
Fortex 200	Elastik	4000

Analizlerde kullanılan genel kabuller ve malzeme parametreleri bu şekildedir. Analizler açıklanırken kullanılan malzemeler tablolardaki isimleriyle belirtilecektir.

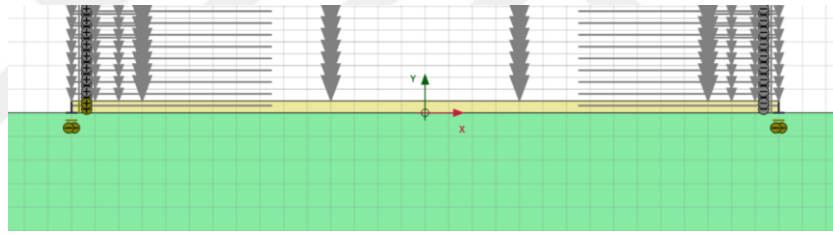
4.7.3. Toprakarme istinat duvarı plaxis 2D analiz sonuçları, senaryo-1 (Plate yüzey elemanı, HS dolgu modeli, çok aşamalı modelleme)

Bu senaryoda yüzey elemanı “plate” eleman olarak tanımlanmıştır. Dolgu malzemesi zemin modeli HS’dir. Toprakarme istinat duvarı aşamalı bir şekilde tanımlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Modelde kullanılan zemin modelleri: Killi Kum, Toprakarme Dolgu/1, DSM Kolon/1. Modelde kullanılan yüzey eleman modeli: Plate. Başlangıç aşamasında sahada bulunan tabi zeminler aktiftir. Başlangıç modeli Şekil 4.16’da verilmiştir. İlk aşamada, toprakarme duvar 1. dolgu katmanı inşa edilmiştir. Bu durumda ilk katman yüzey elemanı, yüzey elemanı arayüzü, ilk katman dolgusu aktiftir (Şekil 4.17). 2. aşamada, dolguya sıkıştırma işlemi sırasında oluşacak yüklemeler etki ettirilmiştir. Yükleme yüzey elemanı yakın bölgede 15 kPa, dolgunun ortasında 20 kPa etki ettirilmiştir (Şekil 4.18). 3. aşamada geogrid yerleştirilmiştir (Şekil 4.19). 4. aşamada, katman sıkıştırma yükü kaldırılmış ve toprakarme duvar ilk katmanı (0,5 m)

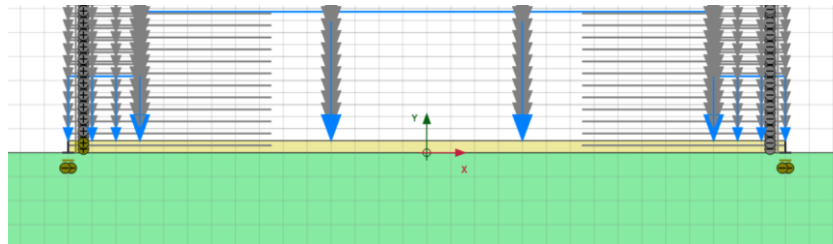
inşaatı tamamlanmıştır (Şekil 4.20). Toprakarme duvar diğer katmanları için tüm bu aşamalar tekrar edilmiştir.



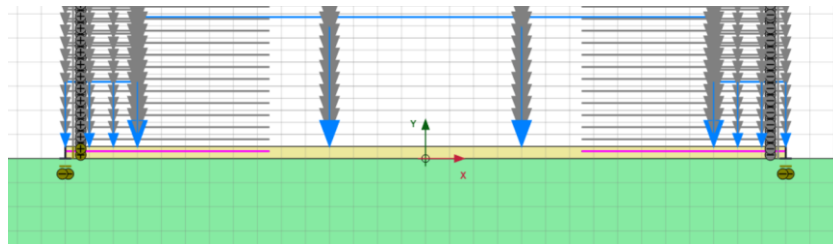
Şekil 4.16. Plaxis analiz aşamaları-Başlangıç



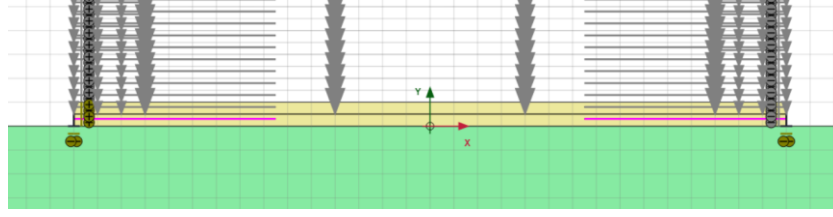
Şekil 4.17. Plaxis analiz aşamaları-Adım 1



Şekil 4.18. Plaxis analiz aşamaları-Adım 2

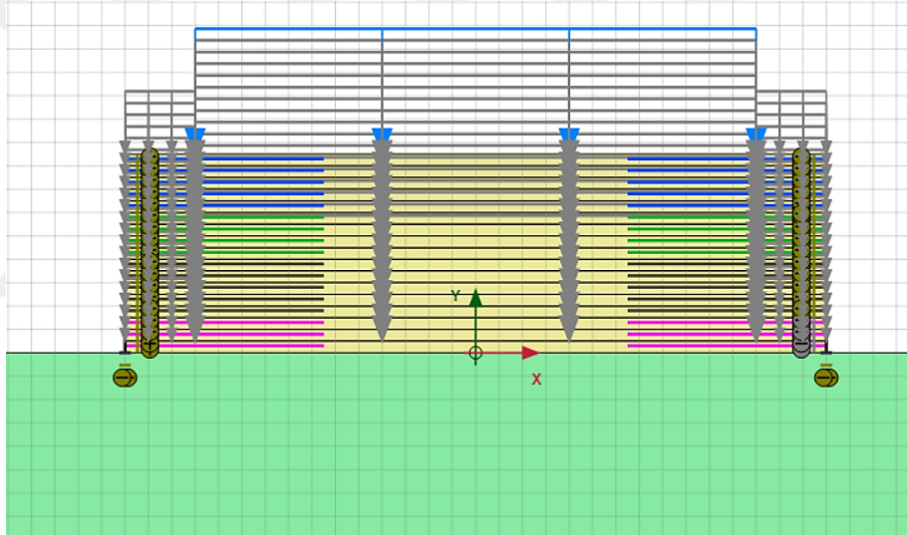


Şekil 4.19. Plaxis analiz aşamaları-Adım 3



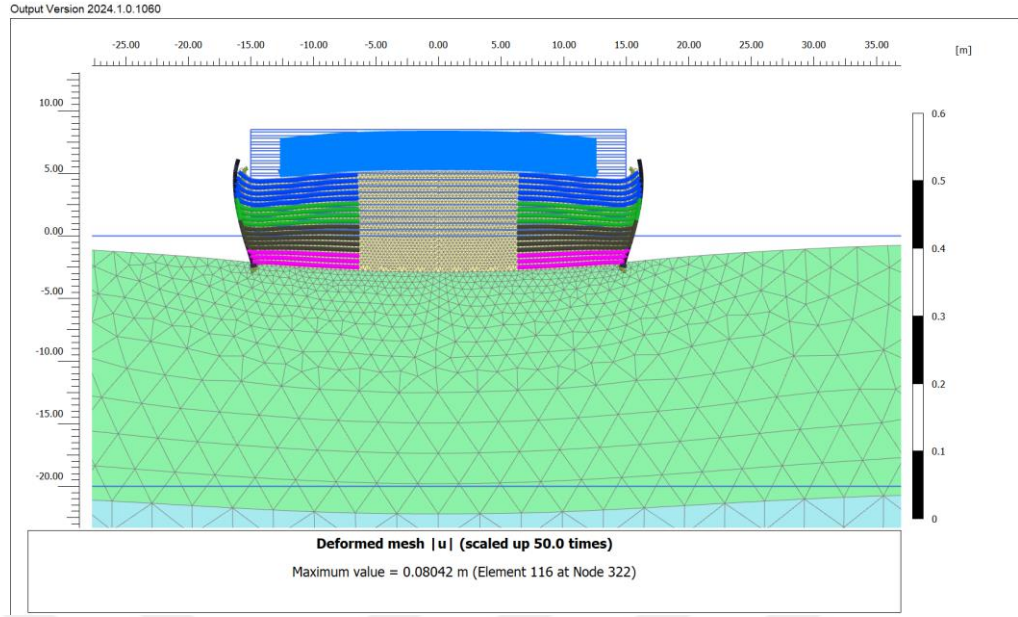
Şekil 4.20. *Plaxis analiz aşamaları-Adım 4*

Toprakarme duvar inşaatı bittikten sonra, trafik yükü etki ettirilmiştir. Trafik yükü uygulandıktan sonra şev güvenlik sayısının tespiti için “Safety” modu ve önceki deplasmanlar sıfırlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Statik analizlerden sonra “Pseudo Static” seçeneği aktif edilerek DD-2 ve DD-1 için belirlenen yatay ve düşey ivme değerleri sisteme etki ettirilmiş ve tekrar Safety analizleri gerçekleştirilerek dinamik durum güvenlik sayıları elde edilmiştir. Son aşama görseli Şekil 4.21’de verilmiştir.

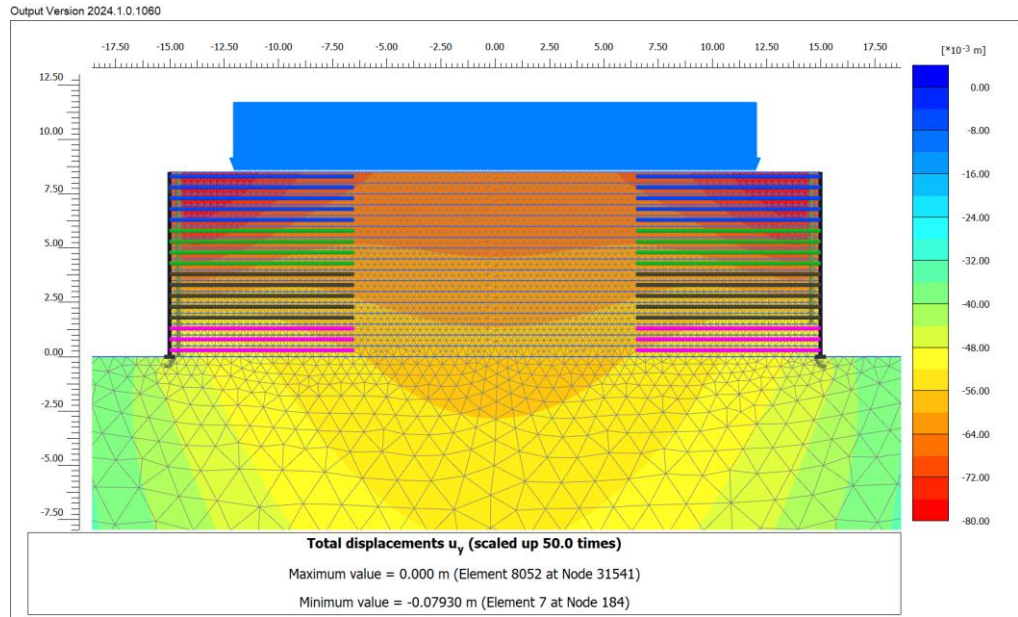


Şekil 4.21. *Plaxis analiz aşamaları-Son aşama*

Belirtilen modeller ve analiz aşamaları sonucunda analizler gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla, Senaryo-1 için deformasyon ağı, toplam düşey deplasman, duvar tabanı toplam düşey deplasman, toplam yatay deplasman, statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti, dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti, dinamik durum güvenlik analizi ve statik durum güvenlik analizine yönelik analiz sonuçları aşağıdaki gibidir (Şekil 4.22a-h).

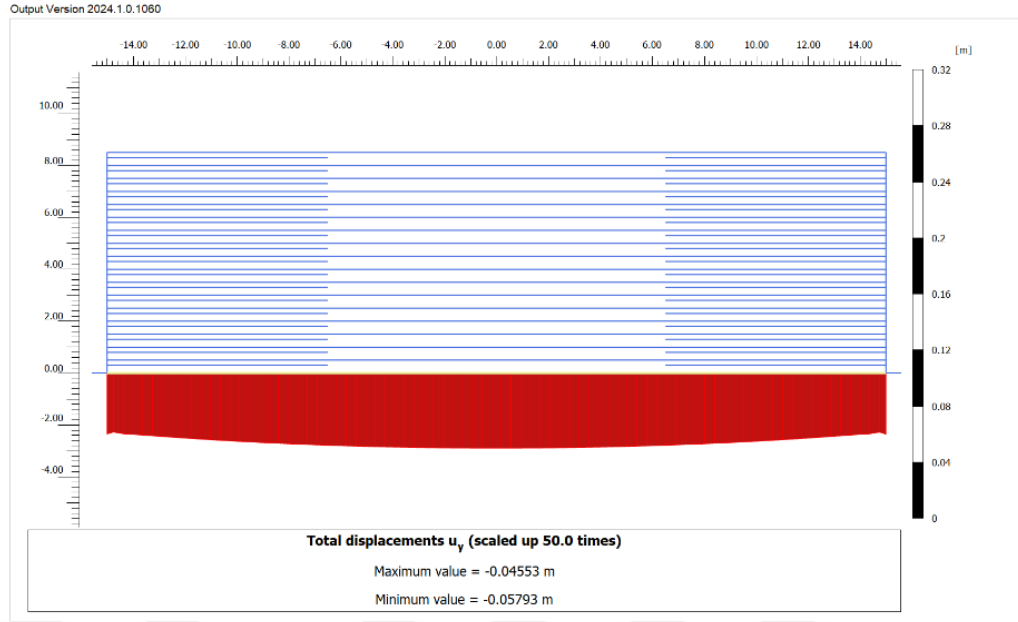


(a)

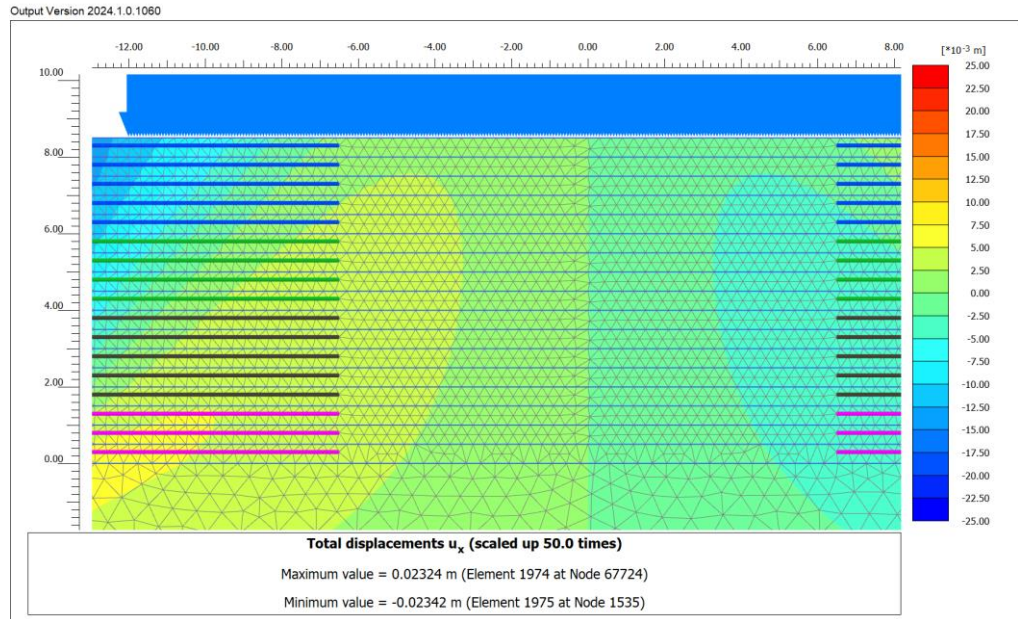


(b)

Şekil 4.22. Senaryo-1 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,29>1,1$) (h) Statik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,94>1,5$)

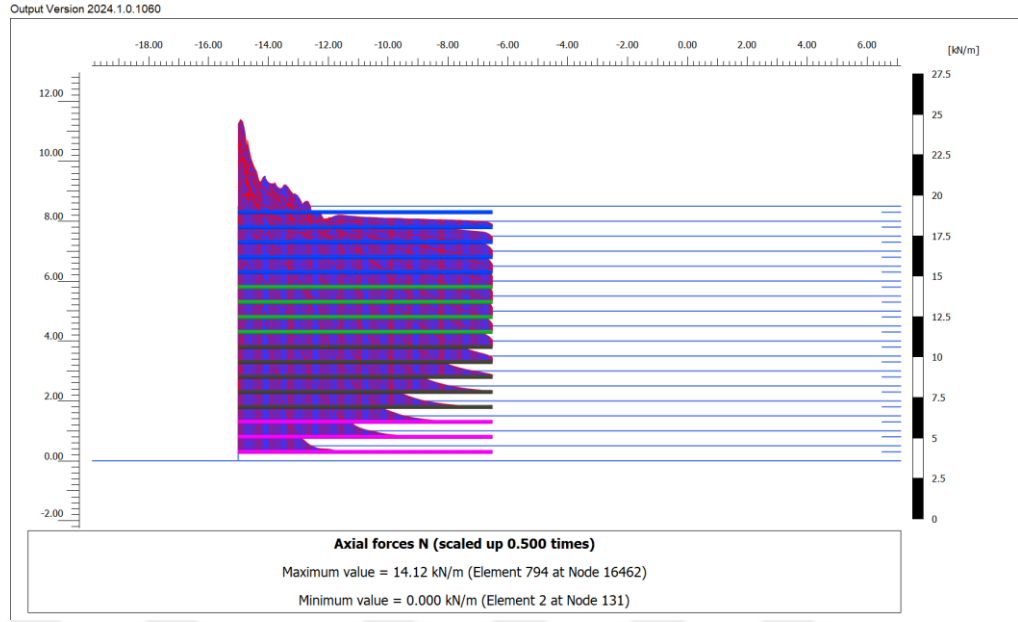


(c)

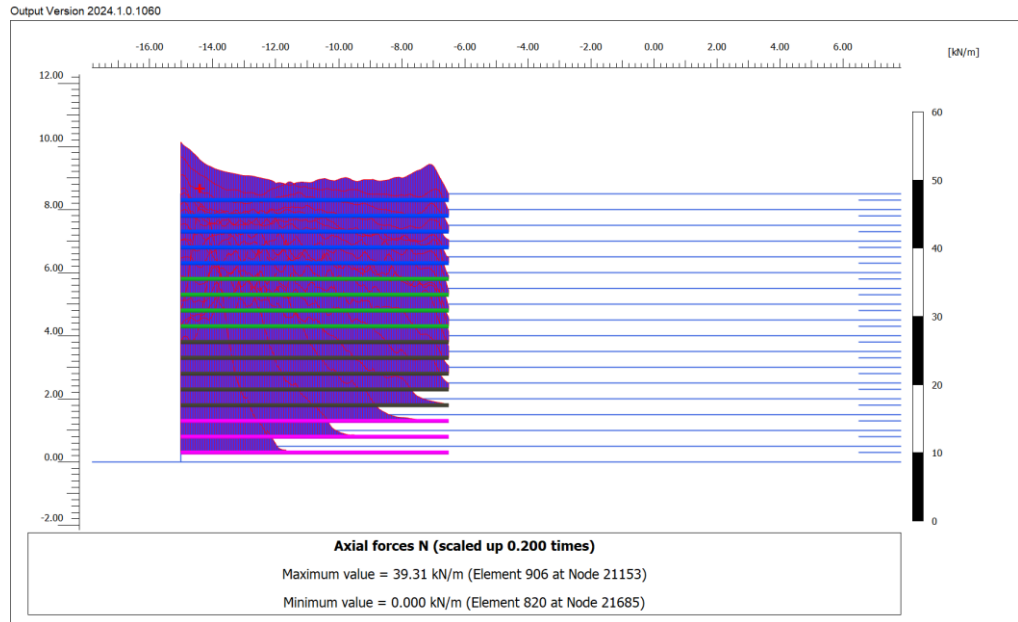


(d)

Şekil 4.22. (Devam) Senaryo-1 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,29>1,1$) (h) Statik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,94>1,5$)

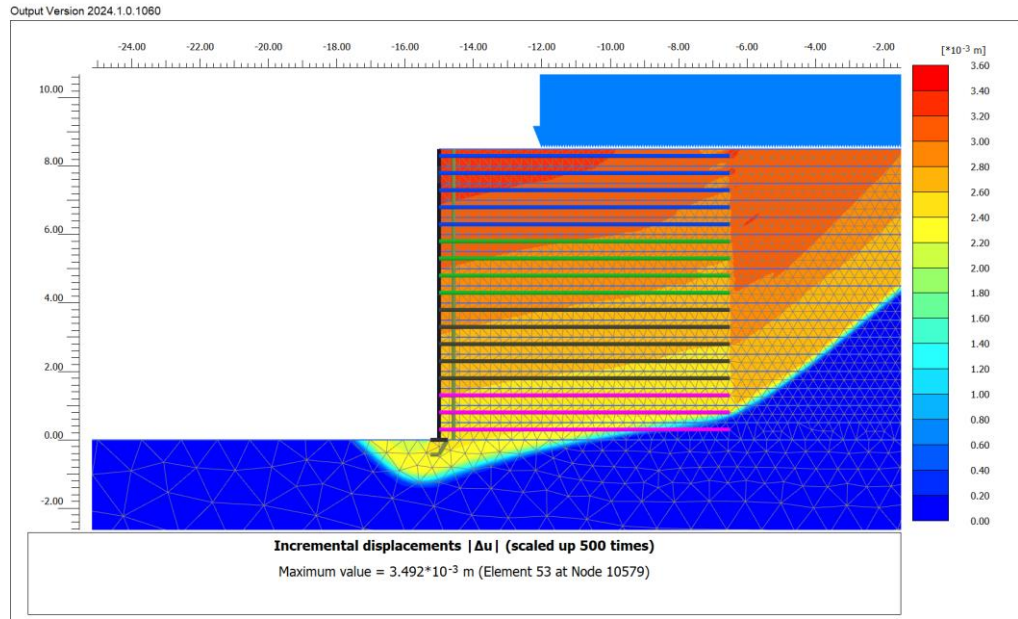


(e)

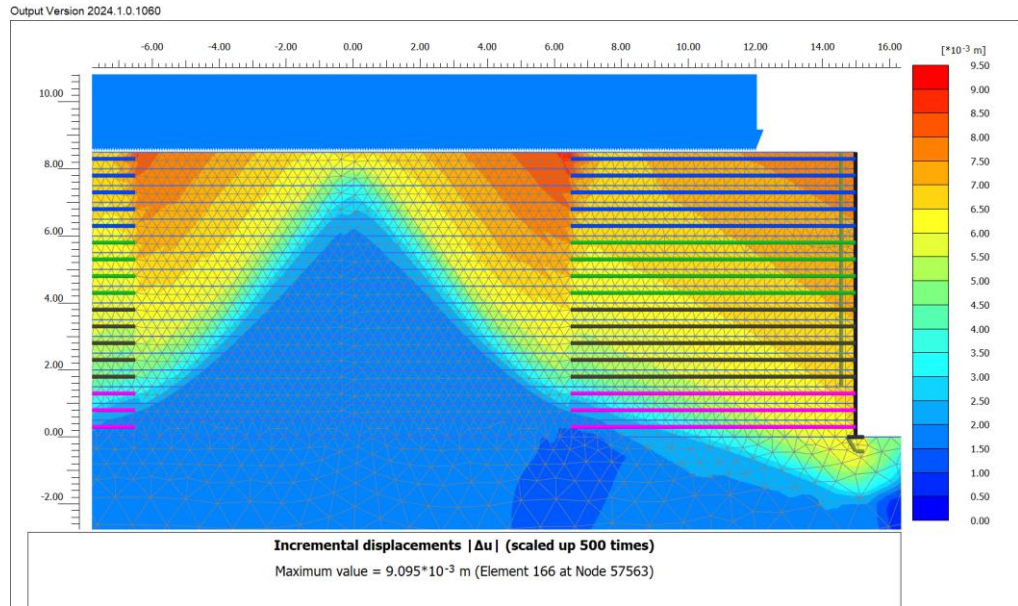


(f)

Şekil 4.22. (Devam) Senaryo-1 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,29>1,1$) (h) Statik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,94>1,5$)



(g)



(h)

Şekil 4.22. (Devam) Senaryo-1 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam dişey deplasman (c) Duvar tabanı toplam dişey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,29 > 1,1$) (h) Statik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,94 > 1,5$)

Donatılara gelen çekme gerilmeleri özet tablosu Tablo 4.18’de verilmiştir. Çekme gerilmelerine karşı hesaplanan güvenlik sayıları minimum değerlerin üstündedir.

Tablo 4.18. *Senaryo-1 geogrid çekme kuvvetleri- güvenlik katsayıları*

Senaryo-1	Statik durum	Dinamik durum	Çekme dayanımı	FS (Statik)	FS (Dinamik)
Geogrid	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m
1	0,09	9,13	28,60	3,17	3,13
2	5,34	9,40	28,60	5,35	3,04
3	6,92	9,00	28,60	4,13	3,18
4	7,51	9,45	28,60	3,81	3,03
5	7,70	9,71	28,60	3,71	2,95
6	11,21	13,61	42,90	3,83	3,15
7	11,38	13,52	42,90	3,77	3,17
8	11,58	13,73	42,90	3,70	3,12
9	11,63	13,71	42,90	3,69	3,13
10	13,96	16,90	53,70	3,85	3,18
11	13,52	17,51	53,70	3,97	3,07
12	13,30	17,11	53,70	4,04	3,14
13	12,94	17,68	53,70	4,15	3,04
14	12,14	18,20	53,70	4,42	2,95
15	14,12	24,31	71,57	5,07	2,94
16	11,67	27,06	71,57	6,13	2,64
17	10,05	39,31	71,57	7,12	1,82

Yapılan analiz sonuçları minimum gereklilikler ile kıyaslanarak özet şeklinde aşağıdaki Tablo 4.19’da verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre tasarım senaryo-1 modeline göre güvenlidir.

Tablo 4.19. *Senaryo-1 analiz sonucu uygunluk kontrolü*

Senaryo-1	Analiz sonucu	Koşul	Uygunluk
Duvar tabanı maksimum düşey deplasman (cm)	7,93	10	Uygun
Duvar tabanı maksimum farklı oturma (cm)	1,3	4	Uygun
Duvar tabanı maksimum yatay deplasman (cm)	2,3	12	Uygun
Statik durum minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	1,94	1,5	Uygun
Dinamik durum minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	1,29	1,1	Uygun

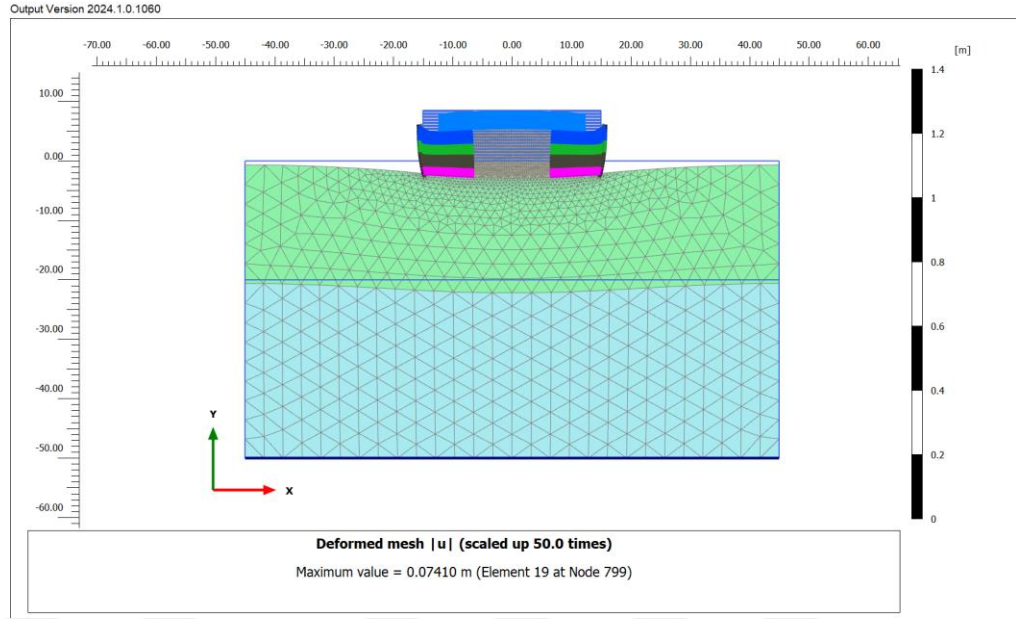
4.7.4. Toprakarme istinat duvarı Plaxis 2D analiz sonuçları, senaryo-2 (Plate yüzey elemanı, HS dolgu modeli, tek aşamalı modelleme)

Senaryo-1 durumu tek aşamalı olarak modellenmiştir. Bu durumda toprakarme donatılı duvarın tek aşamalı veya çok aşamalı modellenmesi durumunda analiz sonucu farklılıkları karşılaştırılmıştır. Senaryo-2 ve Senaryo-1 için kullanılan analiz modeli aynı olduğundan dolayı diğer senaryolarla karşılaştırılırken, tek aşamalı modeli temsil eden Senaryo-2 ile karşılaştırılacaktır. Senaryo-1 ve Senaryo-2 kendi arasında karşılaştırılarak aşamalı modellemenin etkisini belirlemek amaçlanmıştır. Ek olarak çok aşamalı modelleme deplasman kontrolü için önem arz etmektedir. Çok aşamalı modelde her bir adım için duvardaki deformasyonlar tespit edilebilmektedir. Tek aşamalı modelde yalnızca sonuç aşamasındaki deformasyon tespit edilmektedir. Fakat, tek aşamalı model toptan göçme güvenlik sayısı analizinde daha doğru sonuçlar vermektedir.

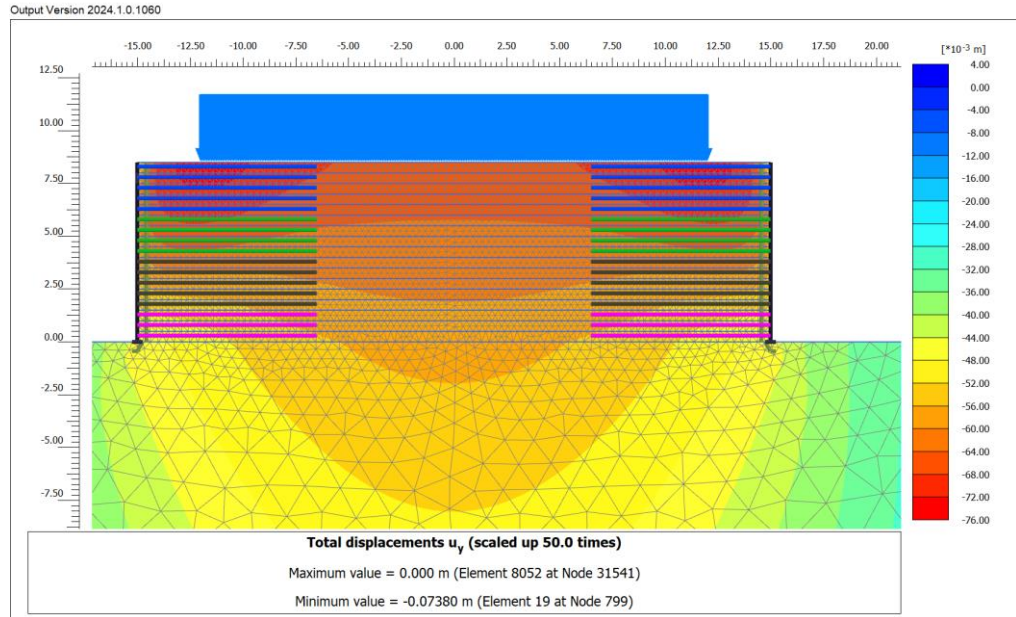
Bu senaryoda yüzey elemanı plate eleman olarak tanımlanmıştır. Dolgu malzemesi zemin modeli HS'dir. Toprakarme istinat duvarı tek aşamalı bir şekilde tanımlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Modelde kullanılan zemin modelleri: Killi Kum, Toprakarme Dolgu/1, DSM Kolon/1, DSM Kolon/2(Kısa Dönem). Modelde kullanılan yüzey eleman modeli:Plate. Başlangıç aşamasında sahada bulunan tabi zeminler aktiftir.

İlk aşama olarak, toprakarme duvar tümüyle aktif edilip trafik yükü etki ettirilmiştir. 2. Aşama olarak statik durum toptan göçme analizi yapılmıştır. 3.Aşama DD-2 deprem düzeyi için dinamik yükler etki ettirilmiştir. 4. Aşama olarak DD-2 deprem düzeyi için toptan göçme analizi yapılmıştır. 5. Aşama olarak DD-1 deprem düzeyi için dinamik yükler etki ettirilmiştir. 6. Aşama olarak DD-1 deprem düzeyi için toptan göçme analizi yapılmıştır. 7. Aşama statik durum kısa dönem parametreleri kullanılarak yükleme yapılmıştır. 8. Aşama statik durum kısa dönem parametreleri ile toptan göçme analizi yapılmıştır.

Belirtilen modeller ve analiz aşamaları sonucunda analizler gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla, Senaryo-2 için deformasyon ağı, toplam düşey deplasman, duvar tabanı toplam düşey deplasman, toplam yatay deplasman, statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti, dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti, statik durum uzun dönem güvenlik analizi, DD-2 dinamik durum güvenlik analizi, DD-1 dinamik durum güvenlik analizi ve statik durum kısa dönem analizi sonuçları aşağıdaki gibidir (Şekil 4.23a-i).

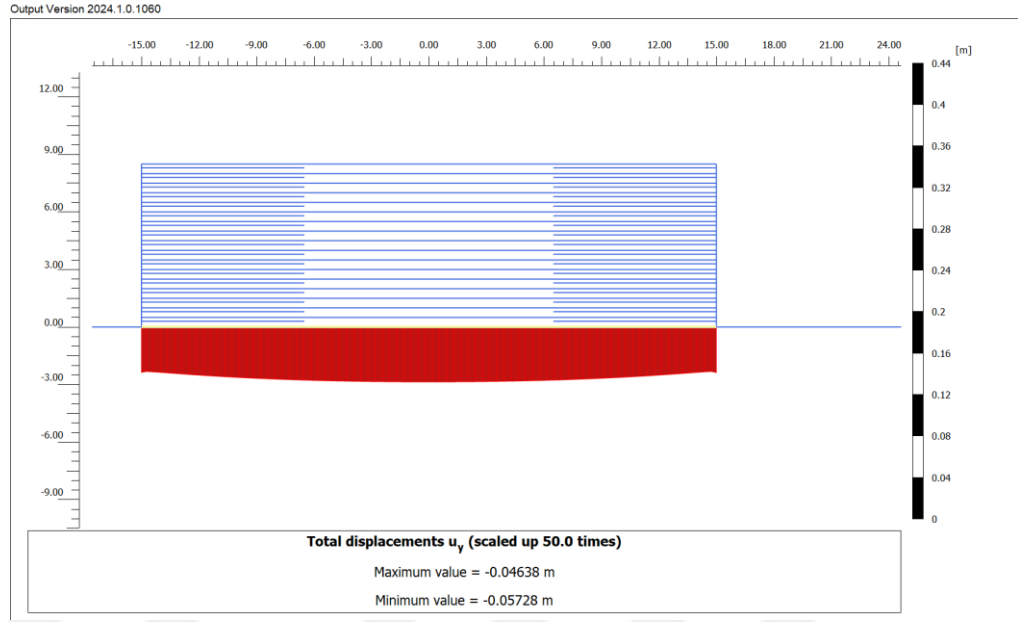


(a)

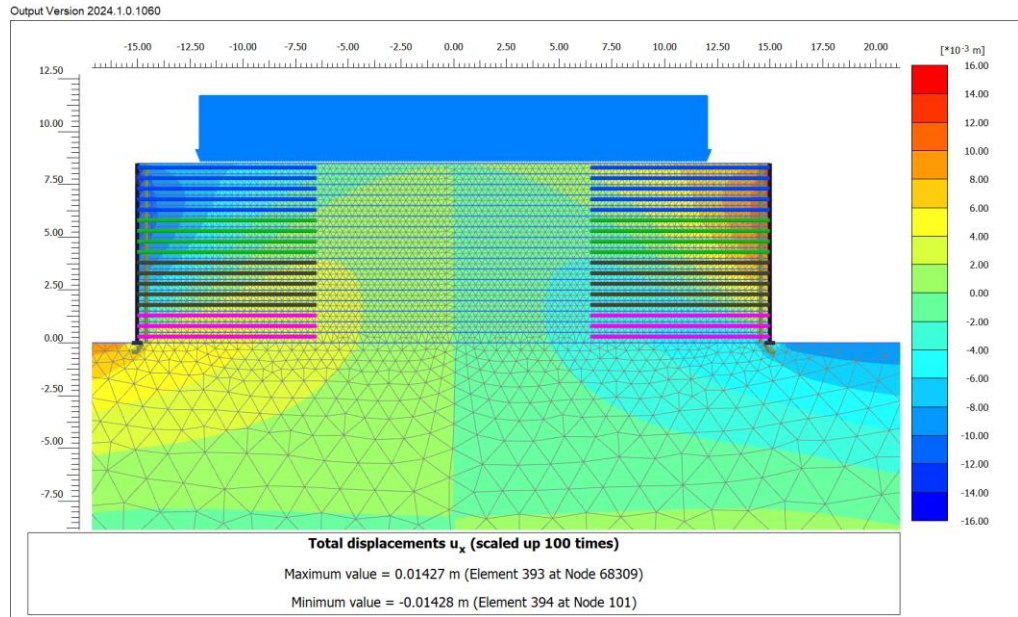


(b)

Şekil 4.23. Senaryo-2 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:1,87>1,5$) (h) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,34>1,1$ (ı) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,1>1,1$) (i) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:2,40>1,3$)

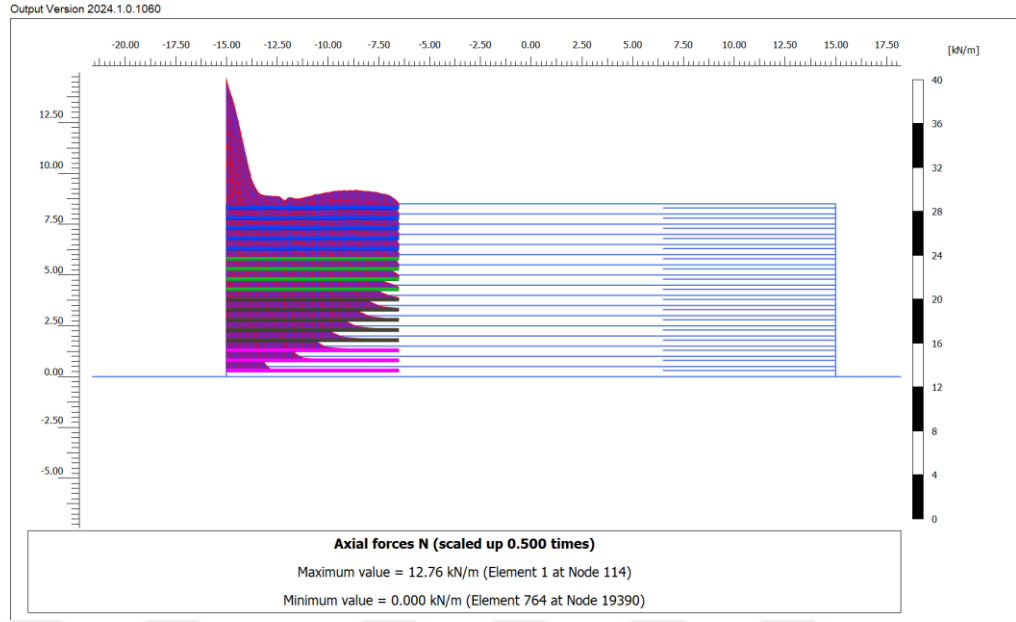


(c)

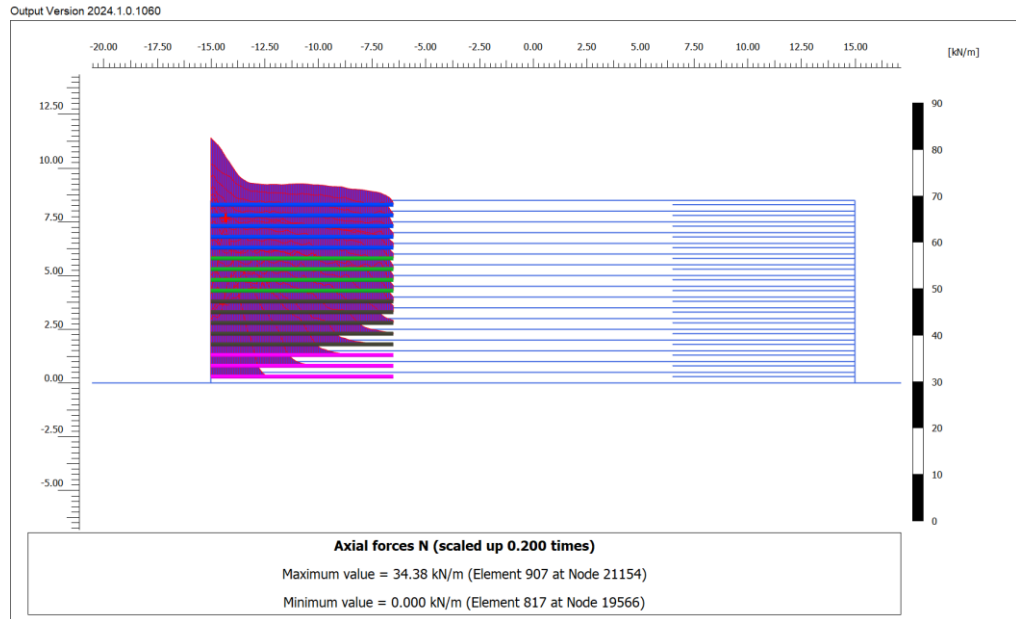


(d)

Şekil 4.23. (Devam) Senaryo-2 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi (FS:1,87>1,5) (h) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi 1,34>1,1 (ı) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi (FS:1,1>1,1) (i) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi (FS:2,40>1,3)

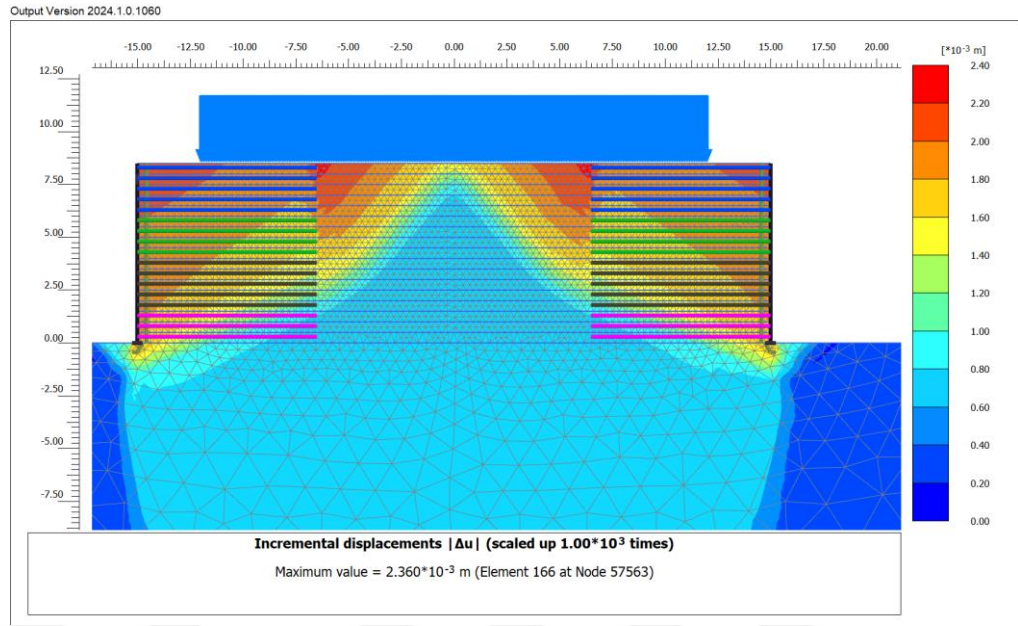


(e)

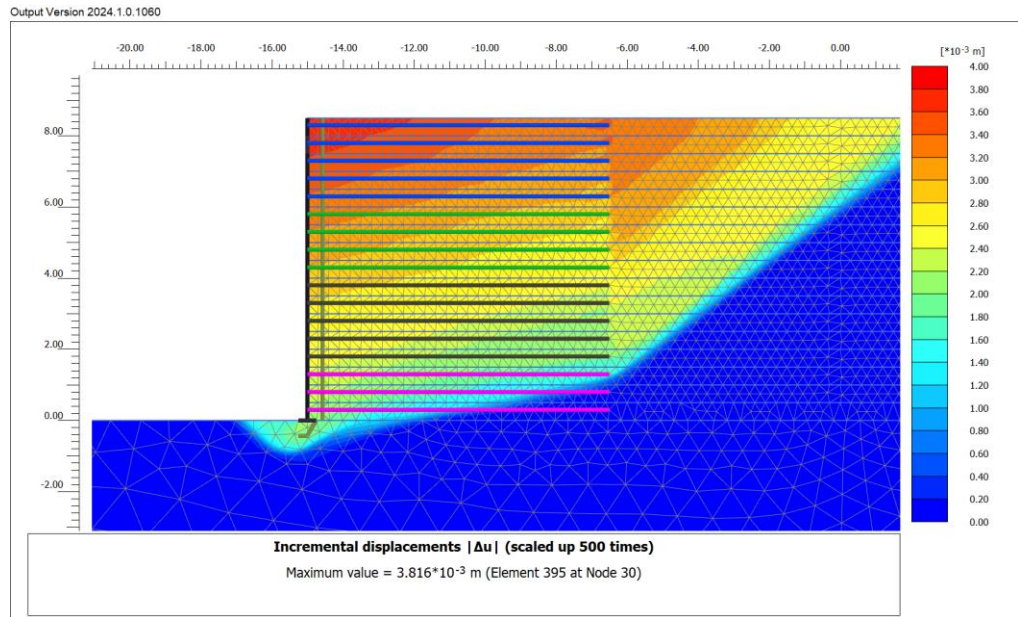


(f)

Şekil 4.23. (Devam) Senaryo-2 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:1,87>1,5$) (h) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,34>1,1$ (i) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,1>1,1$) (j) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:2,40>1,3$)

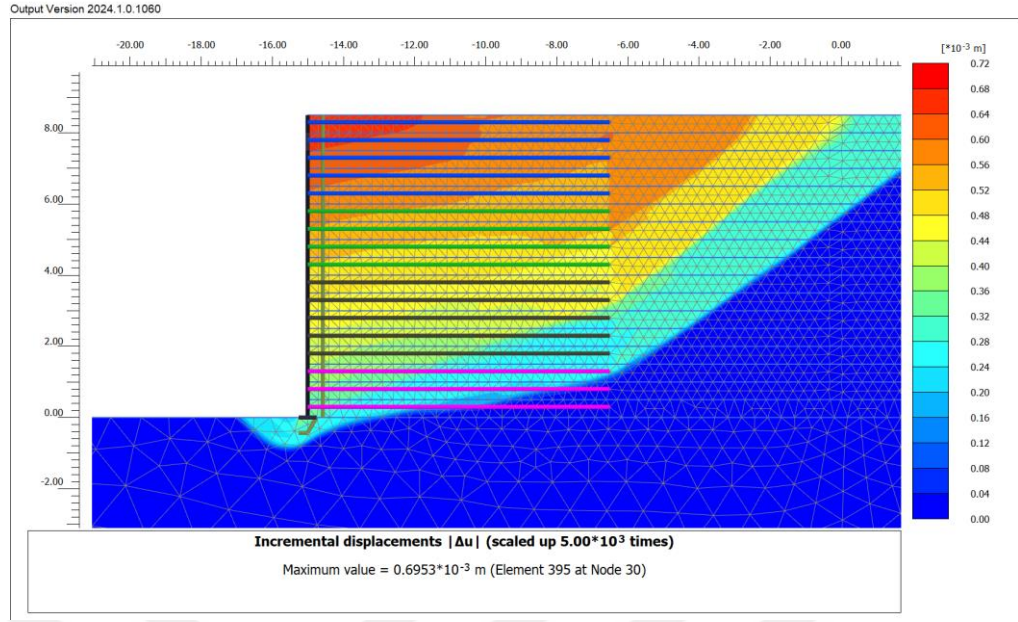


(g)

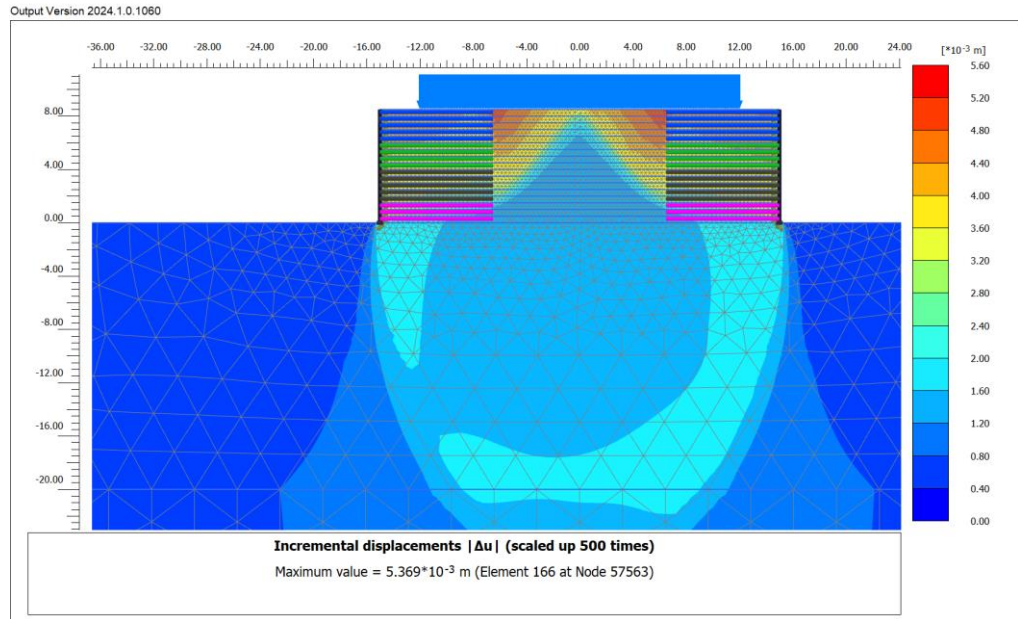


(h)

Şekil 4.23. (Devam) Senaryo-2 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:1,87 > 1,5$) (h) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,34 > 1,1$ (i) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,1 > 1,1$) (j) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:2,40 > 1,3$)



(l)



(i)

Şekil 4.23. (Devam) Senaryo-2 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:1,87 > 1,5$) (h) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,34 > 1,1$ (i) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,1 > 1,1$) (i) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:2,40 > 1,3$)

Donatılara gelen çekme gerilmeleri özet tablo Şekil 4.20’de verilmiştir. Çekme gerilmelerine karşı hesaplanan güvenlik sayıları minimum değerlerin üstündedir.

Tablo 4.20. *Senaryo-2 geogrid çekme kuvvetleri- güvenlik katsayıları*

Senaryo-2	Statik durum	Dinamik durum	Çekme dayanımı	FS (Statik)	FS (Dinamik)
Geogrid	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m
1	12.76	15.54	28.60	2.24	1.84
2	9.70	11.86	28.60	2.95	2.41
3	9.56	11.91	28.60	2.99	2.40
4	9.30	11.68	28.60	3.08	2.45
5	8.91	11.33	28.60	3.21	2.52
6	11.13	14.97	42.90	3.85	2.87
7	10.48	14.28	42.90	4.09	3.00
8	9.88	13.58	42.90	4.34	3.16
9	9.22	12.76	42.90	4.65	3.36
10	10.17	14.28	53.70	5.28	3.76
11	9.24	13.11	53.70	5.81	4.10
12	8.26	13.67	53.70	6.50	3.93
13	7.43	13.46	53.70	7.23	3.99
14	6.55	14.82	53.70	8.20	3.62
15	8.11	19.73	71.57	8.82	3.63
16	8.90	23.24	71.57	8.04	3.08
17	12.13	34.38	71.57	5.90	2.08

Yapılan analiz sonuçları minimum gereklilikler ile kıyaslanarak özet şeklinde aşağıdaki Tablo 4.21’de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre tasarım Senaryo-2 modeline göre güvenlidir.

Tablo 4.21. *Senaryo-2 analiz sonucu uygunluk kontrolü*

Senaryo-2	Analiz sonucu	Koşul	Uygunluk
Duvar tabanı maksimum düşey deplasman (cm)	7,38	10	Uygun
Duvar tabanı maksimum farklı oturma (cm)	1,1	4	Uygun
Duvar tabanı maksimum yatay deplasman (cm)	1,42	12	Uygun
Statik durum – Uzun dönem minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	1,87	1,5	Uygun
Statik durum – kısa dönem minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	2,40	1,3	Uygun

Tablo 4.21. (Devam) Senaryo-2 analiz sonucu uygunluk kontrolü

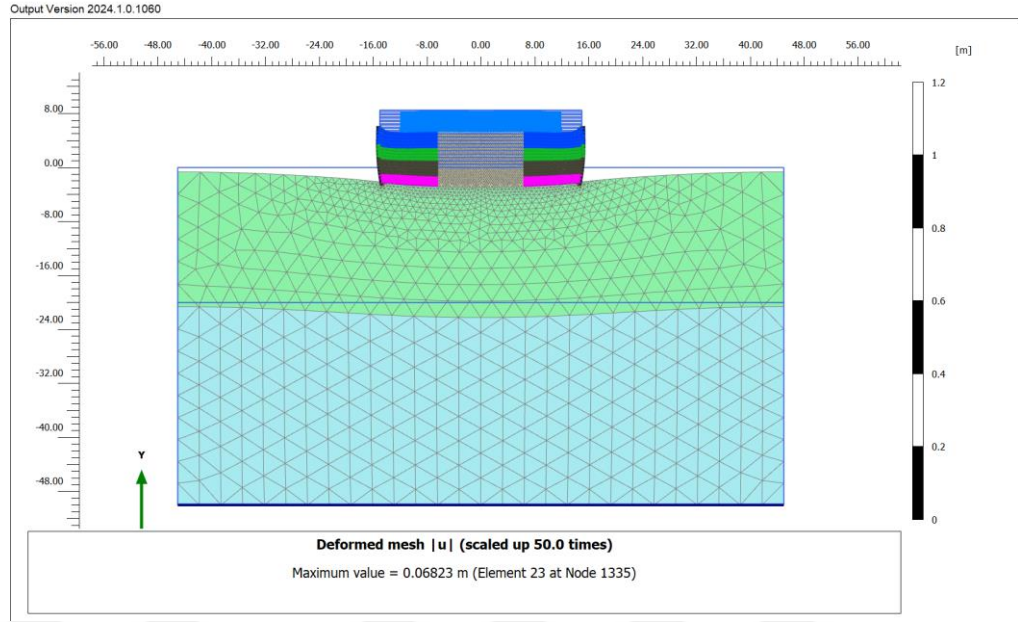
DD-2 Dinamik durum minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	1,34	1,1	Uygun
DD-1 Dinamik durum minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	1,1	1,1	Uygun

4.7.5. Toprakarme istinat duvarı Plaxis 2D analiz sonuçları, senaryo-3 (Plate yüzey elemanı, MC dolgu modeli, tek aşamalı modelleme)

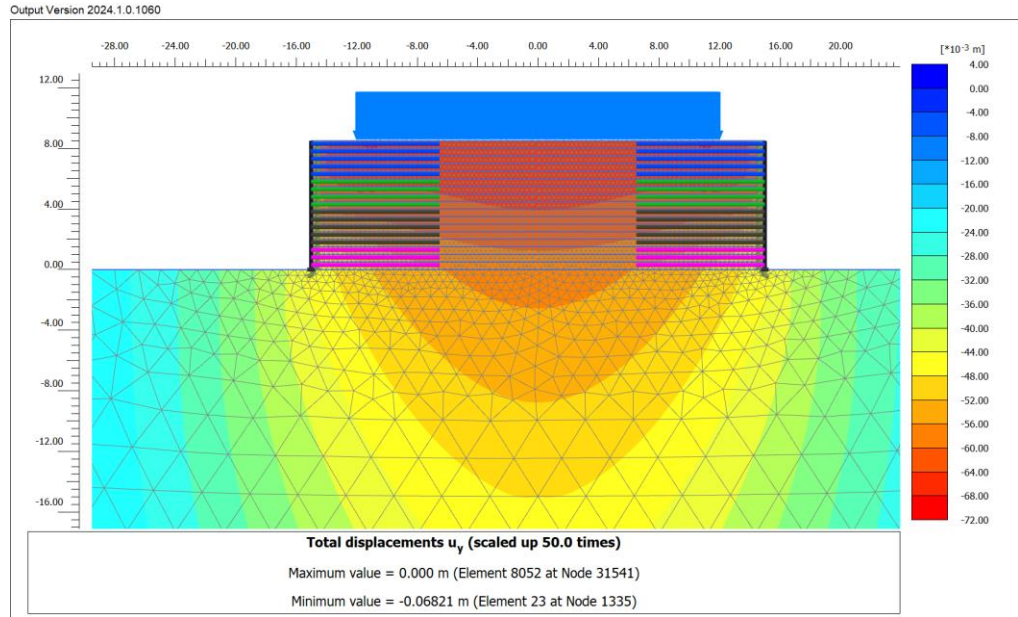
Bu senaryoda yüzey elemanı plate eleman olarak tanımlanmıştır. Dolgu malzemesi zemin modeli MC'dir. Toprakarme istinat duvarı tek aşamalı bir şekilde tanımlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Modelde kullanılan zemin modelleri: Killi Kum, Toprakarme Dolgu/2, DSM Kolon/1 DSM Kolon/2(Kısa Dönem). Modelde kullanılan yüzey eleman modeli:Plate. Başlangıç aşamasında sahada bulunan tabi zeminler aktiftir.

İlk aşama olarak, toprakarme duvar tümüyle aktif edilip trafik yükü etki ettirilmiştir. 2. Aşama olarak statik durum toptan göçme analizi yapılmıştır. 3.Aşama DD-2 deprem düzeyi için dinamik yükler etki ettirilmiştir. 4. Aşama olarak DD-2 deprem düzeyi için toptan göçme analizi yapılmıştır. 5. Aşama olarak DD-1 deprem düzeyi için dinamik yükler etki ettirilmiştir. 6. Aşama olarak DD-1 deprem düzeyi için toptan göçme analizi yapılmıştır. 7. Aşama statik durum kısa dönem parametreleri kullanılarak yükleme yapılmıştır. 8. Aşama statik durum kısa dönem parametreleri ile toptan göçme analizi yapılmıştır.

Belirtilen modeller ve analiz aşamaları sonucunda analizler gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla, Senaryo-3 için deformasyon ağı, toplam düşey deplasman, duvar tabanı toplam düşey deplasman, toplam yatay deplasman, statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti, dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti, statik durum uzun dönem güvenlik analizi, statik durum kısa dönem güvenlik analizi, DD-1 dinamik durum güvenlik analizi ve DD-2 dinamik durum güvenlik analizi sonuçları aşağıdaki gibidir (Şekil 4.24a-i).

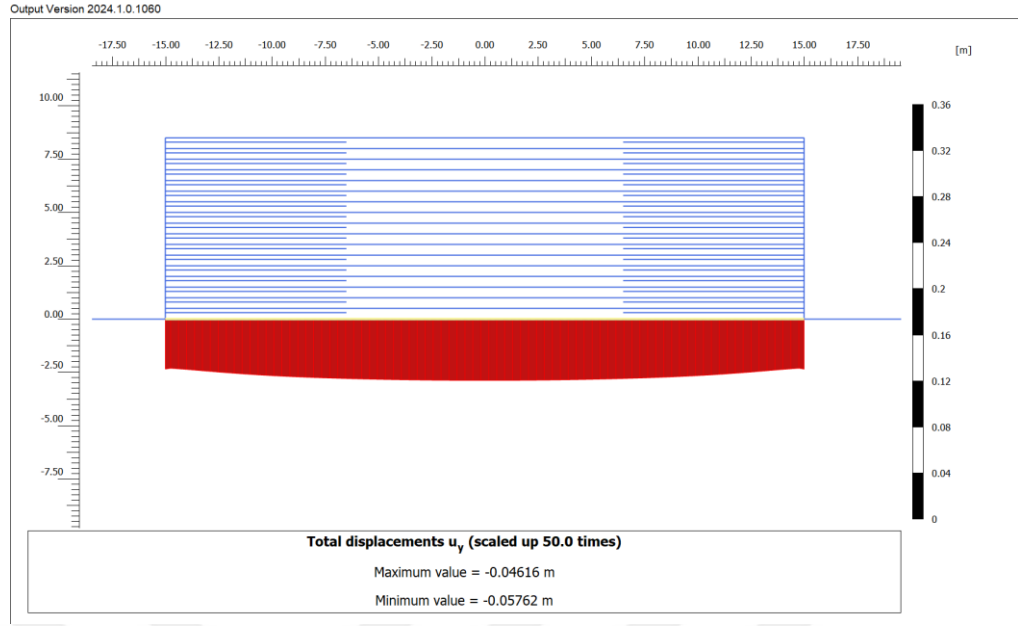


(a)

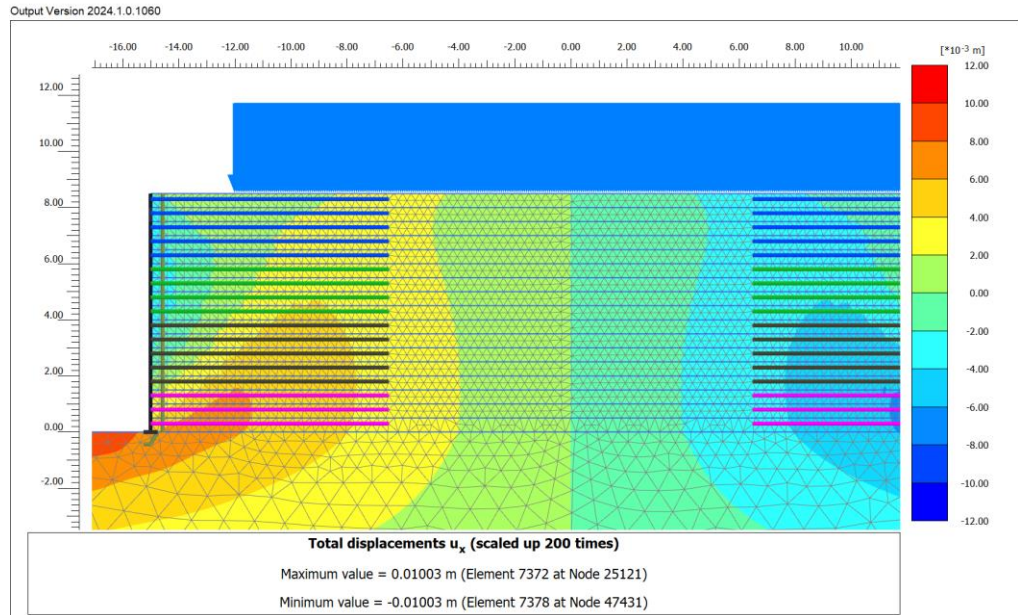


(b)

Şekil 4.24. Senaryo-3 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS: 1,97 > 1,5$) (h) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS: 2,55 > 1,3$) (i) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS: 1,1 > 1,1$) (j) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,38 > 1,1$

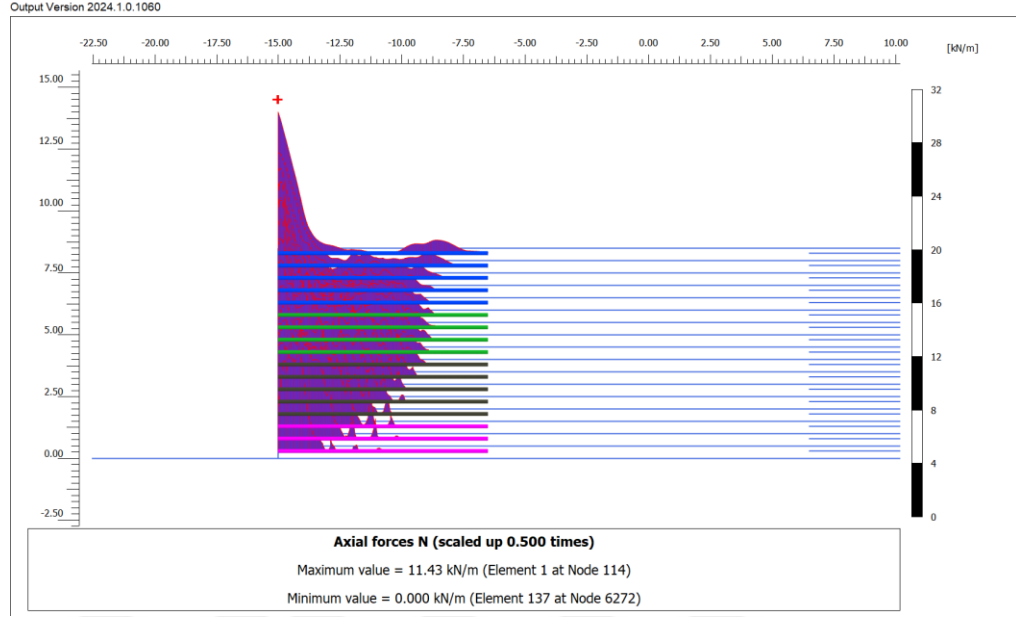


(c)

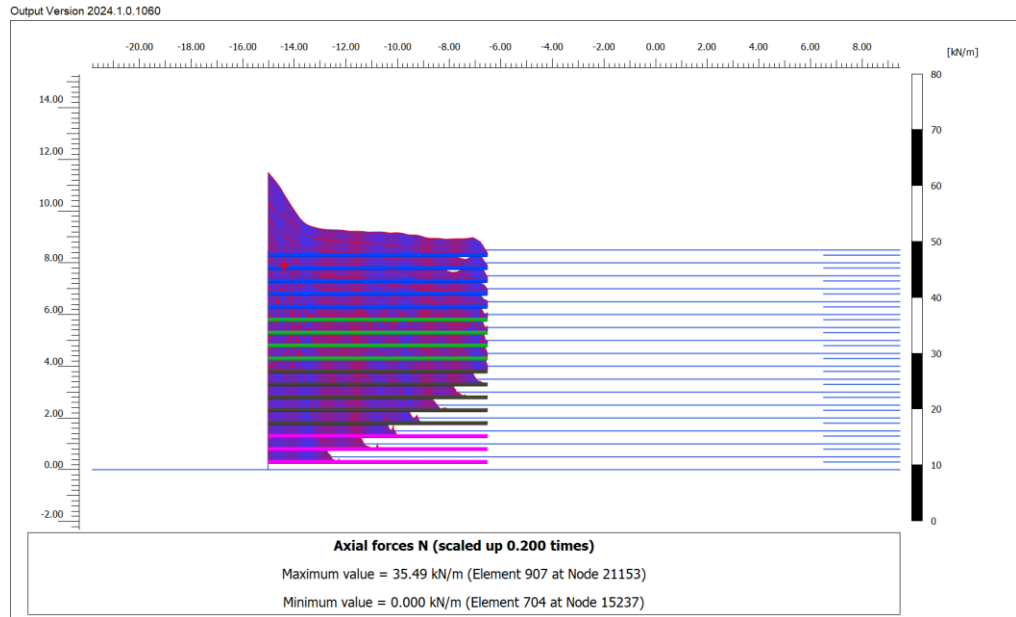


(d)

Şekil 4.24. (Devam) Senaryo-3 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:1,97>1,5$) (h) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:2,55>1,3$) (ı) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,1>1,1$) (i) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,38>1,1$

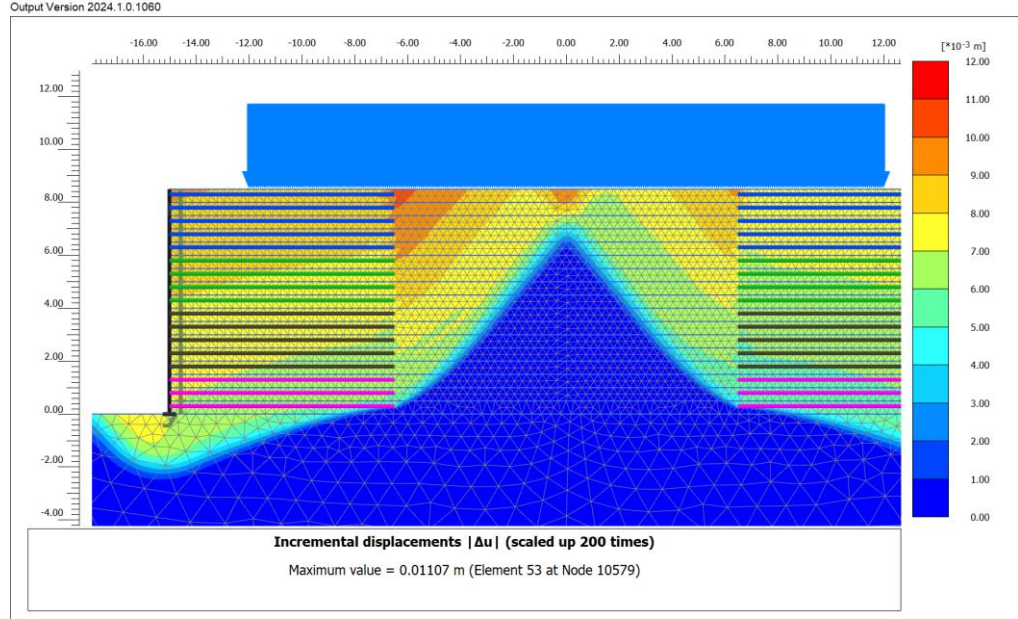


(e)

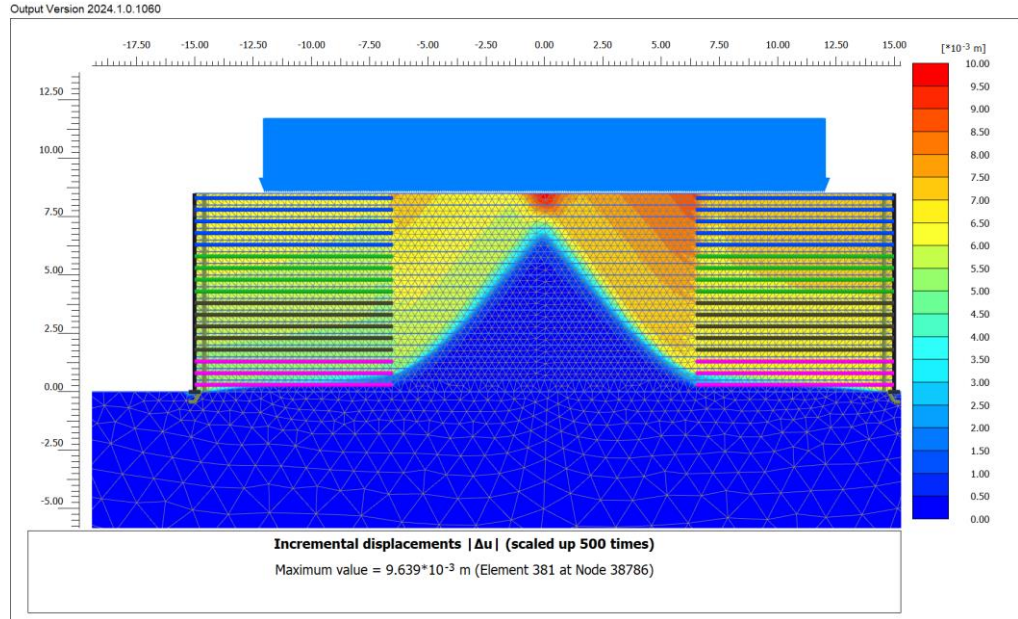


(f)

Şekil 4.24. (Devam) Senaryo-3 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:1,97>1,5$) (h)) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:2,55>1,3$) (i) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,1>1,1$) (i) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,38>1,1$

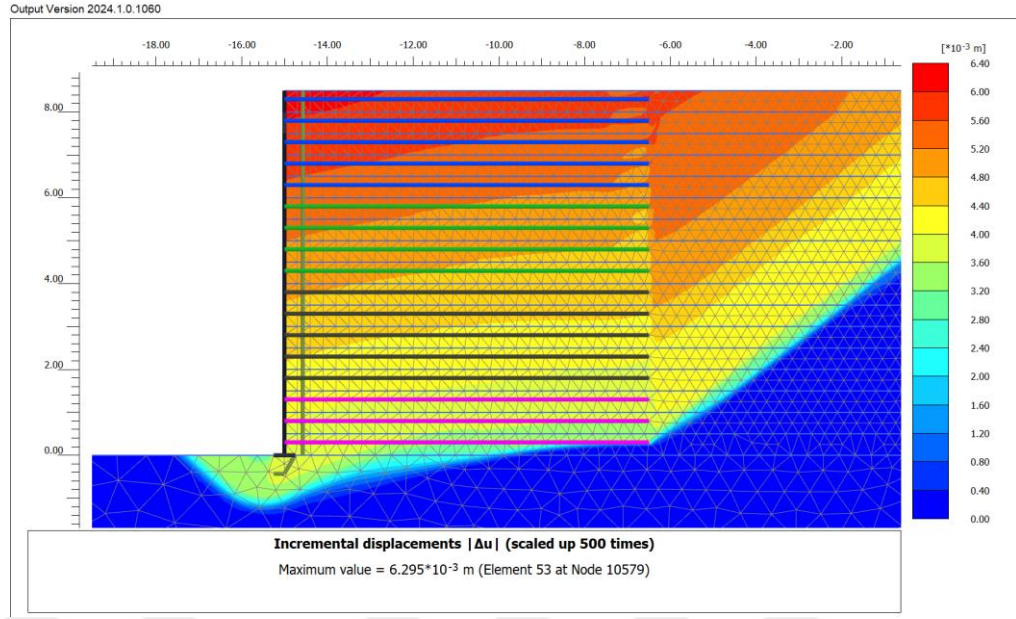


(g)

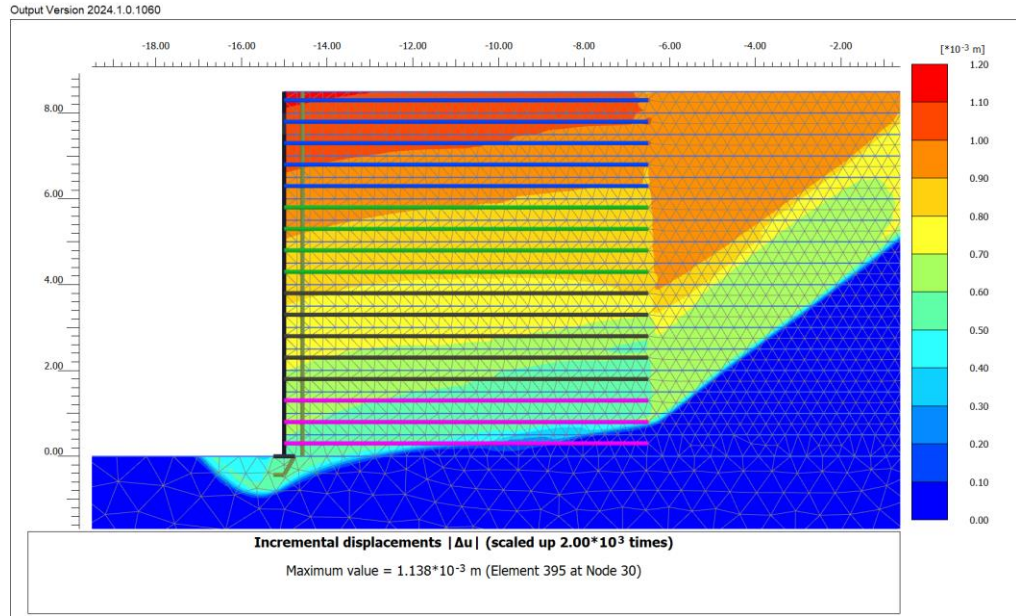


(h)

Şekil 4.24. (Devam) Senaryo-3 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi (FS:1,97>1,5) (h) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi (FS:2,55>1,3) (i) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi (FS:1,1>1,1) (j) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi 1,38>1,1



(t)



(i)

Şekil 4.24. (Devam) Senaryo-3 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:1,97>1,5$) (h)) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:2,55>1,3$) (i) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,1>1,1$) (i) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,38>1,1$

Donatılara gelen çekme gerilmeleri özet tablo Tablo 4.22’de verilmiştir. Çekme gerilmelerine karşı hesaplanan güvenlik sayıları minimum değerlerin üstündedir.

Tablo 4.22. Senaryo-3 geogrid çekme kuvvetleri- güvenlik katsayıları

Senaryo-3	Statik durum	Dinamik durum	Çekme dayanımı	FS (Statik)	FS (Dinamik)
Geogrid	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m
1	11.43	16.01	28.60	2.50	1.79
2	9.15	11.95	28.60	3.13	2.39
3	8.93	11.69	28.60	3.20	2.45
4	8.78	11.65	28.60	3.26	2.45
5	8.52	11.44	28.60	3.36	2.50
6	10.79	14.94	42.90	3.98	2.87
7	10.30	14.36	42.90	4.17	2.99
8	9.75	14.01	42.90	4.40	3.06
9	9.10	13.27	42.90	4.71	3.23
10	10.20	14.91	53.70	5.26	3.60
11	9.42	14.51	53.70	5.70	3.70
12	8.44	15.19	53.70	6.36	3.54
13	8.18	16.34	53.70	6.56	3.29
14	7.26	17.17	53.70	7.40	3.13
15	8.70	21.52	71.57	8.23	3.33
16	7.79	25.01	71.57	9.19	2.86
17	9.36	35.50	71.57	7.65	2.02

Yapılan analiz sonuçları minimum gereklilikler ile kıyaslanarak özet şeklinde aşağıdaki Tablo 4.23’de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre tasarım Senaryo-3 modeline göre güvenlidir.

Tablo 4.23. Senaryo-3 analiz sonucu uygunluk kontrolü

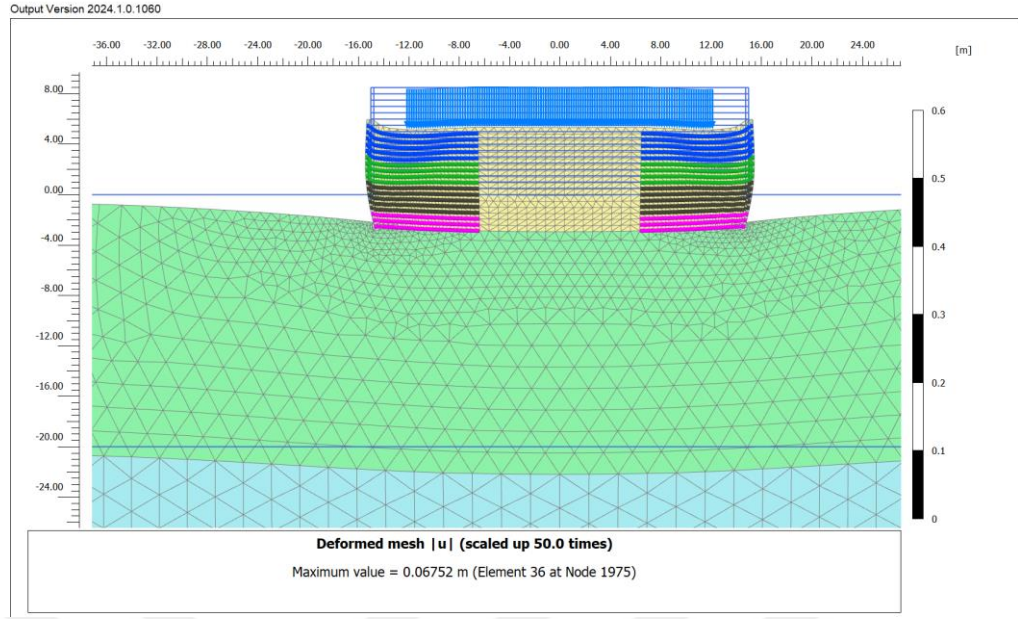
Senaryo-3	Analiz sonucu	Koşul	Uygunluk
Duvar tabanı maksimum düşey deplasman (cm)	6,8	10	Uygun
Duvar tabanı maksimum farklı oturma (cm)	1,2	4	Uygun
Duvar tabanı maksimum yatay deplasman (cm)	1,0	12	Uygun
Statik durum – Uzun dönem minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	1,97	1,5	Uygun
Statik durum – kısa dönem minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	2,55	1,3	Uygun
DD-2 Dinamik durum minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	1,38	1,1	Uygun
DD-1 Dinamik durum minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	1,1	1,1	Uygun

4.7.6. Toprakarme istinat duvarı Plaxis 2D analiz sonuçları, senaryo-4 (Volume element yüzey elemanı, MC dolgu modeli, tek aşamalı modelleme)

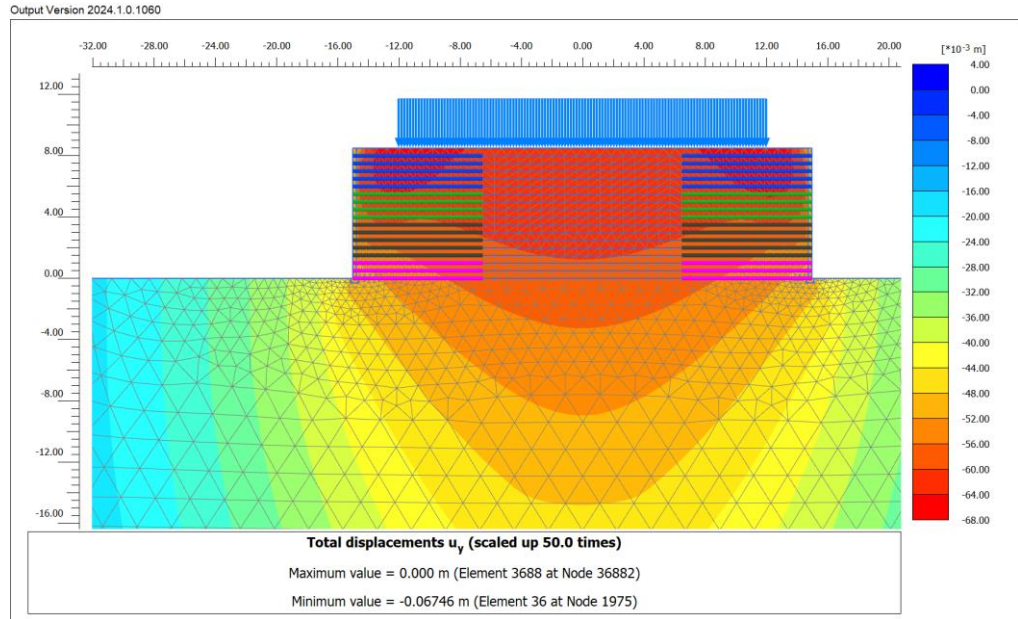
Bu senaryoda yüzey elemanı “volume element” eleman olarak tanımlanmıştır. Dolgu malzemesi zemin modeli MC’dır. Toprakarme istinat duvarı tek aşamalı bir şekilde tanımlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Modelde kullanılan zemin modelleri: Killi Kum, Toprakarme Dolgu/2, DSM Kolon/1 DSM Kolon/2(Kısa Dönem). Modelde kullanılan yüzey eleman modeli: Volume Element. Başlangıç aşamasında sahada bulunan tabi zeminler aktiftir.

İlk aşama olarak, toprakarme duvar tümüyle aktif edilip trafik yükü etki ettirilmiştir. 2. Aşama olarak statik durum toptan göçme analizi yapılmıştır. 3. Aşama DD-2 deprem düzeyi için dinamik yükler etki ettirilmiştir. 4. Aşama olarak DD-2 deprem düzeyi için toptan göçme analizi yapılmıştır. 5. Aşama olarak DD-1 deprem düzeyi için dinamik yükler etki ettirilmiştir. 6. Aşama olarak DD-1 deprem düzeyi için toptan göçme analizi yapılmıştır. 7. Aşama statik durum kısa dönem parametreleri kullanılarak yükleme yapılmıştır. 8. Aşama statik durum kısa dönem parametreleri ile toptan göçme analizi yapılmıştır.

Belirtilen modeller ve analiz aşamaları sonucunda analizler gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla, Senaryo-4 için deformasyon ağı, toplam düşey deplasman, duvar tabanı toplam düşey deplasman, toplam yatay deplasman, statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti, dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti, statik durum kısa dönem güvenlik analizi, statik durum uzun dönem güvenlik analizi, DD-2 dinamik durum güvenlik analizi ve DD-1 dinamik durum güvenlik analizi sonuçları aşağıdaki gibidir (Şekil 4.25a-i).

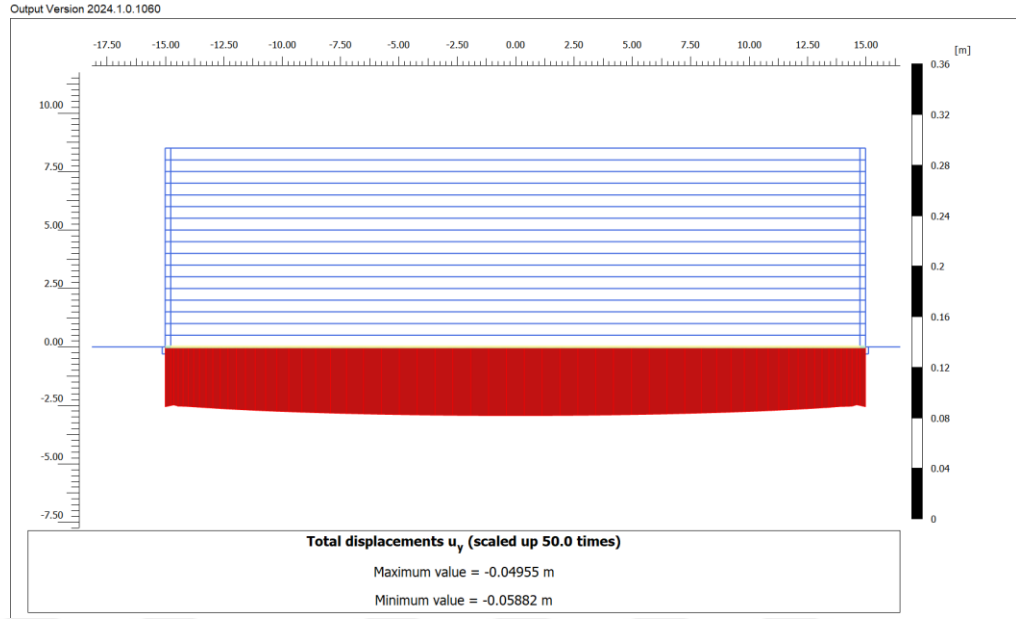


(a)

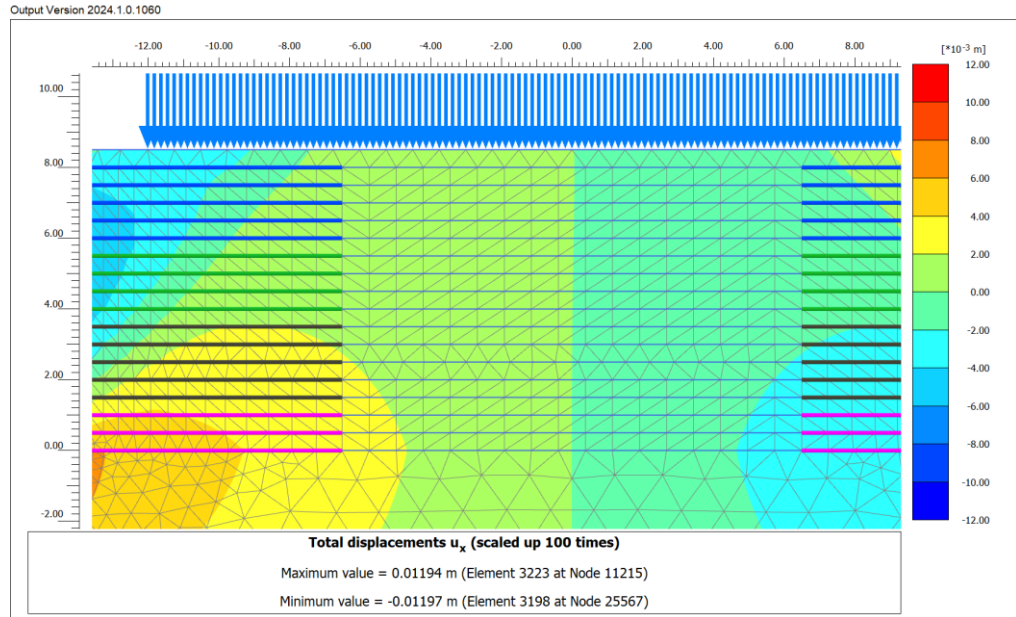


(b)

Şekil 4.25. Senaryo-4 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS: 2,99 > 1,3$) (h) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS: 1,98 > 1,5$) (i) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS: 1,42 > 1,1$) (j) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,1 > 1,1$

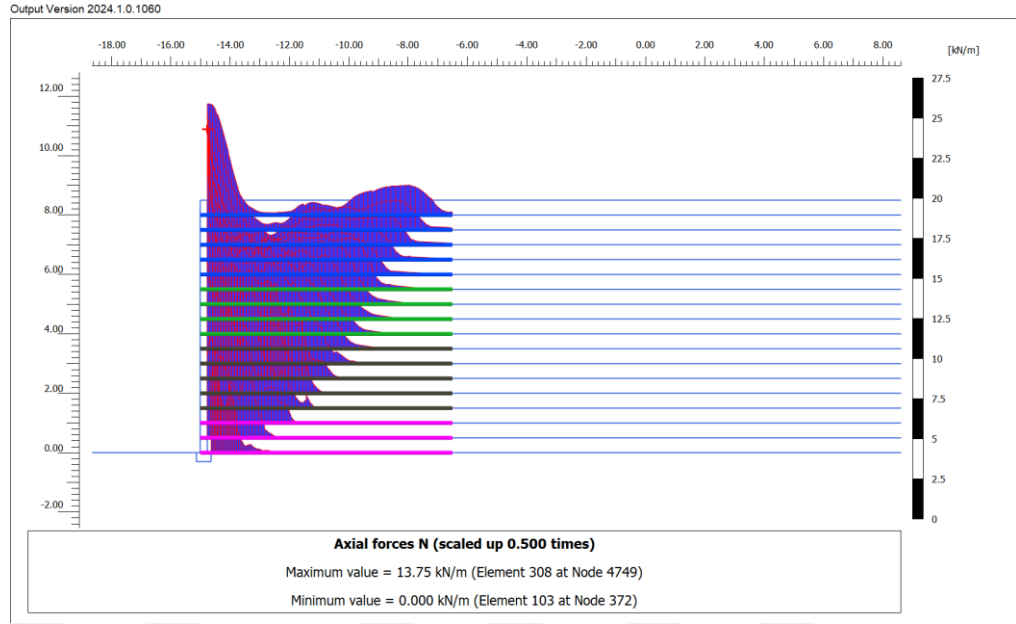


(c)

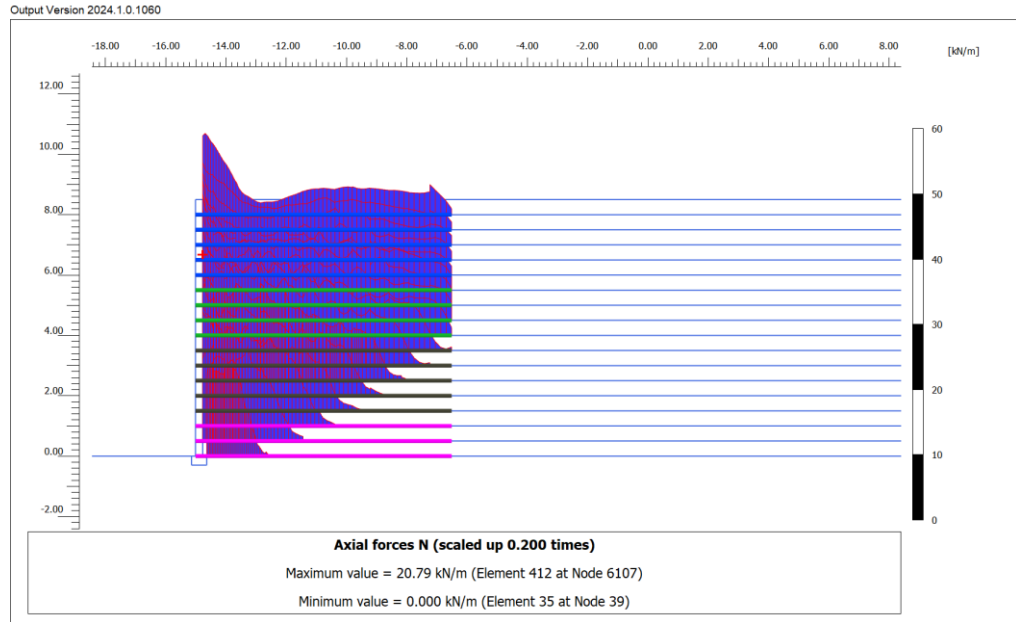


(d)

Şekil 4.25. (Devam) Senaryo-4 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:2,99>1,3$) (h)) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:1,98>1,5$) (ı) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,42>1,1$) (i) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,1>1,1$

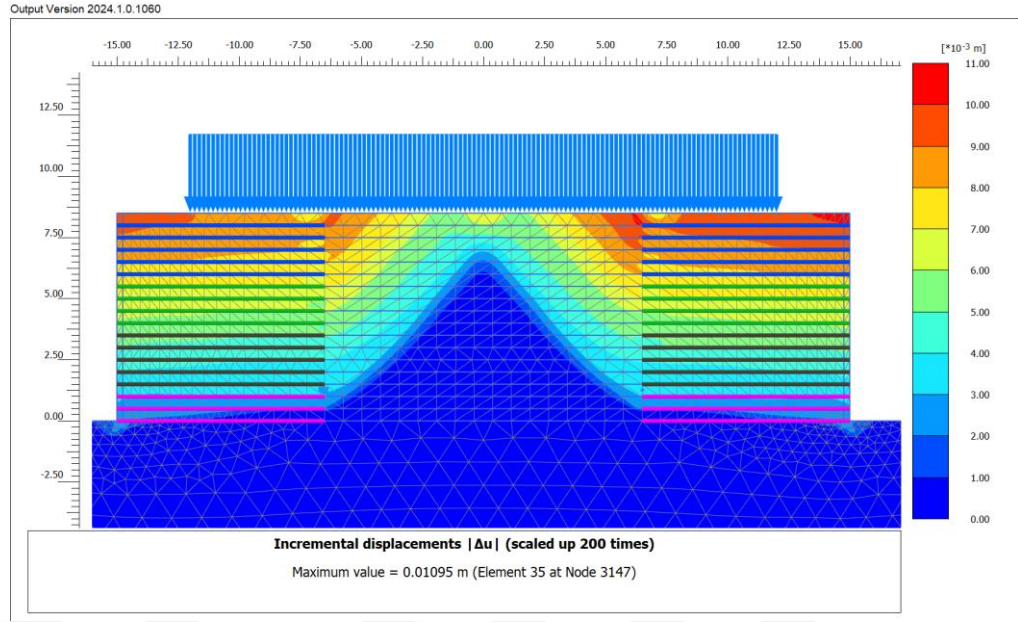


(e)

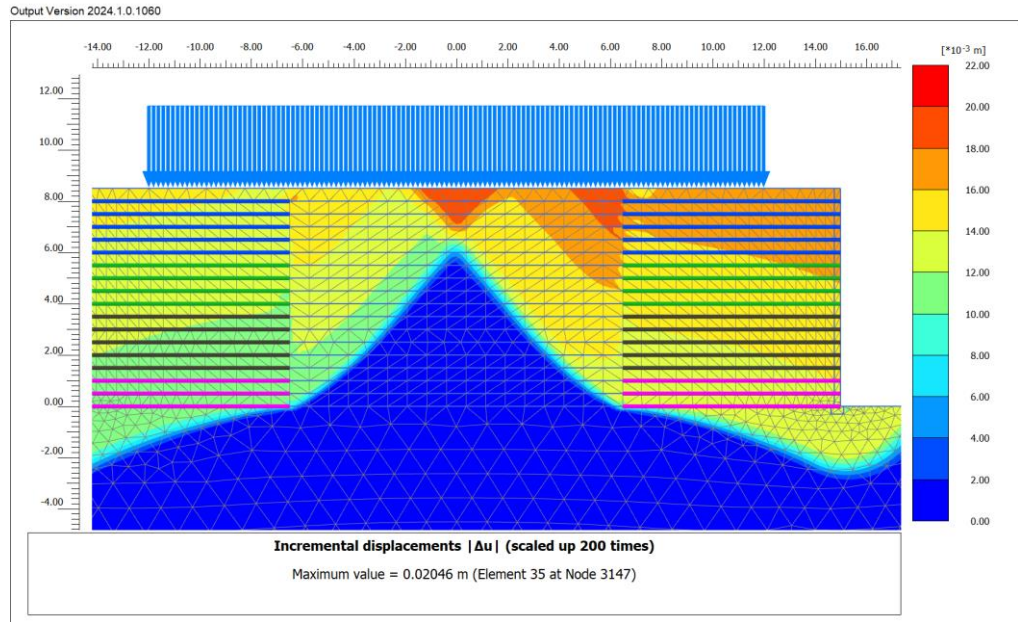


(f)

Şekil 4.25. (Devam) Senaryo-4 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:2,99>1,3$) (h) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:1,98>1,5$) (i) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,42>1,1$) (j) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,1>1,1$

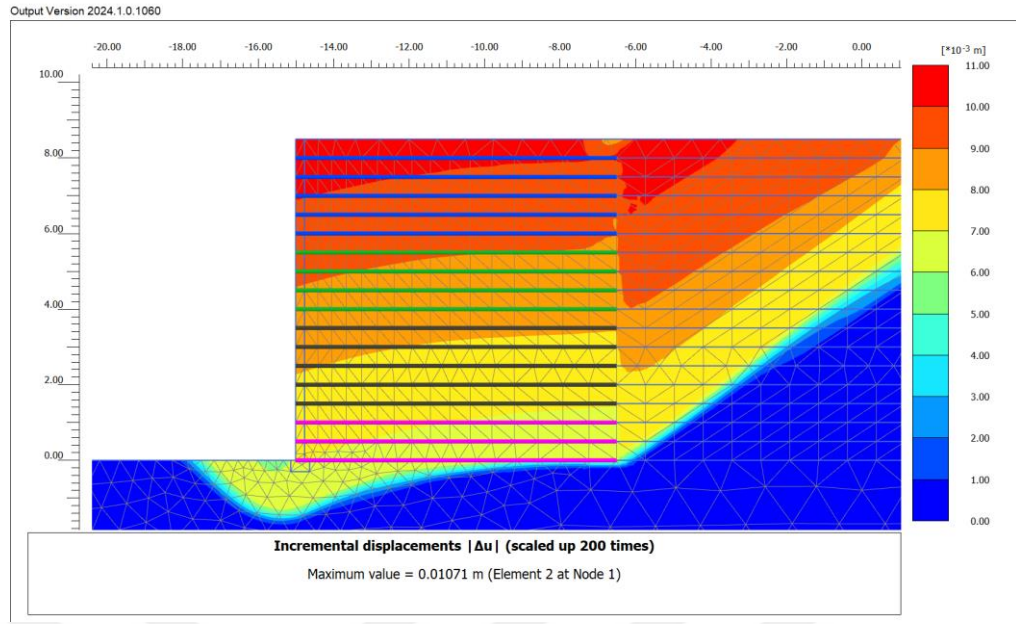


(g)

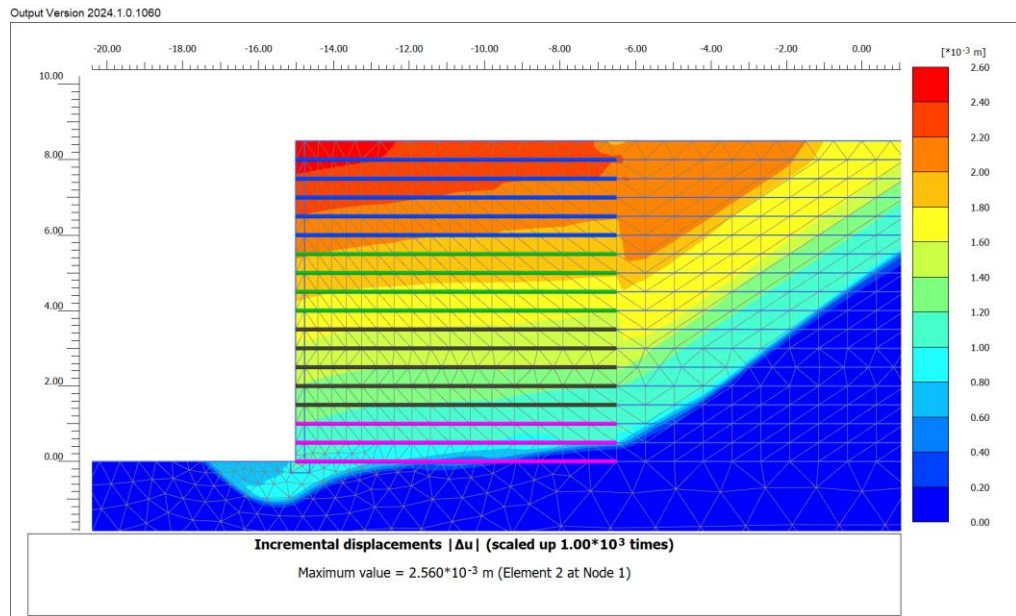


(h)

Şekil 4.25. (Devam) Senaryo-4 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:2,99>1,3$) (h) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:1,98>1,5$) (i) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,42>1,1$) (j) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,1>1,1$



(l)



(i)

Şekil 4.25. (Devam) Senaryo-4 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi (FS:2,99>1,3) (h) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi (FS:1,98>1,5) (i) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi (FS:1,42>1,1) (i) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi 1,1>1,1

Donatılara gelen çekme gerilmeleri özet tablo Tablo 4.24’de verilmiştir. Çekme gerilmelerine karşı hesaplanan güvenlik sayıları minimum değerlerin üstündedir.

Tablo 4.24. Senaryo-4 geogrid çekme kuvvetleri- güvenlik katsayıları

Senaryo-4	Statik durum	Dinamik durum	Çekme dayanımı	FS (Statik)	FS (Dinamik)
Geogrid	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m
1	7.49	13.48	28.60	3.82	2.12
2	7.46	11.12	28.60	3.83	2.57
3	8.39	12.00	28.60	3.41	2.38
4	9.07	12.87	28.60	3.15	2.22
5	9.33	13.61	28.60	3.07	2.10
6	12.05	18.28	42.90	3.56	2.35
7	12.05	18.28	42.90	3.56	2.35
8	12.15	18.44	42.90	3.53	2.33
9	11.95	18.10	42.90	3.59	2.37
10	13.75	20.36	53.70	3.91	2.64
11	13.73	19.72	53.70	3.91	2.72
12	9.65	17.32	53.70	5.56	3.10
13	11.36	20.79	53.70	4.73	2.58
14	10.01	18.01	53.70	5.36	2.98
15	9.96	18.97	71.57	7.19	3.77
16	6.91	15.90	71.57	10.36	4.50
17	6.21	15.54	71.57	11.52	4.61

Yapılan analiz sonuçları minimum gereklilikler ile kıyaslanarak özet şeklinde aşağıdaki Tablo 4.25’de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre tasarım Senaryo-4 modeline göre güvenlidir.

Tablo 4.25. Senaryo-4 analiz sonucu uygunluk kontrolü

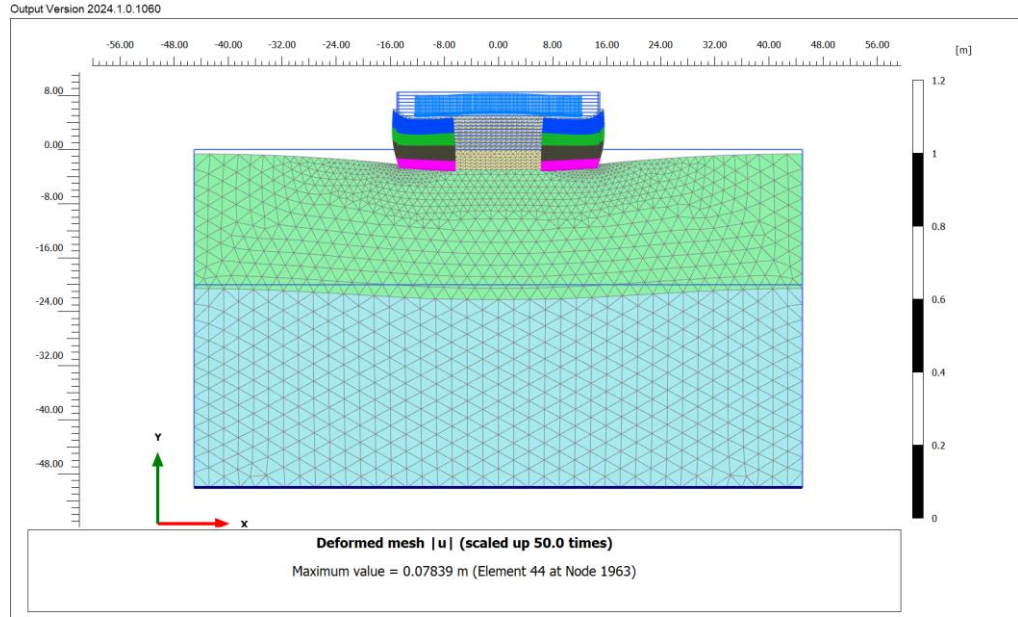
Senaryo-4	Analiz sonucu	Koşul	Uygunluk
Duvar tabanı maksimum düşey deplasman (cm)	6,74	10	Uygun
Duvar tabanı maksimum farklı oturma (cm)	0,9	4	Uygun
Duvar tabanı maksimum yatay deplasman (cm)	1,20	12	Uygun
Statik durum – Uzun dönem minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	1,98	1,5	Uygun
Statik durum – kısa dönem minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	2,99	1,3	Uygun
DD-2 Dinamik durum minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	1,42	1,1	Uygun
DD-1 Dinamik durum minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	1,1	1,1	Uygun

4.7.7. Toprakarme istinat duvarı Plaxis 2D analiz sonuçları, senaryo-5 (Volume element yüzey elemanı, HS dolgu modeli, tek aşamalı modelleme)

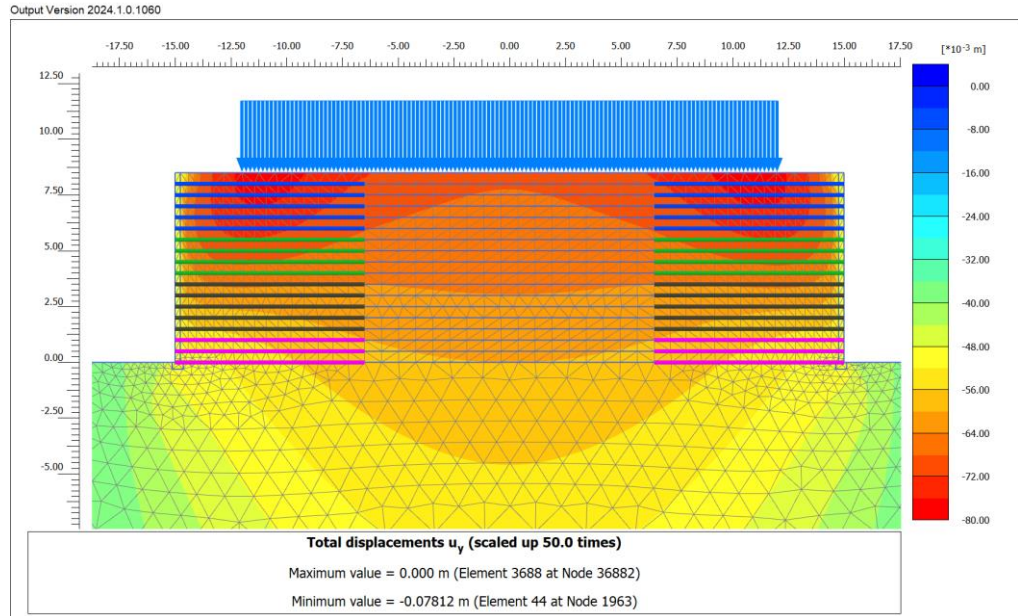
Bu senaryoda yüzey elemanı “volume element” eleman olarak tanımlanmıştır. Dolgu malzemesi zemin modeli HS’dir. Toprakarme istinat duvarı tek aşamalı bir şekilde tanımlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Modelde kullanılan zemin modelleri: Killi Kum, Toprakarme Dolgu/1, DSM Kolon/1 DSM Kolon/2(Kısa Dönem). Modelde kullanılan yüzey eleman modeli: Volume Element. Başlangıç aşamasında sahada bulunan tabi zeminler aktiftir.

İlk aşama olarak, toprakarme duvar tümüyle aktif edilip trafik yükü etki ettirilmiştir. 2. Aşama olarak statik durum toptan göçme analizi yapılmıştır. 3. Aşama DD-2 deprem düzeyi için dinamik yükler etki ettirilmiştir. 4. Aşama olarak DD-2 deprem düzeyi için toptan göçme analizi yapılmıştır. 5. Aşama olarak DD-1 deprem düzeyi için dinamik yükler etki ettirilmiştir. 6. Aşama olarak DD-1 deprem düzeyi için toptan göçme analizi yapılmıştır. 7. Aşama statik durum kısa dönem parametreleri kullanılarak yükleme yapılmıştır. 8. Aşama statik durum kısa dönem parametreleri ile toptan göçme analizi yapılmıştır.

Belirtilen modeller ve analiz aşamaları sonucunda analizler gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla, Senaryo-5 için deformasyon ağı, toplam düşey deplasman, duvar tabanı toplam düşey deplasman, toplam yatay deplasman, statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti, dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti, statik durum kısa dönem güvenlik analizi, statik durum uzun dönem güvenlik analizi, DD-2 dinamik durum güvenlik analizi ve DD-1 dinamik durum güvenlik analizi sonuçları aşağıdaki gibidir (Şekil 4.26a-i).

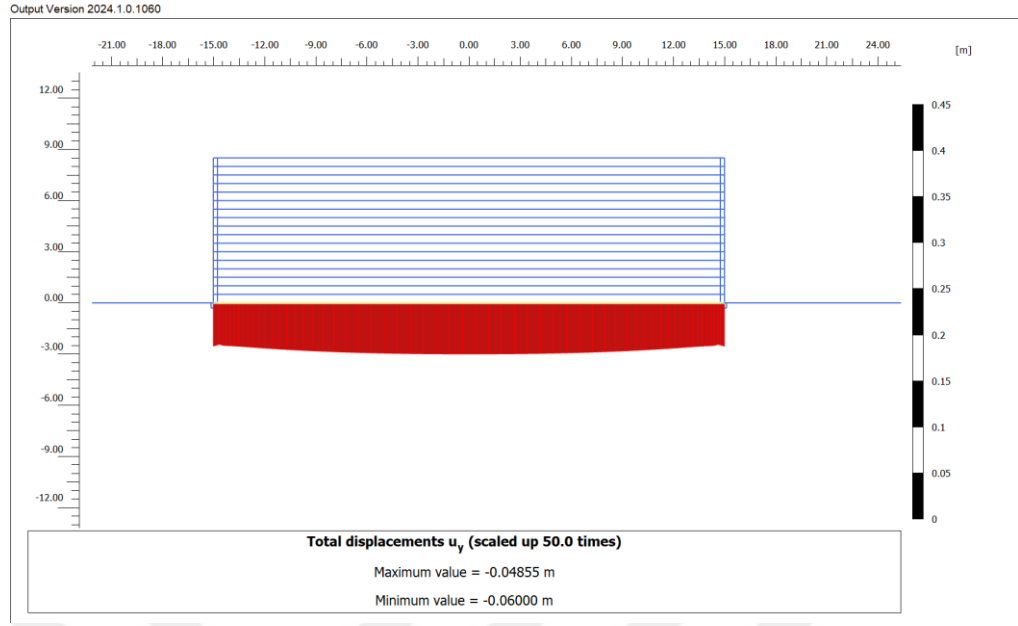


(a)

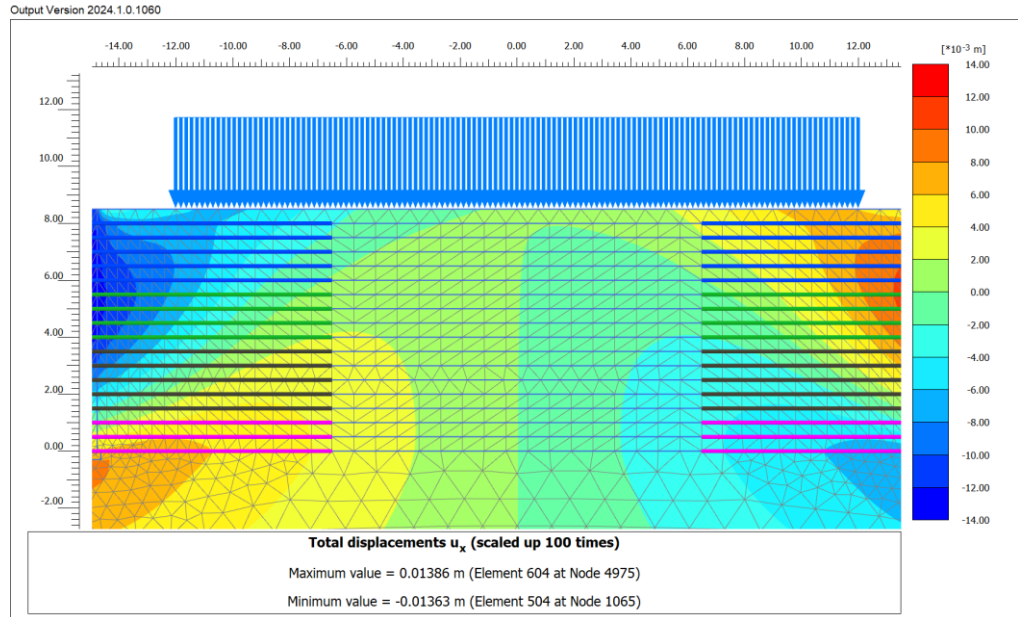


(b)

Şekil 4.26. Senaryo-5 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:2,95>1,3$) (h) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:2,00>1,5$) (i) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,45>1,1$) (j) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,17>1,1$

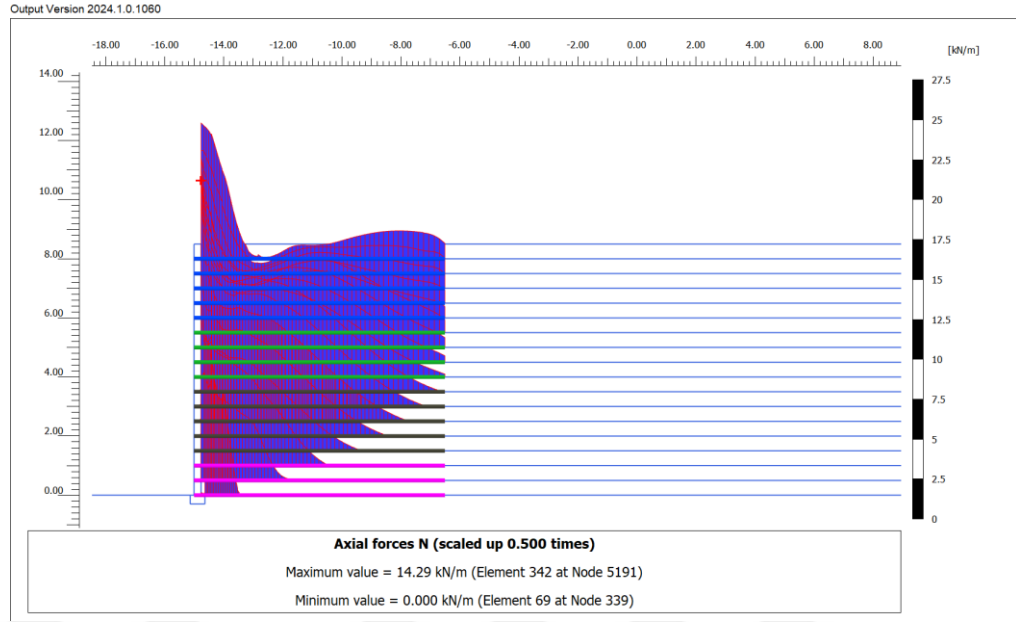


(c)

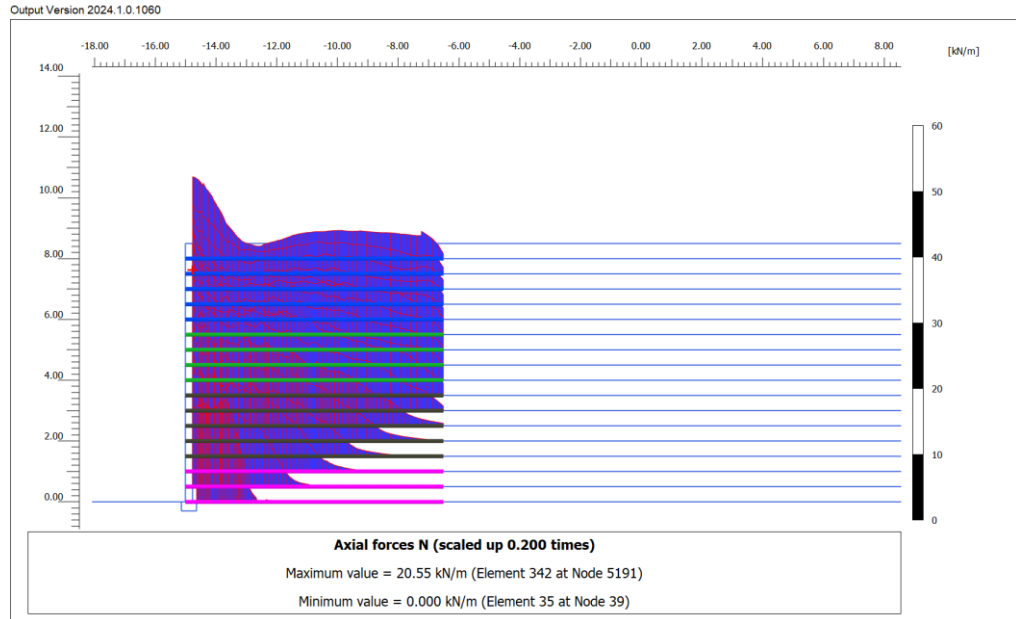


(d)

Şekil 4.26. (Devam) Senaryo-5 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:2,95>1,3$) (h)) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:2,00>1,5$) (ı) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,45>1,1$) (i) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,17>1,1$

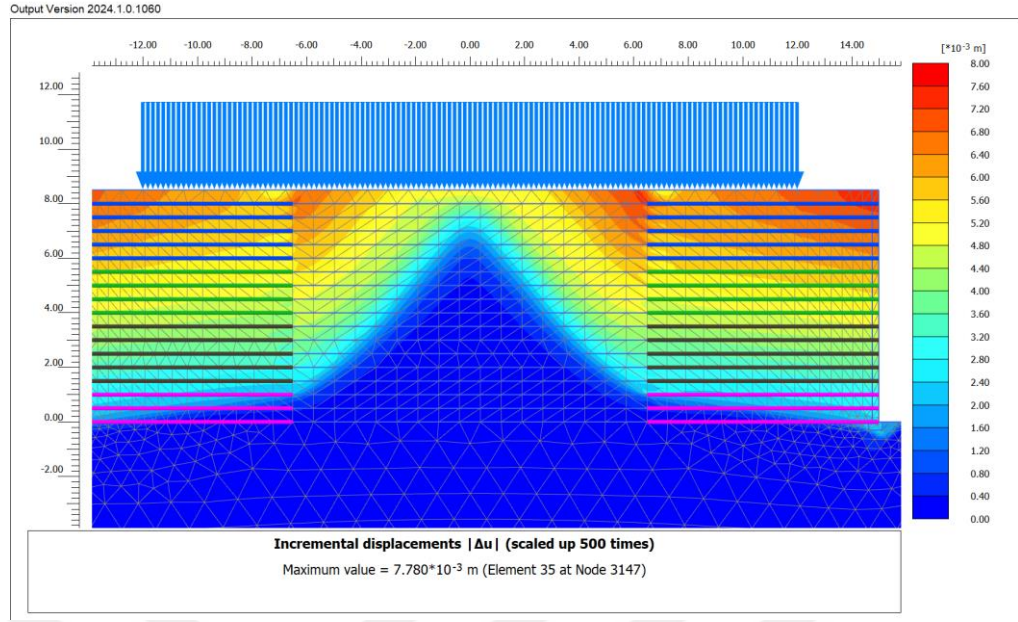


(e)

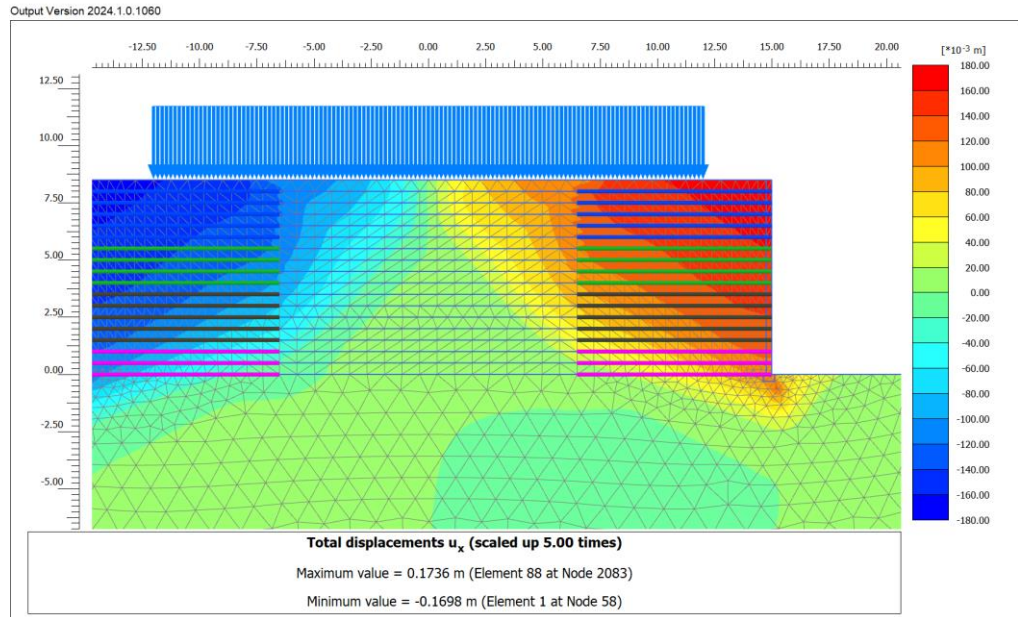


(f)

Şekil 4.26. (Devam) Senaryo-5 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:2,95>1,3$) (h)) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS:2,00>1,5$) (i) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS:1,45>1,1$) (i) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,17>1,1$

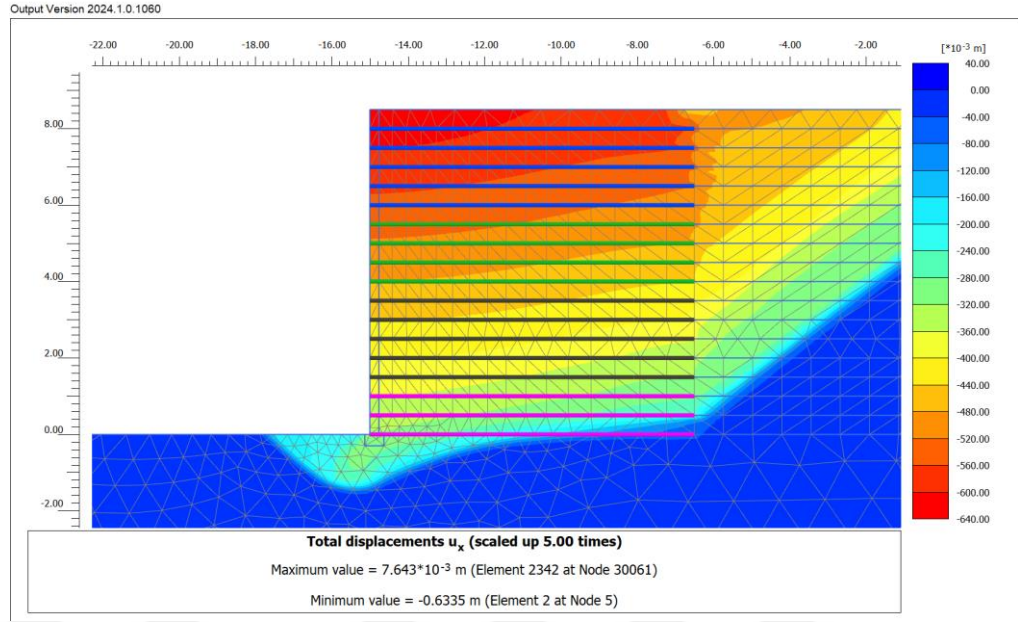


(g)

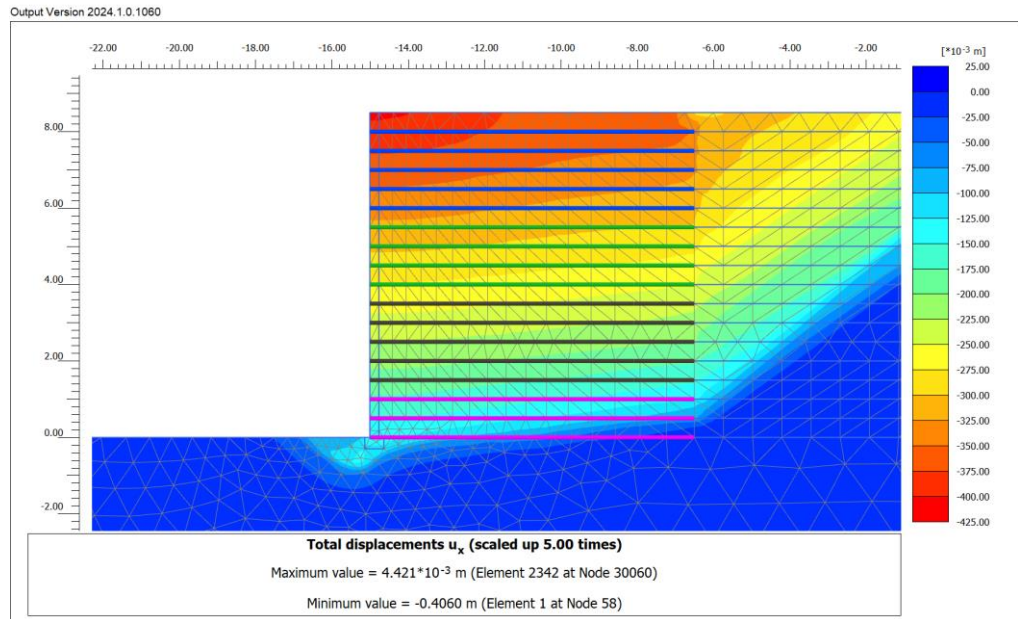


(h)

Şekil 4.26. (Devam) Senaryo-5 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS: 2,95 > 1,3$) (h) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS: 2,00 > 1,5$) (i) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS: 1,45 > 1,1$) (j) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,17 > 1,1$



(l)



(i)

Şekil 4.26. (Devam) Senaryo-5 analiz sonuçları (a) Deformasyon ağı (b) Toplam düşey deplasman (c) Duvar tabanı toplam düşey deplasman (d) Toplam yatay deplasman (e) Statik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (f) Dinamik durum donatılarda meydana gelen çekme kuvveti (g) Statik durum kısa dönem güvenlik sayısı analizi ($FS: 2,95 > 1,3$) (h) Statik durum uzun dönem güvenlik sayısı analizi ($FS: 2,00 > 1,5$) (ı) DD-2 dinamik durum güvenlik sayısı analizi ($FS: 1,45 > 1,1$) (i) DD-1 dinamik durum güvenlik sayısı analizi $1,17 > 1,1$

Donatılara gelen çekme gerilmeleri özet tablo Tablo 4.26'da verilmiştir. Çekme gerilmelerine karşı hesaplanan güvenlik sayıları minimum değerlerin üstündedir.

Tablo 4.26. Senaryo-5 geogrid çekme kuvvetleri- güvenlik katsayıları

Senaryo-5	Statik durum	Dinamik durum	Çekme dayanımı	FS (Statik)	FS (Dinamik)
Geogrid	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m
1	9.21	13.48	28.60	3.11	2.12
2	8.33	11.28	28.60	3.43	2.54
3	8.87	11.78	28.60	3.22	2.43
4	8.94	12.46	28.60	3.20	2.30
5	9.34	12.72	28.60	3.06	2.25
6	11.92	17.11	42.90	3.60	2.51
7	12.13	17.41	42.90	3.54	2.46
8	12.44	17.54	42.90	3.45	2.45
9	12.05	17.22	42.90	3.56	2.49
10	14.04	20.16	53.70	3.82	2.66
11	14.29	20.55	53.70	3.76	2.61
12	10.24	16.98	53.70	5.24	3.16
13	11.07	18.73	53.70	4.85	2.87
14	10.19	16.78	53.70	5.27	3.20
15	9.93	17.57	71.57	7.21	4.07
16	7.33	13.70	71.57	9.76	5.22
17	10.80	17.43	71.57	6.63	4.11

Yapılan analiz sonuçları minimum gereklilikler ile kıyaslanarak özet şeklinde aşağıdaki Tablo 4.27’de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre tasarım Senaryo-5 modeline göre güvenlidir.

Tablo 4.27. Senaryo-5 analiz sonucu uygunluk kontrolü

Senaryo-5	Analiz sonucu	Koşul	Uygunluk
Duvar tabanı maksimum düşey deplasman (cm)	7,80	10	Uygun
Duvar tabanı maksimum farklı oturma (cm)	1,15	4	Uygun
Duvar tabanı maksimum yatay deplasman (cm)	1,40	12	Uygun
Statik durum – Uzun dönem minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	2,00	1,5	Uygun
Statik durum – kısa dönem minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	2,95	1,3	Uygun
DD-2 Dinamik durum minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	1,45	1,1	Uygun
DD-1 Dinamik durum minimum göçme güvenlik sayısı (FS)	1,17	1,1	Uygun

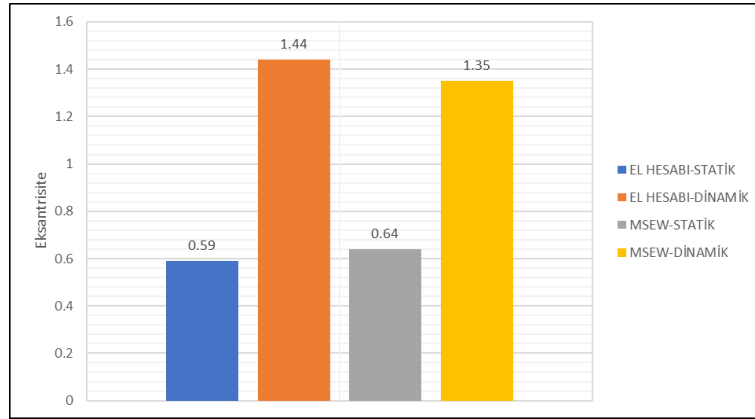
Sonlu elemanlar yöntemiyle toplam 5 senaryo olmak üzere tüm senaryo analizleri tamamlanmış ve tasarım için kriterler kontrol edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda tasarım kesiti statik ve dinamik yüklemeler altında gerekli koşulları sağlamaktadır.



5. SONUÇ VE TARTIŞMA

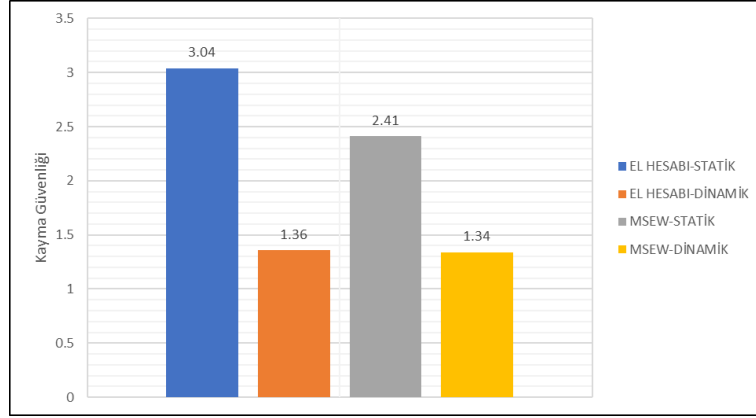
Bursa ili Osmangazi ilçesindeki sondaj verileri kullanılarak sahanın jeolojik profili oluşturulmuş ve literatürde önerilen yöntemlerle sahadaki jeolojik birimlerin geoteknik tasarım parametreleri seçilmiştir. Bu profil ve parametreler doğrultusunda tez kapsamında 9.0 metre yüksekliğinde yatay şev üzerine inşa edilecek geogrid donatılı istinat duvarı projesinin ilk olarak Amerikan Karayolları Yönetmeliğine göre el hesabıyla, limit denge analiz yöntemi kullanan MSEW ve Slide v6 programlarıyla, son olarak sonlu elemanlar yöntemi kullanan Plaxis 2D programıyla iç ve dış stabilite tahkikleri gerçekleştirilmiştir. Tezin temel amacı geogrid donatılı istinat duvarı tasarımının tüm aşamalarını kapsayacak şekilde farklı analiz yöntemlerini ele alarak detaylı bir tasarım örneğini literatüre kazandırmaktır. Ek olarak tasarım aşamalarında uygulanan farklı senaryo sonuçları karşılaştırılarak parametrik çalışma yapılmıştır.

El hesabıyla ve MSEW programıyla yapılan analiz sonuçlarına göre hesaplanan eksantrisite değerleri oldukça yakındır. Statik durumda MSEW programı analiz sonuçları daha güvenli tarafta kalırken, dinamik durumda el hesabıyla ölçülen eksantrisite daha yüksektir (Şekil 5.1). İki hesap metodu da eksantrisite açısından yeterlilik koşulunu sağlamaktadır.



Şekil 5.1. El hesabı ve MSEW programıyla hesaplanan eksantrisite değerleri

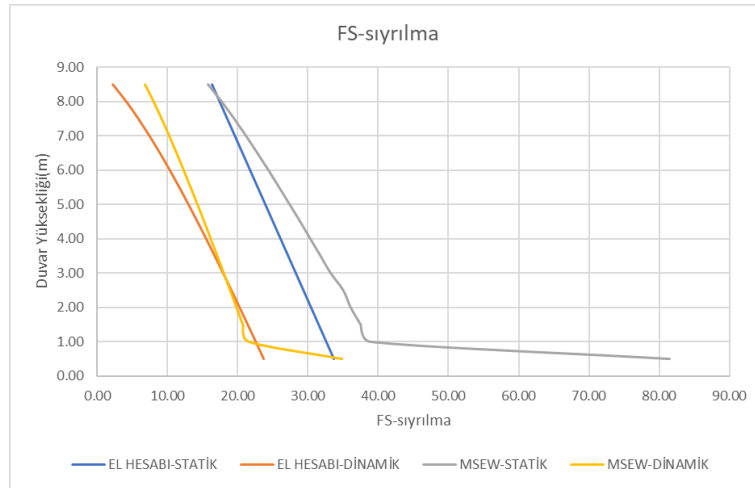
MSEW programıyla statik durumda hesaplanan kaymaya karşı güvenlik sayısı, el hesabı sonucundan yaklaşık %20 düşüktür. Dinamik yüklemeler altında kayma güvenlik faktörleri el hesabıyla 1,36, MSEW programıyla 1,34 olarak hesaplanmış ve oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. İki hesap metodu da toprakarme istinat duvarı geometrisinin statik ve dinamik kayma güvenlik faktörleri minimum değerlerini sağlamaktadır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. El hesabı ve MSEW programıyla hesaplanan kayma güvenliği faktörleri

El hesabı ve limit denge analizleriyle hesaplanan iç stabilite sıyırılma tahkikleri sonucunda, el hesabı yönteminin duvar yüksekliğine göre doğrusal artış azalmaktadır.

Öte yandan, limit denge analiz yöntemi sonucu 0,5 metre derinlikteki geogrid katmanına kadar el hesabı sonuçlarına göre maksimum %15 fark oluşurken 0,5 metre derinliğinde %60 fark meydana gelmiştir. El hesabı yöntemi sıyırılma dayanımı açısından minimum %1 maksimum %60 oranında daha güvenli tarafta kalmaktadır (Şekil 5.3). El hesabı ve limit denge yöntemleriyle elde edilen çekme dayanımı sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlarla birlikte mukayese edilecektir. Her iki durumda da sistem güvenlidir.



Şekil 5.3. El Hesabı ve MSEW programıyla hesaplanan sıyırılma dayanımı güvenliği faktörleri

Geogrid donatılı istinat duvarlarının sonlu elemanlar yöntemi kullanan Plaxis 2D programıyla modellenmesi üzerine birçok soru işareti bulunmaktadır. Bundan dolayı toprakarme istinat duvarı 5 farklı senaryo üzerinden modellenerek nihai sonuç tablosu

bütün senaryo sonuçlarından en güvensiz tarafta kalacak şekilde oluşturulmuştur. Aynı zamanda modellemedeki farklılıkların etkisi incelenmiştir.

Senaryo 1: Plate yüzey elemanı, HS dolgu modeli, Çok aşamalı modelleme

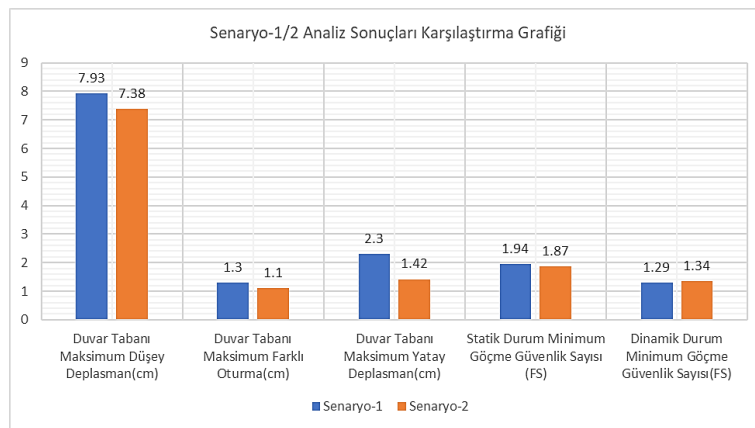
Senaryo 2: Plate yüzey elemanı, HS dolgu modeli, Tek aşamalı modelleme

Senaryo 3: Plate yüzey elemanı, MC dolgu modeli, Tek aşamalı modelleme

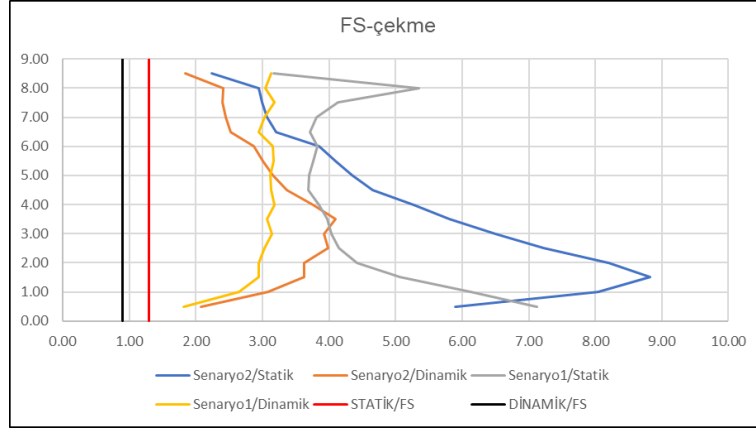
Senaryo 4: Volume yüzey elemanı, MC dolgu modeli, Tek aşamalı modelleme

Senaryo 5: Volume yüzey elemanı, HS dolgu modeli, Tek aşamalı modelleme

Analiz sonuçları özet karşılaştırma grafiği Şekil 5.4'te verilmiştir. Analiz sonuçlarına bakıldığında Senaryo-1 analiz çıktıları Senaryo-2'ye göre daha güvenli tarafta kalmaktadır. Analiz sonuçlarında maksimum 0,88 cm ile toprakarme duvar yatay deplasman değerinde oluşmaktadır. Toplam ve farklı düşey oturma değerlerinde oluşan değerler %15'ten az fark sergilemektedir. Güvenlik sayıları statik durum için Senaryo-2 güvenli tarafta kalırken, dinamik durum için Senaryo-1 güvenli tarafta kalmaktadır. Dolayısıyla, oturma odaklı yapılacak analizlerde Senaryo-1 tipi modelleme tercih edilmelidir. Ek olarak Şekil 5.5'te verilen geogrid çekme güvenlik faktörlerine bakıldığında iki durum için de güvenli bölgeler geogrid katmanına göre değişkenlik göstermektedir. Bundan dolayı genel tasarım için hem tek aşamalı tasarım hem de çok aşamalı tasarım yapılarak nihai değerlerin seçilmesi doğru bir yaklaşım olacaktır.

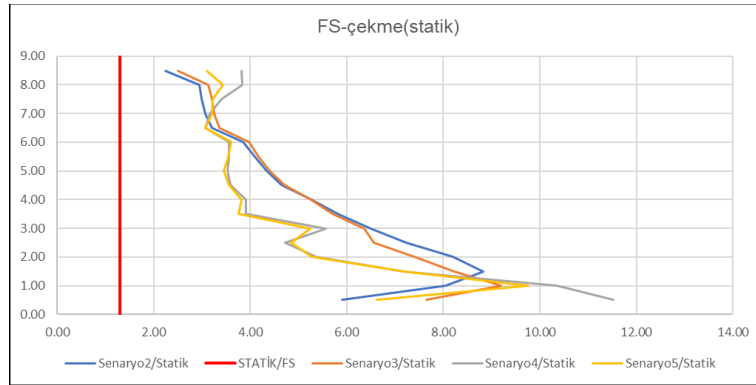


Şekil 5.4. Plaxis 2D analizleri senaryo-1 ve senaryo-2 sonuçları karşılaştırma özet tablo

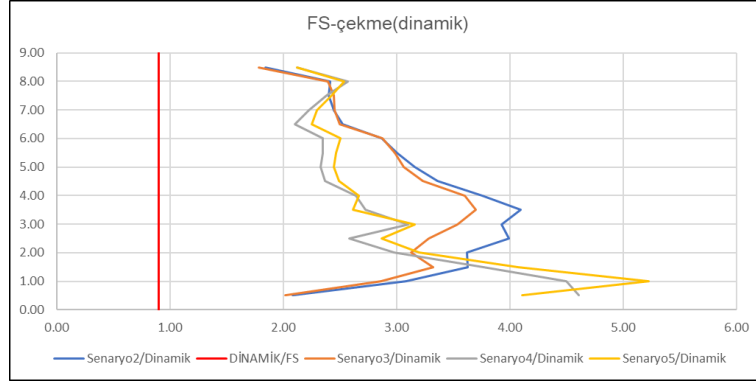


Şekil 5.5. Plaxis 2D analizleri senaryo-1 ve senaryo-2 çekme dayanımı güvenlik faktörü

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’deki sonuçlar incelendiğinde, dolgu malzemesi modelinin HS ve MC olması (Senaryo 2/3-Senaryo 4/5) geogridler üzerine gelen çekme gerilmelerinde önemli bir değişiklik yaratmamaktadır. Yüzey elemanı etkisine bakılacak olursa aynı zemin modeli olan Senaryo 2 ve 3’te (yüzey elemanı plate) geogrid üzerine gelen çekme gerilmeleri Senaryo 1 ve 4’te (yüzey elemanı volume element) oluşan çekme gerilmelerinden %35 oranında daha yüksektir. Yüzey elemanın volume element olarak modellenmesi geogrid üzerine gelen çekme gerilmelerini arttırmaktadır-Yüzey elemanı modelinin farklılaşması dinamik durum çekme gerilmeleri üzerinde daha fazla etkili olmuştur. H-2H/3 derinlik değerlerinde volume element model güvenli tarafta kalırken, 3H/4 derinlik değerinde plate model güvenli tarafta kalmıştır.

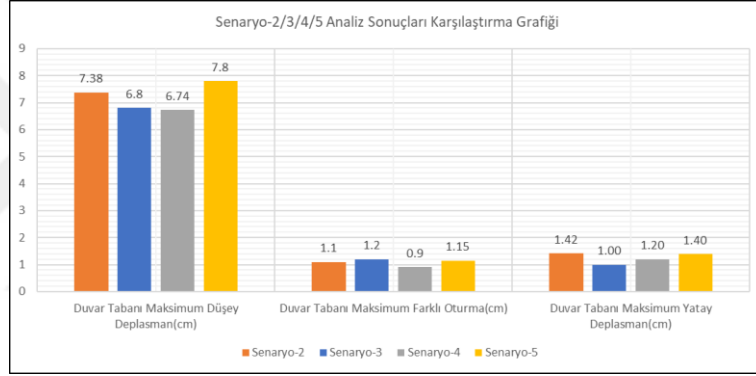


Şekil 5.6. Senaryo 2/3/4/5- Geogrid katmanları statik çekme dayanımı güvenlik sayısı



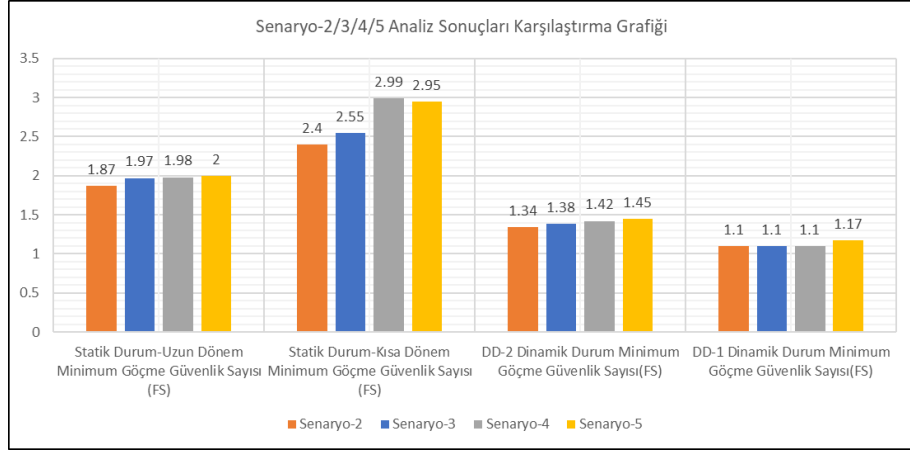
Şekil 5.7. Senaryo 2/3/4/5- geogrid katmanları dinamik çekme dayanımı güvenlik sayısı

Şekil 5.8’de verilen oturma miktarı analiz sonuçları incelendiğinde maksimum oturma Senaryo-5’te oluşmaktadır. Tüm senaryolarda meydana gelen oturma miktarları %10 ile %20 arasında değişmekle birlikte birbirine yakındır.



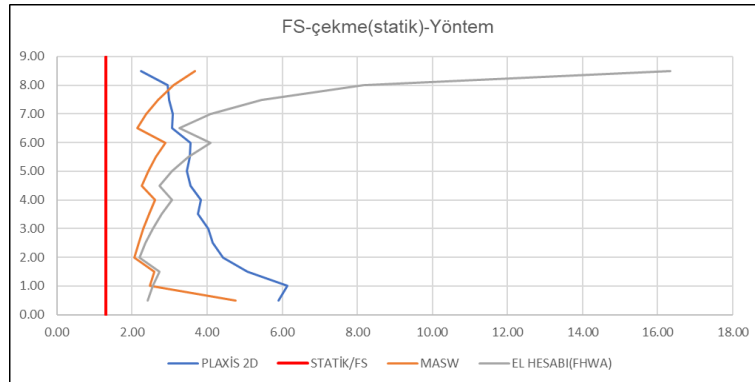
Şekil 5.8. Senaryo 2/3/4/5- analiz sonucu oturma miktarları özet grafik

Şekil 5.9’da verilen toptan göçme güvenlik analizlerine bakıldığında, toptan göçme açısından en güvenli durumu veren Senaryo-2 modeli olmuştur. Farklı durumlar için analiz sonuçlarında senaryo bazlı azalma ve artış genel olarak aynıdır. Statik ve dinamik durum farkının mevcut şartlar altında toptan göçme sayısına önemli derecede etkisi olmamıştır.

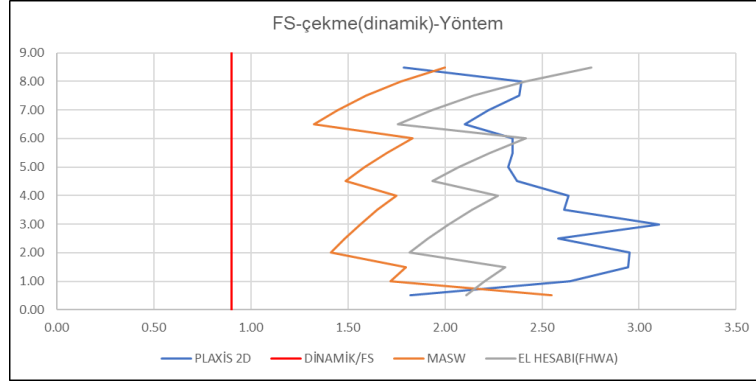


Şekil 5.9. Senaryo 2/3/4/5- analiz sonucu toptan göçme güvenlik sayıları özet grafik

Plaxis 2D programında yapılan 5 senaryo analiz sonuçlarından minimum değerler alınarak Plaxis 2D tasarım nihai değerleri elde edilmiştir. Bu değerler el hesabı ve limit denge analiz yöntemi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Geogridlere gelen statik çekme gerilmeleri tüm analiz metotları için Şekil 5.10'da verilmiştir. Geogridlere gelen dinamik çekme gerilmeleri tüm analiz metotları için Şekil 5.11'de verilmiştir. Statik ve dinamik durum için en yüksek güvenlik sayıları Plaxis 2D analiz sonuçlarında elde edilmiştir. Statik çekme dayanımında MASW-El hesabı sonuçları 1/6 H ile 5/9 H aralığındaki geogrid katmanları için yakın değerler elde edilmiştir. Dinamik durumda gelen çekme gerilmeleri alt tabakalara indikçe MASW analiz sonuçları ile diğer analiz sonuçları arasındaki fark açılmaktadır. Statik ve dinamik durum için geogrid çekme dayanımı açısından tüm derinlik değerleri için diğer yöntemlere göre %10-%60 oranında daha düşük güvenlik sayısı elde ederek ile MASW programı vermiştir.

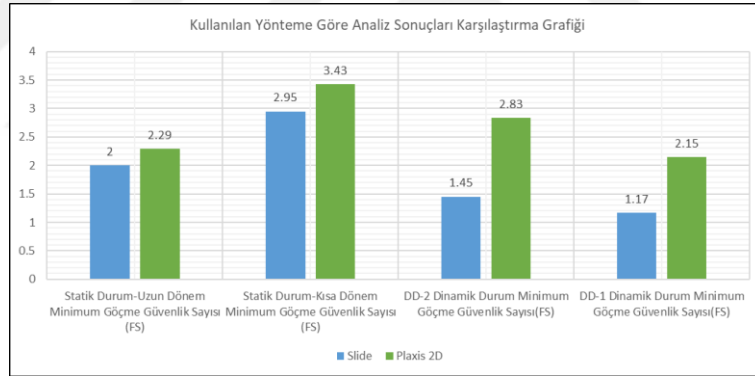


Şekil 5.10. Tüm yöntemler statik çekme dayanımı güvenlik sayısı



Şekil 5.11. Tüm yöntemler dinamik çekme dayanımı güvenlik sayısı

Plaxis 2D ve Slide programları toptan göçme analiz sonuçları Şekil 5.12’de verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında Plaxis 2D programı özellikle dinamik durumda slide programına göre %45 daha düşük güvenlik sayıları vermektedir. Slide programından elde edilen güvenlik sayıları dış stabiliteyi içermektedir. Plaxis 2D programından alınan güvenlik sayıları iç ve dış stabiliteyi içermektedir. Farklılığın bu durumdan kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.12. Plaxis 2D ve Slide programları toptan göçme güvenlik sayısı karşılaştırılması

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, örneğin geogrid çekme dayanımı için en güvenli sonucu MASW verirken, toptan göçme güvenlik sayısı analizinde en güvenli sonucu Plaxis 2D programı vermektedir. Plaxis model senaryoları içinde de durumlara ve geogrid katmanlarına göre güvenli durumu temsil eden model değişmektedir. Nitelikli geoteknik tasarım için tek bir metot kullanılmamalı, birden çok metot kullanılarak en güvenli durum elde etmeye çalışılmalı ve nihai tasarım gerçekleştirilmelidir.

KAYNAKÇA

- Abdelmawla, A. (2017). *Characterization of uniaxial geogrid pullout mechanism for calcareous sand backfill*. Master of Science. Cairo University, Faculty of Engineering, Department of Construction Engineering.
- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2001). *Slope stability and stabilization methods*. New York: Wiley.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1996). *LRFD bridge design specifications* (Publication No. 5.8).
- Babasaki, R., Suzuki, K., Suzuki, Y., & Fujii, N. (1991). Cell type foundation improved by deep cement mixing method against liquefaction: Centrifugal vibration tests on cell type foundation. *Proceedings of the 26th Soil Engineering Research Conference*, Nagano, Japan.
- Bentley Systems. (2024). *PLAXIS 2D Material Models Manual*.
- Berg, R. R., Christopher, B. R., & Samtani, N. C. (2009). *Design of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes – Volume I* (FHWA GEC 011-Vol I). Federal Highway Administration.
- Berg, R. R., Christopher, B. R., & Samtani, N. C. (2009). *Design of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes – Volume II* (FHWA GEC 011-Vol II). Federal Highway Administration.
- Boulanger, R. W. (2012). Shear reinforcement effects for liquefaction mitigation. *PEER Annual Meeting*, Berkeley, CA, October 26-27, 2012, UC Davis.
- Boulanger, R. W., & Shao, L. (2021). Liquefaction mitigation with deep mixing. *Proceedings, Deep Mixing 2021*, Deep Foundations Institute, 1146-1202.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2001). *Concepts and applications of finite element analysis* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Çetin Karagül, B. (2007). *Yol dolgularının geogrid kullanılarak iyileştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Çiçek, E., Güler, E., & Yetimoğlu, T. (2015). Sedde şevlerinin geosentetik ile donatılmasının stabiliteye etkileri. *EÜFBED - Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 100-114.
- Erol, A. O., & Kuruoğlu, Ö. (2023). *Derin karıştırma yöntemi*. Ankara: Yüksel Proje.
- European Committee for Standardization (CEN). (2004). *EN 1997-1: Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules*.
- Ishii, I., Towhata, I., Hiradate, R., Tsukuni, S., Uchida, A., Sawada, S., & Yamauchi, T. (2017). Design of grid-wall soil improvement to mitigate soil liquefaction damage in residential areas of Urayasu. *Journal of Japanese Society of Civil Engineers*, 5, 27-44.,
- Janbu, N. (1998). Soil behavior in large deformation states. *Keynote lecture, ASCE Geotechnical Special Publication*, No. 75.

- Kesim, R. S., 2007. *Donatılı zemin yapılarının sistem davranış özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Kitazume, M. (2016). Applications of centrifuge modeling to liquefaction mitigation techniques. In *Proceedings of Eurofuge 2016: 3rd European Conference on Physical Modelling in Geotechnics, International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Koerner, R. M. (2005). *Designing with geosynthetics* (5th ed.). Pearson Education, Inc.
- Koga, Y., Matsuo, O., Enokida, M., Ito, K., & Suzuki, Y. (1988). Shaking table test on DMM method as a countermeasure against liquefaction of sandy ground (Part 2): Effects of improved ground in grid configuration against liquefaction. In *Proceedings of the 23rd Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 1019–1020).
- Lim, C. S., & Tan, S. M. (2005). Collapse of a reinforced soil segmental retaining wall. In *Proceedings of the IEM-GSM Oktoberforum 2005*.
- Najari, Y. (2017). *Şev ve seddelerde geogridlerin stabiliteye etkilerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. (2002). *Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan*.
- Özköl, O. (2006). *Geosentetik donatılı istinat yapılarının tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- PLAXIS 2D- Tutorial manual (Version 20).
- Polat, A. (2020). *Geosentetik donatılı istinat duvarı üzerine parametrik çalışma*. Yüksek Lisans Tezi. T.C. Balıkesir Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Qian, Y., Han, J., Pokharel, S. K., & Parsons, R. L. (2010). Experimental study on triaxial geogrid-reinforced bases over weak subgrade under cyclic loading. In *GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design* (GSP 199).
- Rocscience Inc. (2024). *Slide v6 user's manual*.
- Sayed, A., Salam, M. Z. E. I., Roy, S., & Rahman, M. T. (2016). Effect of moisture content on the tensile strength of jute geotextile. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*.
- Taylor, T. P., Collin, J. G., Boyle, S., Fishman, K., & Han, J. (2023). *Design and construction of mechanically stabilized earth (MSE) walls* (Report No. FHWA-HIF-24-002). Federal Highway Administration.
- Tensar. (2009). *Tensar geosynthetics in civil engineering*. Blackburn: Tensar International Ltd.
- Türkiye. (2018). *Türkiye bina deprem yönetmeliği*. Resmi Gazete, (30364), 18 Mart 2018.
- Türkiye. (2018). *Türkiye deprem tehlike haritası*. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.

- Türkiye. (2020). *Türkiye karayolları ve demiryolları tünelleri ile diğer zemin yapıları deprem yönetmeliği*. Resmi Gazete, (31266), 6 Ekim 2020.
- U.S. Navy. (1982). *NAVFAC DM 7.1: Soil mechanics*. Naval Facilities Engineering Command Design Manual. Washington, D.C.
- Vashi, R., Patel, A., & Patel, K. (2017). A parametric study on the behaviour of geogrid reinforced earth retaining wall. In *Proceedings of the International Conference on Research and Innovations in Science, Engineering & Technology*.
- Wulandari, P. S., & Tjandra, D. (2006). Determination of optimum tensile strength of geogrid reinforced embankment. In *Proceedings of the International Civil Engineering Conference "Towards Sustainable Civil Engineering Practice,"* Surabaya, August 25-26, 2006.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). *The finite element method: Its basis and fundamentals* (7th ed.). Butterworth-Heinemann.
- http-1:<https://istinatduvari.com/makaleler/istinat-duvari-cesitleri> (Erişim Tarihi: 05.08.2024)
- http-2:<https://reinforcedearth.com/content/uploads/2018/03/Sea-Tac-Airport-28Foster-Project29-Feb.-62C-06-019-28229-535x402.jpg> (Erişim Tarihi: 05.08.2024)
- http-3:<https://industrialplastics.com.au/geogrid-types-and-their-differences/> (Erişim Tarihi: 05.08.2024)
- http-4: <https://reinforcedearth.com/content/uploads/2018/03/RS-Connection.jpg/> (Erişim Tarihi: 05.08.2024)
- http-5: <https://www.geoart.com.tr/urunler/geotekstil> (Erişim Tarihi: 05.08.2024)
- http-6:<https://www.ekstrudegeogrid.com/wpcontent/uploads/2024/01/geogrid.jpg> (Erişim Tarihi: 05.08.2024)
- http-7:<https://happho.com/geogrids-manufacturing-process-applications-advantages/> (Erişim Tarihi: 05.08.2024)

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0001-8135-6065

Ad Soyad : Mert TOS

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2021, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- 2023, Geoteknik Tasarım Mühendisi, TUNGE PROJE LTD. ŞTİ.

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- A Sanding Technique to Improve the Pullout Behavior of Geogrids, Mert TOS, Nesil ÖZBAKAN, Burak EVİRGİN, International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2023.
- The effect of the Geometrical Properties of Geocell Reinforcements between a Two-Layered Road Structure under Overload Conditions, Burak EVİRGİN, Haili OĞUZHAN KARA, Muhammed SEFA UCUN, Asker Alp GÜLTEKİN, Mert TOS, Volkan ÖZTÜRK, Case Studies in Construction Materials, 2024.
- Liquefaction mitigation using sodium polyacrylate: Large-scale in-situ applications with a unique grouting apparatus, Burak EVİRGİN, Nesil ÖZBAKAN, Asker Alp GÜLTEKİN, Mert TOS, Mustafa TUNCAN, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024.
- Industrial Design-No:2022 013922- Special Injection Apparatus for Liquefaction
- Effect of Surface Sanblasting on the Pull-out Resistance of Geogrids, Mert TOS, Burak EVİRGİN, 6th International Mediterranean Science and Engineering Congress. 2021.

Mesleki Birlik/DerneK/Kuruluş Üyelikleri:

- 2023, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Derneği, İstanbul.