

**GEOSENTETİKLERLE GÜÇLENDİRİLEN MARJİNAL
DOLGULARIN STATİK YÜKLER ALTINDA
PERFORMANSI**

EMRAH ASLAN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GEOSENTETİKLERLE GÜÇLENDİRİLEN MARJİNAL DOLGULARIN
STATİK YÜKLER ALTINDA PERFORMANSI**

Emrah ASLAN
0000-0002-4315-1904

Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA– 2021

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GEOSENTETİKLERLE GÜÇLENDİRİLEN MARJİNAL DOLGULARIN STATİK YÜKLER ALTINDA PERFORMANSI

Emrah ASLAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER

Geosentetik takviyeli toprak istinat duvarları (GRS-RW), 1960'ların sonundan bu yana dünya çapında, 1980'li yıllardan itibaren de ülkemizde yaygın olarak uygulanmaktadır. GRS-RW ekonomik oluşları, imalatlarının hızlı yapılması, statik ve dinamik yükleri altında oluşabilecek büyük deplasmanları ve yükleri tolere edebilmesini sağlayan esnek davranabilme özellikleri ve estetik görünüşleri sayesinde sıklıkla tercih edilmektedir. Bu tip duvarlarda genellikle drenajlı oluşu nedeni ile granüler dolgular kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise granüler dolgulara alternatif olarak marjinal dolgu kullanılarak geosentetik takviyeli toprak istinat duvarlarının statik yükler altındaki performansı sonlu elemanlar yazılım programı, Plaxis 2D ile incelenmiştir. İlk olarak, literatürde Yang ve ark. (2012) tarafından bildirilen iyi enstrümanlı tam ölçekli takviyeli toprak duvar uygulamasından elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar analizi ve analitik yöntem sonuçları karşılaştırılarak sayısal modelin doğrulama analizi yapılmıştır. Doğrulama analizinde, tam ölçekli yapıların uygulamasının sonuçlarının analiz sonuçlarıyla uyduğu görülmektedir.

Daha sonra, marjinal dolgu duvarlar üzerinde parametrik çalışmalar yapılmıştır. Marjinal dolgunun parametrik özellikleri, belirlenen lokasyonda yapılan sondaj çalışmalarından elde edilen SPT deneylerinden alınmıştır. Kaplama ve takviye özellikleri ise literatürde kullanılan değerlerden uyarlanmıştır. Marjinal dolgulu duvarların parametrik çalışma sonuçlarına göre takviye sertliğinin artmasıyla, marjinal dolgulu duvarlar granül dolgulu duvarlara göre daha güvenli çıkmıştır. Ek olarak, marjinal dolgu için sonlu elemanlar analizinde hiçbir kesme gerilmesi elde edilmemiştir. Bu da incelenen modeller için statik yüklerin etkisi altında göçme oluşmadığını göstermektedir. Bunun yanında seçilen değişkenlere göre ekonomik yönden makul olan modeli belirlemek için maliyet analizi yapılmıştır. Yapılan gözlemlere dayanarak, geogrid takviyeli toprak duvarlarda daha sert geogridlerin kullanılması ve marjinal dolguların drenaj önlemlerin sağlanması halinde, marjinal dolguların uygulanabilir seçeneklerden biri olabileceği bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Geosentetik, Marjinal Dolgu, Statik yükler, Sonlu Elemanlar Analizi, Plaxis

2021, xi +123 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

PERFORMANCE OF MARGINAL FILLERS REINFORCED WITH GEOSYTHETICS UNDER STATIC LOADS

Emrah ASLAN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Yeşim Sema ÜNSEVER

Geosynthetic reinforced soil retaining walls (GRS-RW) have been widely applied worldwide since the late 1960s and in our country since the 1980s. GRS-RW is preferred highly due to its economic features, rapid production, flexibility to tolerate large displacements and loads that may occur under static and dynamic loads, and aesthetic appearance. Generally, granular fills are used for that kind of walls due to the drainage properties of the soil. In this study, the performance of geosynthetic reinforced soil retaining walls with marginal fills under static loads was investigated as an alternative to granular fills by using the finite element software, Plaxis 2D. First, the results obtained from the well-instrumented full-scale reinforced soil wall test by Yang et al. (2012) was used for the validation. For that purpose, finite element analysis and analytical method results were compared with the structure adapted from the literature. As it is seen in the validation analysis, the experimental results of full-scale structures agree with the analysis results.

After that, parametric study was performed on marginal fills. The parametric properties of the marginal fill are taken from the SPT tests obtained from the drilling studies at the determined location. Coating and reinforcement properties were adapted from the values used in the literature. According to the parametric study results of marginally filled walls, it was found that marginal fills to be safer than granule filled walls with increasing reinforcement hardness. Moreover, no shear stress was obtained in the finite element analysis for the marginal fill. This shows that there is no collapse under the static loads for the examined models. In addition, a cost analysis was carried out to determine the economically reasonable model by using the selected variables in the models. Based on the observations made, stiffer geogrids and marginal fills in geogrid reinforced soil walls have been found to be one of the viable options if drainage measures are provided.

Key words: Geosynthetic, Marginal Filler, Static loads, Finite Element Analysis, Plaxis

2021, xi +123 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam süresince bana yol gösteren, çalıőmamın verimli bir Şekilde sonuca ulaşmasına bilgi ve tecrübeleriyle katkıda bulunan danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER'e teőekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans hayatımda ve tez çalıőmam süresince her türlü zorluk ve sıkıntıda bana destek olan ve yardım eden aileme ve sevdiklerime sonsuz teőekkürlerimi iletmek isterim.

Emrah ASLAN
07/10/2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ÖZET..... | i |
| ABSTRACT..... | ii |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ..... | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | ix |
| ÇİZELGELER DİZİNİ..... | xi |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI..... | 3 |
| 2.1. Geosentetik Takviyeli Toprakarme Duvarlar..... | 4 |
| 2.2. Takviyeli Toprakarme Duvarların Temel Prensipleri..... | 8 |
| 2.3. Göçme Modları..... | 13 |
| 2.3.1. İç stabilitede donatıların çekme kuvvetleri ve donatı sökülme tahkiki..... | 13 |
| 2.3.2. İç stabilitede donatıların kopma tahkiki..... | 18 |
| 2.3.3. Dış stabilitede tahkikler..... | 19 |
| 2.4. Güvenlik Sayıları..... | 20 |
| 2.5. Takviyeli Toprak Dolgu Duvar Elemanları..... | 22 |
| 2.5.1. Mekanik stabilize toprak dolgu..... | 23 |
| 2.5.2. Takviye birimleri..... | 25 |
| 2.5.3. Kaplama birimleri..... | 26 |
| 2.5.4. Temel toprağı..... | 29 |
| 2.6. Geosentetikler..... | 30 |
| 2.6.1. Geosentetiklerin özellikleri ve işlevleri..... | 32 |
| 2.6.2. Geosentetiklerin işlevleri..... | 38 |
| 2.7. Geosentetiklerle Güçlendirilmiş Toprakarme Yapılarının Tarihsel Gelişimi..... | 41 |
| 2.8. Geosentetiklerle Takviyeli Toprakarme Yapıların Avantaj ve Dezavantajları..... | 41 |
| 2.9. Toprakarme Uygulamaları..... | 43 |
| 2.10. Geosentetik Donatılı Çalışmalar..... | 44 |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM..... | 55 |
| 3.1. Çözüm Yöntemleri..... | 55 |
| 3.2. Sayısal Yöntemler..... | 56 |
| 3.3. Plaxis Programının Genel Tanımı..... | 58 |
| 3.4. Plaxis Bilgisayar Programı Kullanılarak GRS Tutma Yapılarının Sayısal Modelin Geliştirilmesi..... | 59 |
| 3.5. Zemin Modelleri..... | 60 |
| 3.5.1. Doğrusal/lineer elastik model (LE)..... | 60 |
| 3.5.2. Mohr-coulomb modeli (MC)..... | 60 |
| 3.6. Plaxis Programı ile Tasarım..... | 61 |
| 3.7. Tam Ölçekli Test Verileri ile Model Doğrulanması..... | 64 |
| 3.8. Analitik Yöntemlerle Karşılaştırma..... | 68 |
| 3.9. Göçme Mekanizması Analizi..... | 72 |
| 3.9.1. Model hakkında genel bilgi..... | 73 |
| 3.9.2. Plaxis göçme analizinde kullanılan elemanların malzeme özellikleri..... | 76 |
| 3.9.3 Model tasarımında kademeli inşaat aşamaları..... | 77 |
| 3.10. Göreli Maliyet..... | 78 |
| 4. BULGULAR ve TARTIŞMA..... | 79 |
| 4.1. Tam Ölçekli Model Doğrulama Sonuçları..... | 79 |
| 4.1.1. Düşey toprak basıncı..... | 79 |

| | |
|-----------------------------------------------|-----|
| 4.1.2. Yanal toprak basıncı..... | 82 |
| 4.1.3. Takviye gerilimleri..... | 87 |
| 4.2. Analitik Karşılaştırma Sonuçları..... | 88 |
| 4.3. Göçme Mekanizması Analizi Sonuçları..... | 90 |
| 4.3.1. Dolgu tipinin etkisi..... | 93 |
| 4.3.2. Takviye sertliğinin etkisi..... | 93 |
| 4.3.3. Kaplama tipinin etkisi..... | 93 |
| 4.4. Maliyet Analiz Sonuçları..... | 94 |
| 5. SONUÇ..... | 97 |
| KAYNAKLAR..... | 100 |
| EKLER..... | 104 |
| EK 1..... | 105 |
| EK 2..... | 118 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 123 |

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| Simgeler | Açıklama |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A_s | Toprak elementinin alanı |
| $(T_{yxr})_{max}$ | Güçlendirilmiş zeminin maksimum toplam kayma gerilmesi |
| θ_{max} | Zeminin maksimum kayma direnci |
| $(T_{yx})_{max}$ | Zemin tarafından sağlanan maksimum toplam kayma gerilmesi |
| K_r | Duvar üst seviyesinden alt seviyesine kadar olan mesafenin (Z) bir fonksiyonu |
| σ_v | Düşey gerilme |
| R_c | Kapsama oranı |
| b | Donatıya ait birim genişlik |
| S_h | Donatıların merkezleri arasındaki yatay uzaklık |
| L_b | Sürşarj yükünün efektif genişlik |
| F_H | Etkiyen yatay kuvveti |
| T_a | İzin verilen maksimum çekme kuvvet |
| F^* | Kopma dayanım katsayısı |
| L_a | Uzayamayan donatılar için aktif bölge şerit boyu |
| E | Elastik modülü (Pa) |
| EA | Elastik aksenal sertlik (N/m) |
| H | Duvar yüksekliği (m) |
| K_a | Yatay aktif toprak basınç katsayısı (boyutsuz) |
| K_0 | Hareketsiz durumda yatay basınç katsayısı (boyutsuz) |
| L | Takviye uzunluğu (m) |
| S_v | Donatı dikey aralığı (m) |
| a | Sabit katsayı |
| β | Sabit katsayı |
| c | Toprak kohezyonu (kPa) |
| ν | Poisson oranı (boyutsuz) |
| d | Sabit katsayı |
| D_{tmax} | Takviye yük dağıtım faktörü (boyutsuz) |
| GS | Güvenlik Sayısı |
| i | Sayaç (1,2,3... n) |
| n | Duvar bölümündeki toplam takviye tabakası sayısı |
| J | Takviyenin çekme modülü (kN/ m) |
| h_{eff} | Eşdeğer yükseklik |
| K_{abh} | Duvar yüzü meyilli için hesaplanan aktif toprak basınç katsayısının yatay bileşeni (boyutsuz) |
| K_{ah} | Aktif toprak basınç katsayısının yatay bileşeni (boyutsuz) |
| K_{avh} | Dikey duvar için aktif toprak basınç katsayısının yatay bileşeni (boyutsuz) |
| pa | 101 kPa (atmosferik basınç) |
| S | Duvarın üst kısmının üzerindeki ortalama toprak sürşarj derinliği veya eşdeğer yükseklikte tekdüze sürşarj basıncı (m) |
| S_{global} | Global donatı sertlik değeri (kN/m ²) |

| | |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| S_i | Birim yüz alanı (duvarın birim uzunluğu başına donatı dikey aralığı (m) |
| S_{local} | Yerel donatı sertlik değeri (kN/m ²) |
| S_r | Duvar için global donatı sertliği (kN/m ²) |
| T, T_{max} | i katmanında ölçülen maksimum, tasarım güçlendirme yükü (kN/m) |
| T_i | i takviye tabakası için çekme kapasitesi (kN/m) |
| T_{max} | Bir takviye katmanındaki maksimum çekme yükü (kN/m) |
| T_{mxmx} | Duvardaki katmanlardan gelen maksimum takviye yükü (kN/m) |
| z | Duvar yüzünde duvarın tepesine göre donatı seviyesine derinlik (m) |
| z_i | Duvarın üstünden i takviye tabakasına derinlik (m) |
| Φ_{fb} | Yüzey meyilli faktörü (boyutsuz) |
| Φ_{fs} | Yüz sertlik faktörü (boyutsuz) |
| Φ_g | Global sertlik faktörü (boyutsuz) |
| Φ_l | Yerel sertlik faktörü (boyutsuz) |
| ϕ | Zeminin sürtünme açısı (derece) |
| ϕ_{ps} | Zeminin tepe düzlem gerinim sürtünme açısı (derece) |
| ϕ_{tx} | Tepe üç eksenli sürtünme açısı (derece) |
| γ | Toprağın birim ağırlığı (kN/m ³) |
| σ_h | Bağımlı alan üzerine etki eden yanal toprak basıncı (kN/m ²) |
| ω | Toprağın genişleme açısı (derece) |
| ΣM_{sf} | Sonlu elemanlarda kullanılan indirgeme faktörü (boyutsuz) |
| F_i | Takviyedeki Toplam Donatı Yüğü |
| FS_{ta} | Takviye katmanındaki statik Takviye yükü (bileşeni) |
| FS_{bc} | Taşıma kapasitesi Göçmesine Karşı Güvenlik Sayısı (boyutsuz) |
| FS_{cs} | Bağlantı Göçmesine Karşı Güvenlik Sayısı (boyutsuz) |
| FS_{gl} | Küresel stabilite Göçmesine karşı güvenlik Sayısı (boyutsuz) |
| FS_{os} | Aşırı Takviye Gerilimine Karşı Güvenlik Sayısı (boyutsuz) |
| FS_{ot} | Tabanın Devrilmesine Karşı Güvenlik Sayısı (boyutsuz) |
| FS_{otc} | Tepenin Devrilmesine Karşı Güvenlik Sayısı (boyutsuz) |
| FS_{oti} | Geleneksel GRS yapıları için iç devrilmeye karşı güvenlik Sayısı (boyutsuz) |
| FS_{otl} | Güçlendirilmiş GRS Yapıları İçin Yerel Devrilmeye Karşı Güvenlik Sayısı (boyutsuz) |
| FS_{po} | Çekilmeye Karşı Güvenlik Sayısı (boyutsuz) |
| FS_{sc} | Arayüz Kesme Göçmesine Karşı Güvenlik Sayısı (boyutsuz) |
| FS_{sl} | Taban Kaymasına Karşı Güvenlik Sayısı (boyutsuz) |
| FS_{sli} | İç Kaymaya Karşı Güvenlik Sayısı (boyutsuz) |

| Kısaltmalar | Açıklama |
|--------------------|------------------------------------------------|
| AASHTO | Amerikan Karayolları Birliği |
| ASTM | Amerikan Test Malzemeleri Derneği |
| FHWA | Federal Otoyol İdaresi |
| GCL | Geosentetik kil gömlekleri |
| GEC | Geosentetik Kapsüllenmiş Taş Sütun |
| GRS-RW | Geosentetik Takviyeli Toprak İstinat Duvarları |
| GRS | Geosentetik Takviyeli Toprak |
| MSE | Mekanik Stabilize Toprak |
| MSEW | Mekanik Stabilize Toprak Duvar |
| MBW | Kuru döküm modüler blok duvar |
| PVD | Prefabrik Dikey Drenler |
| PP | Polipropilen |
| PET | Polietilen tereftalat |
| PE | Polietilen |
| RSS | Güçlendirilmiş toprak şevler |
| USCS | Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 2.1. Temel istinat duvarları tipleri | 4 |
| Şekil 2.2. Temsili takviyeli toprakarme yapı | 5 |
| Şekil 2.3. Temsili GRS-RW uygulamaları (a) istinat duvarı; (b) erişim rampası; (c) sahil yapısı; (d) köprü kenar ayağı | 6 |
| Şekil 2.4. Geosentetik malzemeler ile şev stabilizasyonunda tabaka teşkili (a) eşit uzunluk ve eşit aralıkta, (b) eşit uzunluk ve farklı aralıkta, (c) eşit uzunluk, eşit aralıkta ve kısa tabakalarla, (d) farklı uzunluk ve eşit aralıkta kısa tabakalar..... | 7 |
| Şekil 2.5. (a) Takviyesiz ve (b) takviyeli toprak elemanında gerilme çizgileri ve gerilmeler | 9 |
| Şekil 2.6. Takviyesiz bir zemin elemanındaki kayma gerilmeleri | 10 |
| Şekil 2.7. Güçlendirilmiş bir zemin elemanındaki kayma gerilmeleri | 10 |
| Şekil 2.8. Takviyelerde çekme kuvvetleri ve şematik maksimum çekme kuvveti hattı . | 12 |
| Şekil 2.9. İç Stabilite Kaybı; (a) Donatı Sökülmesi (Sıyrılma), (b) Donatı Kopması..... | 13 |
| Şekil 2.10. Şerit tiplerine göre yatay gerilme oranı-yükseklik ilişkisi..... | 14 |
| Şekil 2.11. Şevli duvarlarda donatı gerilmeleri..... | 16 |
| Şekil 2.12. Sürşarj tipine göre düşey gerilme artışı | 16 |
| Şekil.2.13. Yatay yükler altında gerilme artışı parametreleri | 17 |
| Şekil 2.14. Dış Stabilite Kaybı; (a) Kayma, (b) Devrilme, (c) Taşıma Gücü, (d) Taban Göçmesi..... | 20 |
| Şekil 2.15. Geosentetik donatılı zemin dayanma duvarı..... | 22 |
| Şekil 2.16. Temsili çelik takviye örnekleri: (a) Çelik kayışlar, (b) Çelik hasırlar | 25 |
| Şekil 2.17. Temsili geosentetik takviye örnekleri: (a) Geogridler, (b) Geotekstilller..... | 26 |
| Şekil 2.18. Kaplama birimleri | 27 |
| Şekil 2.19. Modüler blok kaplama Birimleri | 28 |
| Şekil 2.20. Temsili geosentetik malzemeler | 31 |
| Şekil 2.21. Yaygın kullanılan polimerler; geotekstilller ve SEM görüntüsü | 33 |
| Şekil 2.22. Tek ve çift yönlü geogridler | 35 |
| Şekil 2.23. Geosentetik kil (GCL) | 36 |
| Şekil 2.24. Geosentetiklerin fonksiyonları..... | 38 |
| Şekil 2.25. Donatılı toprak uygulamaları: a) İstinat duvarı, b) Köprü yanında merdiven, c) Köprü ayağı, d) Yol altı menfez, (e) Metal şeritli imalat, f) Köprü ayağı..... | 43 |
| Şekil 3.1. Tam ölçekli testlerden kabul edilen model geometrisi | 62 |
| Şekil 3.2. Parametrik çalışmada kullanılan geometrik modelin kesiti | 62 |
| Şekil 3.3. Amerikan şartnamesi kriteri için temsili model..... | 63 |
| Şekil 3.4. Doğrulan modelin tipik sonlu elemanlar ağı..... | 66 |
| Şekil 3.5. Dolgu inşaatının ilerlemesi | 67 |
| Şekil 3.6. Ölçülen Tmax değerlerinin normalleştirilmiş dağılımı..... | 71 |
| Şekil 3.7. Duvarın altında normalize derinliğin bir fonksiyonu olarak normalize ölçülen yükseklik | 71 |
| Şekil 3.8. İncelenen geometrik modelin tipik sonlu elemanlar ağı | 75 |
| Şekil 3.9. Monoblok prekast kaplamalı duvar modelinin yüzey kaplama kesiti | 75 |
| Şekil 4.1. Düşey basınç ölçerlerin duvar yüzey kaplamasından itibaren mesafeleri | 79 |
| Şekil 4.2. 1,5 m, 2,4 m ve 3,3 m lokasyonlarındaki düşey toprak basıncının arazide ölçülen değerler ile sayısal analiz sonuçların zamanla ilişkisi..... | 81 |
| Şekil 4.3. 4,2 m ve 5,0 m lokasyonlarındaki düşey toprak basıncının arazide ölçülen değerler ile sayısal analiz sonuçların zamanla ilişkisi..... | 81 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.4. Son aşamada temel seviyesindeki lokasyonlarda toplam düşey basınçlar (σ_{yy}) | 82 |
| Şekil 4.5. Yatay basınç ölçerlerin temelden itibaren yükseklikleri..... | 82 |
| Şekil 4.6. 0,3 m, 1,9 m ve 2,7 m lokasyonlarındaki yatay toprak basıncının arazide ölçülen değerler ile sayısal analiz sonuçların zamanla ilişkisi..... | 84 |
| Şekil 4.7. 3,5 m ve 4,5 m lokasyonlarındaki yatay toprak basıncının arazide ölçülen değerler ile sayısal analiz sonuçların zamanla ilişkisi..... | 84 |
| Şekil 4.8. İnşaatın son aşamasında dolgu yüksekliği ile yanal toprak basıncı dağılımı.. | 85 |
| Şekil 4.9. Son aşamada artan yükseklikle farklı lokasyonlarda toplam yatay basınçlar (σ_{xx})..... | 86 |
| Şekil 4.10. Doğrulama modelinin şekil değiştirmiş hali | 86 |
| Şekil 4.11. Takviye gerilmelerinin inşaat aşamalarına göre ölçülen ve sayısal analiz değerlerinin karşılaştırılması..... | 87 |
| Şekil 4.12. Takviye gerilmelerin arazide ölçülen değerlerin AASHTO yöntemi ile dolgu yüksekliğine bağlı karşılaştırılması..... | 89 |
| Şekil 4.13. Takviye gerilmelerin arazide ölçülen değerler ile K-rijitlik yöntemi ve sayısal analizin dolgu yüksekliğine bağlı karşılaştırılması | 89 |
| Şekil 4.14. İstinat yapısında takviye sertliği ve güvenlik sayısı karşılaştırılması | 91 |
| Şekil 4.15. Marjinal dolgu-Esnek kaplama (A2-A4-A6) modellerinin güvenlik sayısı ve yerdeğiştirme bağlantısı | 92 |
| Şekil 4.16. Marjinal dolgu-Rijit kaplama (A8-A10-A12) modellerinin güvenlik sayısı ve yerdeğiştirme bağlantısı | 92 |
| Şekil 4.17. Model kombinasyonların takviye sertliği ve maliyet karşılaştırılması | 96 |
| Şekil 4.18. Her bir modelin maliyet karşılaştırılması | 96 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1. GRS Yapıların Tasarımı için Önerilen Minimum Güvenlik Sayıları | 21 |
| Çizelge 2.2. Polimer malzemelerin özellikleri | 34 |
| Çizelge 2.3. Geosentetik tipleri ve fonksiyonları | 40 |
| Çizelge 3.1. Zemin problem çözüm yöntemleri | 55 |
| Çizelge 3.2. Plaxis analizleri için kontrol kriterleri | 64 |
| Çizelge 3.3. Üretici tarafından sağlanan geogrid donatıların özellikleri | 65 |
| Çizelge 3.4. Kürlenme yaşı <1 gün olan kireçle işlenmiş kohezif toprağın mekanik özellikleri | 66 |
| Çizelge 3.5. Plaxis model mesh düğüm sayısı | 67 |
| Çizelge 3.6. Parametrik çalışmada kullanılan toprakların özellikleri | 74 |
| Çizelge 3.7. Plaxis model mesh düğüm sayısı | 76 |
| Çizelge 3.8. Parametrik çalışmada kullanılan takviye ve yüzey birimlerin özellikleri .. | 76 |
| Çizelge 3.9. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan model kombinasyonları | 77 |
| Çizelge 4.1. Dolgu yüksekliği, zaman ve duvar yapım aşamaları arasındaki bağlantı... | 80 |
| Çizelge 4.2. Dolgu yüksekliği ile duvar yapım aşamaları arasındaki bağlantı | 83 |
| Çizelge 4.3. Modellerin güvenlik sayısı sonuçları | 90 |
| Çizelge 4.4. Modellerin maliyet analiz sonuçları..... | 94 |

1. GİRİŞ

Geniş bir yelpazede, güvenli ve ekonomik çözümler sunan geosentetikler günümüzde inşaat mühendisliği uygulamalarında çok yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Geosentetik içeren çözümler çoğu kez maliyet, uygulama kolaylığı ve süresi açısından avantajlar sağlamaktadır. Günümüzde geosentetik kullanımına birçok yapı ihtiyaç duymaktadır. En basit bir şantiye yolundan, trenlerin saatte 500 km süratle gittikleri tren hatlarına, küçük sulama göletlerinden, dev barajlara, bina altında zemin ıslahından istinat yapılar teşkiline kadar her sahada geosentetikler giderek daha da yaygın olarak kullanılmaktadır. Geosentetik takviyeli toprak istinat duvarların performansı, literatürde Guler ve ark. (2012); Alhadj Chehade ve ark. (2019); Yu ve ark. (2016); Zarnani ve Bathurst (2009); Yu ve Bathurst (2017); Ling ve ark. (2005); Hatami ve Bathurst (2005); Guler ve ark. (2007); Cetin ve ark. (2006); Jiang ve ark. (2020) tarafından çalışılmıştır.

Dünyanın bazı bölgelerinde dolgudan kaynaklanan geleneksel sürtünme direncinin akut eksikliği, bu ülkelerdeki güçlendirilmiş toprak yapılar da marjinal (kohezif) zeminlerin kullanılmasına yol açmıştır. Bununla birlikte, kohezif ve atık dolguların kullanımıyla ilgili uygulamalar, inşaat sırasında dolguda oluşan aşırı boşluk suyu basınçlarının yüksek yatay basınçlar yarattığı, etkili gerilmenin gelişmesini engellediği ve dolayısıyla toprak ile takviye arasındaki bağı azalttığı sonucuna varmıştır. Drenajın meydana gelebileceği duvar yüzeyine yakın yerlerde zamanla bu sorunlar çözümlenebilir. Bu nedenle çözüm, takviyenin yanında bir drenaj tabakası kullanmak olmuştur. Bununla birlikte, marjinal dolgu kullanımının ilgili kesimlerce kabul görmesi, hala hidrolik geçirgenliği ve başlangıçtaki su içeriği ile sınırlıdır, bu nedenle pratikte kullanılan malzeme arasındaki boşluk oranını ciddi şekilde sınırlandırmaktadır (Glendinning ve ark. 2005). Marjinal dolguların parametrik özellikleri tasarımcılar için ciddi endişe yaratabilir. Geleneksel dolgular için bir dizi farklı yönetmeliklerin ve hangisinin en uygun olduğunun belirsizliği ile bu durum, marjinal dolgular için henüz net değildir. Bununla birlikte, marjinal dolguların başarılı bir şekilde projelendirildiği ve inşa edildiği pek çok uygulama vardır. Ayrıca, mevcut olan geosentetik tipindeki araştırma ve teknolojik gelişmeler, daha az elverişli olan toprak mekanik özellikleri, daha teknik geosentetik ürünler kullanılarak dengelenebilir (Raja ve ark. 2019).

Her ne kadar saha testi, geosentetik takviyeli toprak (GRS) duvarların davranışının stabilite üzerindeki etkisini incelemek için basit ve etkili bir yöntem olsa da, sayısal modelleme ile karşılaştırıldığında maliyetli ve zaman alıcıdır (Jiang ve ark. 2020). Ne yazık ki ülkemizde bu alanda genel bir mevzuat yoktur. Olan bazı mevzuatlar da yeteri kadar detay içermemektedir. Esas olarak var olan şartnameler, mühendislik tasarımından ziyade ampirik ürün seçimi metotları önermektedir. Geosentetik ürünlerin kaliteli hammaddeden (yani polimerden) üretilmesi sağlanmalı, ürünün üretim tekniği kurallara uygun olmalı ve yine kurallara uygun olarak ve özenle yerine yerleştirilmelidir. Bütün bunlardan sonra da standartların öngördüğü kalite kontrol deneyleri (laboratuvar ve/veya arazi uygulamaları) gerçekleştirilmelidir. Bu sayede başka yöntemlerle çözümü çok zor, pahalı ya da uygulama süresi uzun olan imalatlar; çok kısa sürede, ekonomik ve muadil yöntemlere istinaden mühendislik açıdan daha iyi bir uygulama ile geosentetik ürünleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. İşte bütün bu hususlar bir arada değerlendirildiğinde mevcut sektörde kullanılan takviye ürünlerine kıyasla geosentetik takviye ürünlerin çok daha fazla kullanılması gerekir.

Toprak istinat duvarlarda genellikle drenajlı oluşu nedeni ile dolgu malzemesi olarak granüler zeminler tercih edilmektedir. Ancak granüler zeminin temini her zaman mümkün olamamaktadır, mümkün olduğu durumlarda ise maliyeti yüksek olabilmektedir. Bu sebeple, bu çalışmada granüler dolguya alternatif olarak kullanılabilen marjinal dolguların (kohezyonlu zeminler) dış yükler altındaki davranışını analiz etmek için sonlu elemanlar programı, Plaxis 2D kullanılmıştır. Öncelikle, (Yang ve ark. 2012) tarafından yapılan çalışmadan alınan tam ölçekli testin sayısal entegrasyonu MC (Mohr-Coloumb) modeli kullanılarak doğrulama analizi yapılmıştır. Daha sonra, marjinal dolgulu geosentetik takviyeli istinat yapılarının statik yükler altındaki performansı araştırılmış ve araştırma sonucunda maliyet analizi yapılarak en ekonomik model belirlenmiştir. Çalışmada, (1) kaplama tipi; (2) takviye sertliği ve (3) marjinal dolgu tipi seçilen değişkenlerdir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Toprağın tutulması sorunu, geoteknik mühendisliğinin en eski sorunlarından biridir. Toprak tutmaya yönelik birçok farklı yaklaşım geliştirilmiş ve başarıyla kullanılmıştır. Zemin mekaniğinin en eski ve en temel ilkelerinden bazıları, istinat duvarlarının rasyonel tasarımına izin vermek için geliştirilmiştir. Son yıllarda metalik, polimer ve geotekstil takviyenin geliştirilmesi, mekanik olarak stabilize edilmiş birçok yenilikçi tipte toprak tutma sisteminin geliştirilmesine yol açmıştır (Kramer 2008).

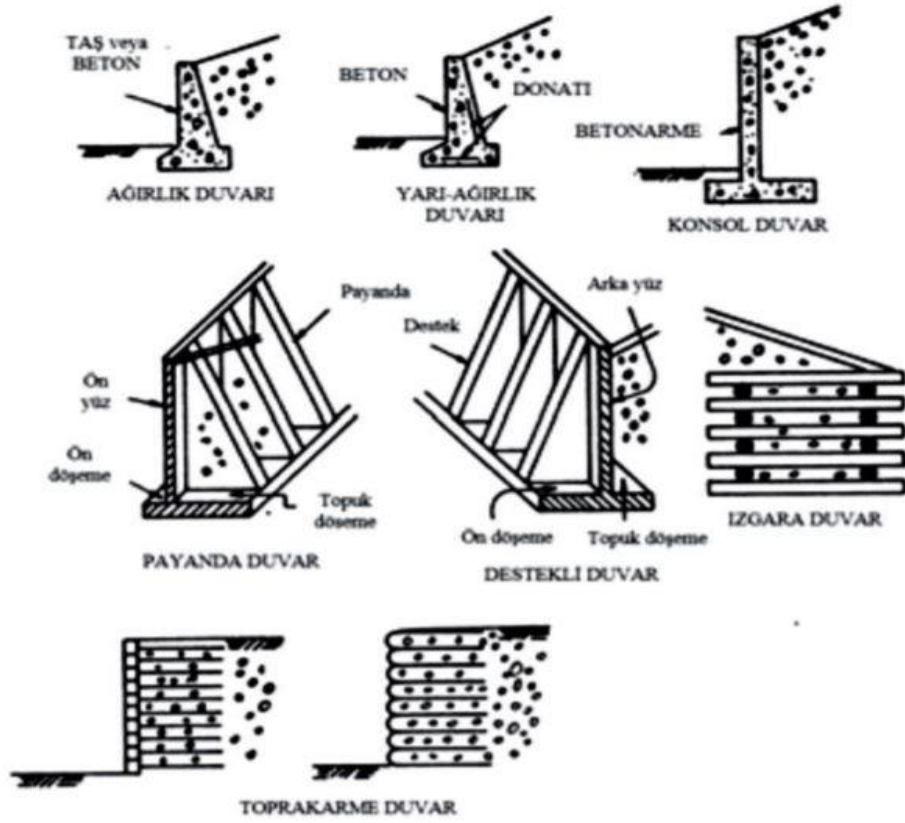
Dayanma (istinat) yapıları, meyilli arazilerde araziden faydalanmak üzere,

- Zemini doğal şev açısından daha dik açı ile tutmak,
- Kayma ihtimali olan zeminlerin göçmesini engellemek,
- Bir binanın bodrum duvarını oluşturmak,
- Kıyıların erozyondan veya taşkınlardan korunmasını temin etmek,
- Köprülerde kenar ayak görevini yapmak,
- Derin kazıların yanıl duvarlarını tutmak, v.b. amaçlara hizmet etmek gayesi ile inşaa edilen kalıcı veya geçici yapılardır (Önal 2009).

Dayanma yapısı tipleri aşağıdaki gibidir ve Şekil 2.1’de verilmiştir.

- A. Ağırlık ve yarı ağırlık duvarları
- B. Betonarme konsol duvar
- C. Payandalı duvar
- D. Gabion duvar
- E. Toprakarme duvar (Donatılı zemin duvarları)
- F. Diyafram duvar
- G. Palplanş perdeler

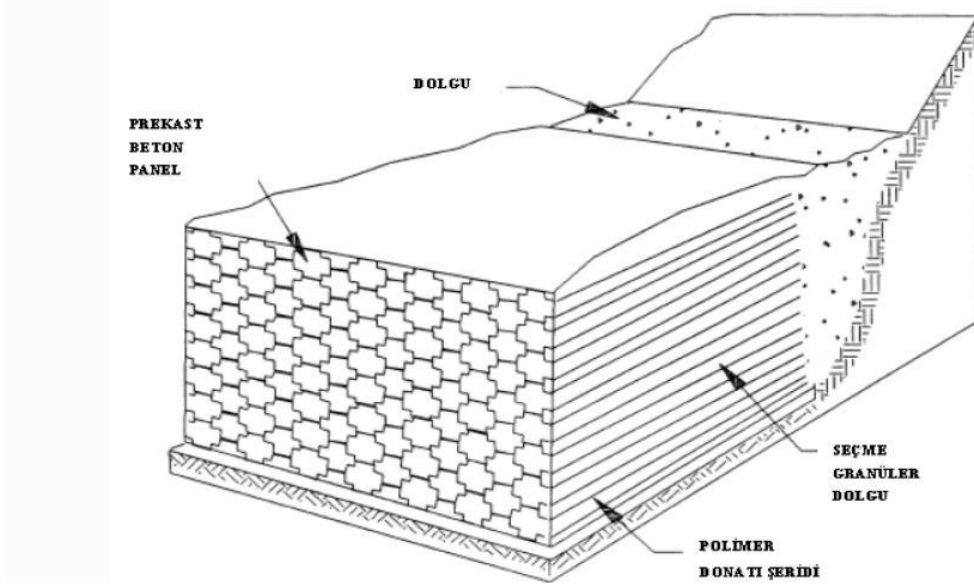
Bu tezde toprakarme duvar (Donatılı zemin duvarları) yapıları araştırılacaktır.



Şekil 2.1. Temel istinat duvarları tipleri (Binici ve Öztürk 2019)

2.1. Geosentetik Takviyeli Toprakarme Duvarlar

İnşaat mühendisliği pratiğinde, yükselme farkı yaratmak için istinat duvarları ve eğimler kullanılır. Tarih boyunca istinat duvarlarında ilkel olarak taş duvarlar kullanılmıştır. Bugün daha geniş betonarme istinat yapıları inşa edilmektedir. Yeterli alan varsa, elbette sabit bir eğim oluşturmak da mümkündür. Bugün, kazıda duvar inşa edilmişse, çivilenmiş toprak ve ankrajlı duvarların kullanılması yaygın bir uygulamadır. Dolgu koşullarında, betonarme istinat duvarlarının yerine geçen bir teknik, geosentetik takviyeli toprak istinat yapılarıdır (Şekil 2.2) (Guler 2017).



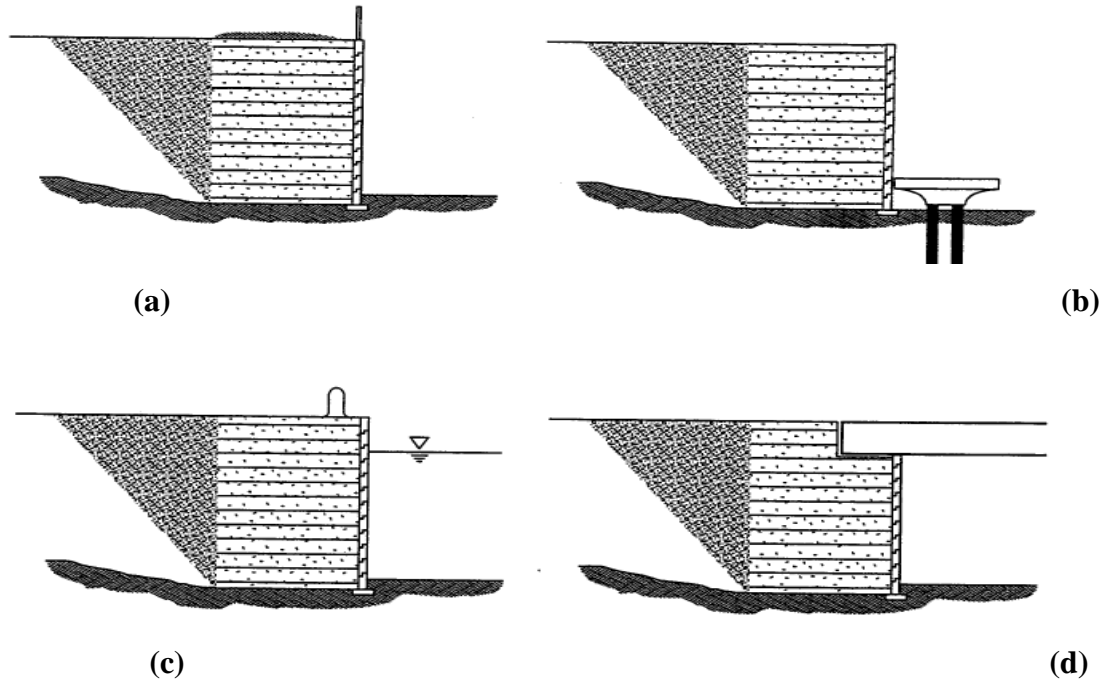
Şekil 2.2. Temsili takviyeli toprakarme yapı (Özben 2006)

Takviyeli toprak, toprak ve takviyenin birleştirilmesiyle oluşturulan bir malzemedir. Toprak mekaniğinde kullanılan tanıma göre tek başına toprak veya en azından tanecikli (granüller) toprak, yapışkan (kohezif) olmayan parçacıklardan oluşur, ancak bu toprağa esnek doğrusal takviye eklendiğinde, tüm kütleyle bir miktar uyum gösterir. Bu güçlendirilmiş bir toprak gövdesidir. Takviyeli toprağın bu bütünlüğü, toprak tanelerinin takviye elemanlarına sürtünmesinden kaynaklanmaktadır. Daneler ve takviyeler arasında sürtünme yoluyla kuvvetlerin iletimi vardır ve tüm kütleyle gerçek bir uyum sağlar. Bu, kayma mukavemetinde dane ve takviye sürtünmesinin olduğunu varsayar; bu nedenle, takviye elemanları bu koşulun her zaman karşılanacağı şekilde düzenlenmelidir. Takviye, bir üç ekseninin yönleri boyunca yerleştirilebildiğinden, güçlendirilmiş bir toprak gövdesinin her yöne uyumu sağlayabileceği kolayca anlaşılabilir. Sonuç olarak, herhangi bir şekilde güçlendirilmiş toprak yapıları inşaa etmek mümkündür. Bu tür yapılarda, takviyede geliştirilen gerilmeler, toprak parçacıkları arasındaki temas eylemlerinin toplamına bağlıdır (Vidal 1969). Genel olarak, geosentetiklerin istinat duvarlarında kullanılmasının asıl amacı statik yüklerin oluşturduğu gerilmelere direnmek ve deformasyonları önlemektir (Raja ve ark. 2019).

Geosentetik takviyeli toprak istinat duvarları (GRS-RW), geleneksel olarak toprağı korumak için betonarme veya yerçekimi tipi duvarların kullanıldığı çoğu uygulama için

uygun maliyetli alternatiflerdir. Bunlar, köprü ayakları ve kanat duvarlarının yanı sıra, sabit yan eğimli bir set veya kazı yapılamayacak şekilde geçiş hakkının kısıtlandığı alanları içerir. Dik kenarlı arazide, eğim dengesizliğine maruz kalan zeminde veya temel topraklarının zayıf olduğu alanlarda ekonomik inşaat için özellikle uygundur. Geosentetik takviyeli toprak istinat duvarları (GRS-RW), zemin koşullarının elverişli olmadığı durumdaki inşaa faaliyetlerde teknik ve maliyet avantajları sunar. Bu gibi durumlarda, geleneksel yapıların desteklenmesi için gerekli olabilecek kazık ve kazık başlıkları gibi temel iyileştirme maliyetlerinin ortadan kaldırılması, tamamlanan projelerde yüzde 50'den fazla maliyet tasarrufu ile sonuçlanmıştır (Berg ve ark. 2009).

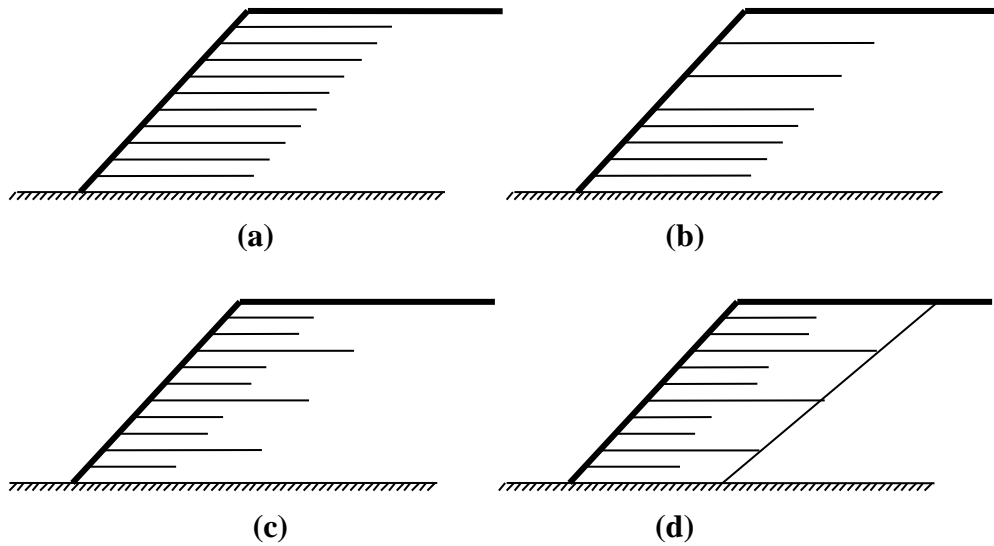
Çoğu ağır temel işi türü betonarme olduğu kadar güçlendirilmiş toprakla da yapılabilir, bu iki malzemenin ilgili ağırlıkları oldukça yakındır. Bu nedenle, güçlendirilmiş bir toprak yapının hacmi, benzer bir beton yapının hacmine benzer olabilir. Takviyeli toprak yapı türleri (Şekil 2.3): Toprak istinat duvarları, şev tutma yapıları, platformu destekleyen yapılar, kirişler ve temel paspaslar ve su altı yapıları aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Vidal 1969).



Şekil 2.3. Temsili GRS-RW uygulamaları (a) istinat duvarı; (b) erişim rampası; (c) sahil yapısı; (d) köprü kenar ayağı (Berg ve ark. 2009)

Dış yüzeyin sertliğine bağlı olarak, Geosentetik takviyeli toprak (GRS) tutma yapıları “sert” kaplama yapıları ve “esnek” kaplama yapıları olarak iki tipe gruplanabilir. “Sert” kaplama tipik olarak, prekast veya yerinde dökülmüş, sürekli bir betonarme paneldir. Diğer yandan “esnek” kaplama, sarılmış geosentetik levhalar, kuru istiflenmiş beton modüler bloklar, ahşaplar, doğal kayalar veya gabionlar şeklini alabilir. “esnek” kaplamanın aksine, “sert” kaplama, kaplama panelinin tüm yüksekliği boyunca önemli derecede “küresel” bükülme direnci sunar ve böylece üzerine uygulanan yanal toprak basıncı nedeniyle "küresel" eğilme deformasyonuna karşı daha fazla direnç sunar (Kitsabunnarat 2008).

Güçlendirilmiş toprak şevler (RSS), 70 dereceden daha düşük yüz eğimlerine sahip inşa edilmiş toprak eğimli yapılarda düzlemsel takviye elemanlarını (tipik olarak geosentetikler) içeren mekanik olarak stabilize edilmiş bir toprak şeklidir. Şekil 2.4’te gösterildiği gibi, toprağı güçlendirmek ve artan şev stabilitesini sağlamak için inşaat veya yeniden inşa sırasında eğime farklı kombinasyonlarda takviye katmanı yerleştirilebilir. RSS yapıları, doldurma maliyeti, geçiş hakkı ve diğer hususların daha dik bir eğimi arzu edilebilir hale getirebileceği yeni inşaat ve yeniden inşa için uygun maliyetli alternatiflerdir (Berg ve ark. 2009).



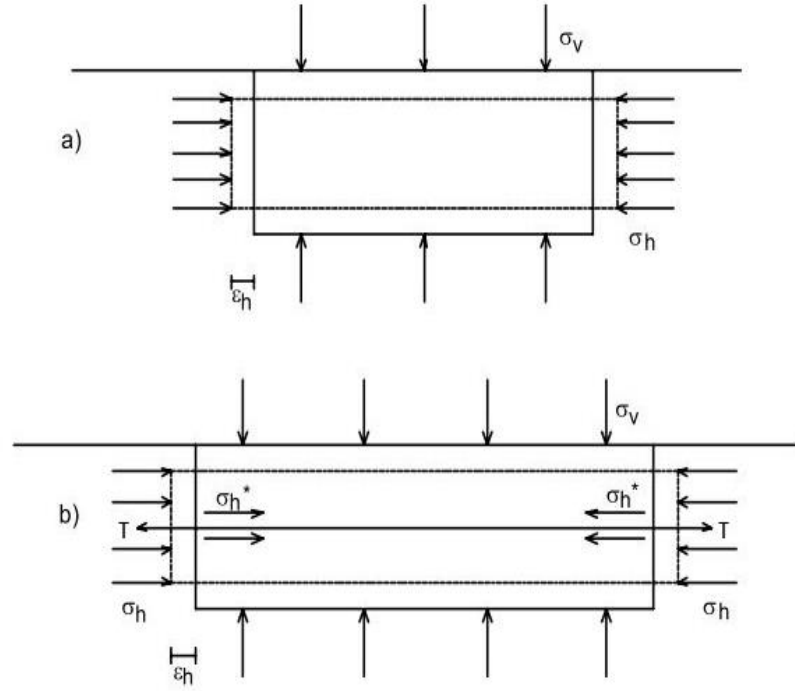
Şekil 2.4. Geosentetik malzemeler ile şev stabilizasyonunda tabaka teşkili (a) eşit uzunluk ve eşit aralıkta, (b) eşit uzunluk ve farklı aralıkta, (c) eşit uzunluk, eşit aralıkta ve kısa tabakalarla, (d) farklı uzunluk ve eşit aralıkta kısa tabakalar (Koerner 1990)

2.2. Takviyeli Toprakarme Duvarların Temel Prensipleri

Sonsuz bir toprak kütlelerinin parçası olan Şekil 2.5a'daki zemin elemanını ele alırsak, σ_v düşey gerilmesinin uygulanması elemanda bir deformasyona neden olur ve sonuç olarak bitişik topraktan bir σ_h yanal sıkışmasına neden olur. Yatay olarak toprak elemanı, yerel göçmenin temel nedenlerinden biri olan ϵ_h gerilme deformasyonuna maruz kalır. Öte yandan, geosentetik bir malzeme, yani bir geotekstil, bir geogrid, vb. Şekil 2.5b'de olduğu gibi zemine düşey bir gerilme uygulandıktan sonra sadece zemin elemanı deforme olmaz, aynı zamanda geosentetik malzemenin kendisi de uzama, çekme deformasyonlarına uğrar.

Malzemenin bu genişlemesi, donatıda bir T gerilme mukavemeti yaratır ve bu da yatay bir σ_h^* gerilmesine neden olur. Bu gerilim, zemin granülleri üzerinde bir sınırlama etkisi sağlar ve yatay kuvvetlere direnmeye ve yatay deformasyonları azaltmaya büyük ölçüde katkıda bulunur.

Sonuç olarak, geosentetik malzemenin zemine dahil edilmesinin sağladığı fayda, donatının çekme mukavemetine ve donatı ile zemin arasındaki sürtünmenin kesmeye karşı dayanımına bağlıdır. Zemine uygulanan gerilmeleri ve stresleri büyük ölçüde azalttığı ve kompozit zemin malzemesine uygulanan düşey gerilmenin, eşit deformasyonlarda donatısız zemine göre artırılabilceği sonucuna varılabilir (Enünlü 2007).



Şekil 2.5. (a) Takviyesiz ve (b) takviyeli toprak elemanında gerilme çizgileri ve gerilmeler (Enünlü 2007)

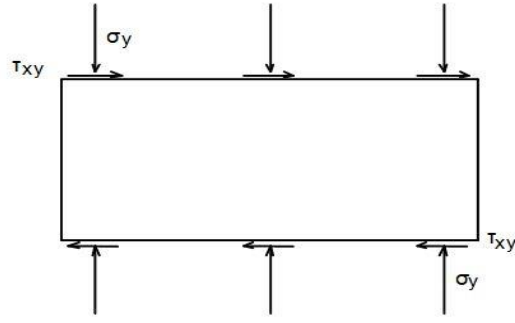
Ek olarak, zemindeki kayma gerilmelerine göre, Şekil 2.6'ya bakarsak, σ_y düşey gerilme uygulandığında zemindeki doğal kayma gerilmesi dağılımını görebiliriz. Zeminin sağladığı maksimum kayma gerilmesi formülü aşağıdaki gibidir:

$$(T_{yx})_{max} = \sigma_y \cdot \tan\theta_{max} \quad (2.1)$$

Burada,

θ_{max} = Zeminin maksimum kayma direnci

$(T_{yx})_{max}$ = Zemin tarafından sağlanan maksimum toplam kayma gerilmesi'dir.



Şekil 2.6. Takviyesiz bir zemin elemanındaki kayma gerilmeleri (Enünlü 2007)

Zemin elemanı, kesme yönü ile θ açısı yapan bir takviye elemanı ile geçtiğinde (Şekil 2.7), gerilim T , teğet bileşen $T \cdot \sin\theta$ tarafından üretilen bir kayma gerilimi oluşturduğundan, bu arada normal bileşen $T \cdot \cos\theta$, topraktaki θ_{max} sürtünme açısının neden olduğu başka bir T_{yx} üretir.

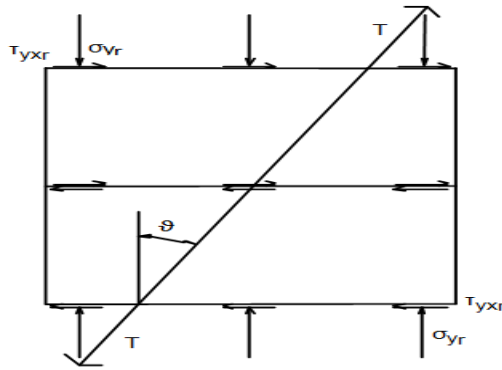
Bu değer aşağıdaki formülden hesaplanır:

$$(T_{yxr})_{max} = \sigma_{yr} \cdot \tan\theta_{max} + \left(\frac{T}{A_s}\right) \cdot \cos\theta \cdot \tan\theta_{max} + \left(\frac{T}{A_s}\right) \cdot \sin\theta \quad (2.2)$$

Burada,

A_s = Toprak elementinin alanı

$(T_{yxr})_{max}$ = Güçlendirilmiş zeminin maksimum toplam kayma gerilmesi'dir.



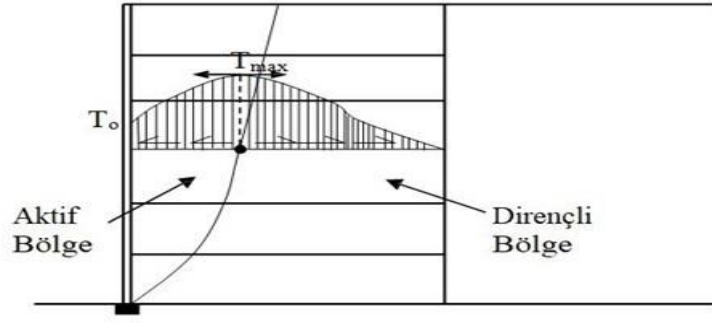
Şekil 2.7. Güçlendirilmiş bir zemin elemanındaki kayma gerilmeleri (Enünlü 2007)

Çekme kuvvetlerinin donatı boyunca değişimi ve maksimum kuvvetin konumu, deneysel olarak enstrümantasyonlu modeller ve tam ölçekli yapılar aracılığıyla ve teorik olarak sayısal analiz kullanılarak oluşturulmuştur.

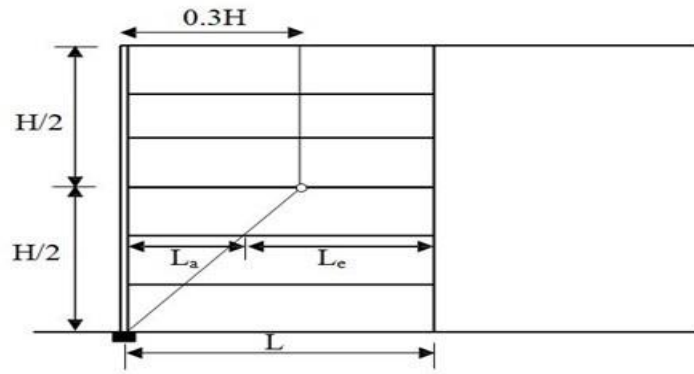
Şekil 2.8a'da gösterildiği gibi, takviyedeki maksimum gerilme kuvveti genellikle kaplamanın biraz arkasında bulunur. Bu konumda maksimum bir kuvvet oluşturmak için, dolgunun donatıya uyguladığı kayma gerilmeleri, şekilde gösterildiği gibi tepe kuvvetinin iki tarafında zıt yönlerde olmalıdır. Maksimum gerilme kuvveti çizgisi olarak adlandırılan maksimum çekme kuvveti noktalarının konumu, böylece güçlendirilmiş dolguyu iki bölgeye ayırır: Cephe ve maksimum çekme kuvvetleri hattı arasında, takviyeler üzerindeki kesme gerilmelerinin duvar yüzüne doğru yönlendirildiği aktif bir bölge mevcuttur. Donatı üzerindeki kesme gerilmelerinin duvar yüzeyinden uzağa yönlendirildiği, maksimum çekme kuvvetleri hattının arkasında ise dirençli bir bölge vardır. Küresel etki, aktif bölgedeki zeminin donatıda ürettiği çekme kuvvetinin, donatı yoluyla dayanıklı bölgedeki zemine geri aktarılmasıdır.

Maksimum gerilme kuvvetleri hattının konumu, takviyenin uzayabilirliğinden ve ayrıca kaplamanın genel sertliğinden etkilenir. Şekil 2.8b ve Şekil 2.8c, uzayamaz ve uzayabilir takviyelerle duvarlardaki maksimum gerilme kuvvetlerinin sınırlayıcı konumlarını gösterir:

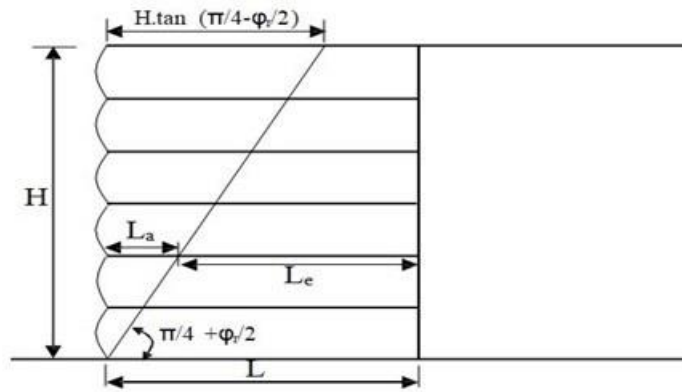
- Uzatılmayan takviyelerle (Şekil 2.8b), maksimum çekme kuvvetleri çizgisi, duvarın üst kısmında dikey olan bir çift doğrusal göçme yüzeyi ile modellenebilir. Gerilme durumunun tepede hareketsiz olduğu varsayılır ve duvarın alt kısmındaki aktif duruma düşer (Duvarın üst kısmındaki dinlenme durumu hem inşaat gerilmelerine hem de yanal verime karşı takviye tarafından sağlanan kısıtlamaya atfedilmiştir).
- Genişletilebilir takviyelerle (Şekil 2.8c), maksimum çekme kuvvetleri çizgisi Coulomb veya Rankine aktif göçme düzlemi ile çakışır ve dolgudaki gerilmeler, aktif toprak basıncı durumuna karşılık gelir. Maksimum çekme kuvvetleri hattının konumu, yapının şekli ve ek yük koşulları gibi dış etkenlere bağlı olarak da değişebilir (Enünlü 2007).



a) Genel durum



b) Uzatılamaz takviyeler



c) Uzayabilir takviyeler

Şekil 2.8. Takviyelerde çekme kuvvetleri ve şematik maksimum çekme kuvveti hattı (Enünlü 2007)

2.3. Göçme Modları

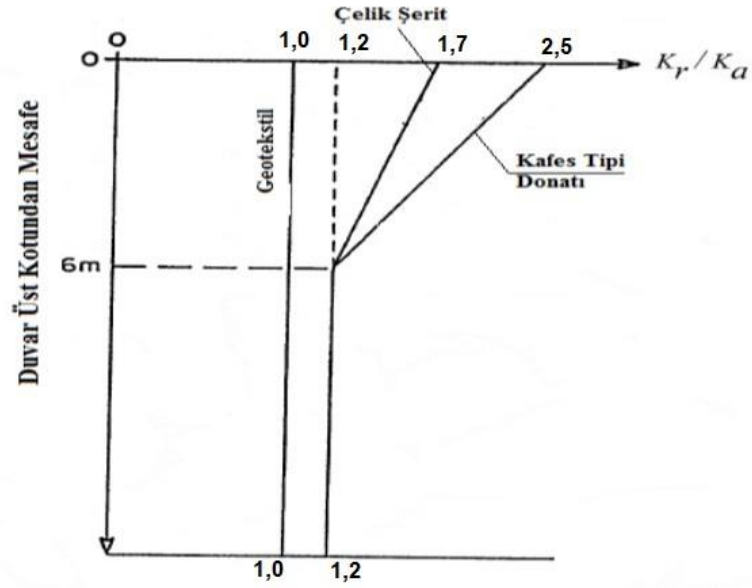
Statik ve sismik yükleme koşulları altında geosentetik takviyeli toprak istinat duvarı sistemleri için stabilite analizleri, iç, dış ve göçme modlarına karşı güvenlik faktörleri oluşturmak için ayrı hesaplamalar içerir. Göçme modlarının anlaşılması stabilite tahkiklerin irdelenmesiyle mümkündür. Toprak istinat yapılarında stabilite analizi iç ve dış olarak iki şekilde ve ayrı ayrı hesaplanır. Toprak istinat yapılarında iç stabilite; donatı sökülme analizi ve donatı kopması analizi olmak üzere Şekil 2.9’da gösterildiği gibi iki şekilde analiz yapılır.



Şekil 2.9. İç Stabilite Kaybı; (a) Donatı Sökülmesi (Sıyrılma), (b) Donatı Kopması (Gündüz 2015)

2.3.1. İç stabilitede donatıların çekme kuvvetleri ve donatı sökülme tahkiki

İç stabilite kontrolünde ilk adım, şeritlerde meydana gelmesi beklenen maksimum çekme kuvvetinin belirlenmesidir. Bu problemde daha önce bahsedilen maksimum gerilme çizgisinden yararlanılır. Bu hattın yeri dolgunun sıklığına, donatıların sıklığına bağlı olarak değişse de genel formu aynıdır. Bu kriterlere ve şerit tipine göre bir yatay gerilme oranı-derinlik grafiği oluşturulmuştur (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Şerit tiplerine göre yatay gerilme oranı-yükseklik ilişkisi (Elias ve ark. 2001)

Maksimum gerilmelerin hesabında aşağıdaki yol izlenir.

- Her bir şerit donatısı seviyesinde düşey gerilme ve yatay gerilmeler hesaplanır. Sistemde yer alan sürşarj yüklerinden dolayı meydana gelecek ek gerilmelerin de yatay ve düşey bileşenleri eklenir.

Burada,

K_r Değeri duvar üst seviyesinden alt seviyesine kadar olan mesafenin (Z) bir fonksiyonudur. Bu mesafede duvar üstü elemanlar ve panel altı tesviye betonu kalınlığı dikkate alınmaz. σ_h yatay gerilme, σ_v düşey gerilme olmak üzere her şerit seviyesinde toplam yatay ve düşey gerilmeler aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

$$\sigma_h = K_r \cdot \sigma_v + \Delta\sigma_h \quad (2.3)$$

Düşey gerilme hesabında donatı seviyesi (Z), dolgu birim ağırlığı (γ_r) ve duvar üstünden gelecek sürşarj yükü (q) değeri de göz önünde bulundurulur.

Buna göre düşey gerilme değeri aşağıdaki gibi hesap edilir.

$$\sigma_v = \gamma_r \cdot Z + \sigma_2 + q + \Delta\sigma_v \quad (2.4)$$

Formüldeki σ_2 değeri ise Şekil 2.11’de gösterildiği gibi hesaplanır. $\Delta\sigma_v$ parametresi düşey yüklerden dolayı sistemde meydana gelen düşey gerilme artışını temsil eder. Bu artış geometrik olarak 2Y/1D eğimle sisteme etkir (Şekil 2.11).

$\Delta\sigma_h$ Parametresi sisteme etkiyen düşey yüklerden dolayı meydana gelecek yatay gerilme artışını temsil etmektedir. Her sürşarj yük tipine göre gerilme artışları ve hesap yöntemleri farklıdır (Şekil 2.11), (Şekil 2.12).

- Düşey kademeler S_v olmak üzere her bir donatı kademesi için birim genişlikte maksimum gerilmeler, T_{max} hesaplanır:

$$T_{max} = \sigma_h \cdot S_v \quad (2.5)$$

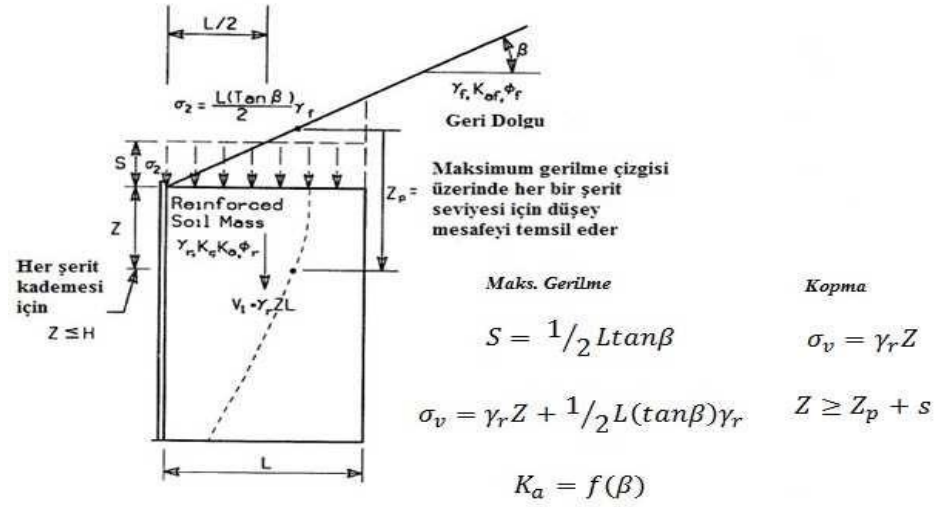
Maksimum gerilme değeri bağımsız tipte donatılar için belirlenen bir duvar genişliği boyunca da hesaplanabilir:

$$T_{max} = \sigma_h \cdot \frac{S_v}{R_c} \quad (2.6)$$

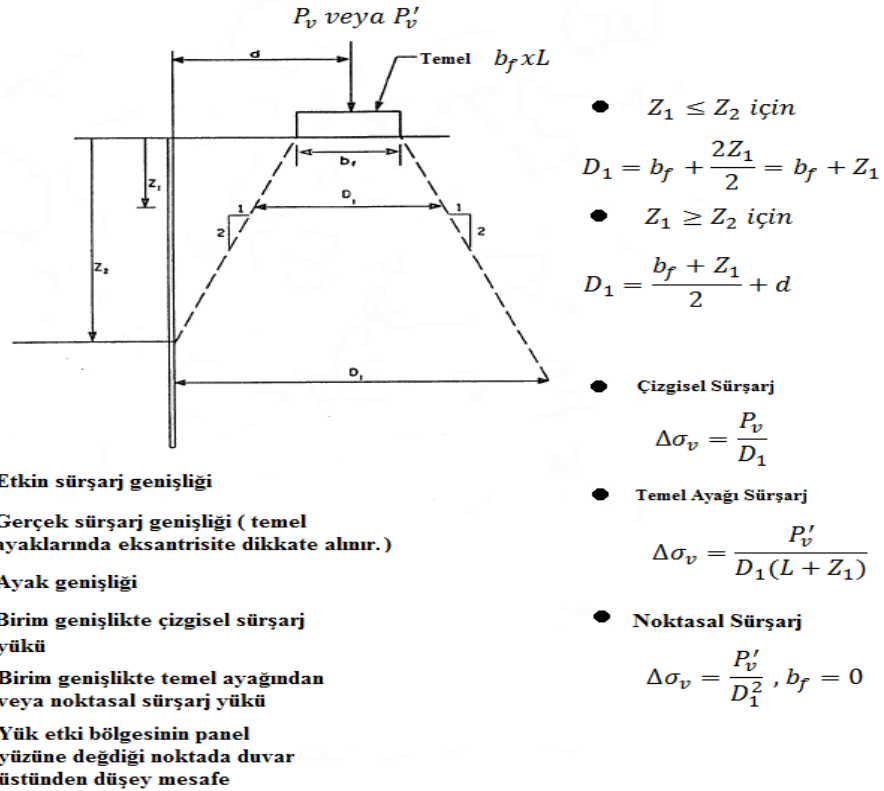
Denklem 2.6’da yer alan R_c değeri kapsama oranı olarak ifade edilir. Bu değer:

$$R_c = b/S_h \quad (2.7)$$

olarak hesaplanır. Kapsama oranı donatıya ait birim genişliğin (b), donatıların merkezleri arasındaki yatay uzaklığa S_h oranıdır. Kapsama oranı dış stabilitenin iç stabilize ile ilişkisinin anlaşılması yönünden önemlidir. Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’de şevli duvarlardaki donatı gerilmeleri ile sürşarj yükünden kaynaklı düşey gerilme artışının hesaplanması açıklanmıştır.



Şekil 2.11. Şevli duvarlarda donatı gerilmeleri (Elias ve ark. 2001)



Şekil 2.12. Sürşarj tipine göre düşey gerilme artışı (Elias ve ark. 2001)

Sürşarjlardan meydana gelen yatay gerilmelerin hesabında aşağıdaki yol takip edilir.

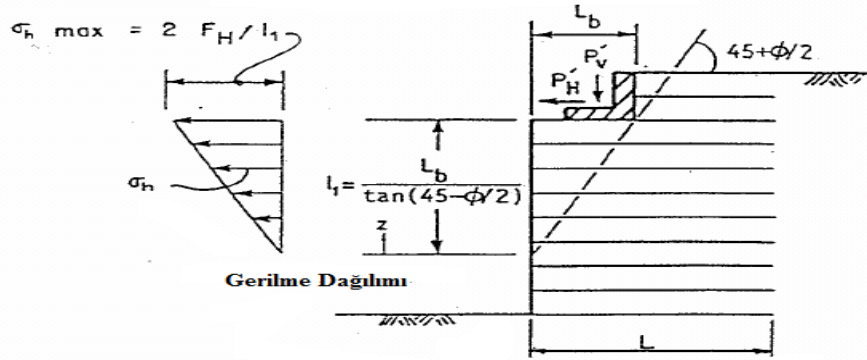
- Eğer varsa, yatay sürşarj kuvvetlerinden meydana gelen yatay gerilme artışı:

$$\Delta\sigma_h = 2F_H \cdot \left(\frac{z}{l_1}\right) \quad (2.8)$$

Denklem 2.8'den hesaplanır. Denklemde geçen l_1 değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$l_1 = L_b / \tan\left(45 - \frac{\theta}{2}\right) \quad (2.9)$$

L_b sürşarj yükünün efektif genişliğine karşılık gelir. F_H Etkiyen yatay kuvveti temsil eder.



Şekil.2.13. Yatay yükler altında gerilme artışı parametreleri (Elias ve ark. 2001)

- T_{max} , maksimum gerilme değeri, R_c , kapsama oranı ve T_a , donatının birim genişliği başına izin verilen çekme kuvveti olmak üzere her kademe için takviyelerin kırılması ile ilgili stabilite hesabı:

$$T_a \geq T_{max} / R_c \quad (2.10)$$

Bu tahkikte şerit kapasitesi, şerit panel arasındaki gerilme kuvvetlerinden büyük olmasına dikkat edilmelidir. Aksi durumda şerit değiştirilmesi ve bağlantı sayısını artırmak çözüm olabilir. Çekme tahkiki ve aderans iç stabilitenin temel taşıdır (Mitchell ve Villet 1987).

2.3.2. İç stabilitede donatıların kopma tahkiki

Şeritlerin kopma dayanımının kontrolü aşağıdaki kriterle kontrol edilir:

$$T_{max} \leq \left(\frac{1}{GS_{PO}} \cdot P_r \cdot R_c \right) \quad (2.11)$$

$$P_r = F^* \cdot a \cdot \gamma_r \cdot z_p \cdot L_e \cdot C \quad (2.12)$$

$$T_{max} \leq \left(\frac{1}{GS_{PO}} \right) \cdot F^* \cdot a \cdot \gamma_r \cdot z_p \cdot L_e \cdot C \cdot R_c \quad (2.13)$$

Denklemlerde yer alan değişkenlerden GS_{PO} kopma tahkiki için güvenlik sayısını, F^* kopma dayanım katsayısını, R_c kapsama oranı, P_r kopma dayanımı, T_{max} maksimum donatı çekmesi, a ise ölçek düzeltme faktörünü ifade eder.

C Değeri çelik şerit donatılar için 2 alınır. $\gamma_r \cdot z_p$ ifadesi hesap derinliğindeki düşey jeolojik yüke karşılık gelir. Burada L_e değeri önemlidir. Maksimum gerilme çizgisine göre pasif bölgede kalan şerit mesafesi bu değere eşittir. Kopmaya bağlı iç stabilite analizlerinde şerit boyu bu parametreye bağlıdır. Denklemden pasif bölgedeki şerit boyu çekilirse aşağıdaki sınır koşulu elde edilir:

$$L_e \geq 1.5 T_{max} / F^* a \cdot \gamma_r \cdot z_p \cdot C \cdot R_c \quad (2.14)$$

Bu denklemden hareketli yükler hesaba katılmamıştır. Bu kriterin sağlanmaması durumunda donatı boyu artırılabilir, daha yüksek kopma dayanımına sahip şeritler kullanılabilir veya donatılar arası düşey mesafeler artırılarak maksimum kopma dayanımı (T_{max}) düşürülebilir. Toplam donatı boyu aktif bölge ve pasif bölgede yer alan donatı uzunluklarının toplamına eşittir.

$$L = L_a + L_e \quad (2.15)$$

Uzayabilen donatılar için aktif bölge şerit boyu (L_a) uzunluğu;

$$L_a = (H - Z) \tan\left(45 - \frac{\theta}{2}\right) \quad (2.16)$$

Uzayamayan donatılar için aktif bölge şerit boyu (L_a) uzunluğu duvar yüksekliği boyunca değişkenlik göstermektedir. Buna göre;

- Duvar üstünden H/2 seviyesine kadar;

$$L_a = 0.3H \quad (2.17)$$

- H/2 seviyesinden duvar tabanına kadar;

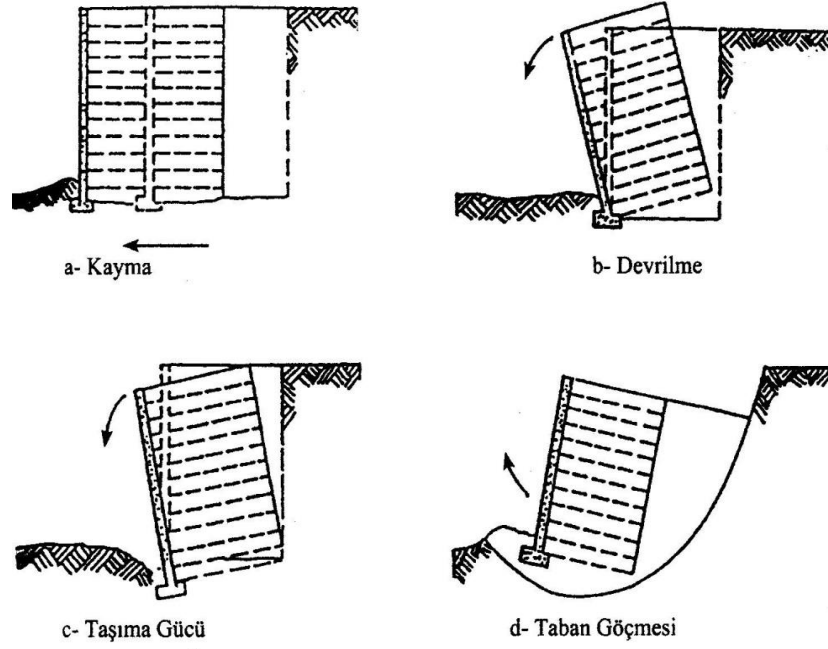
$$L_a = 0.6(H - Z) \quad (2.18)$$

olarak hesaplanır.

Mevcut kesitte şerit boyları birbiriyle uzunluk yönünden uyumludur. Şerit boyu hesap açısından en kritik olan kademedeki şerit boyu güvenliği sağlayacak boyda olmalıdır. Her durumda şerit boyları stabilite analizlerini sağlamalıdır.

2.3.3. Dış stabilitede tahkikler

Toprak istinat yapılarda dış stabilite; kayma, devrilme, taşıma gücü, taban göçmesi analizi olmak üzere Şekil 2.14'te gösterildiği gibi dört şekilde analiz yapılır. Bu analizler diğer istinat yapılarına benzer şekilde yapıldığı için burada detaylı bahsedilmeyecektir.



Şekil 2.14. Dış Stabilite Kaybı; (a) Kayma, (b) Devrilme, (c) Taşıma Gücü, (d) Taban Göçmesi (Gündüz 2015)

2.4. Güvenlik Sayıları

Güvenlik sayısı, yapının yapısal kapasitesinin uygulanan yüklere oranı olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, yol ve demiryolu dolguları veya toprak barajlar gibi toprak kütleleri için durum farklıdır, çünkü hâkim yük dış hizmet kuvvetinden değil, toprak dolgu ağırlığının kendisinden gelir. Stabilite analizinde kullanılan güvenlik faktörleri, analiz yöntemine, tasarım yönteminin güvenilirliğine, tasarım toprak parametrelerinin güvenilirliğine ve göçmenin insan yaşamı ve ekonomik kayıp açısından sonuçlarına bağlıdır. Dolgu tasarımında güvenlik sayısının belirlenmesi için belirli bir değer veya yöntem yoktur, ancak pratikte genellikle güvenlik sayısı 1,2 ile 1,5 arasında değişir. Düşük bir güvenlik sayısı, büyük dikey oturmalara, yanal deformasyonlara ve göçme riskinde artışa neden olur (Fratta ve Bozkurt 2014).

Genel olarak, sismik tasarım için önerilen minimum güvenlik faktörleri, AASHTO/FHWA uygulaması sonrasında statik yüklü yapılar için önerilen değerlerin % 75'i olarak

alınmıştır (Öztürk 2003). GRS (Geosentetik Takviyeli Toprak) yapılarının statik ve sismik tasarımı için önerilen minimum güvenlik faktörleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. GRS Yapıların Tasarımı için Önerilen Minimum Güvenlik Sayıları (Öztürk 2003)

| Güvenlik sayıları | | Statik | Dinamik |
|------------------------------------------|-------------------|---------|---------|
| Taban kayması | FS _{sl} | 1,5 | 1,1 |
| Taban devrilmesi | FS _{ot} | 1,5 | 1,1 |
| Taşıma gücü kapasitesi | FS _{bc} | 2,0 | 1,5 |
| Küresel kapasite | FS _{gl} | 1,3-1,5 | 1,1 |
| Takviye max gerilme | FS _{os} | 1,0 | 1,0 |
| Çekilme | FS _{po} | 1,5 | 1,0 |
| İç kayma | FS _{sli} | 1,5 | 1,0 |
| Ara yüz kesme | FS _{sc} | 1,5 | 1,0 |
| Bağlantı | FS _{cs} | 1,5 | 1,0 |
| İç devrilme | FS _{otl} | 1,5 | 1,0 |
| Tepe devrilmesi | FS _{otc} | 1,5 | 1,0 |
| Geleneksel GRS yapıları için iç devrilme | FS _{oti} | 1,5 | 1,1 |

2.4.1. Güvenlik sayısı hesaplama (Phi-c Reduction)

Kaymaya karşı güvenlik sayısını hesaplamak için bir "Phi-c azaltma" analizi kullanılabilir. Bu analizde çökme momentini belirlemek için toprak parametreleri “ $\tan\phi$ ” ve “ c ” kademeli olarak azaltılır. Böylece, inşaat aşamasının herhangi bir aşaması için çökmeye karşı güvenlik sayısını (kayma-toplam çökme) belirlemek de mümkündür. ΣMsf Toplam çarpanı inşaatın herhangi bir aşamasında zemin taşıma parametresini elde etmek için kullanılır.

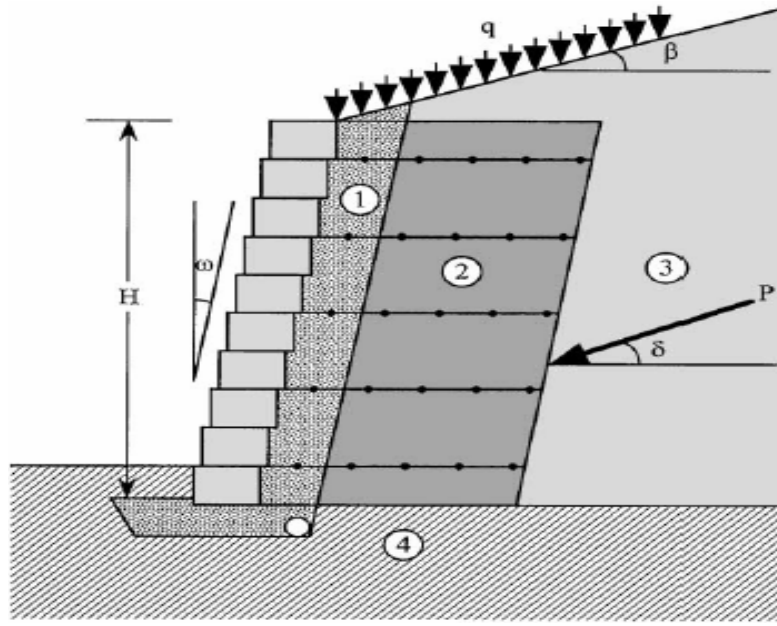
$$\Sigma Msf = \frac{\tan\phi_i}{\tan\phi_r} = \frac{c_i}{c_r} \quad (2.19)$$

Yukarıdaki denklemde “ i ” malzeme özellik tanımlarında verilen değerleri ve “ r ” analizlerde kullanılan indirgenmiş değerleri temsil eder. $\Sigma Msf = 1$, analizlerin ilk aşamalarında azaltılmış malzeme özelliklerini kullanmak için kullanılır ve daha sonra $\tan\phi$ ve c parametrelerini kademeli olarak düşürerek yapının çökme durumuna ulaşması sağlanır. Bu çökme durumundaki güvenlik sayısı, çökme anındaki ΣMsf değerine eşittir.

Bu çalışmada yapılan analizlerde, toplam göçmeye karşı güvenliği belirlemek için “Phi-c azaltımı” yöntemi kullanılmıştır.

2.5. Takviyeli Toprak Dolgu Duvar Elemanları

Bir GRS-RW, temel olarak 5 elementten oluşur. Bunlar şöyle adlandırılır; tutulan dolgu toprağı, takviye, kaplama ünitesi, mekanik olarak stabilize edilmiş toprak kütlesi ve temel toprağı. Bu bileşenlerin gösterimi Şekil 2.15’te görülebilir.



- 1- Drenaj zemini
- 2- Donatılı zemin
- 3- Arka zemin
- 4- Temel zemini
- P: Aktif toprak basıncı kuvveti
- q: Sürşarj
- β : Eğimli arka yüzey açısı
- ω : Duvar ön yüz açısı
- δ : Sürtünme açısı
- H: Duvar yüksekliği

Şekil 2.15. Geosentetik donatılı zemin dayanma duvarı (Koerner ve Soong 2001)

2.5.1. Mekanik stabilize toprak dolgu

Toprak terimi, doğada bulunan veya hem granüller topraklar hem de hafif bir uyum sergileyen marjinal topraklarda dahil olmak üzere fiziksel veya kimyasal yollarla üretilen tüm zemin türlerini kapsar. Tüm dane boyutlarını (silt, kum, çakıl, taşlar ve tüm kaya boyları) içerebilir; prefabrik elemanlardan (örneğin beton) oluşturulabilir. Böylece toprak, küreye veya küpe yakın kompakt şekillere sahip bileşenlerin bir kütesidir. Sonuç olarak, onlara "daneler" veya "parçacıklar" adı verilir (Vidal 1969).

Yüzey stabilitesinin çoğunda, topraklar izotropik ve homojen mukavemet parametrelerine sahip geoteknik malzemeler olarak kabul edilir. Bununla birlikte, hem laboratuvar incelemeleri hem de saha gözlemleri, çoğu doğal toprağın farklı özellikler açısından doğal anizotropi ve homojen olmayan bir karakter sergilediğini göstermektedir (Pan ve Dias 2016).

Dolgu sınıfları genellikle derecelendirme, plastisite, kil mineralojisi ve kimyasal birleşim şeklinde sınıflandırılır. Dolgu cinsinin seçilmesinde etkin faktörler ise, mukavemet ve deformasyon gereksinimleri, kullanılabilirlik ve takviye ile etkileşim olarak sıralanabilir. Bunların yanında tane boyutu, plastisite, kayma mukavemeti ve sıkıştırma özellikleri de dolgu tipini seçiminde etkilidir. AASHTO (2009), 200 (0,075 mm) nolu elek ve plastisite indeksi 6'yı geçmeyen % 15'ten daha az ince taneli bir dolgu malzemesine izin vermektedir.

Dolgu tipi olarak genellikle granüller dolgular kullanılır. Geleneksel tasarım için dolgu malzemesinin otomatik olarak tamamen tanecikli bir toprak olduğu varsayılır (Guler ve ark. 2007). Granül dolgular, yüksek mukavemetleri ve boşluk suyu basınçlarının gelişmesini önleme kabiliyetleri nedeniyle güçlendirilmiş zemin yapımı için tercih edilen dolgu malzemesi olmuştur (Christopher ve ark. 1998).

Marjinal (kohezif) toprakların kullanımı en az yirmi yıldır ilgi çekicidir, çünkü granüller dolgular her zaman kolayca bulunamamaktadır ve marjinal dolgular genellikle elde edilmesi kolaydır (Guler ve ark. 2012). Marjinal dolgular, daha düşük kalite, zayıf drenaj,

yüksek ince içerikli kohezif dolgular ve genellikle düşük kesme mukavemeti gibi düşük mekanik özelliklere sahip olarak tanımlanmaktadır. Marjinal dolgular hem ekonomik hem de sürdürülebilir faydalar sağladığından, yüksek kaliteli granül dolgunun popüler bir alternatifi haline gelmektedir. Marjinal (kohezif) olarak sınıflandırılan topraklar, çok çeşitli farklı özelliklere sahip olabilir; daha düşük ince içerikli marjinal dolgular, daha yüksek ince içerikli olanlara kıyasla daha yüksek kesme mukavemeti özelliklerine sahiptir (Raja ve ark. 2019). Yüksek kaliteli, geçirgen dolgu, düşük kaliteli, marjinal toprağın iki ila üç katına mal olabilir. Bu nedenle, daha düşük maliyetli marjinal toprak kullanımında potansiyel tasarruf önemlidir (Christopher ve Stulgis 2005).

Marjinal dolguların avantajlarının yanında dezavantajlarda vardır. Marjinal dolguların dezavantajları ve yarattığı sorunlar Mitchell ve Zornberg (1995), Koerner ve ark. (1998), Christopher ve ark. (1998), Raisinghani ve Viswanadham (2010), Raisinghani ve Viswanadham (2011)'in yaptığı çalışmalarda konu edilmiştir (Balakrishnan ve Viswanadham 2016).

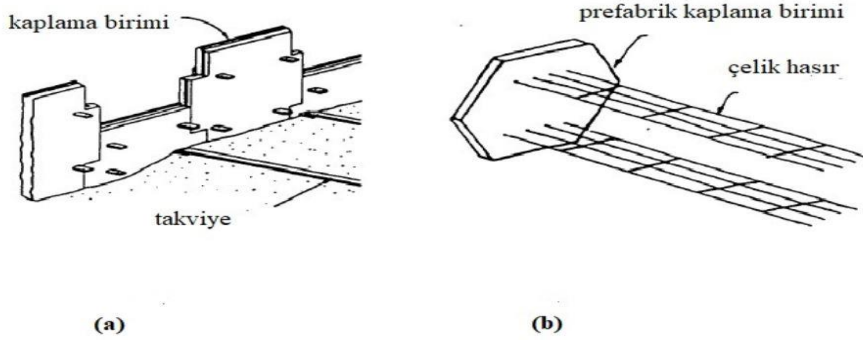
Dünyanın bazı bölgelerinde geleneksel sürtünme dolgusunun akut eksikliği, bu ülkelerdeki büyük güçlendirilmiş toprak yapılarında marjinal(kohezif) zeminlerin kullanılmasına yol açmıştır. Bununla birlikte, kohezif ve atık dolguların kullanımıyla ilgili uygulamalar, inşaat sırasında dolguda oluşan aşırı boşluk suyu basınçlarının yüksek yatay basınçlar yarattığı, etkili gerilmenin gelişmesini engellediği ve dolayısıyla toprak ile takviye arasındaki bağı azalttığı sonucuna varmıştır. Drenajın meydana gelebileceği duvar yüzeyine artan yakınlıkla ve artan zamanla bu sorunlar hafifletilir. Bu nedenle çözüm, takviyenin yanında bir drenaj tabakası kullanmak olmuştur. Bununla birlikte, kohezif dolgu kullanımının kabul edilebilirliği, hidrolik geçirgenliği ve başlangıçtaki su içeriği ile hala sınırlıdır, bu nedenle pratikte kullanılan malzeme aralığını ciddi şekilde sınırlandırmaktadır. BS8006 (BSI 1995) dahil olmak üzere uygulama kurallarının çoğu, kalıcı işler için güçlendirilmiş zemin yapılarının yapımında tamamen marjinal toprak kullanımına izin vermez, bunun istisnası şu nedenlerle belirtilmiştir: düşük mukavemet, yüksek nem içeriği, yüksek sünme, ve toprak ile donatı arasında düşük yapışma gücü (Glendinning ve ark. 2005).

2.5.2. Takviye birimleri

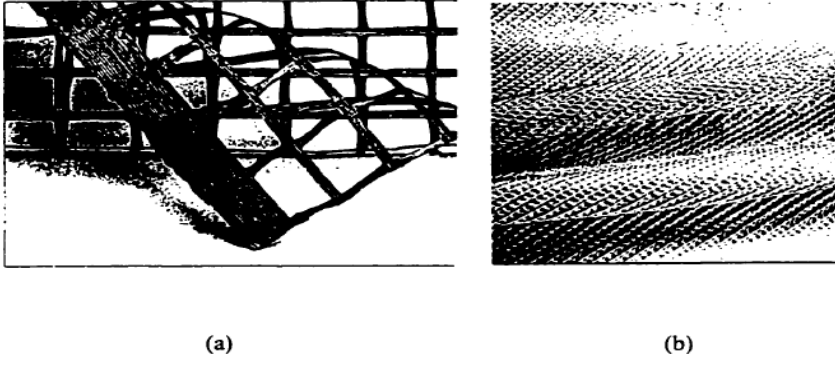
Takviye kelimesi, büyük gerilmelere ve streslere dayanabilen tüm doğrusal bileşenleri tanımlamak için kullanılır. Takviye elemanları, bir boyutu diğerlerinden açıkça daha büyük olan uzun elemanlardır (Vidal 1969).

Toprağın içindeki takviye tabakalarının ana işlevi, takviye yüzeyi boyunca oluşan sürtünme ve yer değiştirmeye enine yönde pasif direnç ile toprak gövdesinin gerilme direncini arttırmaktır. Toprağın taşıdığı ortalama kayma gerilimi azalırken, göçme yüzeyinde ortalama normal gerilme artar (Guler ve ark. 2007).

Çelik ve geosentetik donatı arasındaki temel farklar, sertlikleri, yapıları ve donatı ile zemin arasındaki arayüzlerde meydana gelen etkileşimlerdir. Çelik donatı genellikle şerit veya hasır şeklindedir (Şekil 2.16). Geosentetik donatı ise genellikle ızgaralar veya düzlemsel levhalar şeklindedir (Şekil 2.17). Geosentetiklerin düzlemsel yapısı ve esnekliğinden dolayı, zemin kütlesi içinde oluşan kesme kuvvetleri geosentetik donatıya daha düzgün ve kesintisiz olarak aktarılır; bu nedenle, geosentetik malzemeler, çelik donatıya göre toprak kütlesinin hem yerel hem de küresel verimini içermeye kabiliyetine sahiptir (Lee 2000).



Şekil 2.16. Temsili çelik takviye örnekleri: (a) Çelik kayışlar, (b) Çelik hasırlar (Lee 2000)



Şekil 2.17. Temsili geosentetik takviye örnekleri: (a) Geogridler, (b) Geotekstilller (Lee 2000)

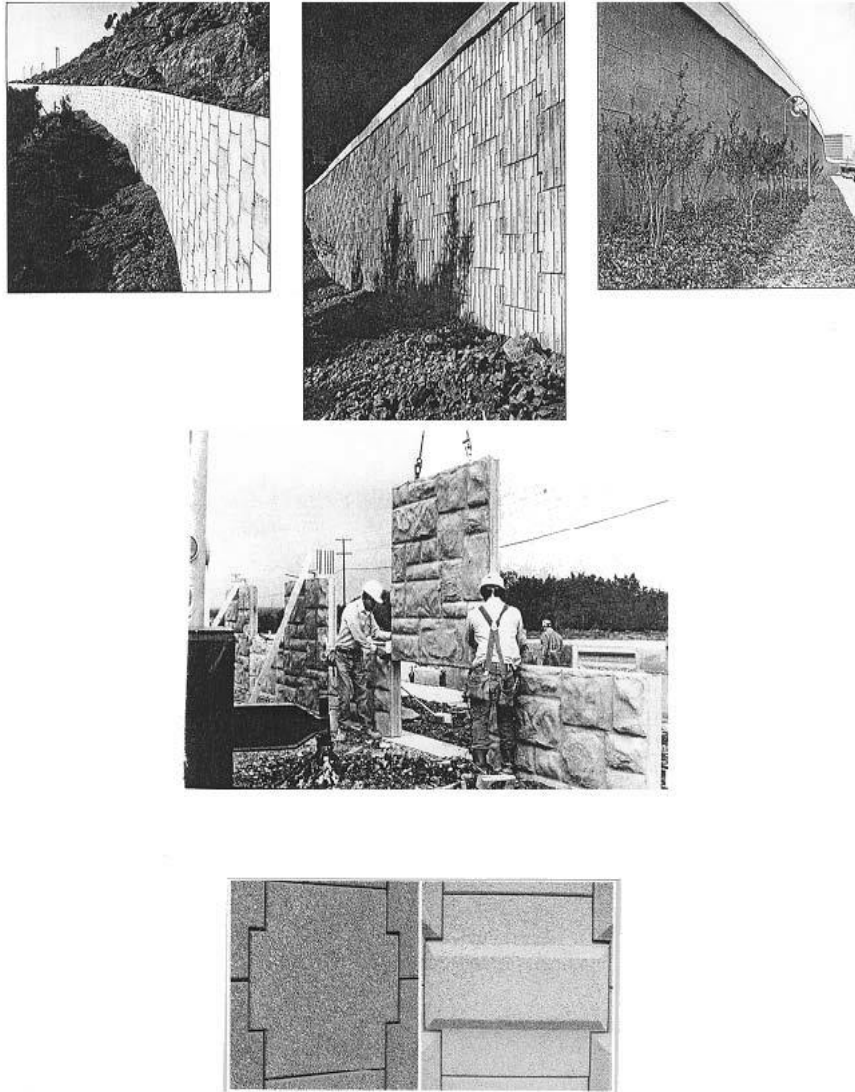
2.5.3. Kaplama birimleri

Kaplama, geri dolgunun çökmesine ve erozyona karşı koruma sağlar ve belirli durumlarda drenaj yolları sağlar. Yüzeyin tipi oturma toleranslarını etkiler. Başlıca kaplama tipleri şunlardır:

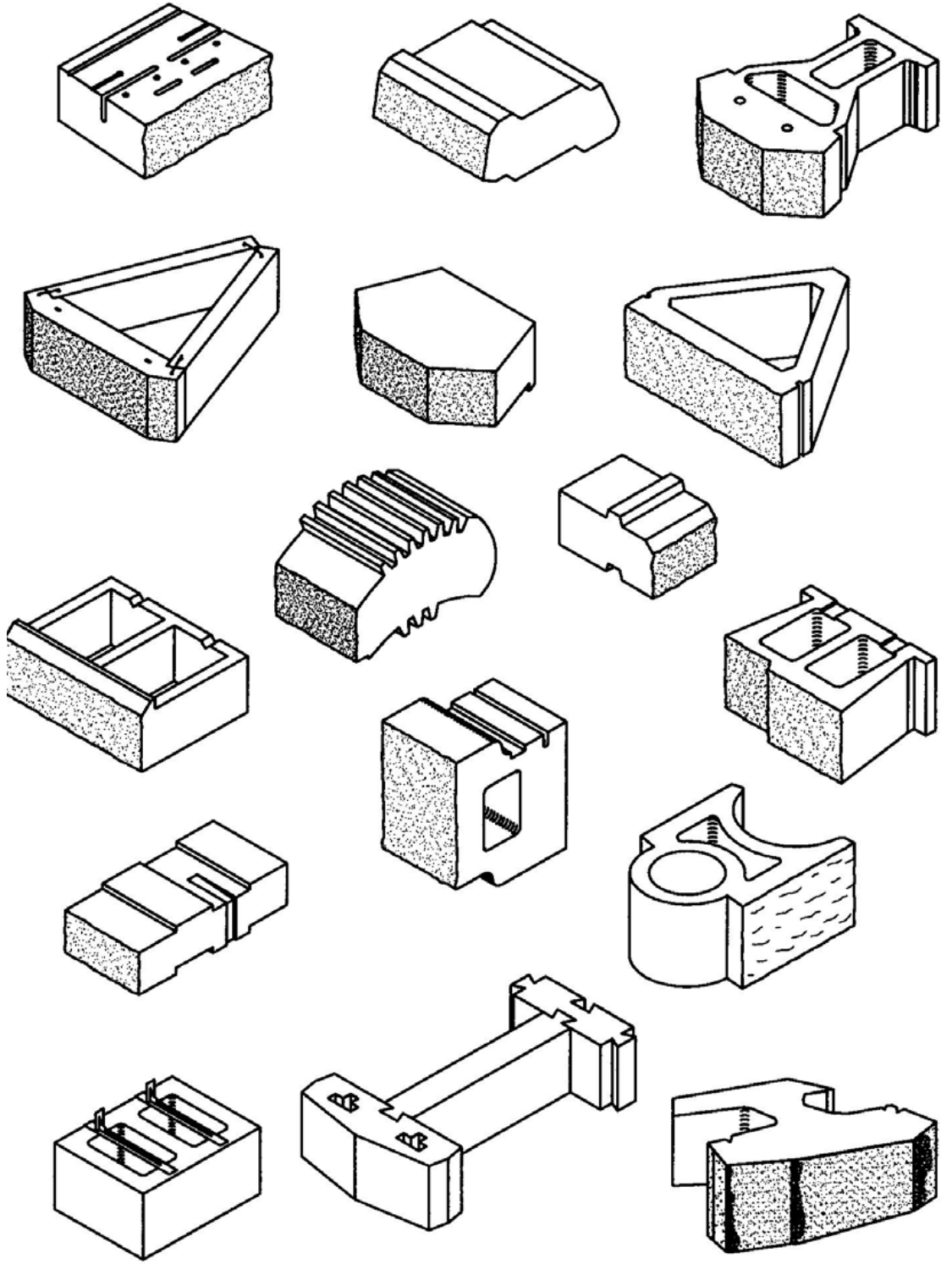
- **Segmental prekast beton paneller:** Segmental prekast panellerin çeşitleri Şekil 2.18’ de gösterilmektedir. Prekast beton paneller minimum 140 mm kalınlığa sahiptir ve kare, dikdörtgen, haç biçiminde, elmas veya altıgen geometridedir. Tipik nominal panel boyutlar 1,5 m yüksekliğinde ve 1,5 veya 3 m genişliğindedir. Betonun sıcaklık ve gerilme takviyesi gereklidir ve AASHTO (LRFD) Karayolu Köprüleri için Teknik Özellikler (2007), bölüm 5’e göre tasarlanmalıdır.
- **Kuru döküm modüler blok duvar (MBW) birimleri:** Bunlar, istinat duvarı uygulamaları için özel olarak tasarlanmış ve üretilmiş nispeten küçük, bodur beton ünitelerdir. Bu birimlerin ağırlığı genellikle 15 ila 50 kg arasında değişir ve 35 ila 50 kg birimler, otoyol projeleri için rutin olarak kullanılır. Ünite yükseklikleri, çeşitli üreticiler için tipik olarak 100 ila 300 mm arasında değişir ve 200 mm tipik değerdir. Görünen yüz uzunluğu genellikle 200 ila 450 mm arasında değişir. Ünitelerin nominal önden arkaya genişliği (duvar yüzüne dik boyut) tipik olarak 200 ila 600 mm arasında değişir. Üniteler masif veya çekirdekli olarak üretilir. Tam boy maçalar, montaj sırasında agrega ile doldurulur. Üniteler normalde kuru istiflenir (yani harç veya yatak yastıkları olmadan) ve hareketli bir bağ konfigürasyonundadır.

Dikey olarak bitişik birimler kesme pimleri, dudaklar veya anahtarlar ile bağlanabilir. Keystone®, Landmark®, Mesa®, Versa-Lok®, vb. gibi ticari markalı isimlerle anılırlar. Çeşitli örnek modüler kaplama birimleri Şekil 2.19’da gösterilmektedir.

- **Kaynaklı Hasır:** Tel ızgara, duvar yüzünü oluşturmak için duvarın önünde bükülebilir. Bu tip kaplama örneğinin Hilfiker, Tensar ve Reinforced Earth telli istinat duvarı sistemlerinde kullanılır. Bu tür kaplama, genellikle yaklaşık 45 derece ve daha dik yüz açılara sahip güçlendirilmiş toprak şevler (RSS) için kullanılır (Berg ve ark. 2009).



Şekil 2.18. Kaplama birimleri (Berg ve ark. 2009)



Şekil 2.19. Modüler blok kaplama Birimleri (Berg ve ark. 2009)

- **Gabionlar (Kaya Dolgulu Tel Sepetler):** Kaynaklı tel örgü, kaynaklı çubuk-paspaslar, geogridler, jeotekstiller veya gabion sepetleri arasına yerleştirilen veya bunlarla entegre olarak üretilen çift bükümlü dokuma ağdan oluşan takviye elemanları ile MSE duvarı veya RSS kaplama olarak kullanılabilir. Örneğin, bu kaplama sistemi Maccaferri tarafından Terramesh® duvar sistemi için kullanılmaktadır.
- **Geosentetik kaplama:** Geosentetik takviyeler, MSEW (Mekanik Stabilize Toprak Duvarlar) veya RSS'ine maruz kalan yüzünü oluşturmak için yüzün etrafına dolanır. Bu yüzler ultraviyole ışığın bozulmasına ve yangından kaynaklanan hasara karşı hassastır. Zemin takviyesi için kullanılan geogrid, tamamlanmış istinat yapısının yüzünü, kaynaklı tel örgü ve kumaş kaplamaya benzer şekilde oluşturmak için çevrilebilir. Bitki örtüsü, ızgara yapısı boyunca büyüyebilir ve geogrid için hem ultraviyole ışık koruması hem de hoş bir görünüm sağlayabilir.
- **İnşaat sonrası kaplama:** Sarılı cepheli duvarlar için, kaplama ister geotekstil, geogrid veya tel örgü olsun, duvarın inşasından sonra püskürtme, yerinde dökme beton veya beton, ahşap veya diğer malzemelerden yapılmış prefabrik kaplama panelleri takılarak yapıştırılabilir. Bu çok aşamalı yaklaşım maliyeti artırır, ancak duvarın inşasından sonraki bu aşamalar kısıtlandığı durumlarda avantajlıdır (Berg ve ark. 2009).

2.5.4. Temel toprağı

Mevcut temel koşulları için yeterli bir yeraltı araştırma programının geliştirilmesi ve uygulanması, başarılı proje uygulamasının sağlanması için kilit bir unsurdur. Projelerde yaşanan sıkıntının nedenleri genellikle, yerel veya önemli yumuşak toprak alanlarını açığa çıkarmayan, önemli yerel farklı yerleşimlere ve cepheye bakan panellerde sıkıntıya neden olan yetersiz yüzey altı keşif programlarından kaynaklanmaktadır. Belgelenen birkaç aşırı durumda, bu tür temel zayıflıkları, çökmelere yol açan tam temel göçmelerine neden olduğu belirtilmektedir.

Temel toprakları için mühendislik özelliklerinin belirlenmesi, taşıma direnci, küresel stabilite, oturma potansiyeli ve yeraltı suyu seviyelerinin konumuna odaklanmalıdır. Taşıma kapasitesi belirlemeleri için, normal olarak, taşıma gücünü hesaplamak için sürtünme ve kohezif parametrelerin yanı sıra birim ağırlıkları ve yeraltı suyu konumu gereklidir. Yük eğiminin ve temel şeklinin etkileri Mukavemet Sınır Durumu için ihmal edilebilir.

Temel oturma belirlemeleri için, Hizmet Sınır Durumu yük faktörleri ile geleneksel oturma analizlerinin sonuçları ve zemin indeksi testleriyle korelasyonlardan elde edilen, sıkıştırma indeksi C_v için yaklaşık değer ile bağlantılı olarak laboratuvar zaman-oturma verileri, konsolidasyon katsayıları C_c içerik, Atterberg sınırları kullanılmalıdır. Yerleştirme analizlerinin sonuçları, özellikle farklı oturmaya ilişkin olarak, yüz yüze ve bağlantı sisteminin bu tür hareketleri tolere etme kabiliyetini veya beklenen diferansiyel hareketi barındıracak özel ayrıntılar veya prosedürler gerekliliğini belirlemek için kullanılmalıdır (Berg ve ark. 2009).

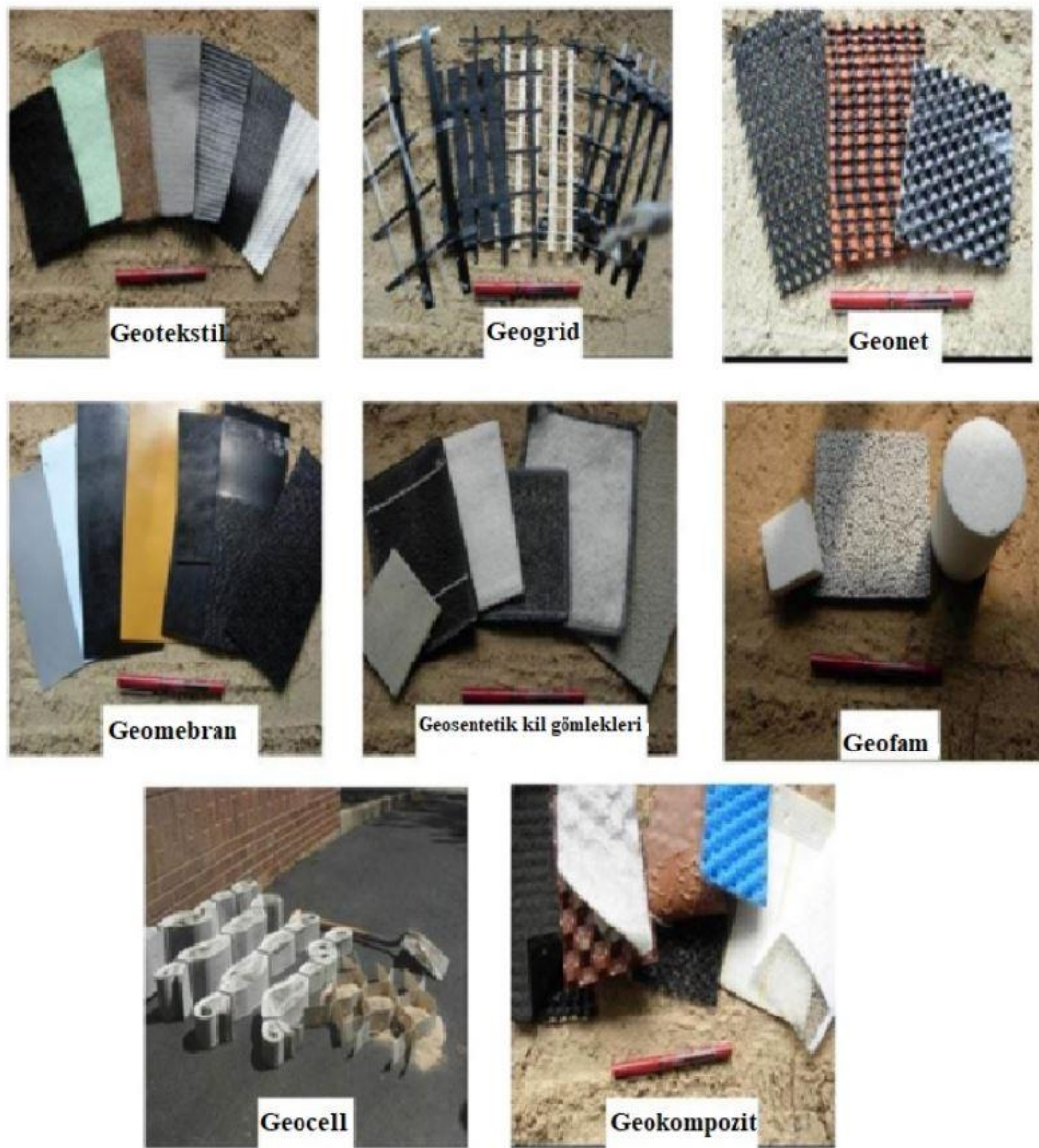
Mekanik olarak stabilize edilmiş toprak kütesinin altındaki toprak ve bu genel sistemi taşıyan tutulan dolgu maddesidir. Elbette, temel zemininin tasarım kılavuzlarındaki kriterleri karşılaması önemlidir. Takviyeli toprak yapıların uygulanmasından önce araştırılması gereken önemli faktörlerden bazıları, taşıma kapasitesi, yerleşim potansiyeli ve yeraltı suyu seviyeleridir. Sonuç olarak, uygulamadan önce, yeterli taşıma kapasitesini karşılamak ve toplam veya farklı oturmaları sınırlandırmak için zayıf temel zemini özellikleri geliştirilebilir (Enünlü 2007).

2.6. Geosentetikler

Geo, bilindiği üzere yer; sentetik ise doğada olmayan yapay olarak üretilmiş malzemeyi tanımlamaktadır. Sentetikler günümüzde polimer olarak da adlandırılan ve ham petrolün arıtılmasından sonra arta kalan ve atık özelliği taşıyan kısımdan elde edilen karbon zincirleridir.

Geosentetik genel olarak polimerik hammaddeden inşaat mühendisliği sorunlarına çözüm üretmek için üretilen malzemelerdir. İlk üretim geotekstil üretimi ile başladı, bugün geosentetik geogrid, geotekstil, geonet, geomembran, geosentetik kil astar (GCL),

geofam, geosel, geopipe, geotube, geosentetik kapsüllenmiş taş sütun (GEC) ve geokompozitlerden oluşan bir aile haline geldi. Bu malzemelerin polimer malzemelerden üretilmesi, önemli bir avantaj yaratır, korozyon problemi yoktur. Ayrıca polimerin özellikleri ve nihai ürün, bu ürünlerin son kullanıcısı olan mühendisin ihtiyaçlarına göre uyarlanabilir. Günümüzde geosentetik; inşaat mühendisliği, geoteknik mühendisliği, ulaştırma projeleri, çevre projeleri ve hidrolik uygulamalarında başarıyla kullanılmaktadır (Guler 2017). Günümüzde kullanılan geosentetik türleri Şekil 2.20’de gösterilmiştir.



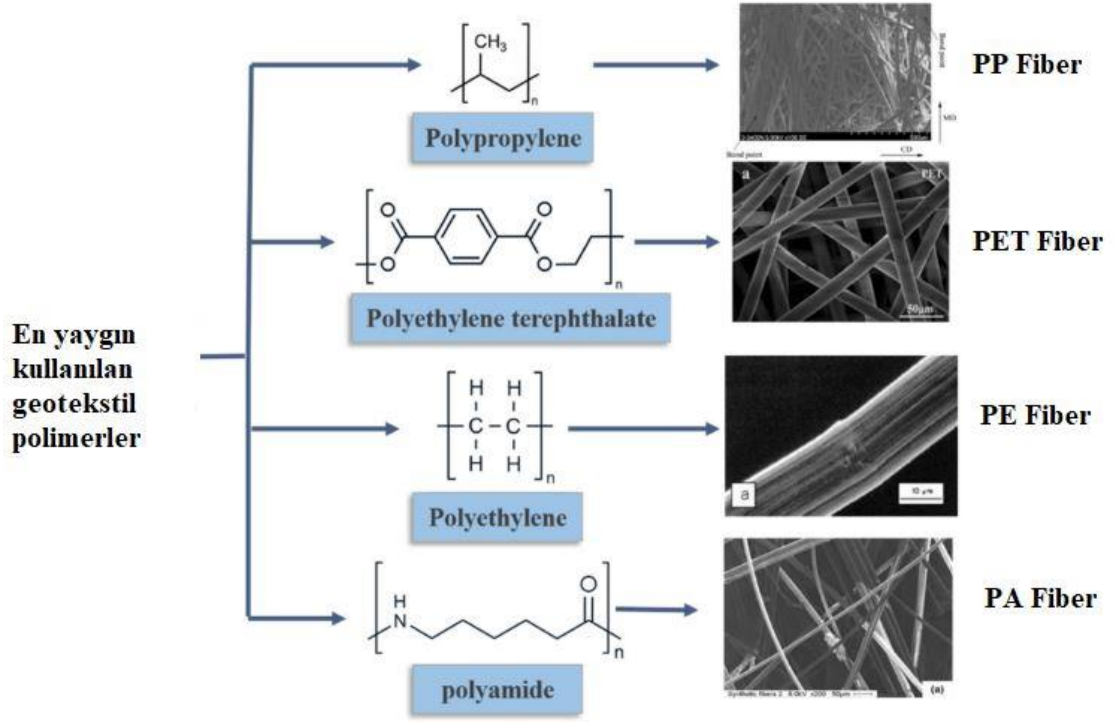
Şekil 2.20. Temsili geosentetik malzemeler (R. Koerner 2012)

2.6.1. Geosentetiklerin özellikleri ve işlevleri

Uluslararası literatürde, ana geosentetik tipler listelenmiştir: Geotekstilller, geogridler, geomembranlar, geonlar, geokompozitler, prefabrik dikey drenler (PVD), geoseller, geosentetik kil astarları (GCL), erozyon kontrol ürünleri, dikey geçirimsizlik kesme malzemeleri, geofiberler , geopipelere ve geofoamlar (Guler 2017).

Geotekstilller, en büyük iki geosentetik grubundan birini oluşturur. Pamuk, yün veya ipek gibi doğal elyaflardan ziyade sentetik elyaflardan oluşan tekstillerdir. Bu onları biyolojik bozulmaya karşı daha az duyarlı hale getirir. Bu sentetik lifler, standart dokuma makineleri ile esnek, gözenekli kumaşlar haline getirilir veya rastgele dokunmamış bir şekilde birbirine hasırlanır. Bazıları da örülür. Geotekstilller, imal ettikleri düzlem boyunca ve ayrıca kalınlıkları dahilinde sıvı akışı için gözeneklidir, ancak büyük ölçüde değişkenlik gösterir. Geotekstilller için geliştirilmiş en az 100 özel uygulama alanı vardır; bununla birlikte, kumaş her zaman dört ayrı işlevden en az birini gerçekleştirir: ayırma, güçlendirme, filtreleme ve / veya drenaj. Geotekstil tipleri; dokuma geotekstilller, dokumasız geotekstilller, örme geotekstilller olmak üzere 3 gruba ayrılır.

Geotekstil malzemelerinin seçimi, sadece sahadaki geotekstillerin performans gereksinimleri göz önünde bulundurularak değil, aynı zamanda ürün maliyeti de dikkate alınarak projenin fiili durumuna uygun olmalıdır. Şu anda, geotekstillerin temel malzemesi esas olarak sentetik elyaftır. Polipropilen (PP) geotekstilllerle bağlantılı olarak en sık kullanılan malzemedir, bunu polietilen tereftalat (PET) ve polietilen (PE) izlemektedir. Şekil 2.21, Geotekstilller ve SEM görüntüsü olarak kullanılan en yaygın polimerleri göstermektedir (Wu ve ark. 2020)



Şekil 2.21. Yaygın kullanılan polimerler; geotekstillere ve SEM görüntüsü (Wu ve ark. 2020)

Şekil 2.21’de verilen yaygın olarak kullanılan polimer malzemelerin özellikleri Çizelge 2.2’de düşük ve yüksek seviyesine göre gruplandırılmıştır.

Geotekstillere farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Örneğin asfalt kaplama güçlendirmesi için ve bitişik topraktaki taşlardan, atık veya drenaj agregasındaki geomembranların delinmesini (nokta temas gerilmelerini azaltarak) önlemek için yastık tabakaları olarak ve kurulum sırasında ve hizmet sırasında kullanılırlar. Geotekstillere, kentsel katı atık depolama sahalarının çalışma yüzeyinde gevşek atıkların rüzgâr veya kuşlar tarafından dağılmasını önlemek için günlük örtüler olarak kullanılmıştır. Geotekstillere ayrıca esnek beton kalıplar ve kum torbaları için de kullanılmıştır. Silindirik geotüpler, kıyı şeridi dolguları oluşturmak veya çamurun susuzlaştırılması için hidrolik dolgu ile doldurulmuş çift geotekstil katmanlarından üretilir (Richard J. Bathurst 2007).

Çizelge 2.2. Polimer malzemelerin özellikleri (Töremiş 2003)

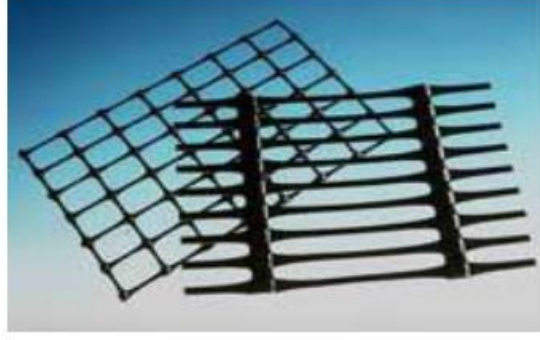
| Polimer Grubu | Polipropilen | Polyester | Polietilen | Poliamid |
|-------------------|--------------|-----------|------------|----------|
| Özellikler | | | | |
| Dayanım | • | o | • | • |
| Kopmada Uzama | o | • | o | • |
| Elastisite Modülü | • | o | • | • |
| Birim Ağırlık | • | o | • | • |
| Sünme | o | • | o | • |
| Maliyet | • | o | • | • |
| U.V. Dayanımı | • | o | • | • |
| Alkali | o | • | o | o |
| Mikro Organizma | • | • | o | • |
| Fuel Oil | • | • | • | • |
| Deterjan | o | o | o | o |

• DÜŞÜK o YÜKSEK

Geogridler, geosentetikler içinde hızla büyüyen bir bölümü temsil eder. Geogridler, dokunmuş, dokunmamış veya örülmüş bir tekstil kumaşı olmaktan ziyade çok açık, ızgara benzeri bir konfigürasyonda oluşturulmuş polimerlerdir, yani enine ve uzunlamasına yönlerde tek tek nervürler arasında geniş açıklıklara sahiptirler.

Geogridler:

- Gelişmiş fiziksel özellikler için bir, iki veya üç yönde gerilir.
- Dokuma veya örme makinelerinde standart tekstil üretim yöntemleriyle yapılır veya lazer veya ultrasonik olarak birbirine bağlanan çubuklar veya şeritler ile yapılır (Şekil 2.22). Birçok özel uygulama alanı vardır; ancak geogridler neredeyse sadece takviye malzemeleri olarak işlev görür.



Şekil 2.22. Tek ve çift yönlü geogriler (Can 2017)

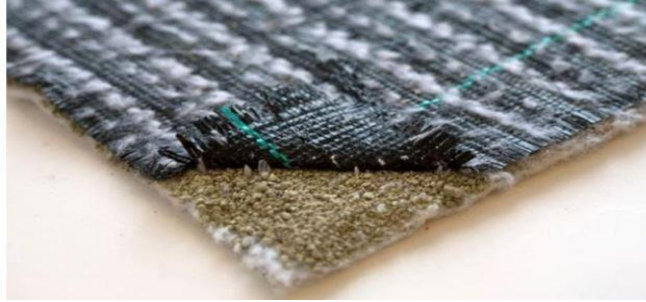
Geonetler, geosentetik alan içinde başka bir uzmanlık alanı oluşturur. Birbirlerine dar açılarda paralel polimerik nervür setlerinin sürekli ekstrüzyonu ile oluşturulurlar. Nervürler açıldığında, ağ benzeri bir konfigürasyonda nispeten büyük açıklıklar oluşturulur. İki tip en yaygın olanı iki düzlemlili veya üç düzlemlilidir. Alternatif olarak birçok farklı tipte drenaj göbeği mevcuttur. Nubbed, çukurlu veya sivri uçlu polimer tabakalar, farklı konfigürasyonlarda üç boyutlu sert polimer elyaf ağları ve geotekstiller içindeki küçük drenaj boruları veya ara parçalarından oluşurlar. Tasarım işlevleri, her türden sıvıları veya gazları taşımak için kullanıldıkları fonksiyonlar tamamen drenaj içindir.

Geomembranlar, diğer en büyük geosentetik grubunu temsil eder ve dolar hacminde satışları geotekstillerinkinden daha fazladır. Amerika Birleşik Devletleri ve Almanya'daki büyümeleri, katı atık depolama alanlarının kaplanması için 1980'lerin başında çıkarılan hükümet düzenlemeleri tarafından teşvik edilmiştir. Malzemelerin kendileri, esas olarak sıvıların veya katı depolama tesislerinin astarları ve kaplamaları için kullanılan nispeten ince, geçirimsiz polimerik malzeme tabakalarıdır. Bu, her türden atık depolama alanını, yüzey su tutmalarını, kanalları ve diğer muhafaza tesislerini içerir. Bu nedenle birincil işlev, her zaman bir sıvı veya buhar bariyeri veya her ikisi olarak muhafaza etmektir. Bununla birlikte, uygulama yelpazesi büyüktür ve çevresel alana ek olarak, uygulamalar geoteknik, ulaşım, hidrolikte de tercih edilir.

Geosentetik kil astarlar veya GCL'ler, polimerik malzemeler ile doğal toprakların ilginç bir yan yana gelmesidir. İki geotekstil arasına sıkıştırılmış veya bir geomembrana

bağlanmış fabrikada üretilmiş ince bentonit kili katmanlarıdır. Sonraki kompozitin yapısal bütünlüğü iğneyle delme, dikme veya yapıştırma ile elde edilir (Şekil 2.23). GCL'ler, bir geomembranın altında kompozit bir bileşen olarak veya tek başlarına geoçevresel ve çevreleme uygulamalarında ve ayrıca nakliye, geoteknik, hidrolik ve birçok özel geliştirme uygulamalarında kullanılır.

Geosentetik kil gömlekleri (GCL) günümüzde genellikle bariyer olarak kullanılmaktadır. Burada geçirimsizlik, iki geotekstil arasına yerleştirilmiş bentonit kili tarafından sağlanır. Dolayısıyla literatürde bu ürünler "kil geosentetik bariyer" olarak adlandırılmaktadır. GCL'ler katı atık depolama sahalarında, sulama kanallarında, temel izolasyonlarında, su depolarında ve maden atık barajlarında kullanılmaktadır. Yukarıda belirtildiği gibi GCL, iki geotekstil katmanı arasına ince bir bentonit katmanının (5-15 mm) ilave edilmesiyle üretilir. GCL genellikle düşük hidrolik geçirgenliği ($k \approx 10^{-10}$ m / s), düşük maliyeti ve kolay montajı nedeniyle tercih edilir. Ayrıca daha fazla dikiş ve zor geometrik komplikasyonlar gerektiren uygulamalarda başarılı çözümler sunar. Böyle bir örnek, kazıklı bir temelin su geçirmezlik astarıdır. Buradaki ana avantaj, bentonitin şişerek kendi başına küçük boşlukları doldurması ve kapatmasıdır (Guler 2017).



Şekil 2.23. Geosentetik kil (GCL) (Aydin ve Gelberi 2018)

Geofoam (geoköpük), polistirenin hava ve / veya gazlarla dolu birçok kapalı hücreden oluşan bir köpük haline getirilmesiyle oluşturulan polimerik bir üründür. Hücre duvarlarının iskelet yapısı, genleşmemiş polimerik malzemeden yapılmış kemik yapılarına benzer. Ortaya çıkan ürün genellikle büyük, ancak son derece hafif bloklar şeklindedir ve yan yana istiflenir ve çeşitli uygulamalarda hafif dolgu sağlayan katmanlar halinde bulunur.

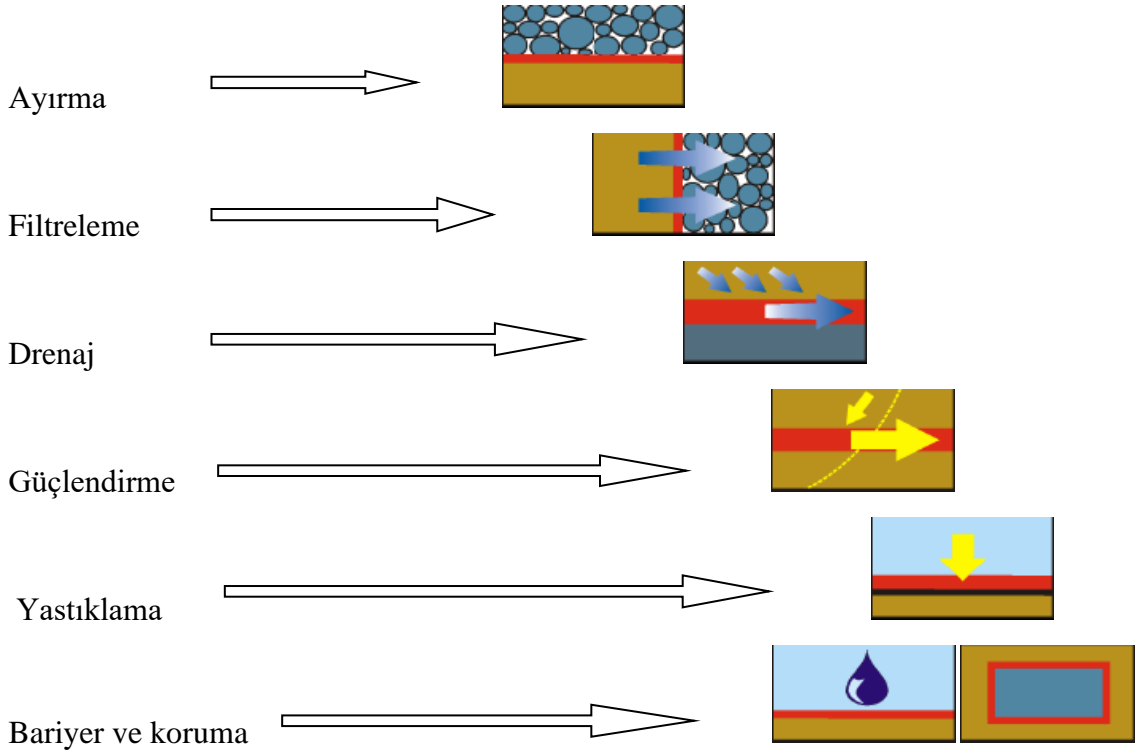
Geocells (Hücresel Hapsetme Sistemleri) olarak da bilinir, sıkıştırılmış toprakla doldurulduğunda bir hapsetme sistemi oluşturan üç boyutlu bal peteği şeklindeki hücresel yapılardır. Polimerik malzemelerden seri olarak ultrasonik olarak birbirine kaynaklanmış şeritler halinde ekstrüde edilen şeritler, esnek bir 3D hücresel yatağın sert (ve tipik olarak dokulu ve delikli) duvarlarını oluşturmak için genişletilir. Toprakla dolu, hücre-toprak etkileşimlerinden yeni bir kompozit varlık yaratılır. Hücresel sınırlama, toprak parçacıklarının yanal hareketini azaltır, böylece sıkıştırmayı sürdürür ve yükleri daha geniş bir alana dağıtan sertleştirilmiş bir şilte oluşturur. Eğim koruma ve toprak tutma uygulamalarında geleneksel olarak kullanılan gelişmiş polimerlerden yapılan yer hücreleri, uzun vadeli yol ve demiryolu yükü desteği için giderek daha fazla benimseniyor.

Geokompozit, fabrikada üretilmiş bir birimdeki geotekstillere, geogridler, geonetler ve/veya geomembranların bir kombinasyonundan oluşur. Ayrıca, bu dört malzemeden herhangi biri başka bir sentetik malzemeyle (örneğin, deforme olmuş plastik levhalar veya çelik kablolar) veya hatta toprakla birleştirilebilir. Örnek olarak, her iki yüzeyinde geotekstillere bulunan bir geonet veya geospacer ve geotekstil/bentonit/geotekstil sandviçten oluşan bir GCL, geokompozitlerdir. Bu özel kategori, mühendis ve üreticinin en iyi yaratıcı çabalarını ortaya çıkarır. Uygulama alanları çoktur ve sürekli büyümektedir. Ana işlevler, daha önce tartışılan geosentetikler için listelenen tüm işlevleri kapsar: ayırma, güçlendirme, filtreleme, drenaj ve muhafaza.

Geosentetik kapsüllenmiş sütunlar (GEC), tasarım yöntemleri ve tasarım standartlarına girmiş olanlardan biri, 'geosentetik Kaplı Sütun' veya kısa GEC olarak bilinen geosentetik kapsüllenmiş taş sütunlardır. Bilindiği gibi, geleneksel taş sütunlar gevşek kum içine yerleştirildiğinde, sütun doğal gevşek kumda yoğunlaşmaya neden olur ve bu nedenle sıvılaşmaya karşı çok etkili bir gelişme sağlar. Bununla birlikte, yumuşak kil sınırlı bir yanal basınç sağlayabildiğinden taş kolonlar yumuşak killere monte edildiğinde, kolona aktarılabilen dikey yük de sınırlandırılacaktır (Guler 2017).

2.6.2. Geosentetiklerin işlevleri

Geosentetikler, geoteknik, çevre geotekniği, hidrolik ve ulaştırma mühendisliği uygulamalarında kullanılmak üzere farklı sentetik polimer malzemeleri içeren özel olarak üretilmiş malzemelerdir. Bir geosentetiğin birincil işlevini ayırma, filtrasyon, drenaj, donatı, sıvı/gaz tutma veya erozyon kontrolü olarak belirlemek uygundur. Bazı durumlarda geosentetikler birden fazla işlevi de yerine getirerek hizmet verirler (Bathurst 2007). Uluslararası literatürde geosentetik fonksiyonlar şu şekilde sıralanmaktadır (Şekil 2.24); ayırma, filtrasyon, drenaj, takviye, geçirimsizlik (bariyer) ve koruma (Guler 2017).



Şekil 2.24. Geosentetiklerin fonksiyonları (Myles 2006)

Ayırma: Geosentetik, farklı parçacık boyutu dağılımlarına sahip iki toprak katmanını ayırma görevi görür. Örneğin, geotekstilller, yol temel malzemelerinin yumuşak altta yatan yumuşak alt zeminlere nüfuz etmesini önlemek, böylece tasarım kalınlığını ve yol bütünlüğünü korumak için kullanılır. Ayırıcılar ayrıca ince taneli alt zemin topraklarının geçirgen taneli yol tabanlarına pompalanmasını önlemeye yardımcı olur (Bathurst 2007).

Filtreleme: Genellikle ticari önemi büyük olmasa da, zayıf veya yetersiz performansın sonucu felaket olabilir (Myles 2006). Geosentetik, Yukarıdaki tüm toprak parçacıklarını korurken suyun toprakta hareket etmesine izin vererek bir kum filtresine benzer şekilde davranır. Örneğin, geotekstilller, sistem boyunca akışı korurken toprakların drenaj agregasına veya borulara hareket etmesini önlemek için kullanılır. Geotekstilller, toprak erozyonunu önlemek için kıyı ve nehir koruma sistemlerinde riprap ve diğer zırlı malzemelerinin altında da kullanılır (Richard J. Bathurst 2007).

Drenaj: Geosentetik, sıvı akışlarını daha az geçirgen topraklardan taşımak için bir drenaj görevi görür. Örneğin, geotekstilller karayolu setlerinin tabanındaki gözenek suyu basınçlarını dağıtmak için kullanılır. Daha yüksek akışlar için geokompozit drenler geliştirilmiştir. Bu malzemeler kaplama kenarı drenajları, eğim önleme drenajları ve dayanak ve istinat duvarı drenleri olarak kullanılmıştır. Dolguların ve ön yük dolgularının altındaki yumuşak kohezif temel topraklarının konsolidasyonunu hızlandırmak için prefabrik dikey drenajlar (PVD'ler) kullanılmıştır (Richard J. Bathurst 2007). Filtre çekirdekli kompozitler şeklindeki drenaj geosentetikleri giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bunlar hem sıvıları hem de gazları tahliye etmek için kullanılır (Myles 2006).

Güçlendirme (Takviye): Geosentetik, takviye edilmemiş zemin üzerinde gelişmiş mukavemet ve deformasyon özelliklerine sahip bir kompozit üretmek için bir toprak kütlesi içinde veya toprakla kombinasyon halinde bir takviye elemanı olarak işlev görür. Örneğin, geotekstilller ve geogridler, eğimde (güçlendirilmiş toprak duvarlar) dikey veya dikeye yakın değişiklikler oluşturmak için bir toprak kütlesine gerilme mukavemeti eklemek için kullanılır. Takviye, dolguların çok yumuşak temeller üzerine inşa edilmesini ve takviyesiz toprakla mümkün olabileceğinden daha dik açılarda dolgu yan eğimleri inşa

etmesini sağlar. Geosentetikler (genellikle geogridler), düzenli depolama uygulamalarında yük taşıyan granüler tabakaların (yollar ve demiryolları) altında veya örtü altı sistemlerin altında oluşabilecek boşluklar üzerinde köprü oluşturmak için de kullanılmıştır (Bathurst 2007).

Yastıklama: Geosentetik bir bariyeri korumak için bir yastık tabakasının kullanılması, düzenli depolama ve diğer bariyer uygulamalarında yaygındır. Yastıklama geosentetik spesifikasyonu, EN 13719 standartlarını sağlamalıdır (Myles 2006).

Geçirimsizlik (bariyer) muhafazası: Geosentetik, sıvılara veya gazlara karşı nispeten geçirimsiz bir bariyer görevi görür. Örneğin, geomembranlar, ince film geotekstil kompozitler, geosentetik kil astarlar (GCL'ler) ve sahada kaplanmış geotekstiller, sıvı veya gaz akışını engellemek için akışkan bariyerler olarak kullanılır. Bu fonksiyon aynı zamanda asfalt kaplamalarında, şişen toprakların kapsüllenmesinde ve atıkların muhafazasında da kullanılır (Bathurst 2007).

Erozyon kontrolü: Geosentetik, yağış etkisi ve yüzey suyu akışının neden olduğu toprak erozyonunu azaltmak için hareket eder. Örneğin, geçici geosentetik battaniyeler ve kalıcı hafif geosentetik paspaslar, yamaçlarda aksi halde açıkta kalan toprak yüzeyinin üzerine yerleştirilir. Geotekstil silt çitler, asılı parçacıkları tortu yüklü akış suyundan çıkarmak için kullanılır. Bazı erozyon kontrol matları, biyolojik olarak parçalanabilen ağaç lifleri kullanılarak üretilir (Bathurst 2007). Geosentetik tipleri ve fonksiyonları Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Geosentetik tipleri ve fonksiyonları (Özben 2006)

| GEOSENTETİK TİPİ | AYIRMA | GÜÇLENDİRME | FİLTASYON | DRENAJ | YALITIM |
|-----------------------------|---------------|--------------------|------------------|---------------|----------------|
| geotekstil | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| geogrid | | ✓ | | | |
| geonet | | | | ✓ | |
| geomembran | | | | | ✓ |
| geoboru | | | | ✓ | |
| geokompozit | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

2.7. Geosentiklerle Güçlendirilmiş Toprakarme Yapılarının Tarihsel Gelişimi

Kalıntılar tarih öncesi çağlardan beri toprağı iyileştirmek için kullanılmıştır. Kerpiç tuğlaların kalitesini artırmak için saman kullanımı, insanlık tarihinin en eski dönemlerine kadar uzanmaktadır. Birçok ilkel insan, çamur evlerini güçlendirmek için çubuklar ve dallar kullandı. 17. ve 18. yüzyıllarda, Kanada'daki Fundy Körfezi'ndeki Fransız yerleşimciler, çamur setlerini güçlendirmek için çubuklar kullandılar. İnsan yapımı toprak takviyesinin diğer bazı erken örnekleri, Çin'de en az 1000 yıldır (örneğin, Çin Seddi'nin batı kısmı) ve 1880'lerde Mississippi Nehri boyunca kullanılan toprak ve ağaç dallarını içerir. Diğer örnekler, İngiltere'de erozyon ve heyelan kontrolü için kullanılan tahta mandalları ve genel olarak kaplama erozyon kontrolü için kullanılan bambu veya tel ağları içerir. Canlı bitki kökleri kullanılarak toprak takviyesi de yapılabilir. İstinat duvarı yapımı için modern zemin güçlendirme yöntemlerine 1960'ların başında Fransız mimar ve mühendis Henri Vidal öncülük etti. Araştırmaları, çelik şerit takviyesinin kullanıldığı bir sistem olan Reinforced Earth®'ün icat edilmesine ve geliştirilmesine yol açtı. Amerika Birleşik Devletleri'nde bu teknolojiyi kullanan ilk duvar 1972'de Los Angeles'ın kuzeydoğusunda California State Highway 39'da inşa edildi. Günümüzde Mekanik Stabilize Toprak (MSE) duvarları çoğu dolgu durumunda tercih edilen duvardır ve MSE duvarları ABD'de ve dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde inşa edilen en yüksek kalıcı duvar, yaklaşık 41 m açıktaki bir yükseklik ile 46 m düzenindedir (Berg ve ark. 2009).

Türkiye'de ilk geosentetik takviyeli duvar 1997 yılında inşa edilmiştir. Bu, ülkedeki ilk geosentetik takviyeli duvar olmasına rağmen, arka arkaya bir duvar olup ve 10 m yüksekliğe sahiptir. Duvar ayrıca çeşitli geometrik ve yapısal komplikasyonlar içerir. Temel yükseltmeleri ve duvar yüksekliği duvar boyunca değişir. (Guler 2017).

2.8. Geosentiklerle Takviyeli Toprakarme Yapıların Avantaj ve Dezavantajları

MSE (Mekanik Stabilize Toprak) duvarları, geleneksel betonarme ve beton ağırlık istinat duvarlarına kıyasla birçok avantaja sahiptir. MSE duvarları:

- İnşaat için özel beceriler gerektirmez.
- Diğer alternatiflerden daha az saha hazırlığı gerektirir.
- İnşaat işlemleri için yapının önünde daha az alana ihtiyaç vardır.
- MSE yapıları deformasyonlara toleranslı olduğu için sert, dayanıklı temel desteğine ihtiyaç duymaz.
- Ekonomiktir.
- 30 m aşan yüksekliklere teknik olarak uygulanabilir.

MSE duvarlarının en büyük avantajlarından biri, zayıf toprak altı temel koşullarından kaynaklanan deformasyonları tolere etme esnekliği ve kabiliyetidir. Ayrıca, sismik olarak aktif bölgelerdeki gözlemlere dayanarak, bu yapılar, sert beton duvar yapılarına göre sismik yüklenmeye karşı daha yüksek bir direnç göstermiştir. Aşağıdaki genel potansiyel dezavantajlar, tüm güçlendirilmiş zemin yapıları ile ilişkili olabilir ve yerel ve proje koşullarına bağlıdır:

- Gerekli takviyeyi kurmak için duvarın veya eğimli yüzün arkasında nispeten büyük bir alan (örneğin, bir kesikte kazı) gerektirir.
- MSE duvarları, belirli granüler dolgu kullanılmasını gerektirir. (Bazı sahalarda, uygun dolgu malzemesi ithal etmenin maliyeti sistemi ekonomik hale getirmeyebilir.)
- Zemin takviyeli sistemlerin tasarımı genellikle malzeme tedarikçileri ve sahipleri arasında paylaşılan bir tasarım sorumluluğu gerektirir.

2.9. Toprakarme Uygulamaları

Ülkemizde ve dünyada günümüze kadar hem geotekstil kullanarak hem de metal şerit kullanarak birçok donatılı zemin uygulaması yapılmıştır (Şekil 2.25).



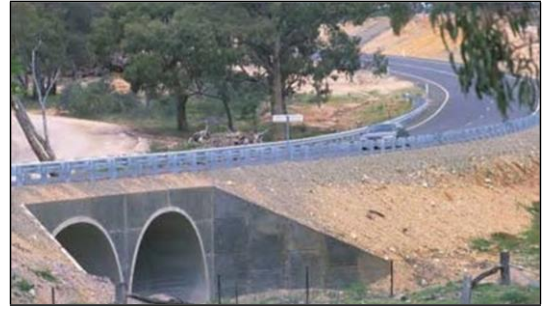
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 2.25. Donatılı toprak uygulamaları: a) İstinat duvarı, b) Köprü yanında merdiven, c) Köprü ayağı, d) Yol altı menfez, (e) Metal şeritli imalat, f) Köprü ayağı (Alkaya ve Yeşil 2012)

2.10. Geosentetik Donatılı Çalışmalar

Sayısal modelleme birçok araştırmacı tarafından GSR duvarlarının davranışını değerlendirmek için başarıyla kullanılmıştır (ör. Hatami ve Bathurst (2005), Ling ve ark. (2005), Cetin ve ark. (2006), Guler ve ark. (2007), Zarnani ve Bathurst (2009), Guler ve ark. (2012), Yu ve ark. (2016), Yu ve Bathurst (2017), Alhadj Chehade ve ark. (2019), Jiang ve ark. (2020).

Ling ve ark. (2005) alışmasında Diana-Swandyne-II programının revize olmuş versiyonuyla iki boyutlu şekil değiştirme analizi yapmıştır. Bu yöntemde, GRS-RW yapılarının tam ölçekli statik testleri ve dinamik santrifüj testleri baz alınarak doğrulama analizi gerçekleştirilmiştir. Doğrulanmış dinamik sonlu elemanlar yöntemi, modüler/segmental blok takviyeli toprak istinat duvarlarında toprak ve takviye özelliklerinin, takviye uzunluğu ve aralığının etkileri, takviye uzunluğu ve boşluklarının etkileri hakkında ek bilgiler kazanmak ve inşaat sonunda ve deprem yüklemesi sırasında duvarın performansı üzerindeki etkileşim özelliklerini engellemek için bir dizi parametrik çalışma yapmak için kullanılmıştır. Parametrik çalışmalarda farklı deprem hareketleri de kullanılmıştır.

Parametrik çalışmada düşünülen duvarlar 6,0 m yüksekliğinde ve modüler blok takviyelidir. Duvar yüksekliğinin % 70'inin (blok genişliği hariç 4,2 m) uzunlukta bir takviye düzenine ve 3 blok (0,6 m) dikey aralıklara sahip olduğu belirtilmiş ve böylece toplam 10 kat takviye kullanılmıştır. Genelleştirilmiş bir plastisite zemin modeli ve bir sınırlayıcı yüzey geosentetik modeli içeren doğrusal olmayan sayısal algoritmalar kullanılmıştır. Donatı yerleşimleri, statik ve dinamik yükler altında zemin özellikleri, blok etkileşim özellikleri ve deprem hareketleri araştırmanın ana değişkenleri arasında yer almıştır. Cephe deformasyonu ve kret yüzey oturması, yanal toprak basıncı, donatı katmanlarındaki çekme kuvveti ve ivme kuvvetlendirmesi için duvar performansı sunulmuştur.

Dolgu ve temel toprakları, Pastor-Zienkiewicz-Chan modeline göre bir gelişme olan genelleştirilmiş bir plastiklik modeli (Ling ve Liu 2003; Ling ve ark. 2004) tarafından ortaya sürülen modeli kullanılarak ifade edilmiştir. Modifiye edilmiş modelde sertlik, dilatanlık ve mukavemetin basınç seviyesi bağımlılığı dikkate alınmıştır. Model ayrıca, çevrimsel sertleşme davranışını simüle etmede orijinal versiyonuna göre iyileştirmeler yapmıştır ve toprak özellikleri bu yenilenmiş modelle belirlenmiştir.

Takviye ve yerleşimlerde, temel vaka analizinde 54 kN/m gerilme mukavemetine sahip yüksek yoğunluklu bir polietilen tek eksenli geogrid göz önüne alınmıştır. Döngüsel davranış deneysel olarak incelenmiş ve geosentiği sıkıştırmayı sürdürmeyen tek boyutlu bir eleman olarak gören sınırlayıcı bir yüzey modeli (Ling ve ark. 2001) kullanılarak analiz edilmiştir.

Deprem hareketlerin 5 türü için Dinamik analiz yapılmıştır; 1995 Kobe depremi (doğu-batı ve kuzey-güney bileşenleri), 1994 Northridge depremi, 1989 Loma Prieta depremi, 1952 Taft Depremi ve 1940 El Centro depremi' dir. Kobe-EW kayıtları ilk olarak esas alınmıştır. Farklı özelliklere sahip depremlerden ve saha koşullarından elde edilen kayıtların kullanılması, dinamik tepki üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

İnşaat sırasında toprak özelliklerinin ve çeşitli tasarım parametrelerinin duvar performansı üzerindeki etkileri, duvar yüzündeki yanal deformasyon, geogrid katmanlarındaki mobil yük ve blokların arkasına etki eden toprak basıncına göre incelenmiştir.

Parametrik çalışmaların sonuçlarına göre aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır; duvarın EOC ve çalkalama sonrası performansı, önem sırasına göre aşağıdaki değişkenlerden etkilenmiştir; toprak özellikleri, deprem hareketleri ve takviye düzeni (uzunluk ve aralık). Blok etkileşim davranışı ve takviye döngüsel özelliklerinden kaynaklanan etkiler minimaldir. Etkileşim davranışının etkileri ihmal edilebilir derecede küçük olmakla birlikte, bu çalışmada kullanılan ince arayüz elemanının sınırlamalarına maruz kalabilir.

- Yüzey yanal yer değiştirme, toprak davranışı ve donatı düzeninden etkilenmiştir. Takviye katmanlarındaki maksimum kuvvet aynı zamanda toprak davranışından ve düzeninden de etkilenmiştir, ancak takviye aralığının uzunluktan daha büyük bir etkisi olduğu görülmüştür. Blokların arkasındaki toprak basıncı, yukarıda bahsedilen değişkenlerden çok fazla etkilenmemiştir.
- En büyük yanal yer değiştirme duvarın üstünde meydana gelmiştir. Yanal yer değiştirme, en büyük yer değiştirmeyi sağlayan toprak döngüsel davranışı, takviye düzeni ve Kobe deprem hareketleri ile deprem hareketleri gibi faktörlerden etkilenmiştir.
- Donatı katmanlarındaki kuvvet, özellikle deprem hareketleri ve dikey boşluk gibi farklı değişkenlerden etkilenmiştir.
- Donatı yerleşimleri, yanal deplasmanlar, tepe yerleşimi, donatı kuvveti ve toprak basıncı dahil olmak üzere duvar performansını etkiledi. Dikey aralığın etkileri, takviye uzunluğuna göre daha önemli görünmektedir.

Cetin ve ark. (2006) çalışmasında saf ince ve kaba taneli lastik talaşlarının ve bunların karışımlarının (% 10, 20, 30, 40 ve % 50) killi kohezif (marjinal) toprakla hafif dolgu malzemesi olarak kullanım olasılıklarını araştırmak için bir dizi toprak mekanik testi ile araştırmıştır. Bu çalışmanın amacı, karayolu dolguları, köprü ayakları ve istinat yapılarının arkasındaki dolgu malzemesi olarak, saf ince ve iri taneli lastik yongalarının ve bunların killi (kohezif) bir zemin ile çeşitli karışımlarının geoteknik özelliklerini belirlemektir.

- Hem killi toprağı hem de karışımları Birleşik Toprak Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre sınıflandırmak için tane boyutu analizi ve Atterberg limit testleri yapılmıştır. Çalışmada başlıca indeks özelliğı testi, geçirgenlik testi, kesme ve deformasyon testi, sıkıştırma testi yapılmıştır. Bu çalışmadan yapılan çıkarımlar:
- Kesme dayanımlarının ince lastikler için % 30'a ve kaba lastik talaş karışımları için % 20'ye kadar arttığını göstermektedir. Normal basınç ve kesme dayanımı arasında doğru orantı vardır. İç sürtünme açısı azalırken, lastik yongalarının yüzdesi hem ince

hem de kaba karışımlar için % 40'a kadar yükseldikçe kohezyon artar. Ancak % 40'tan sonra kohezyon azalırken iç sürtünme açısı artar.

- Killi toprağın ve karışımların geçirgenlikleri, tipik düşük geçirgenlikle killi topraklarla tutarlıdır. Normal basınç düştükçe ve lastik yongası yüzdesi ile geçirgenlik arasında doğru orantı vardır. Hem ince hem de iri taneli lastik yongalarının tek başına geçirgenlikleri, lastik yongalarının tek başına veya kumla kombinasyon halinde setlerde yararlı bir dolgu malzemesi olarak kullanılmasını sağlayan tipik kumlardır.
- Son olarak sonuçlar, % 20 iri taneli lastik yongası ve % 30 ince taneli lastik yonga karışımlarının, karayolu dolgularında düşük ağırlık, düşük geçirgenlik ve yüksek mukavemete ihtiyaç duyulan yer altı suyu aşamasında kullanılabileceğini göstermektedir. Doymuş koşullar altında dolguların yüklenmesi sırasında gözenek basınçlarının gelişmesini önlemek için drenajın gerekli olduğu yerlerde kullanılmamalıdır.

Guler ve ark. (2007) çalışmasında toprakarme duvarların sayısal analizini sonlu elemanlar programı Plaxis kullanılarak yapmıştır. Çalışılan değişkenler donatı aralığı, donatı uzunluğu ve dolgu zemini kombinasyonlarıdır. Analiz ilk aşamada inşaat sürecinde yapılan analiz ve inşaat bitiminden sonra yapılan göçme faktörünün incelenmesidir.

Sonlu elemanlar modelindeki mekanik parametrelerin Hatami ve Bathurst (2005) tarafından bildirilen gerçek tam ölçekli test verileriyle aynı olduğu kabul edilmiş ve bu testin sonlu farklar analizi ile doğrulanması yapılmıştır. Doğrulama analizindeki toprak sertleşen toprak modeli ile modellenmiştir. Bu modelde, deviatorik stres ve eksenel gerilme arasındaki ilişki bir hiperbolle yakınlştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan hiperbolik model Duncan ve Chang (1970) tarafından önerilen modele çok benzediği görülmüştür.

Doğrulama analizinde kullanılan Hatami ve Bathurst (2005)' dan uyarlanan modeller; üç enstrümanlı tam ölçekli geosentetik takviyeli test duvarları (Duvar 1, Duvar 2 ve Duvar 3) 3,6 m yükseklikte ve 8 derece dik bakan bir meyilli idi. En fazla 6,0 m dolgu alanlarına sahiptiler. İlk duvar, 2,52 m uzunluğunda iki eksenli polipropilen geogrid ile inşa

edilmiştir ve her bir takviye tabakası, 0,6 m dikey aralığa sahiptir. İkinci duvar, geogrid sertliği ve mukavemetinin Duvar 1 takviyesinin yarısı olması dışında birincisiyle aynıdır. Üçüncü duvar, birinci duvarla aynı geogrid takviyesine ve geometrisine sahiptir, ancak geogridlerin dikey aralığı 0,90 m' dir. Bu çalışmadan çıkarılan sonuçlar aşağıdaki gibi belirtilmiştir:

İlk olarak, Hatami ve Bathurst (2005) tarafından rapor edilen test sonuçları ile aynı yapıların sonlu elemanlar analizi sonuçları karşılaştırılarak sayısal modelin doğrulama analizi yapılmıştır. Doğrulama çalışmasının sonuçları, test duvarlarının yatay duvarın yer değiştirmesi ile karşı karşıya olduğu, test duvarlarının taban ve temel reaksiyonlarının sayısal tahminlerle makul düzeyde uyumlu olduğunu göstermiştir.

Granül dolgulu geosentetik takviyeli duvarlar için, sonlu elemanlar analiz sonuçları, inşaat aşamasının sonundaki kayma gerilmesi konsantrasyonu konumlarının, halihazırda sınır dengesi analiz yöntemlerinde varsayılan göçme düzlemleri ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Bu, geosentetik takviyeli toprak tutma yapılarının güvenlik faktörlerini analiz etmek için akım sınır dengesine dayalı tasarım yöntemlerinde (örneğin FHWA, 1997; NCMA 1997) kullanılan potansiyel göçme yüzeylerinin doğru olduğunu göstermektedir.

Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen kayma gerilmeleri, güvenli seviyeyi aştığında duvarların marjinal ve granüler dolgu için göçme modu haline geldiğini göstermiştir. Takviye uzunluğunun yüksekliğe oranı arttıkça, güçlendirilmiş dolgu ile doğal dolgu arasındaki ayırım azalmıştır. Dikey takviye aralığının da bu davranış üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. 0,5 m'lik bir takviye aralığı için, bir bütün olarak sistem göçmeye yaklaştığında bile, takviyeli bölgenin neredeyse bozulmadan kaldığı gözlenmiştir. 1 m donatı aralığı için, donatı bölgesinde daha büyük deformasyonlar gözlenmiştir. Takviye katmanları, güçlendirilmiş toprak ile rijit kaplama elemanları arasındaki kaplama ve diferansiyel dikey yerleşimin dönmesi nedeniyle, kaplamaların hemen arkasında yüksek yükler ve zorlanmalar geliştirmiştir.

Takviye gerilmeleri granüler dolguya nazaran marjinal dolguda daha düşüktür. Marjinal dolguda hiçbir kesme gerilmesi oluşmadığı ve göçmenin meydana gelmediği görülmüştür. Modellerde hem kohezif hem de granüler toprak, dolgu malzemesi yeterli gibi görünüyor. Uygulamada, bu ancak uygun drenaj önlemleri sağlandığında mümkün olduğu belirtilmiştir.

Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen kayma gerilmeleri, tasarım yükleri aşıldığında (veya sistem artık güvenli olmadığında), geosentetik GRS' de hem granüler hem de kohezif toprakları olan duvarlar için göçme moduna geçtiğini göstermiştir. Modellerde yapı sağlam bir temel üzerine inşa edilmiştir. Dikey takviye aralığının da bu davranış üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. 0,5 m'lik bir takviye aralığı için, bir bütün olarak sistem göçmeye yaklaştığında bile, takviyeli bölgenin neredeyse bozulmadan kaldığı gözlenmiştir. 1 m donatı aralığı için, donatı bölgesinde daha büyük deformasyonlar gözlenmiştir. Takviye katmanları, güçlendirilmiş toprak ile rijit kaplama elemanları arasındaki kaplama ve diferansiyel dikey yerleşimin dönmesi nedeniyle, kaplamaların hemen arkasında yüksek yükler ve zorlanmalar geliştirmiştir.

Zarnani ve Bathurst (2009) çalışmasında, rijit duvar–kum dolgulu uygulamalarında EPS (geofom) tamponların dinamik yükün etkisini azaltma konusuyla ilgili parametrik bir çalışmayı gerçekleştirmek için doğrulanmış bir sayısal model kullanılmıştır. İncelenen varyasyonlar arasında kalınlık (t) ve geofom tipi (elastik modül, E), duvar yüksekliği, tampon sertliği ($K = E/t$), giriş frekansının tampon toprak sisteminin doğal frekansına yakınlığı ve giriş uyarma kaydının etkisi yer almıştır.

bu çalışmadaki değerler Zarnani ve Bathurst (2008) tarafından yapılan orijinal FLAC modellerindeki değerlere uyacak şekilde doğrulama analizi yapılmıştır. Değerlendirme sonucunda elde edilen verilerden birkaçı şu şekildedir:

- Değişken yükseklikte simüle edilmiş sert istinat duvarlarının arkasına dikey bir EPS sismik tampon tabakası uygulanması sismik yüklerde önemli bir azalma meydana getirmiştir.

- Geofam modülünün azalmasıyla, diğer tüm etkenler sabit tutulduğunda sismik yük zayıflaması aynı oranda artış göstermiştir.
- İnce tamponların sismik etkilerde verimliliği daha belirgin olmuştur.
- İncelenen en yüksek frekans oranında (yani, doğal frekansın % 140'ı), duvar yüksekliği, incelenen maksimum veya minimum sıkıştırılabilir EPS geofam malzemeleri kullanılarak izolasyon verimliliğindeki farkı etkilememiştir. Diğer tüm frekans oranlarında, duvar yüksekliği arttıkça yalıtım verimliliğindeki fark artmıştır.

Guler ve ark. (2012) çalışmasında, Ling ve ark. (2005)'in çalışmasından alınan toprak istinat duvarına ait fiziksel verilerin sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulama analizi yapılmıştır. Bu analizle fiziksel değerlerle Plaxis programından yararlanarak Kobe depremindeki ivme değerlerine karşılık gelen maksimum deplasman değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. En kritik yer değiştirme olan duvarın üst kısmındaki yatay yer değiştirmeler için sonlu elemanlar sonuçlarının uygulamada ölçülen değerlere çok yakın çıktığı görülmüştür. Ayrıca bunun yanında Elastik model için genel toprak parametreleri (Bathurst ve Hatami 1998) uyarlanan bir modelin dolgu tipi baz alınarak (marjinal dolgu ve granüler dolgu) değişen parametreler ile sonlu elemanlar analizi yapılarak dolgu malzemesi tipi, takviye sertliği ve kaplama tipi etkilerinin değerlendirildiği görülmüştür.

Değerlendirmeler neticesinde daha sert takviye kullanılması, duvarın yer değiştirmesinin azalmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, aynı zamanda daha sert takviye kullanılması takviye üzerindeki gerilme yüklerini arttırmıştır. Maksimum yer ivmesinin duvarların sismik tepkisi üzerinde önemli derecede etkisi olmuştur.

Bu çalışmanın en önemli sonuçlarından biri, granüler dolgu yerine yapışkan marjinal dolgu kullanıldığında, yatay duvar deformasyonunun % 50'ye kadar azalması ve takviyedeki gerilme kuvvetlerinin önemli ölçüde azalmasıdır. Orta yükseklikte güçlendirilmiş toprak istinat duvarlarında dolgu malzemesi olarak yeterince sıkıştırılmış ve boşaltılmış bir yapışkan malzemenin başarılı bir şekilde kullanılabileceği söylenebilir.

Dokuma geotekstil ve yapışkan marjinal dolgu toprağı kullanımının iyi bir kombinasyon olduğı ve hem statik hem de deprem yükleri altında güçlendirilmiş toprak tutma yapılarının davranışını optimize ettiğı görülmüştür.

Yu ve ark. (2016) çalışmasında SR-18 karayolunda mevcut iki Takviyeli MSE duvar bölümünün davranışını simüle etmek için sonlu farklar yöntemi (FDM) programı FLAC kullanılarak gerçekleştirilen sayısal modellemenin ayrıntılarını raporlamaktadır. Washington Eyaleti'nde Seattle'ın güneydoğusunda Maple Valley yakınlarındaki SR-18 otoyolunun genişletilmesinin bir parçası olan bir setin desteklenmesi için bir dizi modüler blok duvar inşa edilmiştir. Bu çalışmada iki farklı duvar yüksekliğı kullanılmıştır. Duvarlardan yüksek olanı 10,7 m, diğeri ise 6,4 m yüksekliğindedir. Her iki duvarda da aynı kaplama blokları ve toprak dolgusu kullanılmış ancak düzenlemeye göre takviye ürünleri farklıdır. Bu projedeki duvarlar, donatı yüklerini tahmin etmek ve bu yöntemi kullanarak geogrid donatı miktarını azaltmak ve mümkün olan maliyet tasarruflarını göstermek için K-sertlik Metodu kullanılarak tasarlanmıştır. Takviye ve dolgu malzemelerinin statik ve dinamik özellikleri ayrıntılı bir şekilde deneye tabi tutulmuştur.

Sayısal analizlerde (1) Mohr-Coulomb (MC) başarısızlık kriterine sahip doğrusal elastik model ve (2) Mohr-Coulomb göçme kriterine sahip doğrusal olmayan model (modifiyeli Duncan-Chang modeli) zemin modelleri olarak kullanılmış, her iki modelden elde edilen sayısal sonuçlar çoğı kez benzerlik göstermiştir ve bu da granüler bir dolgu için basit bir doğrusal-elastik MC modelin çalışma koşulları altında bu duvarlar için yeterli olabileceğini göstermiştir.

Sayısal modellemenin sonuçlarıyla sahadaki MSE tutunma yapılarının iki yıllık performans sonuçları karşılaştırılmıştır. Tahmin edilen duvar deformasyonlarının ve takviye gerilmelerinin, toprak için hem doğrusal elastik-plastik hem de doğrusal olmayan elastik-plastik yapı modelleri kullanılarak ölçülen verilerle makul bir uyum içinde olduğunu göstermektedir. Çalışmada, AASHTO ve Basitleştirilmiş Yöntemi ve K-sertlik Yöntemi kullanarak inşaatın sonundaki donatı yüklerinin sayısal analiz sonuçlarını, arazide ölçülen değerler ve tahminlerle karşılaştırmaktadır.

Yu ve Bathurst (2017) çalışmasında sonlu farklar yöntemi (FDM) ile program (FLAC)' te bileşen oluşturuvcu modeller için parametre değerlerinin mevcut olmadığı iki örneği ele almıştır: (1) Bir çekme kutusundaki bir geosentetik (geogrid) takviye tabakasının yatay olarak çekilmesi ve (2) Bir hava boşluğu üzerinde bir geosentetik (geotekstil) takviyeli zemin tabakası' dır. Ayrıca, eksik toprak ve arayüz modeli parametre değerleri için parametrik duyarlılık analizlerinin sonuçlarını sunmuş ve ölçülen verilerle en iyi uyumu sağlayan değerleri tanımlamıştır. Lineer olmayan geometrinin doğru modellemesinin, gerilmiş membran etkisi ile geosentetik takviyeli zemin sistemlerinin performansını doğru bir şekilde tahmin etmenin anahtarı olduğunu göstermiştir.

Literatürde bildirilen fiziksel testlerden bir dizi eksik olan parametre değerleri kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar, Moraci ve Recalcati (2006) ve Villard ve Briançon (2008) tarafından bildirilen fiziksel test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. İlk örnek Sayısal geogrid çekilme modelleri; Moraci ve Recalcati (2006) tarafından bildirilen fiziksel testlere dayanmaktadır. Testler 1,70 m uzunluğunda, 0,60 m genişliğinde ve 0,68 m yüksekliğinde bir çekmecede gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada fiziksel testte kullanılan modelin FLAC programında modellenerek sayısal analizi yapılmış ve fiziksel testteki parametre yorumları baz alınarak, Granül Toprak Young Modülünün (malzemenin esnekliğinin ölçüsü) (E), Granül Toprak Kohezyonun (c), Kuvvet Azaltma Faktörünün (R_i), Toprak-Geogrid Arayüz Sertliğinin (K_s), FLAC Gerilme Modunun etkisi incelenmiş ve fiziksel test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

İkinci örnek bir hava boşluğu üzerinde geotekstil ile güçlendirilmiş toprak (çakıl) tabakasıdır; Villard ve Briançon (2008) tarafından bildirilen fiziksel bir teste dayanmaktadır. Boşluğun bulunduğu yerdeki takviyeli toprak tabakası başlangıçta iki şişirilmiş hava yastığı tarafından desteklenmiştir. Hava yastıkların söndürülmesiyle geotekstil altında oluşan boşluğun çakıl tabakasıyla temasıyla fiziksel testin başladığı bildirilmiştir. Simülasyonlar, orijinal fiziksel testin düzlem gerinim koşullarıyla eşleşen 1 m düzlem dışı genişliğe sahip FLAC kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada fiziksel testte kullanılan modelin FLAC programında modellenerek sayısal analizi yapılmış ve fiziksel testteki parametre yorumları baz alınarak, çakıl tabakası Young modülünün etkisi, çakıl tabakası yapışma mukavemeti bileşeninin etkisi, destekleyici

toprak yapışma mukavemeti bileşeninin etkisi, Toprak-geosentetik arayüz normal sertliğinin etkisi, toprak-geosentetik arayüz kayma sertliğinin etkisi, toprak-geosentetik arayüzün normal ve kesme dayanımı etkisi, küçük gerilme ve büyük gerilme mod seçenekleri etkisi incelenmiş ve fiziksel test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada bildirilen sonuçlara dayanarak, aşağıdaki sonuçlar özetlenebilir:

- Kum ve çakıl gibi tanecikli malzemeler için, toprağın Young modülünün 10 ila 100 MPa arasındaki kullanımı, incelenen örneklerin ve diğer tüm koşulların değişmeden geosentetik tepkileri üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir.
- Serbest sınırlı belli zeminde toprak ve geosentetik etkileşim problemlerinde sayısal kararlılığı sağlamada granüler malzeme modellenirken küçük bir kohezyon önerilebilir.
- Geosentetik ve çevresindeki topraklar arasındaki arayüz normal sertlik $k_n = 100$ MPa/m ve kesme sertliği $k_s = 10$ MPa/m kullanılarak modellenilebilir. İkinci değer, düzlem dışı yönde geosentetik sürekli Flac kablo elemanları kullanırken arayüz sertliği $K_s = 20$ MN/m/m'ye karşılık gelir.
- Çevreleyen toprağa bir mukavemet azaltma faktörü olan R_i değeri verilmediği takdirde $R_i = 0,67$ uygulanabilir. Bu ayrıca AASHTO (2014) tarafından önerilen değerdir.
- Sayısal sonuçlar, özellikle küçük sınırlandırma basınçlarına sahip testler için, küçük başlangıç yer değiştirmelerinde (örneğin 20 mm'den az) ve en yüksek çekilme yükünde ölçülen değerlerle makul pratik uyum içindedir.
- Desteklenmeyen bir geotekstil ile güçlendirilmiş toprak tabakasının bir boşluk üzerinde sayısal analizi, FLAC küçük gerilme modunu kullanan sayısal modellerde kuvvet dengesinin (sayısal yakınsama) sağlanamadığını göstermiştir. Bunun nedeni, FLAC küçük gerilim modunu kullanan yatay yapı (ışın) elemanlarının sadece yatay eksenel yükler üretebilmesidir; dolayısıyla yatay yükler ve yatay yapı elemanlarına etki eden dikey gerilmeler arasında kuvvet dengesi sağlanamaz. Bununla birlikte, kuvvet dengesi, FLAC'deki büyük gerilim modu kullanılarak elde edilmiştir. FLAC büyük gerilim modunu kullanan hesaplanan geotekstil deformasyonlar ve gerilmeler, fiziksel bir testten ölçülen verilerle iyi uyum içindedir.

Alhadj Chehade ve ark. (2019) çalışmasında, çatlakları olan bir GRS-RW yapısının dinamik iç stabilitesini analiz etmek için ayrıklaştırma tekniğini, limit analizinin üst sınır teoremi ile birleştirmiştir. Güçlendirilmiş marjinal dolgulu istinat duvarlarının toprak dolgudaki çatlaklar dikkate alınarak sismik yükleme etkisinde stabilitesini, limit analizinin kinematik teoremine dayalı olarak incelemiştir. Çatlaklı güçlendirilmiş toprak istinat duvarında, önerilen yöntemin sismik analizde uygulamasını doğrulamak için yöntemin sonuçları ile statik koşullar altında çatlaklı güçlendirilmiş şevlerin stabilitesini araştıran Abd ve Utuli (2017) tarafından elde edilen geleneksel kinematik limit analizi yaklaşımının sonuçlarıyla karşılaştırmıştır.

Geosentetik takviyeli toprak istinat duvarlarının sismik yükleme etkisinde, psödo-statik ve psödo-dinamik yaklaşımlar arasındaki farklılıkları ve toprak kuvveti parametrelerinin stabilitesi üzerindeki etkilerini ölçmek için bir parametrik analiz de sunulmuştur. Bu parametrik analizde donatı uzunluğunun etkisi, toprak mukavemeti özelliklerinin etkisi, amplifikasyon faktörünün etkisi (f) incelenmiştir.

Değerlendirmeler neticesinde Çatlağın varlığı, güçlendirilmiş toprak duvarının stabilitesini sağlamak için gerekli takviye mukavemetinin artmasına neden olmuş, bu nedenle marjinal (kohezif) bir toprak kullanırken çatlakların dikkate alınmasının önemi ortaya çıkmıştır.

Dolgunun karakteristik özellikleri, sistemin iç stabilitesini sağlamak için gereken takviye miktarı hakkında önemli ölçüde ipuçları verir ve etkisi göz ardı edilemez. Marjinal bir dolgu için gerekli takviye, zemin sürtünme açısı ve kohezyonu arttırırken, azalır.

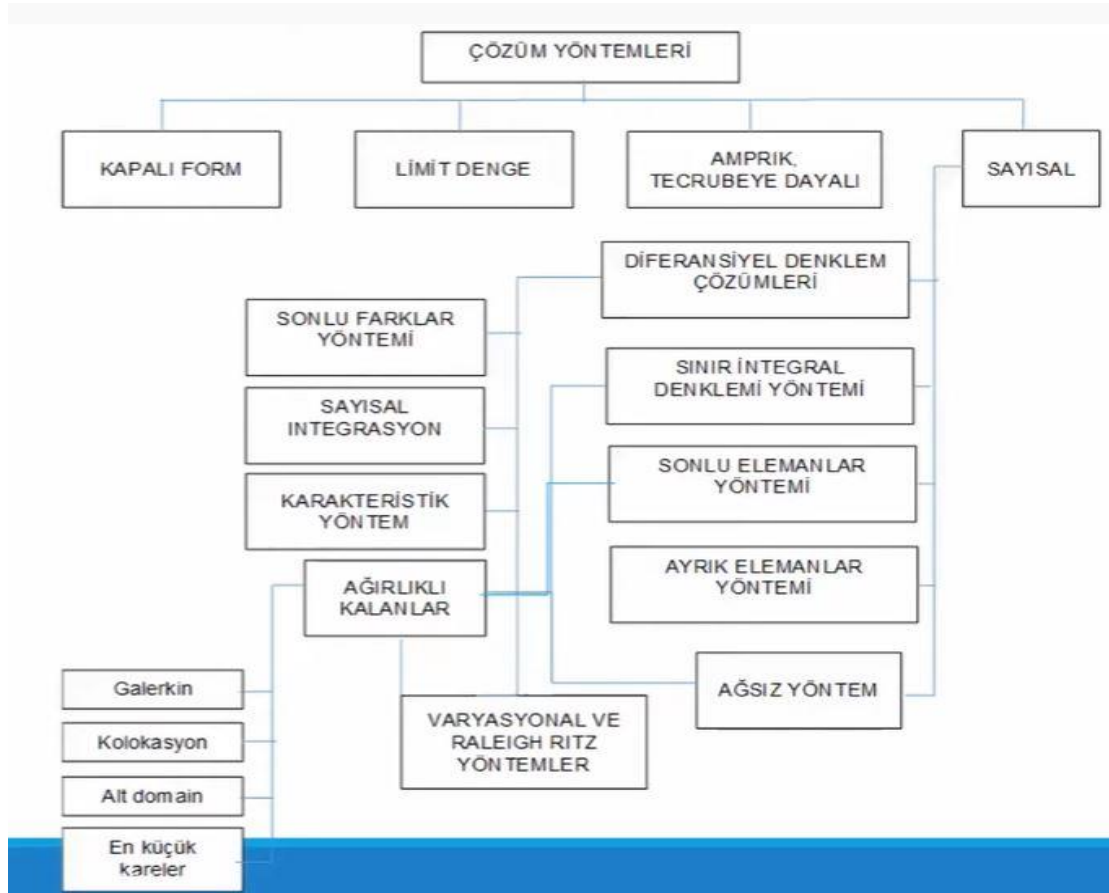
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde ilk olarak nümerik analiz yöntemleri ve sonlu elemanlar analizleri ile ilgili genel bilgi verilmiştir. Daha sonra ise sonlu elemanlar analizi programı PLAXIS 2D ve programda kullanılan malzeme modelleri ile parametreler hakkında bilgi verilmiştir.

3.1. Çözüm Yöntemleri

Zemin problemlerinde çözüm yöntemleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çözüm yöntemleri kendi içerisinde sırasıyla; kapalı form, limit denge, amprük tecrübeye dayalı ve sayısal olmak üzere dört alt başlığa ayrılmıştır. Bu alt başlıklardan biri olan sayısal yöntemler kendi içerisinde beş alt başlığa ayrılmış ve bu alt başlıklardan biri de sonlu elemanlar yöntemidir.

Çizelge 3.1. Zemin problem çözüm yöntemleri (Berilgen 2014)



3.2. Sayısal Yöntemler

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve Sonlu fark yöntemi (FDM) dahil olmak üzere sayısal modelleme, GRS-RW'nin karmaşık sistemini araştırmada güçlü bir araştırma aracı ve geleneksel analiz yönteminin bir tamamlayıcısı haline gelmiştir. FEM en popüler yöntemdir çünkü karmaşık malzeme özellikleri, sınır koşulları ve karmaşık yükleme ve yapım geçişleri ile çok karmaşık yapıları modelleyebilir (Liu 2003).

Sayısal yöntemler, 1950 ve 1960'lı yıllarda elastisite teorisinin çözümünde kullanılmıştır. 1970'li yıllardan sonra doğrusal olmayan malzeme davranışını baz alarak bilgisayarlar yardımıyla çözüm tekniklerinin geliştirilmesiyle kullanılmaya ve yaygınlaşmaya devam etmiştir (Berilgen 2018). Sayısal yöntemlerin avantajları şu şekilde özetlenebilir:

1. İdeal çözüm gerçekleştirilebilir.
2. Karmaşık geometri modellenebilir.
3. Karmaşık yükleme ve sınır koşulları göz önüne alınabilir.
4. Doğrusal olmayan malzeme davranışı modellenebilir.
5. Bütünleşik malzeme davranışı (poroz ortam) ile drenajsız durum ve sonrasında konsolidasyon davranışı modellenebilir.
6. Bütünleşik analizler yapılabilir.
7. Zemin yapı etkileşimi modellenebilir.
8. İnşa adımları modellenebilir.
9. Karmaşık su etkileri modellenebilir.
10. Çok fazla şekil değiştirme durumu modellenebilir
11. Rölatif hareket ve/veya penetrasyon modellenebilir.

Yukarıda belirtildiği gibi sayısal modellemenin avantajları diğer yöntemlere göre oldukça fazladır. Bu avantajlar yanında birtakım sınırlamaların olduğu akıldan çıkarılmamalıdır. Sayısal modelleme, kullanıcının bilgi düzeyi ve alışkanlıklarından çok etkilenmektedir. (Berilgen 2018).

Sayısal modellemelerde çok yaygın olarak kullanılan sayısal analiz yöntemleri sonlu farklar yöntemi ile sonlu elemanlar yöntemidir. Bu yöntemlerin çözümlerinde bilgisayar yazılımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yazılımlara Abaqus, Ansys, Plaxis ve Flac örnek verilebilir. Bu tezde, bu yöntemlerden sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan Plaxis programı seçilmiştir.

Plaxis' te sayısal modellemedeki hedefler:

- Yeni bir proje başlatma
- Eksenel simetrik model oluşturma
- Delme özelliğini kullanarak zemin stratigrafisi oluşturma
- Zemin için malzeme veri setlerinin oluşturulması ve atanması (Mohr-Coulomb modeli)
- Öngörülen yer değiştirmeleri tanımlama
- Plaka özelliğini kullanarak temel oluşturma
- Plakalar için malzeme veri setleri oluşturma ve atama
- Yük oluşturma
- Ağın oluşturulması
- K_0 prosedürünü kullanarak ilk gerilmelerin oluşturulması
- Plastik hesaplama tanımlama
- Hesaplama aşamalarında yüklerin değerlerinin etkinleştirilmesi ve değiştirilmesi
- Hesaplama sonuçlarını görüntüleme
- Eğriler için nokta seçme
- Bir 'Yük- yer değiştirme' eğrisi oluşturma
- Bir 'Gerilme- zaman' eğrisi oluşturma
- Bir 'güvenlik sayısı (GS)- yerdeğiştirme' eğrisi oluşturma

3.2.1. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM)

Sonlu elemanlar yöntemi, bir gövdenin veya bir yapının, sonlu elemanlar adı verilen alt bölümlerin bir araya getirilmesiyle temsilidir, bu elemanların düğüm adı verilen noktalarda birbirine bağlı olduğu kabul edilir. Bu yöntem, yapıları ve sürekliliği analiz etmek için sayısal bir prosedürdür. FEM, basitten karmaşık geometrilere yapısal analizde

güçlü bir araçtır (Oyegbile 2011). Sonsuz serbestlik derecesine sahip bir yapı, belirli bir serbestlik derecesine sahip sonlu elemanlara bölünür. Bir eleman, elemanların bağlı olduğu bir dizi düğüm tarafından tanımlanan geometrik şekillerdir. Bir düğümün hareket edebileceği yönler serbestlik derecesi (dof) olarak adlandırılır (Aslan 2007).

Sonlu elemanlar analiz yazılımı Plaxis 2D kullanılarak, sayısal bir çalışma gerçekleştirilebilir. Bu yazılım, kullanıcının derin kazılar, tünel kazıları ve yer altı yapıları gibi geniş geoteknik sorunları analiz etmesini sağlar. Plaxis 2D ile bir model kurmak için, bir problemin üç temel bileşeni belirtilmelidir:

1. Ağ oluşumu
2. Bünye davranışı ve malzeme özellikleri
3. Başlangıçtaki sınır koşulları

İlişkili malzeme özellikleri ve kurucu davranış, modelin yükleme üzerine göstereceği yanıt türünü belirler. Başlangıç ve sınır koşulları, simüle edilen modeli tanımlar. Sonlu elemanlar teknikleri en titiz yöntemler olduğundan, bu çalışmada da takviyeli toprak istinat yapılarının stabilitesini araştırmak için böyle bir teknik seçildi.

3.3. Plaxis Programının Genel Tanımı

PLAXIS, geoteknik mühendisliğinde deformasyon, stabilite ve yeraltı suyu akışının analizi için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar programıdır. Geoteknik mühendisliği ve tasarımı için dünya çapında kullanılan bir sonlu elemanlar programları paketi olan PLAXIS ürün yelpazesinin bir parçasıdır. PLAXIS'in geliştirilmesi 1987'de Delft Teknoloji Üniversitesi'nde Hollanda Bayındırlık ve Su Yönetimi Bakanlığı'nın (Rijkswaterstaat) bir girişimi olarak başladı. İlk amaç, Hollanda'nın ovalarının yumuşak topraklarındaki nehir setlerinin analizi için kullanımı kolay bir 2D sonlu elemanlar kodu geliştirmektir. Sonraki yıllarda PLAXIS, geoteknik mühendisliğinin diğer alanlarının çoğunu kapsayacak şekilde genişletildi. Sürekli büyüyen faaliyetler nedeniyle PLAXIS şirketi (Plaxis BV) 1993 yılında kuruldu. 2018 itibarıyla PLAXIS, altyapı projelerinin

planlanması, tasarımı ve bakımı için yazılım konusunda uzmanlaşmış ABD merkezli bir şirket olan Bentley Systems, Incorporated'ın bir parçasıdır.

3.4. Plaxis Bilgisayar Programı Kullanılarak GRS Tutma Yapılarının Sayısal Modelin Geliştirilmesi

Modelleme, daha karmaşık bir fiziksel gerçeklikten basitleştirilmiş bir matematiksel gerçeklik oluşturmak için kullanılan süreçtir (Fratta ve Bozkurt 2014). Zeminlerin ve kayaların mekanik davranışı, çeşitli doğruluk derecelerinde modellenebilir. Hooke'un doğrusal, izotropik esneklik yasası, örneğin, mevcut en basit gerilme-şekil değiştirme ilişkisi olarak düşünülebilir. Yalnızca iki girdi parametresi içerdiğinden, yani Young modülü, E ve Poisson oranı, ν , genellikle toprak ve kaya davranışının temel özelliklerini yakalamak için fazla kabadır. Doğrusal elastik mükemmel plastik modeli (Mohr-Coulomb), zemin veya kaya davranışının birinci dereceden bir yaklaşımı olarak düşünülebilir. Bununla birlikte, PLAXIS, sertliğin strese bağımlılığı, gerinim sertleştirme/yumuşatma, ön konsolidasyon yüklemesi, kritik durum, anizotropi, sünme, şişme ve büzülme gibi belirli özellikleri içeren daha gelişmiş malzeme modellerini içerir. Kullanıcılar, toprakların ve kayaların davranışını daha gerçekçi bir şekilde modellemek ve böylece PLAXIS hesaplamalarından daha doğru sonuçlar elde etmek için gelişmiş modelleri kullanmaya çalışır.

Bu çalışmada, GRS-RW'nin statik ve dinamik yüklemeleri Plaxis programının en yeni sürümü olan (Plaxis 2D V20) programı ile gerçekleştirilmiştir. Plaxis programında bir GRS-RW'nin geometrik modelini oluşturmak; noktalar, çizgiler, kümeler, Geotekstil elemanlar, arayüz elemanları, yatay ve düşey sabitlikler, emici sınırlar ve öngörülen yer değiştirmeler kullanılır. Başlangıç ve bitiş noktaları çizgileri oluşturur. Çizgiler, geometrinin fiziksel sınırlarını tanımlamak için kullanılır. Ayrıca çizgiler, kümeler oluşturmak için alanları çevreler. PLAXIS programı, kapalı bir alan oluşturulduktan sonra kümeleri otomatik olarak tanıır. Malzeme veri tabanında zeminlerin veya modüler blokların malzeme özelliklerini oluşturduktan sonra, malzemeler ilgili kümelere atanır. Kümelerdeki toprak daima homojendir (Enünlü 2007).

3.5. Zemin Modelleri

PLAXIS kodu ve zemin modelleri gerçekçi geoteknik problemlerin hesaplamalarını yapmak için geliştirilmiştir. Bu bağlamda PLAXIS, bir geoteknik simülasyon aracı olarak düşünülebilir. Zemin modelleri, zemin davranışının niteliksel bir temsili olarak kabul edilebilirken, model parametreleri toprak özelliklerini ölçmek için kullanılır. PLAXIS kodunun ve onun toprak modellerinin geliştirilmesi için çok dikkatli olunmasına rağmen, sayısal modelleme hataları kaçınılmaz olabilir. Dahası, gerçekliğin yaklaşık olduğu doğruluk, büyük ölçüde kullanıcının problemin modellenmesi konusundaki uzmanlığına, zemin modellerinin anlaşılmasına ve sınırlamalarına, model parametrelerinin seçimine ve hesaplama sonuçlarının güvenilirliğini değerlendirme yeteneğine bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan modeller aşağıda listelenmiştir.

3.5.1. Doğrusal/lineer elastik model (LE)

Doğrusal elastik model, Hooke'un izotropik esneklik yasasına dayanmaktadır. İki temel elastik parametreyi içerir, yani Young modülü E ve Poisson oranı, ν . Doğrusal elastik modeli toprağı modellemek için uygun olmasa da beton duvarlar veya sağlam kaya oluşumları gibi topraktaki sert hacimleri modellemek için kullanılabilir.

3.5.2. Mohr-coulomb modeli (MC)

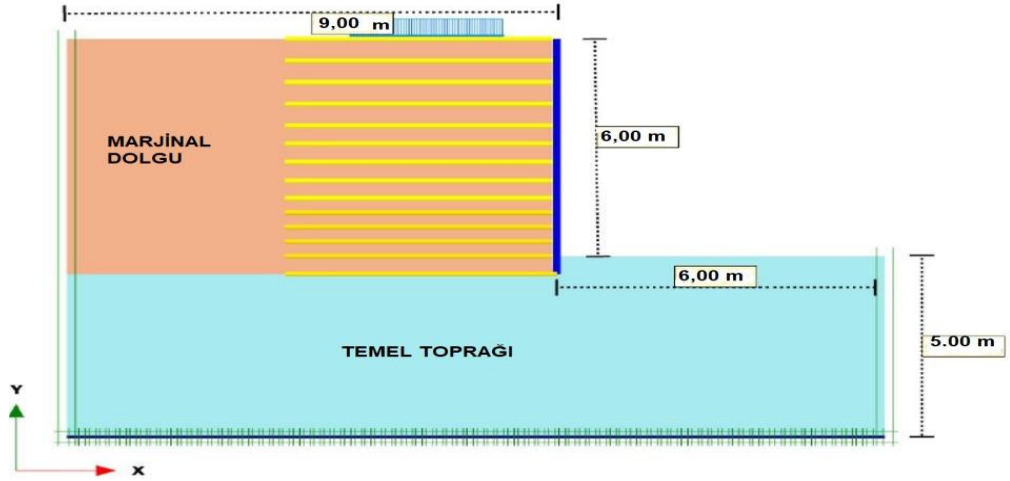
Doğrusal elastik mükemmel plastik Mohr-Coulomb modeli beş girdi parametresini içerir; yani toprak esnekliği için E ve ν ; toprak plastisitesi için sürtünme açısı, ϕ ve kohezyon, c ve bir genleşme açısı olarak, ψ . Bu Mohr-Coulomb modeli, zemin veya kaya davranışının 'birinci dereceden' bir yaklaşımını temsil eder. Her katman için, sabit bir ortalama sertlik veya derinlikle doğrusal olarak artan bir sertlik tahmin edilir. Bu sabit sertlik nedeniyle, hesaplamalar nispeten hızlı olma eğilimindedir ve bir ilk deformasyon tahmini elde edilir.

Topraklar, gerilim veya gerilme değişikliklerine maruz kaldıklarında oldukça doğrusal olmayan davranış sergilerler. Gerçekte, zeminin sertliği en azından gerilme seviyesine, gerilme yoluna ve gerilme seviyesine bağlıdır. Bu türden bazı özellikler, PLAXIS'teki gelişmiş zemin modellerinde yer almaktadır. Mohr-Coulomb modelinin doğrusal elastik kısmı, Hooke'un izotropik esneklik yasasına dayanmaktadır. Mükemmel plastik parça, ilişkili olmayan bir plastisite çerçevesinde formüle edilmiş Mohr-Coulomb göçme kriterine dayanmaktadır.

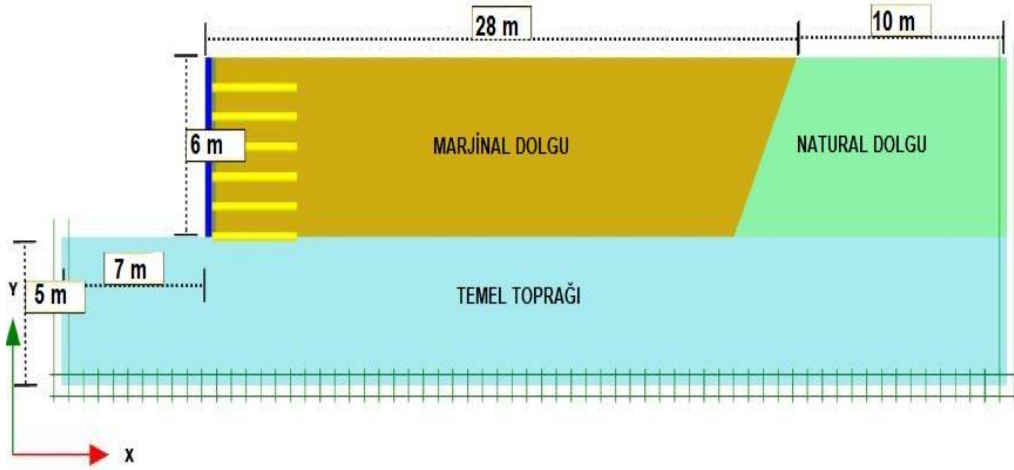
Plastiklik, geri döndürülemez türlerin gelişimini içerir. Bir hesaplamada plastikliğin meydana gelip gelmediğini değerlendirmek için, gerilme ve şekil değiştirme bir fonksiyonu olarak bir verim fonksiyonu, f eklenir. Plastik akma, $f = 0$ koşulu ile ilişkilidir. Bu koşul genellikle temel gerilme uzayında bir yüzey olarak sunulabilir. Kusursuz plastik bir model, sabit bir akma yüzeyine, yani model parametreleriyle tamamen tanımlanan ve (plastik) gerilmeden etkilenmeyen bir akma yüzeyine sahip yapısal bir modeldir. Akma yüzeyi içindeki noktalarla temsil edilen gerilme durumları için, davranış tamamen esnektir ve tüm gerilmeler tersine çevrilebilir.

3.6. Plaxis Programı ile Tasarım

Bu bölümde, ilk önce geoteknik mühendisliği problemlerinin sonlu elemanlar analizi ile geliştirilmiş PLAXIS 2D programı kullanılarak, geometrisi Şekil 3.1' de verilen Yang ve ark. (2012) tarafından bildirilen tam ölçekli testlerden alınan ölçümlerle modelin doğrulanması yapılmış ve analitik yöntemler ile çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daha sonra, geometrisi Şekil 3.2'de verilen daha önce doğrulanmış model tekrar uyarlanarak takviye aralıkları eşit olacak şekilde parametrik çalışma yapılmış ve en son phi-c azaltımı uygulanmış on iki farklı kombinasyonun güvenlik faktörleri belirlenerek, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çıkan analiz sonuçlarına göre maliyet analizi yapılmıştır.



Şekil 3.1. Tam ölçekli testlerden kabul edilen model geometrisi (Yang ve ark. 2012)



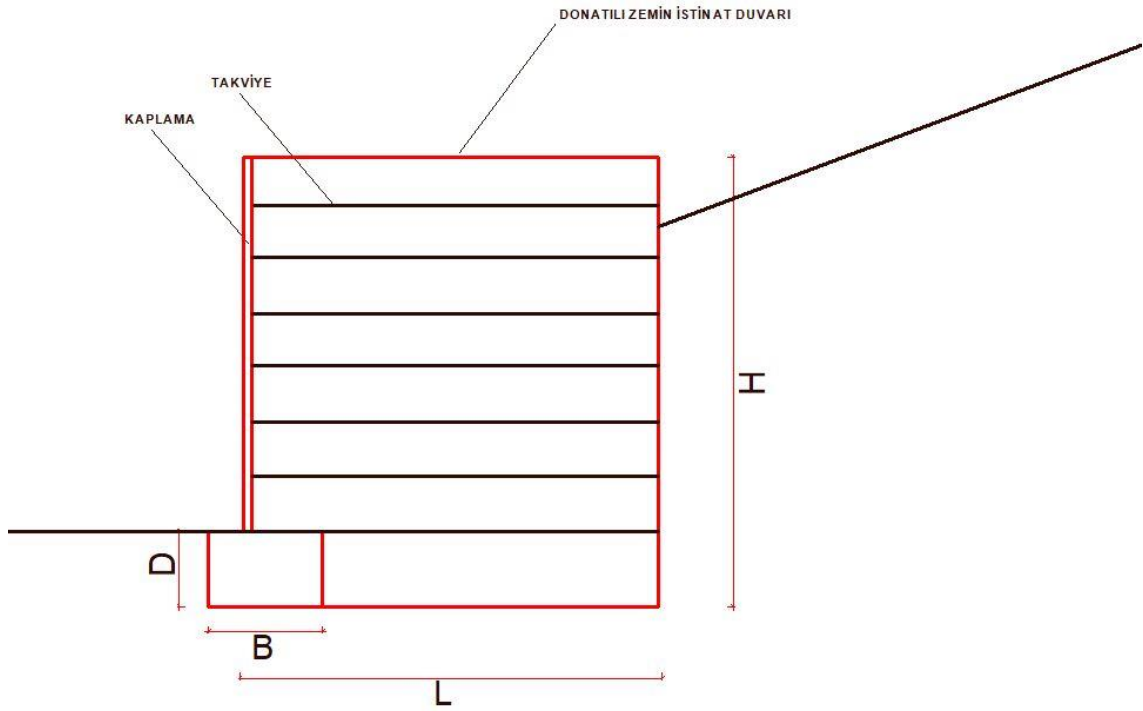
Şekil 3.2. Parametrik çalışmada kullanılan geometrik modelin kesiti

3.6.1. Plaxis analizlerinde uygulanan kabuller ve varsayımlar

- Doğrusal deformasyon modeli olarak Düzlem Gerinim kullanılmıştır.
- Sonlu elemanlar olarak 15 düğüm noktalı üçgen kullanılmıştır.
- SI birim sisteminde m, kN, gün ile çalışılmıştır.
- Analizler için 'Mohr-Coulomb' göçme kriteri seçilmiştir.
- Drenaj tipi olarak malzeme davranışları dikkate alınmıştır.
- 'G' kayma modülü için Plaxis yazılımının verdiği varsayılan değer kullanılmıştır.

- Bu çalışmada, sonlu elemanların boyutlarının sonucu doğrudan etkilediği göz önünde bulundurularak daha iyi sonuçlar için ‘çok sıkı ağ’ sistemi seçilmiştir.
- Ara yüzey üyesi, analizin hiçbir aşamasında kullanılmamıştır.
- Güvenlik sayısı analizi için dikkate alınan değer, ΣMsf değeri ve ΣMsf - duvar üzerinde seçilen noktalardan elde edilen toplam yer değiştirme grafikleridir.

Plaxis analizleri için kontrol kriterleri Amerikan şartnamesine göre yapılmıştır. Şekil 3.3’te Amerikan şartnamesi kriteri için temsili model gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Amerikan şartnamesi kriteri için temsili model

L takviye edilmiş toprak yapısının derinliği veya takviye uzunluğu, H takviye edilmiş toprak yapısının yüksekliği, D topuk dolgusu yüksekliği, B topuk dolgusu genişliği’dir. Amerikan şartnamesine göre:

- $L = 0,7H \geq 2,5m$
- $D = H/20 \geq 0,5$
- B, 2 m’den fazla olmalıdır.

Amerikan şartnamesine göre baz alınan analizlerde maksimum izin verilen değerler Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Plaxis analizleri değerlendirilirken, Çizelge 3.2’deki güvenlik değerleri dikkate alınmıştır.

Çizelge 3.2. Plaxis analizleri için kontrol kriterleri (Aslan 2007)

| Kontroller | İzin verilen Değer (FHWA,1996) | Birim |
|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|
| Duvar maksimum yatay yer değiştirmesi | 120 | mm |
| Maksimum duvar oturması | 75 | mm |
| Duvar maksimum oturma farkı | 32 | mm |
| Duvar maksimum açısal oturma | L/60 | mm |
| Taşıma kapasitesi kontrolü | 1685 | kN/m ² |

3.7. Tam Ölçekli Test Verileri ile Model Doğrulanması

Çin’de Yang ve ark. 2012 tarafından yürütülen tam ölçekli takviyeli toprak duvarlardan elde edilen veriler, Plaxis programı ile oluşturulan sonlu elemanlar modelinin doğrulanması için kullanılmıştır. Çin’in Hebei Eyaletindeki Bao-Cang otoyolunun bir bölümü, güneyde bir sulama kanalına ve kuzeyde mevcut bir otoyola bitişiktir. Mevcut tesislere müdahaleyi önlemek için, yüksekliği 1,95 m ile 6,0 m arasında değişen yol dolgusu olarak düşey cepheli kireçle işlenmiş marjinal (kohezif) toprak istinat duvarlarının kullanılmasına karar verilmiştir. Kireç uygulanmış kohezif toprak istinat duvarının toplam uzunluğu yaklaşık 1100 m uzunluğundadır. Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) geogrid, stabiliteyi artırmak ve maliyeti düşürmek amacıyla modüler blok kaplama ile takviye olarak kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modelindeki mekanik parametreler, Yang ve ark. 2012 tarafından bildirilen gerçek tam ölçekli test verilerinden elde edilmiştir.

3.7.1. Model hakkında genel bilgi

Modelde, temel toprağı herhangi bir göçme durumuna karşın sert killi zemin olarak tasarlanmıştır. Plaka yükleme testinden elde edilen verilere göre izin verilen taşıma kapasitesi 150 kPa'dır. Üstteki 0,5 m'lik temel toprağı, bir çift eksenli polipropilen (PP) geogrid tabakası ile güçlendirilmiş granüler bir yastıkla değiştirilmiştir. Mekanik özellikleri Çizelge 3.3'te gösterilen sette donatı olarak iki tip HDPE geogrid kullanılmıştır. Mukavemet ve deformasyon özellikleri ASTM standartlarına göre elde edilmiştir. Birim hacim ağırlığı 15,3 kN/m olan marjinal (kohezif) dolgu toprağın arzu edilen nemli birim ağırlığı için kireç %6 ile muamele edilmiş ve sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma sonrasında nemli birim ağırlığı yaklaşık olarak 16,8 kN/m olarak elde edilmiştir. Marjinal dolgu toprağının ana kısmı, tek tamburlu silindir sıkıştırıcı kullanılarak sıkıştırılmıştır. Kaplamadan 1,0 m mesafedeki geri dolgu toprağı, çok daha küçük temas basıncına sahip elle çalıştırılan bir tokmak kullanılarak sıkıştırılmıştır. Çizelge 3.4, sertleştirme süresi bir günden daha kısa olduğunda sıkıştırmadan sonra dolgu toprağının mekanik özelliklerini göstermektedir. Bu sertleşme, geogridin sıyrılma direnci yaklaşık olarak saf sıkıştırılmış dolgudaki ile aynıdır. Beton blok kaplama, 0,5 m × 0,2 m × 0,2 m (uzunluk × genişlik × yükseklik) boyutunda önceden dökülmüştür. Bloкта 6 cm HDPE geogrid dökülmüş ve bodkin eklemler kullanılarak geogrid donatıya bağlanmıştır (Şekil 3.1) (Yang ve ark. 2012).

Çizelge 3.3. Üretici tarafından sağlanan geogrid donatıların özellikleri (Yang ve ark. 2012)

| Parametreler | A Tipi | B Tipi |
|----------------------------------------------|--------|--------|
| Tek eksenli çekme dayanımı (kN/m) | 64,5 | ≥88,0 |
| %2 gerilmeye çekme yükü (kN/m) | ≥16,1 | ≥23,7 |
| %5 gerinimde çekme yükü (kN/m) | ≥30,9 | ≥45,2 |
| Başarısızlık gerinimi (%) | ≤10,0 | ≤10,0 |
| 120 yıl (20 ° C) (kN/m) sonra sünme dayanımı | ≥25,5 | ≥34,0 |

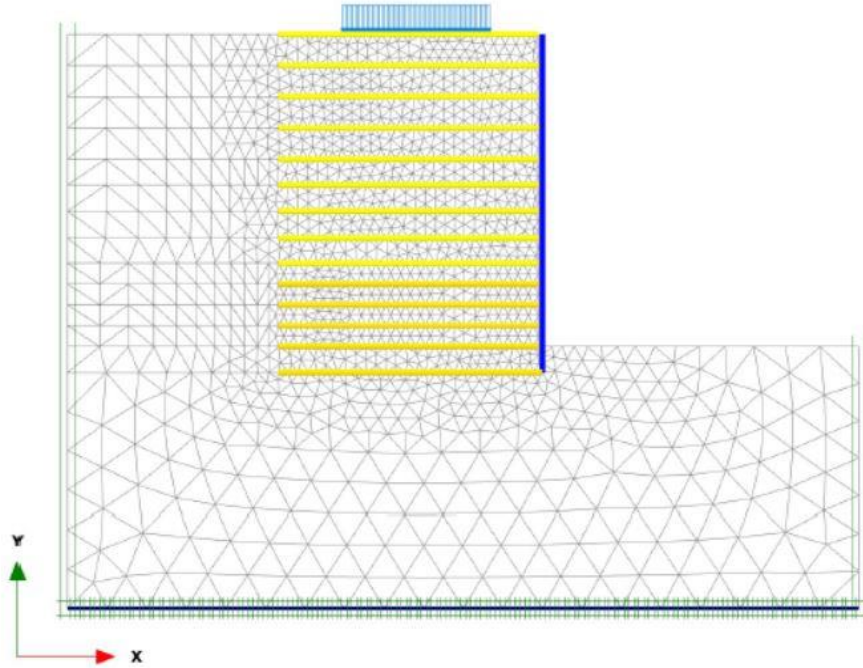
Çizelge 3.4. Kürlenme yaşı <1 gün olan kireçle işlenmiş kohezif toprağın mekanik özellikleri (Yang ve ark. 2012)

| Parametre | W_{opt} (%) | γ_{dmax} (kN.m ⁻³) | IP | a_{v1-2} (MPa) ⁻¹ |
|-----------|---------------|---------------------------------------|----|--------------------------------|
| Değer | 16,8 | 17,0 | 13 | 0,07 |

| Parametre | C (kPa) | Φ (°) | C^a (kPa) | Φ^a (°) |
|-----------|-----------|------------|-------------|--------------|
| Değer | 68 | 24 | 2 | 7 |

a geogrid ile sıyırılma testinden toprak arasındaki sürtünme direncidir.

Doğrulama analizinde kullanılan modelin alt sınır deformasyonları hem yatay hem de dikey yönde sabitlenmiştir ve yan sınır deplasmanları yalnızca yatay yönde sabitlenmiştir. Şekil 3.1’de model sınırları gösterilmektedir. Doğrulama analizinde kullanılan sonlu elemanlar ağının grafiği otomatik ağ oluşturma kullanılarak PLAXIS tarafından üretilmiştir. Şekil 3.4’te görüleceği üzere üçgen bir örgü oluşturma prosedürü gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.5’te özeti verilen mesh modelini oluşturulan sonlu elemanlar ağı 2268 eleman 21746 düğüm noktasından oluşmuştur.

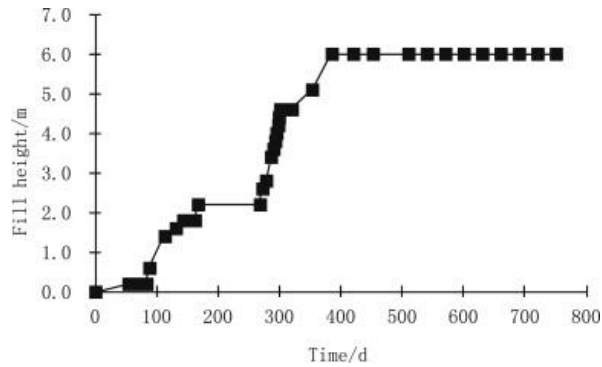


Şekil 3.4. Doğrulan modelin tipik sonlu elemanlar ağı

Çizelge 3.5. Plaxis model mesh düğüm sayısı

| Genel | |
|---------------------------|-----------------------|
| Model | Düzlem Gerinim |
| Elemanlar | 15-Düğümlü |
| İvme | |
| Yerçekimi açısı | -90° |
| x-ivme | 0.000 G |
| y-ivme | 0.000 G |
| Yer çekimi | 9,81 m/s ² |
| Mesh | |
| Toprak elemanların sayısı | 2668 |
| Düğüm sayısı | 21746 |
| Ortalama eleman boyutu | 0,2969 m |
| Maksimum eleman boyutu | 1,044 m |
| Minimum eleman boyutu | 0,1189 m |

Sensör okumaları, set sıkıştırmasının başlamasından hemen sonra başlamıştır. İnşaat sırasında, her bir takviye katmanının yerleştirilmesinden sonra basınç hücrelerinin ve esnek sensörlerin okumaları alınmıştır. Dolgu tamamlandıktan sonra bir yıl boyunca aylık okuma yapılmıştır. Şekil 3.5 set inşasının ilerlemesini göstermektedir. İnşaata kış mevsiminden dolayı yaklaşık 100 gün ara verilmiştir.



Şekil 3.5. Dolgu inşaatının ilerlemesi (Yang ve ark. 2012)

Şekil 3.1'de gösterildiği gibi 6,0 m yüksekliğindeki toprakarme yapı kaldırım yapısı üzerinde 10 kN/m sürşarj yükü etki edilmiş, alttaki dört donatı katmanı 0,4 m dikey aralıktaki Geogrid B, Geri kalan katmanlar Geogrid A olacak şekilde son duvar yüksekliğine ulaşılan kadar sırayla yerleştirildiği 'aşamalı inşaat' prosedürü ile inşaa

edilmiştir. En üstteki dört katman 0,6 m aralıklarla yerleştirilmiştir. Tüm donatı katmanlarının uzunluğu 5,0 m'dir. Enstrümantasyonlar arasında, takviye deformasyonu, önceki saha testlerinde başarıyla test edilen esnek yer değiştirme sensörleri aracılığıyla ölçülmüştür (Yang ve ark. 2012).

3.8. Analitik Yöntemlerle Karşılaştırma

3.8.1. K-sertlik yöntemi ve AASHTO yöntemi

K-rijitlik yöntemi, (Allen ve Bathurst 2001, Bathurst ve ark. 2005) donatılardaki çekme kuvvetlerini tahmin etmek ve bunları ölçülen değerlerle karşılaştırmak için kullanılmıştır. Analitik ve sayısal yöntemlerle güçlendirilmiş duvarları modellemek özellikle zor olduğundan, bu tam ölçekli testlerin sonuçlarına dayanan deneysel bir yöntemdir. Yöntem, T_{max} 'ın dağılımını ve büyüklüğünü tahmin etmek için duvar bileşenlerinin, zeminin ve takviye katmanlarının sertliğini dikkate alır (Ahmadi ve Bezuijen 2018). Bu yöntemin ardından, her bir donatı katmanındaki tepe yükü, T_{max} şu şekilde hesaplanabilir (Allen ve Bathurst 2001) :

$$T_{max} = 0.5 \cdot S_V \cdot K_0 \cdot \gamma \cdot (H + S) \cdot D_{tmax} [\Phi_{local} \Phi_g \Phi_{fs} \Phi_{fb}] \quad (3.1)$$

burada S_V takviye tabakasının ortalama dikey aralıklarıdır; K_0 , nötr yanal basınç katsayısıdır ($K_0 = 1 - \sin \phi$); $\phi = \phi_{ps}$, zeminin düzlemsel şekil değiştirme sürtünme açısıdır, H dikey duvar yüksekliğidir; S , dolgunun üzerindeki ortalama toprak yüksekliği, D_{tmax} yük dağıtım faktörü, Φ_g tüm duvar yüksekliği boyunca donatı katmanlarının katılığının ve aralığının etkisini açıklayan global bir sertlik faktörüdür. Φ_{local} tüm takviye tabakalarının ortalama sertliğine göre takviye tabakasının nispi sertliğini açıklayan yerel bir sertlik faktörüdür; Φ_{fs} , yüzey sertlik faktörüdür ve Φ_{fb} , yüzey meyil faktörüdür.

Allen ve Bathurst (2001)'e göre T_{max} (bir takviye katmanındaki maksimum gerilme yükü) şu şekilde yazılabilir:

$$T_{max} = 0.5 \cdot S_v \cdot K_0 \cdot \gamma \cdot (H + S) \cdot D_{tmax} \times$$

$$\left[\frac{S_{local}}{S_{global}} \times 0.25 \left(\frac{S_{global}}{P_a} \right)^{0.25} \times 0.5 \left(\frac{1.5H^4}{ELb^3(h_{eff}/H)} P_a \right)^{0.14} \times \left(\frac{K_{abh}}{K_{avh}} \right)^{0.25} \right] \quad (3.2)$$

$$S_{global} = J_{ave} / (H/n) = \frac{\sum_{i=1}^n J_i}{H} \quad (3.3)$$

$$S_{local} = J / S_v \quad (3.4)$$

Takviye katmanları için parametreler şunlardır: S_{local} ,yerel takviye sertliği, burada J takviye sertliğidir ve S_{global} küresel sertlik, burada J_{ave} , duvar yüksekliği üzerindeki tüm "n" takviye katmanlarının ortalama gerilme modülüdür ve J_i , duvarın birim uzunluğu başına kuvvet birimleri olarak ifade edilen ayrı bir takviye katmanının gerilme modülüdür. Parametre kaplama panelinin gerekli özellikleri, b = kaplama kolonunun kalınlığı, L = kaplamanın birim uzunluğu ($L = 1$ m), H = kaplama panelinin yüksekliği ve E = duvar yüzünü temsil eden eşdeğer elastik kirişin elastik modülüdür. h_{eff} , eşdeğer yüksekliktir ve h_{eff}/H oranı, yüzey boyunca momenti iletmek için eklemli bir kaplama sisteminin verimliliği, P_a atmosfer basıncı (101 kPa), K_{abh} , aktif toprak basınç katsayısının yatay bileşeni, K_{avh} , aktif toprak basınç katsayısının yatay bileşenidir (duvarın dikey olduğu varsayılarak).

Lade ve Lee (1976) tarafından bildirilen üç eksenli sıkıştırma testinden en yüksek sürtünme açısı ve düzlem gerinimi sürtünme açıları arasındaki ilişki:

$$\phi_{ps} = 1,5\phi_{tx} - 17 \quad (3.5)$$

ϕ_{tx} : üç eksenli sıkıştırma testinden en yüksek sürtünme açısı'dır.

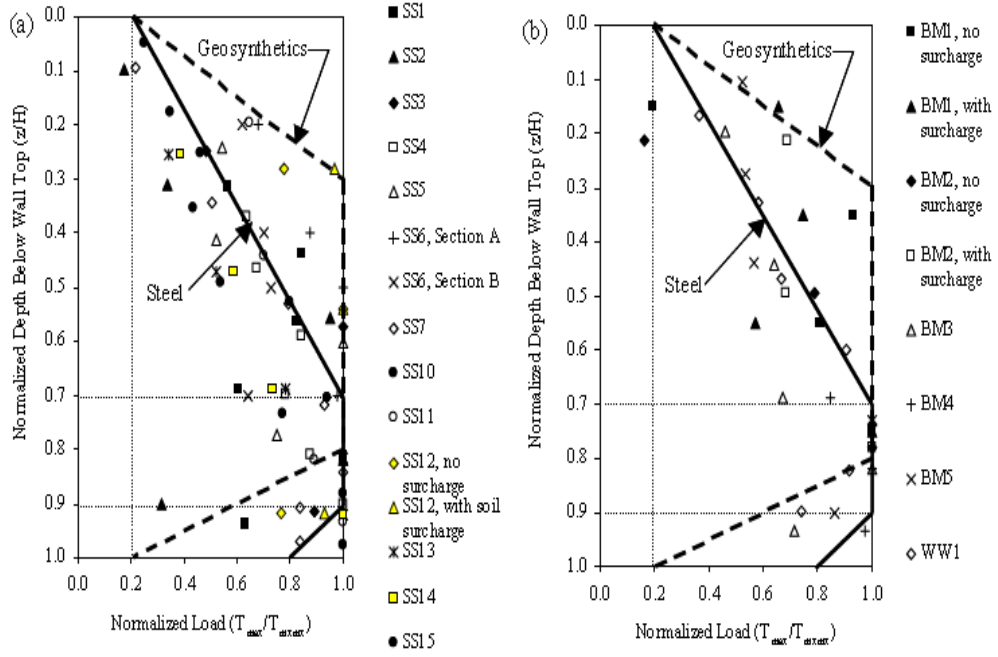
Bathurst ve ark. (2005) tarafından bildirilen ön tasarım amaçları için, kaplama sertlik faktörü (Φ_{fs}) değerleri için önerileri aşağıdaki gibidir:

- Modüler blok ve destek beton panel yüzü duvarlar için $\Phi_{fs} = 0,35-0,5$ (sert kaplamalar),
- Artımlı prekast beton kaplamalar için $\Phi_{fs} = 0,5-0,7$,
- Diğer tüm duvar kaplamaları türleri için $\Phi_{fs} = 0,7-1,0$ (esnek kaplamalar-örneğin, sarılmış yüzey, kaynaklı tel veya gabion yüzü).

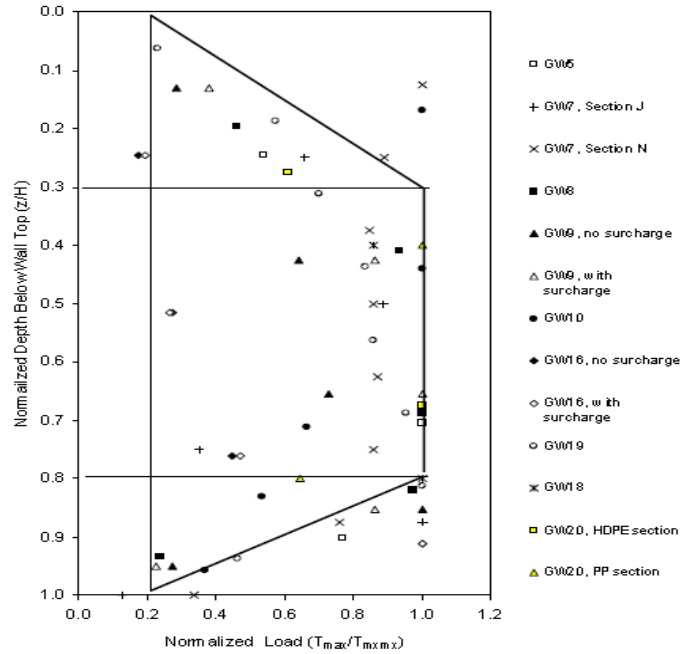
Buna göre analitik förmüllerde kaplama yüzeyine göre Φ_{fs} değeri 0,4 olarak alınmıştır. K_{abh} , duvar yüzü meyilli aktif toprak basıncın yatay bileşen katsayısıdır ve K_{avh} , duvarın aktif toprak basıncın dikey bileşen katsayısıdır ve d 'nin sabit bir katsayı olduğu varsayılarak, aktif toprak basıncın yatay bileşen katsayısıdır. Denklemin şekli, duvar yüzü meyilli açısı $\omega \rightarrow 0$ (yani, meyilli duvara bakan duvar dikeye yaklaşırken), bakan meyilli çarpma faktörü $\Phi_{fb} \rightarrow 1$ olduğunu gösterir.

$D_{tmax} = (T_{max}/T_{mxmx})$ parametresi, donatı yükünü duvarın üst kısmının (z / H) altındaki normalize derinliğin bir fonksiyonu olarak değişen bir yük dağıtım faktörüdür ve $0 \leq D_{tmax} \leq 1$ aralığında değişir. Şekil 3.6'da D_{tmax} değerleri (z / H) oranına karşılık gelen geosentetik donatılar için grafikten alınmıştır. Şekillerdeki kesikli çizgi zarfları, geosentetik takviyeli toprak duvarları için önerilen dağılımlardır.

Çeşitli temel zemin koşullarının ve çeşitli kaplama türlerinin dağılım üzerindeki etkisini belirlemek için, Şekil 3.7'de gösterilen derinlikle yük dağılımının daha iyi ölçülmesine ihtiyaç vardır. Yük dağıtım zarfının şekli, genişletilebilir donatı (geosentetik) için yamuktur, ancak sert donatı (çelik) için daha üçgen hale gelir. Bu, donatı sertliğinin donatı yüklerinin dağılımı üzerindeki olası etkisini gösterir.



Şekil 3.6. Ölçülen T_{max} değerlerinin normalize edilmiş dağılımı (Allen ve Bathurst 2001)



Şekil 3.7. Duvarın altında normalize derinliğin bir fonksiyonu olarak normalize ölçülen yükseklik (Allen ve Bathurst 2001)

Önerilen K_0 -Sertlik Yöntemi, deneysel temelli bir çalışma gerilimi tasarım yönteminin geliştirilmesinde ilk adımı temsil eder. Önerilen bu yöntem, özellikle geosentetik duvarlar

için mevcut tasarım protokolleriyle ilişkili olarak donatı yükü tahmininin doğruluğunu önemli ölçüde geliştirir ve hem geosentetik hem de çelik takviyeli MSE duvar sistemleri için tutarlı bir yaklaşım sağlar.

Bu denklemi tasarıma düzgün bir şekilde uygulamak için kavramsal olarak doğru limit durumları ile kullanılmalıdır. Araştırma, bu denklemin, zemin çökmeye başlayana kadar geosentetik takviyeli yapılar için donatı yüklerini doğru bir şekilde tahmin ettiğini ve bu noktada donatı yükünün artmaya başladığını göstermiştir. Zemin bozulmaya başladığında, modülü hızla azalmaya başlar ve takviyenin duvar sisteminde dengeyi sağlamak için daha fazla yük taşımasına neden olur.

AASHTO (2012) yönteminde, duvar yüzünün esnek olduğu (aktif bir gerilme durumu oluşturmak için yeterli deformasyona sahip olduğu) varsayılarak aktif yanal toprak basınç katsayısı (K_a) kullanılır. Bir takviye katmanındaki maksimum gerilme yükü (T_{max}), Rankine göçme kaması dengesi dikkate alınarak hesaplanır:

$$T_{max} = S_v \cdot K_a (\gamma z' + q) \quad (3.6)$$

Burada, S_v = takviye tabakalarının dikey mesafe, K_a = aktif yan toprak basıncı katsayısı, γ = toprak birim ağırlığı, z' = takviye tabakasının duvarın üstünden derinliği ve q = uniform sürşarjdan kaynaklanan dikey gerilim'dir.

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (3.7)$$

3.9. Göçme Mekanizması Analizi

Güçlendirilmiş bir toprak istinat duvarının her bileşeninin duvar davranışı üzerinde etkisi vardır. Takviye tipi, kaplama tipi ve dolgu tipinin göçme mekanizması üzerindeki etkilerini değerlendirmek için bir parametrik çalışma yapılmıştır.

3.9.1. Model hakkında genel bilgi

İncelenen duvarın yüksekliği 6,0 m olarak seçilmiştir. Bu yükseklik, çok sık karşılaşılan bir orta yükseklikteki istinat yapısını temsil eder. Toprak üç farklı bölgeye ayrılmıştır: Dolgu toprağı, doğal toprak ve temel toprak. Dolgu toprağı, kaplama ile doğal toprak arasındaki dolgudur. Bu doldurma bölgesinin uzunluğu yüzeyde 28 m, yüzeyin altındaki tabanda 25 m, doğal toprağın önünde 2:1 eğim ile uzanır. Dolgu için iki tür toprak kullanılmıştır; ilki, iç sürtünme açısı, 35^0 ve kohezyonu 5 kN/m^2 olan granül bir topraktır (Guler ve ark. 2012). İkinci tip, kohezyonu 76 kN/m^2 ve iç sürtünme açısı 7^0 olan kohezif bir topraktır. Temel zemini için de herhangi bir bozulmaya izin vermemek için yüksek bir kohezyon 100 kN/m^2 ve iç sürtünme açısı 35^0 olan bir temel toprağı seçilmiştir. Temel toprak derinliği 5,0 m olarak alınmıştır. Seçilen toprak modeli davranışı elasto-plastik kabul edilmiş ve her üç bölge için Mohr-Coulomb mukavemet özellikleri kullanılmıştır. Mohr-Coulomb modeli, doğrulama testinde gerçek duvarın davranışını başarılı bir şekilde tahmin edebildiğinden bu parametrik çalışmada da kullanılmıştır (Guler ve ark. 2012).

Mohr-Coulomb modeli, analizler için gerekli olan malzeme özelliklerinin daha az karmaşık olması ve bu nedenle parametrik çalışmanın sonuçlarının, özellikle iki tür dolgu toprağının davranışını karşılaştırmaya çalıştığımızdan daha verimli bir şekilde yorumlanabilmesi avantajına sahiptir. Bu model için aşağıdaki altı parametre gereklidir: Esneklik modülü (E), Poisson oranı (ν), kohezyon (c), iç sürtünme açısı (ϕ), dilatasyon açısı (ψ) ve kesme modülü (G). Çizelge 3.6'da tüm toprak özellikleri özetlenmiştir. Bu tablodan görülebileceği gibi, doğal toprağın ve temel toprağının özellikleri tüm modeller için aynı olacak şekilde seçilmiştir.

Dolgu malzemesinin tipi, donatı tipi ve kaplama tipi, bu çalışmadaki değişkenler olarak seçilmiştir. Yeraltı suyu tablasının kuru koşulların uygulanabileceği kadar derin olduğu varsayılmıştır. Takviye tabakaları 1 m dikey aralıkta yerleştirilmiştir. Takviye sertliği, literatürde yaygın olarak kullanılan 1000 kN/m^2 ile 10000 kN/m^2 arasında kullanılan değerlerden (Ling ve ark. (2005), Guler ve ark. (2007), Guler ve ark. (2012), Yu ve Bathurst (2017)) yola çıkılarak 1800 kN/m^2 , 3400 kN/m^2 , 5000 kN/m^2 değerleri kullanılmıştır. Takviye uzunluğu, $L/H = 0,7$ oranını vermek üzere $L = 4,2 \text{ m}$ olarak

alınmıştır; buradaki H, 6,0 m duvar yüksekliğidir. Bu, takviyeli toprak istinat duvarlarının statik tasarımı için tipik takviye uzunluk/yükseklik oranıdır (Berg ve ark. 2009).

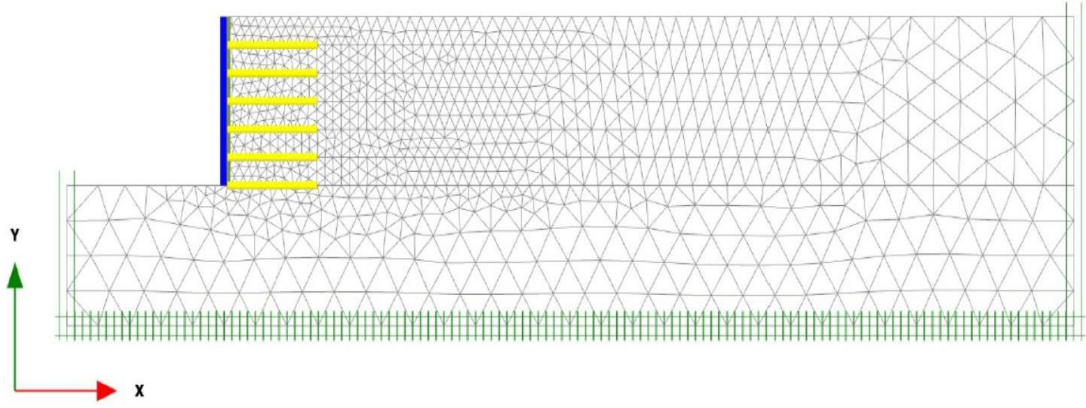
Çizelge 3.6. Parametrik çalışmada kullanılan toprakların özellikleri (Guler ve ark. 2012)

| Material Model | Granüler toprak Mohr-Coulomb | Natural toprak Mohr-Coulomb | Temel toprağı Mohr-Coulomb | Marjinal toprak Mohr-Coulomb |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Birim Ağırlık (γ_{dry}) (kN/m³) | 18 | 19 | 22 | 18,45 |
| Elasticity modulus (E) (kN/m²) | 30000 | 35000 | 200000 | 21000 |
| Poisson oranı (ν) | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,3 |
| Cohesion (c) (kN/m²) | 5 | 50 | 100 | 76 |
| İç sürtünme açısı (ϕ) | 35 | 1 | 30 | 7 |
| Dilatasyon Açısı (ψ) | 5 | 0 | 0 | 0 |
| Kayma Modülü (G) (kN/m²) | 11540 | 14583 | 90909 | 8077 |

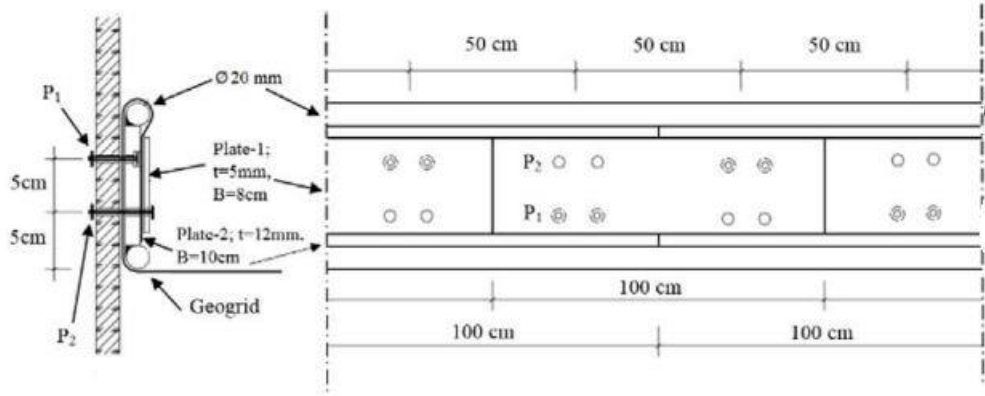
Biri esnek ve diğeri rijit beton yüzü iki model oluşturulmuştur. Rijit kaplama 1,0 m yüksekliğinde, 1,0 m genişliğinde ve 0,20 m kalınlığında 6 panelden yapılmıştır. Esnek kaplama ise 25x30x50 cm fugalı bloklardan yapılmıştır. Bu paneller 0,10 m yüksekliğinde levhalar kullanılarak birleştirilmiştir. Esnek yüz için Young (gerilme) modülü, üretim bilgilerine göre 12,5 GPa, EI ise 2000 kNm²/m olarak kabul edilmiştir. Rijit yüz için Young modülü 35 GPa, EI ise 23,33 x10³ kNm²/m olarak kabul edilmiştir (Ahmadi ve Bezuijen 2018). Takviye elemanları sadece gerilme kuvvetlerini koruyabilir ve bükülme sertliğine sahip değildir. Bu elementler, mevcut analizde toprak takviyesini geotekstil (dokuma kumaş), geogrid ve metalik şeritler olarak modellemek için kullanılır. Takviyenin malzeme özelliği elastik aksenal sertliktir (EA) (Bathurst ve Hatami 1998). İncelenen Plaxis modeli Şekil 3.2’de gösterilmiştir. İncelenen modelin Plaxis 2D ile oluşturulan sonlu elemanlar kesiti Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

Modelin alt ve yan sınırları, sayısal sınır etkilerinden kaçınmak için ilgilenilen bölgeden (güçlendirilmiş bölge) büyük bir mesafeye yerleştirilmiştir. Alt sınır deformasyonları hem yatay hem de dikey yönde sabitlenmiştir ve yan sınır deplasmanları yalnızca yatay

yönde sabitlenmiştir. Şekil 3.2’de model sınırlarının özeti gösterilmektedir. Yüzey kaplama birimlerin bağlantı detayı ise Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.8. İncelenen geometrik modelin tipik sonlu elemanlar ağı



Şekil 3.9. Monoblok prekast kaplamalı duvar modelinin yüzey kaplama kesiti (Ahmadi ve Bezuijen 2018)

Göçme analizinde kullanılan sonlu elemanlar ağının grafiği otomatik ağ oluşturma kullanılarak PLAXIS tarafından üretilmiştir. Şekil 3.8’de görüleceği üzere üçgen bir örgü oluşturma prosedürü gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.7’de özeti verilen mesh modelini oluşturulan sonlu elemanlar ağı 1752 eleman 14350 düğüm noktasından oluşmuştur.

Çizelge 3.7. Plaxis model mesh düğüm sayısı

| Genel | |
|---------------------------|-----------------------|
| Model | Düzlem Gerinim |
| Elemanlar | 15-Düğümlü |
| İvme | |
| Yerçekimi açısı | -90° |
| x-ivme | 0.000 G |
| y-ivme | 0.000 G |
| Yer çekimi | 9,81 m/s ² |
| Mesh | |
| Toprak elemanların sayısı | 1752 |
| Düğüm sayısı | 14350 |
| Ortalama eleman boyutu | 0,7001 m |
| Maksimum eleman boyutu | 2,127 m |
| Minimum eleman boyutu | 0,2285 m |

3.9.2. Plaxis göçme analizinde kullanılan elemanların malzeme özellikleri

Plaxis yazılımında modelde kullanılan malzeme, farklı toprak muhafazaları, zeminlerden alınmış çeşitli oranlarda ince dane oranına sahip dolgu için tasarım parametreleri ve kullanılan dolgu malzeme türleri Çizelge 3.6’da ve istinat duvarı kaplama birimleri özellikleride Çizelge 3.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.8. Parametrik çalışmada kullanılan takviye ve yüzey birimlerin özellikleri (Ahmadi ve Bezuijen 2018)

| Takviye | Geogrid | Çekilme rijitliği | EA (kN/m ²) | 1800, 3400, 5000 |
|--------------|-------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|
| Yüzey Birimi | Prekast ve modüler blok | Kalınlık | D (m) | 0,20 – 0,25 |
| | | Çekme rijitliği | EA (kN/m ²) | 12,5 x 10 ⁶ , 35 x 10 ⁶ |
| | | Bükülme sertliği | EI (kNm ² /m) | 2000, 23,33 x10 ³ |
| | | Ağırlık | W (kN/m/m) | 4,8 |
| | | Poisson oranı | v | 0,2 |

3.9.3 Model tasarımında kademeli inşaat aşamaları

Düşük kayma mukavemeti ve yüksek sıkıştırılabilirliğe sahip yumuşak zeminlerde yüksek bentlerin inşası, alt zeminin düşük kesme mukavemeti nedeniyle tek seferde yapılamadığından kademeli inşaat uygulanmaktadır (Fratta ve Bozkurt 2014).

Duvar performansını gerçekçi bir şekilde simüle etmek için, sonlu elemanlar analizinin ilk aşaması duvar yapısının modellenmesidir. Zemin katmanları, donatı aralığına bağlı olarak 1,0 m kalınlığında katmanlara bölünmüştür. Her bir katmanın kendi ağırlığı aşamalı olarak uygulanmıştır. İnşaat aşaması tamamlandıktan sonra, güvenlik sayısını araştırmak için ikinci aşama olarak Phi-c azaltımı uygulanmıştır (Guler ve ark. 2007). Sonlu elemanlar analizinde kullanılan model kombinasyonları Çizelge 3.9'da gösterilmiştir. Toplamda 12 model kombinasyonunun analizi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.9. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan model kombinasyonları

| Model | Dolgu | Takviye Sertliği (kN/m ²) | Kaplama Tipi |
|------------------|----------|------------------------------------------|--------------|
| A1 A3 A5 | Granüler | 1800 3400 5000 | Esnek |
| A2 A4 A6 | Marjinal | 1800 3400 5000 | Esnek |
| A7 A9 A11 | Granüler | 1800 3400 5000 | Rijit |
| A8 A10 A12 | Marjinal | 1800 3400 5000 | Rijit |

6 m duvar yüksekliği için tasarım aşamaları şöyledir: Başlangıç Aşama: K_0 prosüdüğü uygulanmasıdır. Daha sonra sırasıyla;

- 1.Aşama: 1 m yüksekliğe kadar yüzey elemanı, arka dolgu ve geogridin aktif hale getirilmesi
- 2.Aşama: 2 m yüksekliğe kadar yüzey elemanı, arka dolgu ve geogridin aktif hale getirilmesi
- 3.Aşama: 3 m yüksekliğe kadar yüzey elemanı, arka dolgu ve geogridin aktif hale getirilmesi
- 4.Aşama: 4 m yüksekliğe kadar yüzey elemanı, arka dolgu ve geogridin aktif hale getirilmesi,
- 5.Aşama: 5 m yüksekliğe kadar yüzey elemanı, arka dolgu ve geogridin aktif hale getirilmesi
- 6.Aşama: 6 m yüksekliğe kadar yüzey elemanı, arka dolgu ve geogridin aktif hale getirilmesi'dir.

Bu aşamalardan sonra stabilite analizi yapılmıştır. Son aşamada ϕ -c azaltımı uygulanarak yapının güvenlik faktörleri belirlenmiştir.

3.10. Göreli Maliyet

Toprakarme istinat yapılarının maliyeti pek çok koşula bağlıdır. Bu koşullar; kazı- dolgu maliyetleri yapı yüksekliği ve alanı, zemin koşulları, depremsellik, dolgu malzemesinin özellikleri olarak sıralanabilir. Yapılan araştırmalar sonucunda, ortalama zemin koşullarında duvar yüksekliğinin 3 metre'den fazla olduğu projelerde prekast panelli toprakarme istinat yapılarının, konvansiyonel istinat yapılarına göre daha ucuz olduğu görülmüştür. Zayıf zemin koşulları göz önüne alındığında, yüzeysel temelli toprakarme istinat yapıları, derin temel sistemleri ile desteklenen konvansiyonel yapılara göre % 25-50 oranında daha az maliyetle imal edilebilmektedir. İmalat hızı ve kolaylığı, maliyetleri etkileyen bir başka önemli faktördür (Berg ve ark. 2009). Toplamda 12 model kombinasyonunun maliyet analizi karşılaştırılmıştır. Maliyet analizlerinde drenaj tasarımı ve maliyeti hesaba katılmamıştır, drenaj tasarımının ve maliyetinin eklenmesi durumunda sonuçların değişebileceği gözününde bulundurulmalıdır.

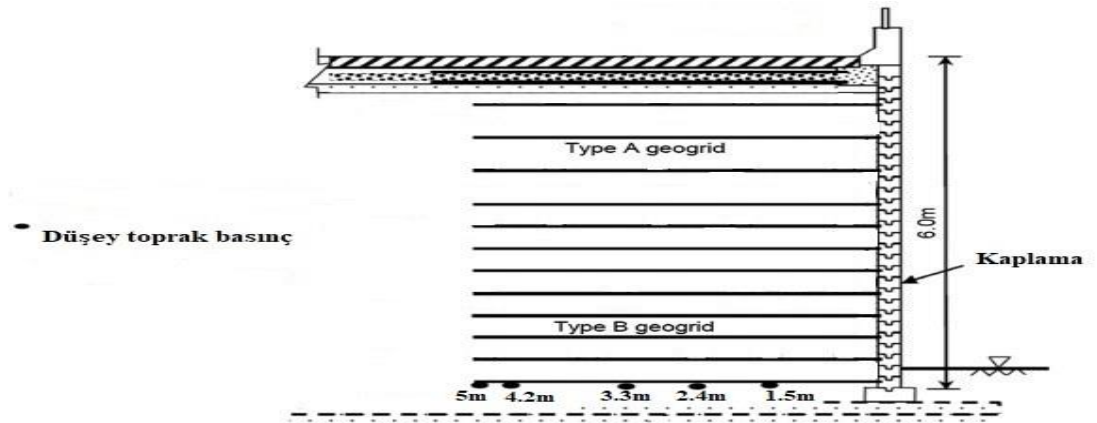
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Tam Ölçekli Model Doğrulama Sonuçları

Model aşamalar halinde analiz edilmiştir. Her bir toprak tabakasının ve modüler blokların yerleştirilmesinden sonra sadece, bu aşamaların hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Her bir aşamanın yapım süresi 6. aşamaya kadar 25 gün, 6. aşamadan sonra 15 gün olarak kabul edilmiştir. Sadece 6. aşamada 100 günlük bir süre verilmiştir ve inşaatın son aşamasından sonra bir yıllık bir süre analiz kısmına eklenmiştir. Bunun nedeni ise tam ölçekli arazi uygulamasında mevsimsel koşullardan dolayı inşaat yapım aşamalarının durması ve inşaatın son aşamasından sonra bir yıl boyunca yapının gözlemlenmesidir. Sayısal modellemede konsolidasyon aşamaları uygulanmamıştır. Takviye elemanları, üst toprak katmanı yerleştirilmeden hemen önce aktive edilmiştir. Doğrulama çalışmasının sonuçları düşey toprak basıncı, yanal toprak basıncı ve takviye gerilmeleri ile inşaatın sonlu elemanlar modelinden elde edilen değerler karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

4.1.1. Düşey toprak basıncı

İnşaatın bitiminden sonra düşey toprak basınç ölçerlerin duvar yüzey kaplamasından itibaren mesafeleri Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Temel seviyesinde, farklı lokasyonlarda düşey toprak basınç ölçümleri yapılmış ve 6 m dolgu yüksekliğinde yapının inşaa süresi bitene kadar farklı aşamalarda ölçümler devam etmiştir.



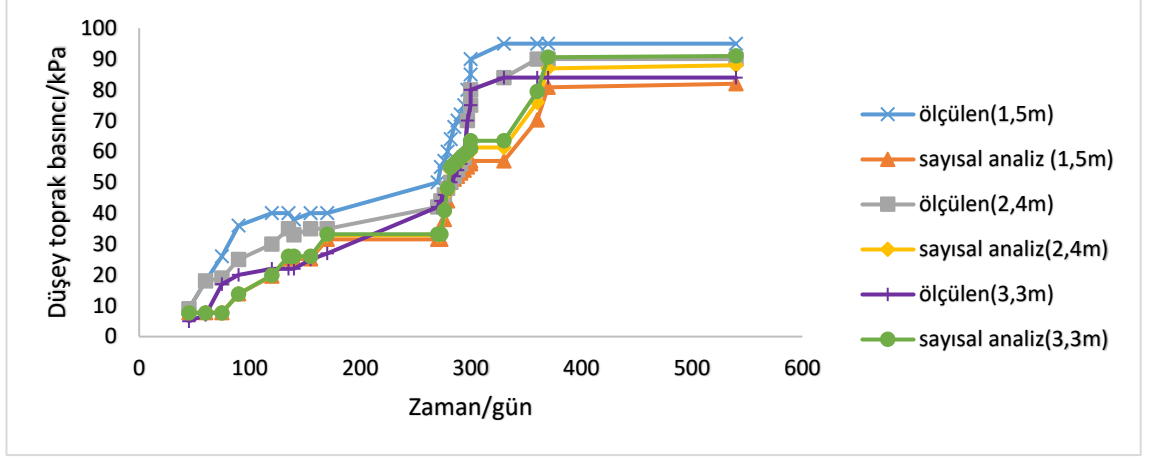
Şekil 4.1. Düşey basınç ölçerlerin duvar yüzey kaplamasından itibaren mesafeleri (Yang ve ark. 2012)

Tam ölçekli arazi ölçüm sonuçlarından alınan yüksekliklerin, hangi aşamaya ve zamana denk geldiği Çizelge 4.1’de gösterilmektedir. 1. Aşama yapının temel inşaatını ifade ettiği için çizelgede gösterilmemiştir. İnşaat bitiminden sonra düşey toprak basıncının arazide ölçülen değerleri ve sayısal analiz değerlerinin zamana bağlı karşılaştırılması her lokasyon için Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te gösterilmektedir.

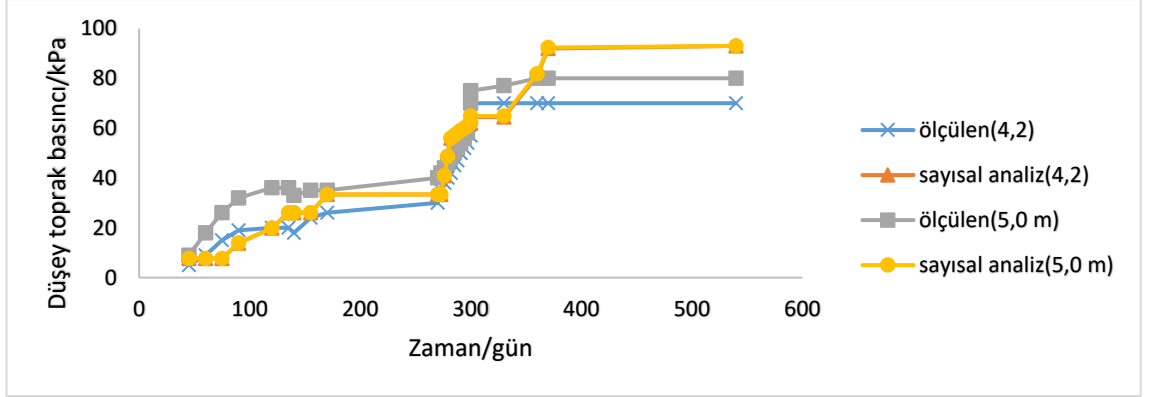
Çizelge 4.1. Dolgu yüksekliği, zaman ve duvar yapım aşamaları arasındaki bağlantı

| Dolgu yüksekliği (m) | Zaman (gün) | Duvar yapım aşamaları |
|-----------------------------|--------------------|------------------------------|
| 0,3 | 45 | 2. aşama |
| 0,3 | 60 | 2. aşama |
| 0,3 | 75 | 2. aşama |
| 0,6 | 90 | 3. aşama |
| 1,5 | 120 | 4.aşama |
| 1,7 | 135 | 5.aşama |
| 1,8 | 140 | 5.aşama |
| 1,8 | 155 | 5.aşama |
| 2,3 | 170 | 6.aşama |
| 2,3 | 270 | 6.aşama |
| 2,5 | 273 | 6.aşama |
| 2,7 | 276 | 7. aşama |
| 3,4 | 279 | 8.aşama |
| 3,7 | 282 | 9.aşama |
| 3,7 | 285 | 9.aşama |
| 3,8 | 288 | 9.aşama |
| 3,8 | 291 | 9.aşama |
| 3,8 | 294 | 9.aşama |
| 3,9 | 297 | 9.aşama |
| 4,0 | 300 | 9.aşama |
| 4,2 | 300 | 10. aşama |
| 4,2 | 330 | 10.aşama |
| 5,0 | 360 | 12.aşama |
| 6,0 | 360 | 13.aşama |
| 6,0 | 540 | 13. aşama |

Şekil 4.2’de ki grafiğe göre arazide ölçülen değerler ile sayısal analiz değerleri 7,7 kPa ile 95 kPa arasında değişmektedir. Grafiklerde, inşaat bitimine kadar değerlerin birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir fakat inşaatın 10. aşamasında (330. gün) bariz bir fark oluşmuştur. Şekillerde kaplamadan 3 m’lik mesafeye kadar arazi ölçümleri sayısal analiz değerlerinden fazla iken 3 m’den sonra tam tersi çıktığı görülmektedir.

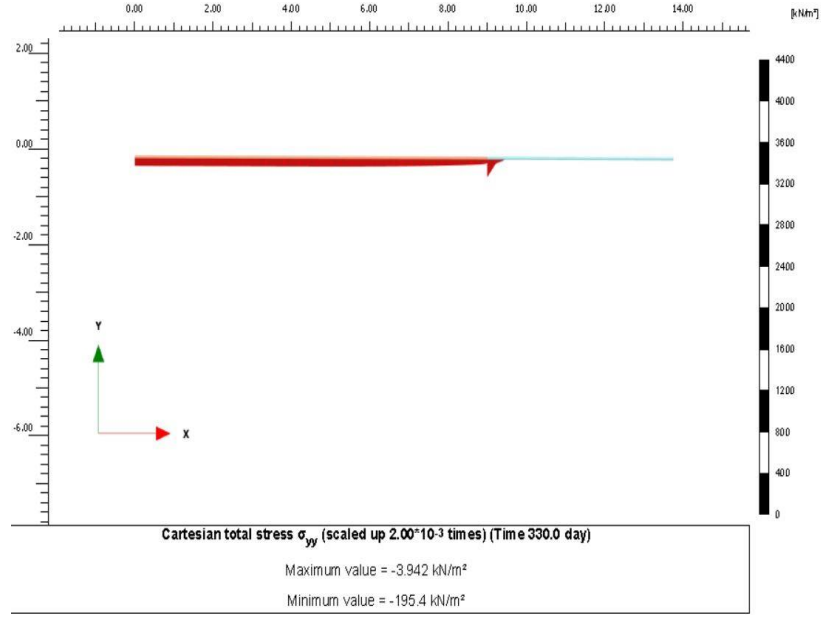


Şekil 4.2. 1,5 m, 2,4 m ve 3,3 m lokasyonlarındaki düşey toprak basıncının arazide ölçülen değerler ile sayısal analiz sonuçlarının zamanla ilişkisi



Şekil 4.3. 4,2 m ve 5,0 m lokasyonlarındaki düşey toprak basıncının arazide ölçülen değerler ile sayısal analiz sonuçlarının zamanla ilişkisi

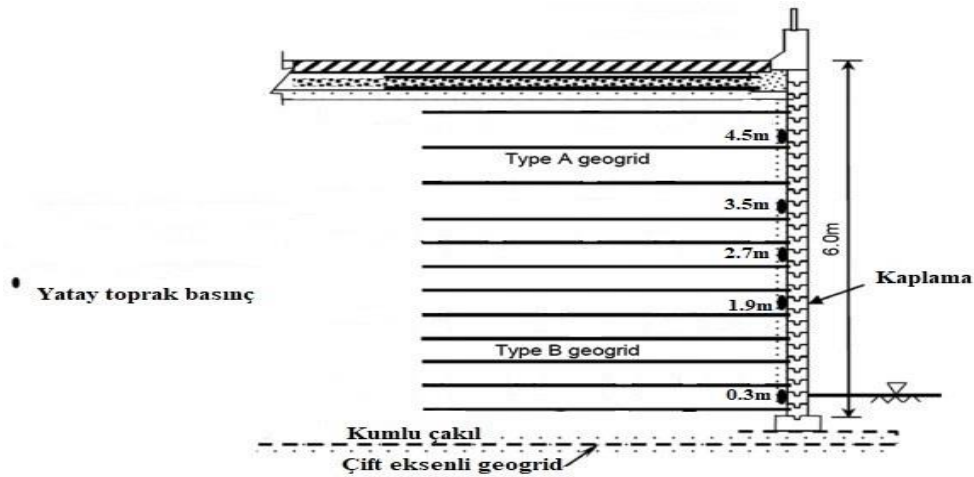
Genel olarak aynı yükseklikteki düşey basınç ölçerlerin duvar yüzeyinden mesafesi arttıkça sayısal analiz sonuçlarının lokasyondan fazla etkilenmediği, tam ölçekli uygulama ölçümlerinde ise düşey toprak basıncın daha değişken olduğu görülmektedir. Düşey basıncın $\sigma = \gamma \cdot h$ kuralından yola çıkarak temel seviyesinde aynı yükseklikte farklı lokasyonlarda sayısal analiz sonuçlarının bu kurala uyduğu ve fazla değişmediği (Şekil 4.4), arazideki test sonuçlarında ise basınç ölçerlerin duvar kaplamasından mesafesi artmasıyla düşey basıncın azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi tam ölçekli arazi uygulamasında yapım aşamalarının sonlanmasıyla kireç takviyesinin dolgunun mukavemetinde artışa neden olması bundan dolayı yer değiştirmelerin ve oturmaların sınırlı kalması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.4. Son aşamada temel seviyesindeki lokasyonlarda toplam düşey basınçlar (σ_{yy})

4.1.2. Yanal toprak basıncı

İnşaatin bitiminden sonra yanal toprak basınç ölçerlerin temelden itibaren yükseklikleri Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Kaplamaya yakın noktalarda temel seviyesinden itibaren artan yükseklikle farklı lokasyonlar için yatay toprak basınç ölçümleri yapının inşaa süresi bitene kadar farklı aşamalarda yapılmıştır.



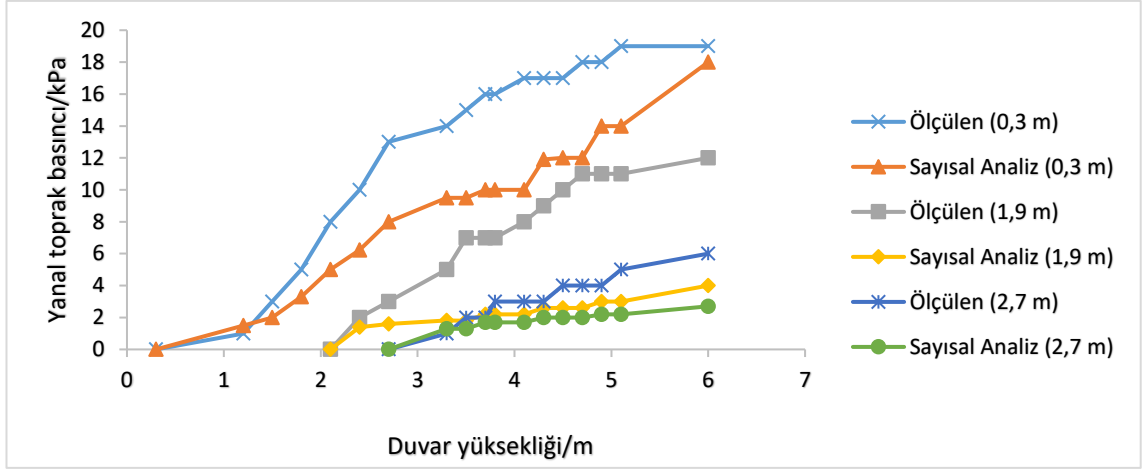
Şekil 4.5. Yatay basınç ölçerlerin temelden itibaren yükseklikleri (Yang ve ark. 2012)

İnşaat bitiminden sonra yatay toprak basıncının arazide ölçülen değerlerinin hangi aşamaya denk geldiği her lokasyon için Çizelge 4.2’de gösterilmektedir. İnşaatın bitiminden sonra yanal toprak basıncının arazide ölçülen değerleri ve sayısal analiz değerlerinin duvar yüksekliğine bağlı olarak karşılaştırılması her lokasyon için Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de gösterilmektedir.

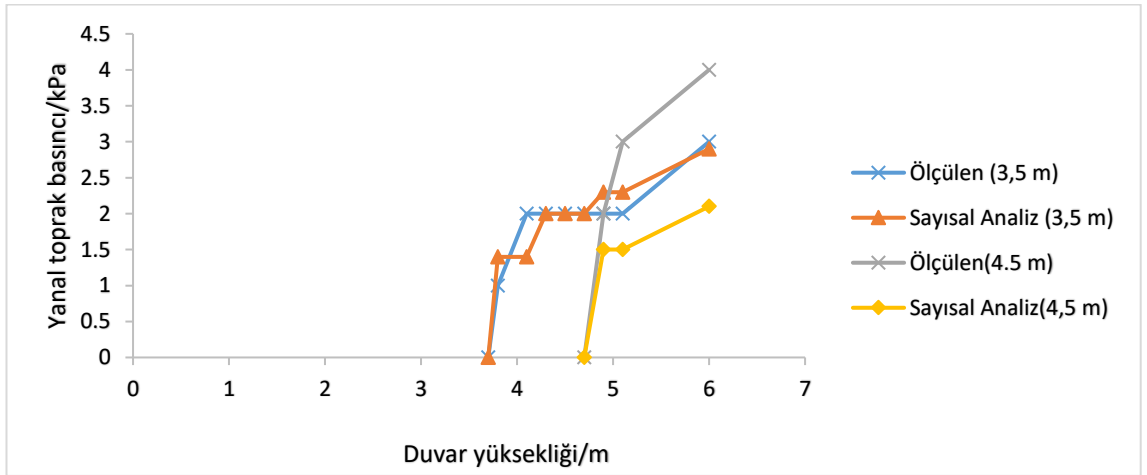
Çizelge 4.2. Dolgu yüksekliği ile duvar yapım aşamaları arasındaki bağlantı

| Dolgu yüksekliği (m) | Duvar yapım aşamaları |
|-----------------------------|------------------------------|
| 0,3 | 2. aşama |
| 1,2 | 3. aşama |
| 1,5 | 4. aşama |
| 1,8 | 5. aşama |
| 2,1 | 6. aşama |
| 2,4 | 7. aşama |
| 2,7 | 8. aşama |
| 3,3 | 9. aşama |
| 3,5 | 9. aşama |
| 3,7 | 10. aşama |
| 3,8 | 10. aşama |
| 4,1 | 10. aşama |
| 4,3 | 11. aşama |
| 4,5 | 11. aşama |
| 4,7 | 11. aşama |
| 4,9 | 12. aşama |
| 5,1 | 12. aşama |
| 6,0 | 13. aşama |

Şekil 4.6’da arazide ölçülen değerler ile sayısal analiz değerleri dolgu yüksekliğiyle doğru orantılı şekilde artmaktadır. Grafikte, yanal toprak basıncı 0,3 kPa ile 19 kPa arasında değişmektedir. Her aşamada ölçülen değerler sayısal analiz değerlerinden fazla çıkmıştır. İnşaatın ilk başlarında değerler arasında yakınsamalar olsada sonrasında ölçümler ile analizler arasında basınç farkı artmaktadır. Şekil 4.7’de ise arazide ölçülen değerler ile sayısal analiz değerlerinin daha uyumlu olduğu görülmektedir. Ölçülen değerler ve sayısal analiz değerleri 0- 4,0 kPa arasında değişmektedir.



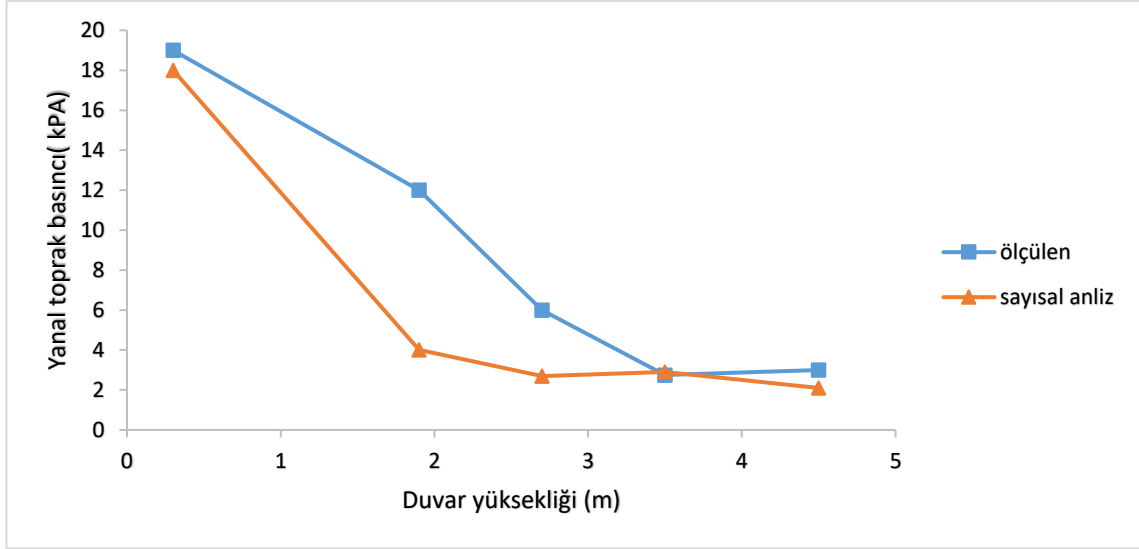
Şekil 4.6. 0,3 m, 1,9 m ve 2,7 m lokasyonlarındaki yatay toprak basıncının arazide ölçülen değerler ile sayısal analiz sonuçlarının zamanla ilişkisi



Şekil 4.7. 3,5 m ve 4,5 m lokasyonlarındaki yatay toprak basıncının arazide ölçülen değerler ile sayısal analiz sonuçlarının zamanla ilişkisi

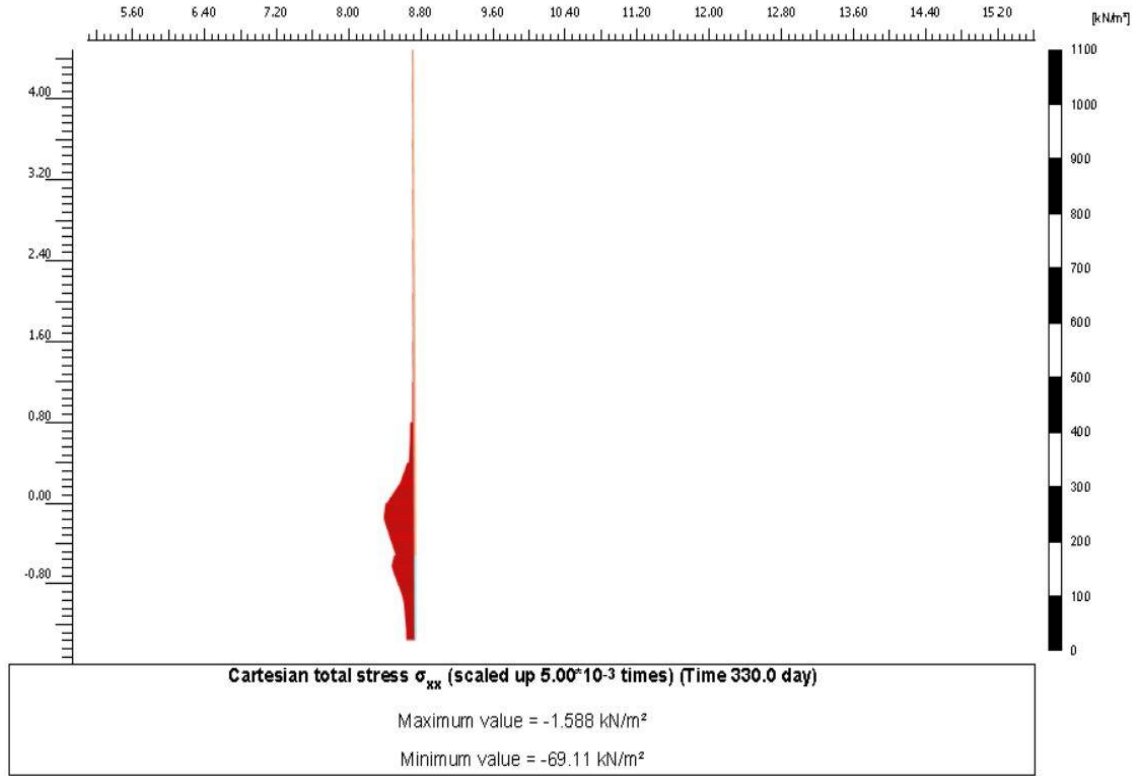
Grafiklerde, yanal toprak basıncı, basınç hücresinin üzerindeki dolgunun inşa edildiği ilk aşamalarda önemli ölçüde artmıştır ancak dolgu ilerledikçe hücredeki basınç artışının azaldığı görülmektedir. Ayrıca yüklemenin ilk aşamalarında sayısal analiz sonuçları ile ölçüm sonuçlarının daha uyumlu olduğu söylenebilir. Yatay basıncın hesaplandığı denklem 2.3'ten yola çıkılarak, sayısal analiz sonuçlarının temelden itibaren farklı yüksekliklerdeki lokasyonlarda bu kurala uyduğu görülmektedir.

İnşaatın son aşamasında dolgu yüksekliği ile yanal toprak basıncı dağılımı değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Grafikte, inşaat sonunda duvarın en altına yerleştirilen ve en üst kısma yerleştirilen hücrelerde ölçümlerin sayısal analiz sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir.

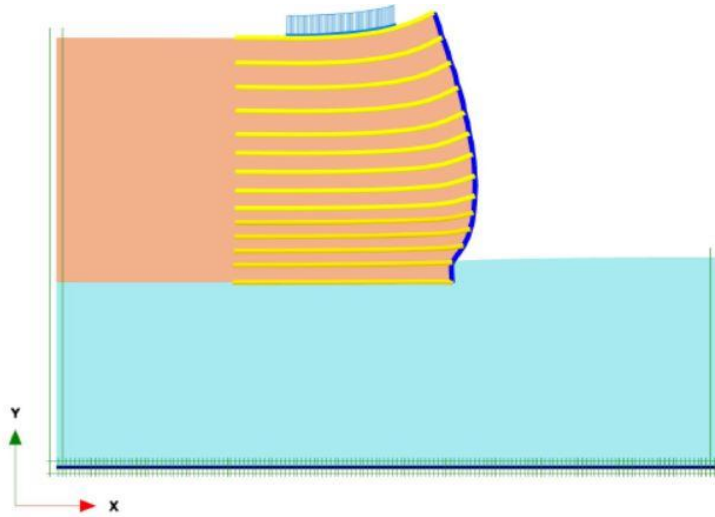


Şekil 4.8. İnşaatın son aşamasında dolgu yüksekliği ile yanal toprak basıncı dağılımı

Yanal basıncın yapının ilk aşamasında yüksek değerlere ulaştığı sonrasında dolgu yüksekliğinden fazla etkilenmediği Şekil 4.9’den anlaşılmaktadır. Doğrulama modelinin şekil değiştirmiş hali Şekil 4.10’da görülmektedir. Buna göre yapının kaplama yüzeyine yakın orta bölgesinin daha çok zorlandığı ve daha fazla deplasman yaptığı görülmektedir.



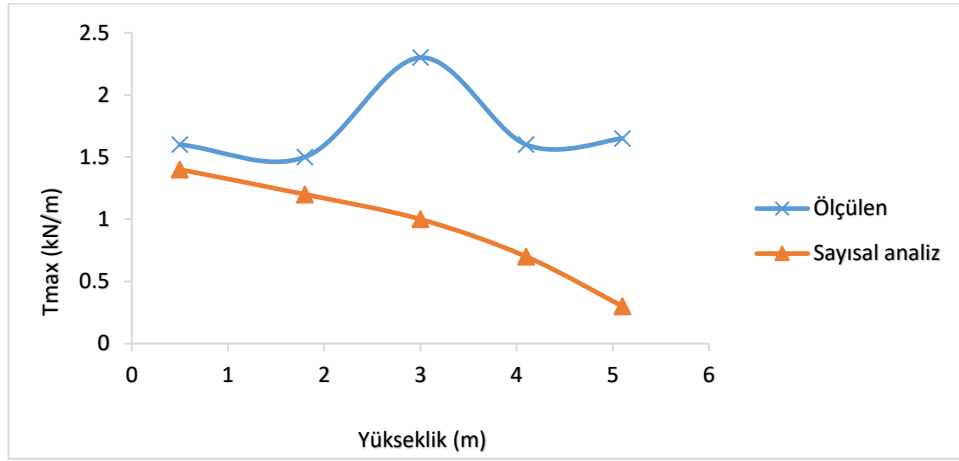
Şekil 4.9. Son aşamada artan yükseklikle farklı lokasyonlarda toplam yatay basınçlar (σ_{xx})



Şekil 4.10. Doğrulama modelinin şekil değiştirmiş hali

4.1.3. Takviye gerilimleri

İnşaatin sonunda takviye gerilmelerinin inşaat aşamalarına göre ölçülen ve sayısal analiz değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.11’de gösterilmektedir. T_{max} , her bir donatı katmanındaki çekme yükü olmak üzere, verilen takviye yükleri analizler sırasında takviye boyunca gözlemlenen maksimum gerilme yükleridir.



Şekil 4.11. Takviye gerilmelerinin inşaat aşamalarına göre ölçülen ve sayısal analiz değerlerinin karşılaştırılması

Arazide ölçülen takviye gerilmelerinde donatı katmanının üzerindeki ilk birkaç aşamanın sıkıştırılmasından hemen sonra gerilme dolgu yüksekliğiyle hafifçe artmıştır. Bu sonuçlar, geogrid takviyeli kireçle işlenmiş kohezif toprağın ağır silindir sıkıştırıcı kullanılarak sıkıştırılmasının büyük ölçüde takviye gerilimine katkıda bulunduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, yük basıncı, önemli ölçüde olmasa da takviye gerilimini de arttırmıştır. İkinci takviye tabakasının gerilimi inşaat sonunda yaklaşık % 30 artmıştır. Bu dolgu derinliğinde, silindir sıkıştırmasının etkisi çok küçük olmalıydı. Aşırı yük basıncı altında kireçle işlenmiş dolgunun yanal deformasyonu, bu gerilim artışına yol açmış olabilir (Yang ve ark. 2012). Sayısal analiz sonuçlarının, dolgu yüksekliğinin artışıyla doğrusal olarak azalmasının; denklem 2.5 kuralından yola çıkılarak temelden itibaren farklı yüksekliklerdeki lokasyonlarda donatı katmanlarındaki maksimum donatı çekme yükünün bu kurala uyduğu, bu nedenle alt donatı katmanlarındaki maksimum çekme kuvvetleri üst katmanlarda hesaplanan miktardan daha fazla çıkmıştır.

4.2. Analitik Karşılaştırma Sonuçları

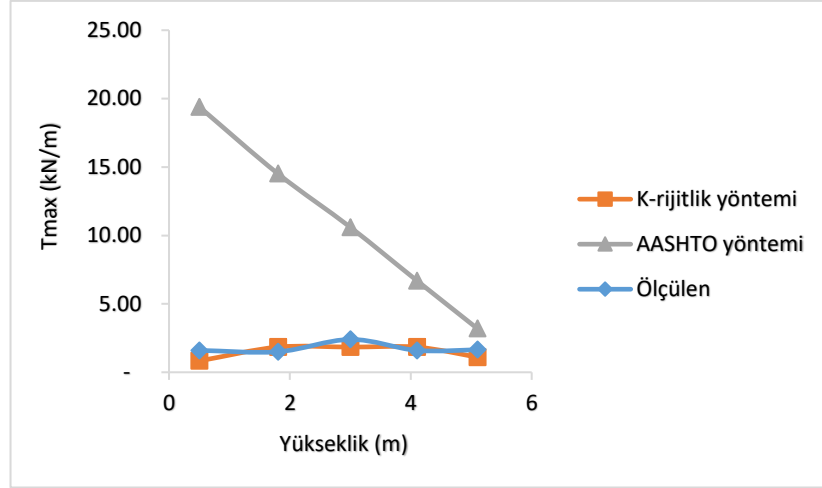
K-Rijitlik Metodu, dolgunun gerilim yükününün takviye ile paylaşımı hususunda donatı tasarımında kullanılabilir. Ayrıca, bu yöntemle bulunan donatı yükü, donatı kopmasını önlemek için gereken nihai gerilme mukavemetini tahmin etmek için kullanılabilir. Tahmin edilen takviye gerilmelerini kısa vadeli ve uzun vadeli duvar yüzü deformasyonlarına bağlamak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmasına rağmen, bu yöntem aynı zamanda hizmet verilebilirlik kriterlerini karşılamak için takviye gereksinimlerini tahmin etmek için de kullanılabilir. Denklem 3.2'ye göre katmanlardaki donatı T_{max} (her bir donatı katmanındaki çekme yükü) değerleri aşağıda verildiği gibi hesaplanmıştır.

| | | |
|-------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0,5 m'deki | $z/H=0,916$ | $0,5 \times 0,5 \times 0,675 \times 16,8 \times 0,45 \times 6 \times (0,95 \times 0,25 \times 1,14 \times 0,4 \times 1) = 0,83$ kN/m |
| 1,9 m'deki | $z/H=0,683$ | $0,5 \times 0,5 \times 0,675 \times 16,8 \times 6 \times 1 \times (0,95 \times 0,25 \times 1,14 \times 0,4 \times 1) = 1,84$ kN/m |
| 3,0 m'deki | $z/H=0,5$ | $0,5 \times 0,5 \times 0,675 \times 16,8 \times 6 \times 1 \times (0,95 \times 0,25 \times 1,14 \times 0,4 \times 1) = 1,84$ kN/m |
| 4,1 m'deki | $z/H=0,316$ | $0,5 \times 0,5 \times 0,675 \times 16,8 \times 6 \times 1 \times (0,95 \times 0,25 \times 1,14 \times 0,4 \times 1) = 1,84$ kN/m |
| 5,1 m'deki | $z/H=0,15$ | $0,5 \times 0,5 \times 0,675 \times 16,8 \times 6 \times 0,6 \times (0,95 \times 0,25 \times 1,14 \times 0,4 \times 1) = 1,10$ kN/m |

AASHTO yönteminde, duvar sertliğinin etkisi hesaba katılmaz. Denklem 3.6'ya göre katmanlardaki donatı T_{max} (her bir donatı katmanındaki tepe yükü) değerleri AASHTO yöntemi için aşağıdaki gibidir;

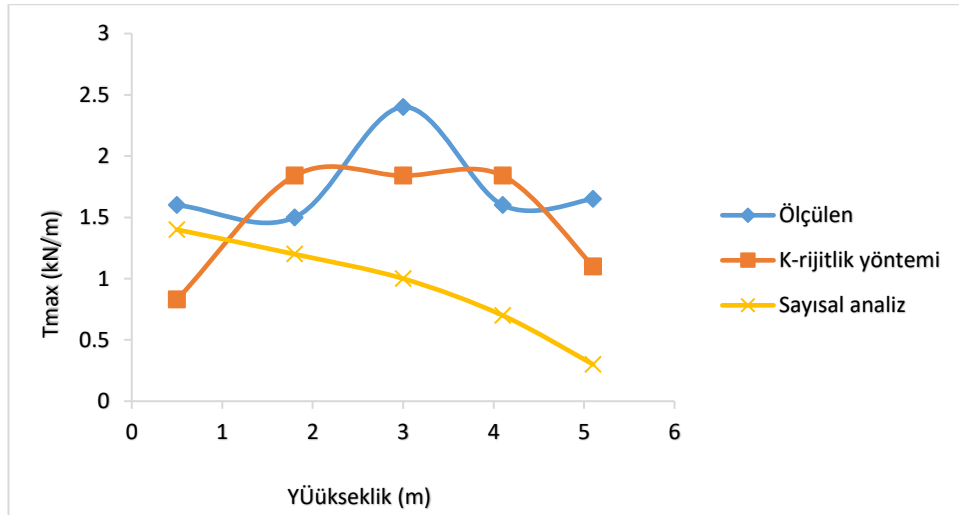
| | |
|-------------------|---------------------------------------------------------|
| 0,5 m'deki | $0,5 \times 0,4217 \times 16,8 \times 5,5 = 19,48$ kN/m |
| 1,9 m'deki | $0,5 \times 0,4217 \times 16,8 \times 4,1 = 14,52$ kN/m |
| 3,0 m'deki | $0,5 \times 0,4217 \times 16,8 \times 3,0 = 10,62$ kN/m |
| 4,1 m'deki | $0,5 \times 0,4217 \times 16,8 \times 1,9 = 6,72$ kN/m |
| 5,1 m'deki | $0,5 \times 0,4217 \times 16,8 \times 0,9 = 3,189$ kN/m |

Şekil 4.12'de görüldüğü üzere, duvarın inşasından sonra K-rijitliği ve AASHTO yöntemi sonuçlarının karşılaştırılması inşaat aşamasına bağlı olarak verilmiştir. Şekilde K-rijitlik yöntemi ile ölçülen değerlerin birbirine yakın değerler verdiği, ASTHOO yönteminde ise takviye yüklerinin fazla tahmin edildiğini ve tahmin edilen takviye yükünün, ölçülen yük arasındaki tutarsızlığın istinat duvarın temeline doğru arttığını göstermektedir.



Şekil 4.12. Takviye gerilmelerin arazide ölçülen değerlerin AASHTO yöntemi ile dolgu yüksekliğine bağlı karşılaştırılması

Takviye gerilmelerin arazide ölçülen değerler ile K-rijitlik yönteminin dolgu yüksekliğine bağlı karşılaştırılması sayısal analiz sonuçları ile Şekil 4.13’ te verilmiştir. K-rijitliği sonuçları ve arazi ölçüm sonuçlarının 0,5 kN/m ile 2,5 kN/m arasında değiştiği görülmektedir. Alt, orta ve üst donatı katmanında az da olsa fark olmasına rağmen, arazi ölçüm sonuçları ile K- rijitlik yöntemi sonuçları arasında iyi bir uyum vardır. Sayısal analiz sonuçları ise duvar tabanında ölçülen değerlerle uyumlu olsa da duvar yüksekliği ile düşme eğiliminde olduğu görülmektedir.



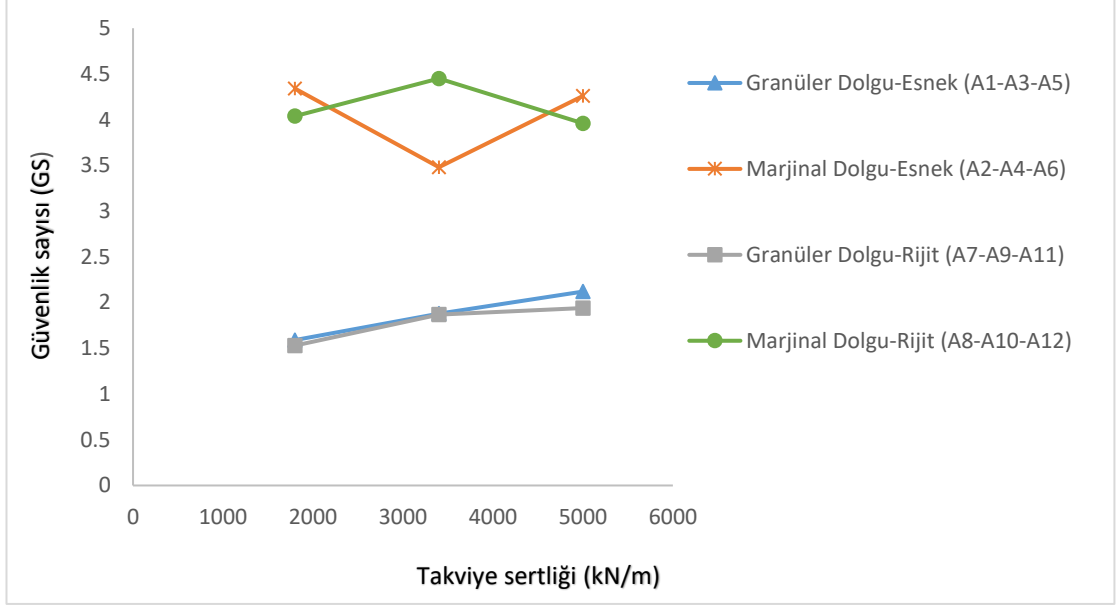
Şekil 4.13. Takviye gerilmelerin arazide ölçülen değerler ile K-rijitlik yöntemi ve sayısal analizin dolgu yüksekliğine bağlı karşılaştırılması

4.3. Göçme Mekanizması Analizi Sonuçları

Parametrik çalışmadan elde edilen sonuçları değerlendirmek için ölçüt olarak güvenlik sayısı ve takviye sertliği kullanılmıştır. Güvenlik sayısı sonuçları duvar yapısının tam orta noktası olan temel seviyesinden 3 m yükseklikteki analiz sonuçlarıdır. EK 1’de verilen modellerin güvenlik sayısı sonuçları Çizelge 4.3’te özetlenmiştir. Bu bölümde, dolgu özelliklerinin, kaplama tipinin ve takviye sertliğinin etkileri değerlendirilmiştir. Parametrik analizlerden elde edilen sonuçlar her parametre için ayrı ayrı tartışılmıştır. Beton panel kaplama ve modüler blok kaplama duvarlar için granül dolgu ve marjinal dolgu toprağı olan, farklı takviye sertliğine göre güvenlik sayılarının değişimi Şekil 4.14’te gösterilmektedir. Dolgu etkisine bakıldığında, her iki kaplama türünde marjinal dolgunun suyun drene edilmesi için gereken önlemlerin alındığı varsayımıyla, granüler dolgudan yaklaşık 2 kat güvenli olduğu söylenebilir. Kaplama etkisine bakıldığında, kaplama sertliğinin granüler dolguda az da olsa etkili olduğu, marjinal dolguda ise takviye sertliğine bağlı olarak esnek veya rijit kaplamanın daha avantajlı olabileceği görülmektedir. Donatı sertliğine bakıldığında, granüler dolguda doğru orantılı bir artış görülmekte, marjinal dolguda ise yapının deplasmanına göre değişkenlik göstermektedir.

Çizelge 4.3. Modellerin güvenlik sayısı sonuçları

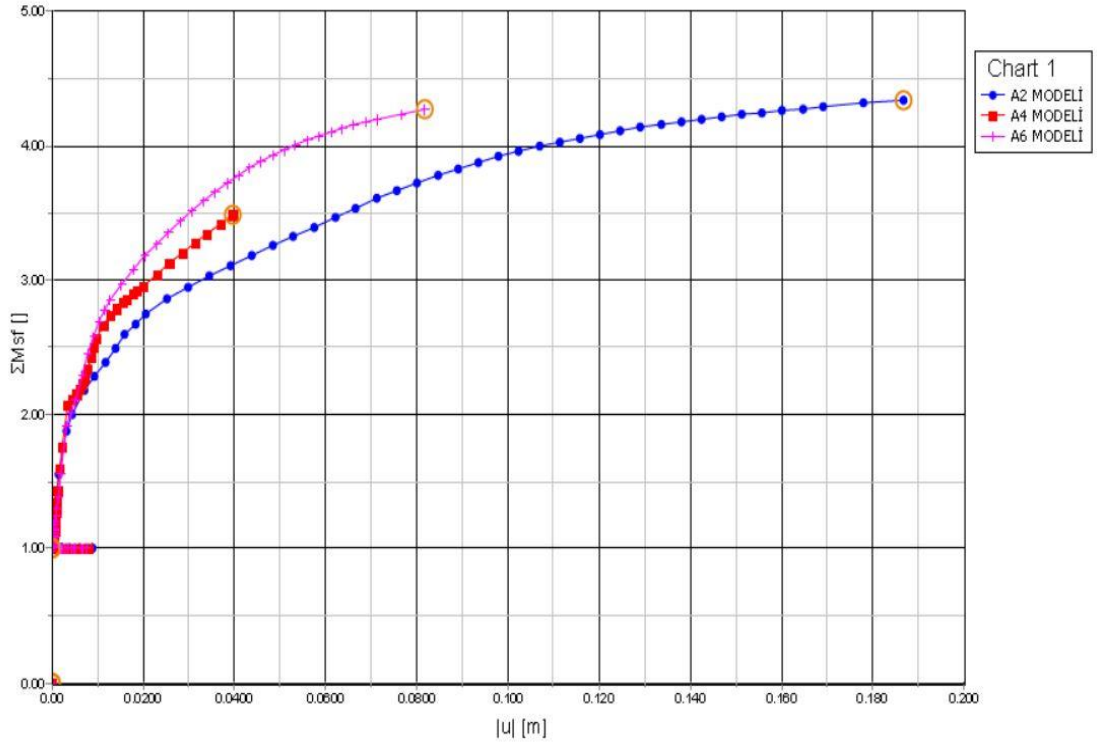
| Model No | Dolgu Tipi | Takviye Sertliği kN/m ² | Kaplama Tipi | Güvenlik Sayısı (GS) |
|------------------|------------|---------------------------------------|--------------|-------------------------|
| A1 A3 A5 | Granüler | 1800 3400 5000 | Esnek | 1,59 1,88 2,12 |
| A7 A9 A11 | Granüler | 1800 3400 5000 | Rijit | 1,53 1,87 1,94 |
| A2 A4 A6 | Marjinal | 1800 3400 5000 | Esnek | 4,34 3,48 4,26 |
| A8 A10 A12 | Marjinal | 1800 3400 5000 | Rijit | 4,04 4,45 3,96 |



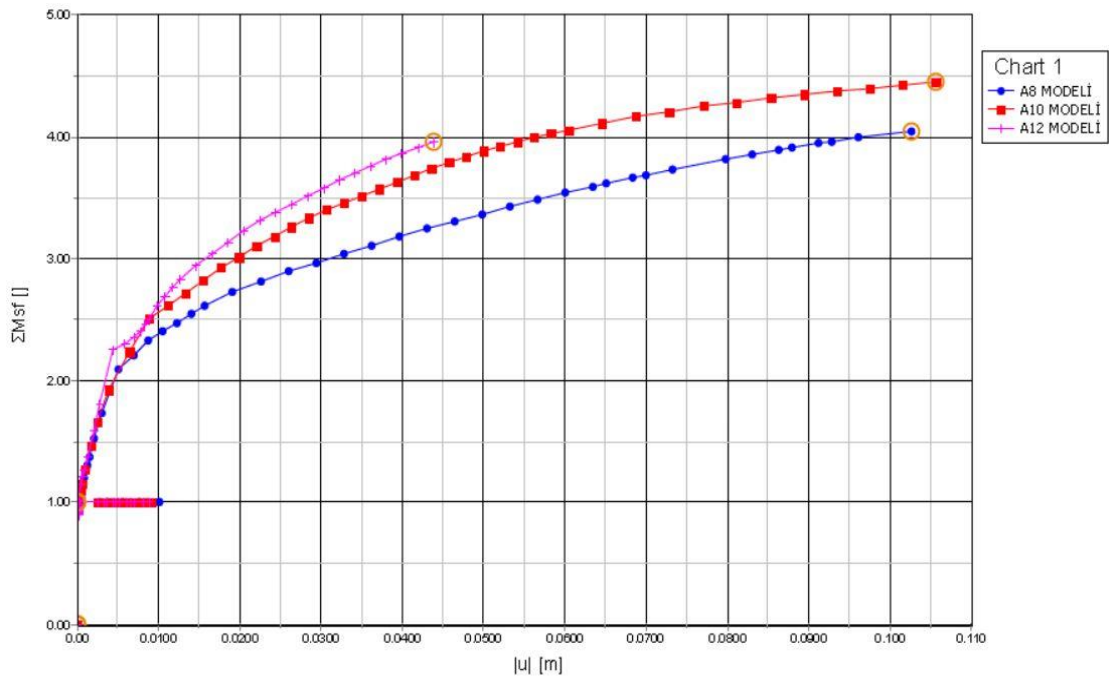
Şekil 4.14. İstinat yapısında takviye sertliği ve güvenlik sayısı karşılaştırılması

Şekil 4.14'te A2 (Marjinal dolgulu esnek yüzey ve takviye sertliği 1800 kN/m) modelinden A4 (Marjinal dolgulu esnek yüzey ve takviye sertliği 3400 kN/m) modeline geçişte güvenlik sayısı düşüş göstermiştir. Bunun sebebi Şekil 4.15'te verilen grafiğe bakıldığında anlaşılmaktadır, grafikten de görüldüğü gibi A4 modelinde yapının yer değiştirmesinin 0,04 m'de sınırlı kalmasından ve fazla deplasman yapmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

A2-A4-A6 model kombinasyonunda olduğu gibi A10 (Marjinal dolgulu rijit yüzey ve takviye sertliği 3400 kN/m) modelinden A12 (Marjinal dolgulu rijit yüzey ve takviye sertliği 5000 kN/m) modeline geçişte güvenlik sayısındaki düşüşün, Şekil 4.16'da verilen grafiğe bakıldığında A12 modelinin yer değiştirmesinin 0,045 m'de sınırlı kalması ve fazla deplasman yapmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Burada kaplamanın rijit olmasını gözardı etmemek gerekiyor ki yapının deplasman yapacağı bölgeyi üst tarafa taşımada payı büyüktür.



Şekil 4.15. Marjinal dolgu-Esnek kaplama (A2-A4-A6) modellerinin güvenlik sayısı ve yerdeğiştirme bağlantısı



Şekil 4.16. Marjinal dolgu-Rijit kaplama (A8-A10-A12) modellerinin güvenlik sayısı ve yerdeğiştirme bağlantısı

4.3.1. Dolgu tipinin etkisi

Dolgu tipinin etkisi, inşaat sonu uygulamaları için araştırılmıştır. Analizler yeraltı suyunun olmadığı durumda gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi her iki takviye ve kaplama türü için granüler dolgu yerine marjinal dolgu kullanıldığında, yapının güvenirliliği önemli ölçüde artmıştır. Uygun donatıya sahip marjinal dolgu nedeniyle azalan yer değiştirmeler, dolgunun drenajı sağlandığında ve kohezyonlu marjinal dolgunun iyi sıkıştırılmış olması durumunda, güçlendirilmiş toprak istinat duvarlarında başarılı bir dolgu malzemesi olarak kullanılabileceğinin bir göstergesidir (Guler ve ark. 2007, 2012).

4.3.2. Takviye sertliğinin etkisi

Şekil 4.14'te görüldüğü gibi granüller dolguda aynı dolgu ve kaplamanın kullanılması durumunda, takviye sertliği arttıkça duvar yapının güvenirliliği genel olarak artmıştır. Marjinal dolguda ise yapının güvenirliliği takviye sertliğinin artmasıyla değişkenlik göstermiştir. Takviye sertliğinin güvenlik sayısı sonuçları üzerindeki etkisi, granüler dolguda daha belirgin olmakla birlikte, marjinal dolguda ise dolgunun mukavemet etkisinin ön plana çıkması ile takviye sertliğinin fazla etki göstermediği ve yapının deplasmanın sınırlı kalması, güvenlik sayısı sonuçları üzerinde değişkenlik göstermektedir.

4.3.3. Kaplama tipinin etkisi

Şekil 4.14'te verilen grafiğe göre aynı dolgu ve takviyenin kullanılması durumunda kaplama tipinin esnek olması marjinal dolgunun güvenlik sayısı sonuçlarında değişkenlik göstermektedir. Granüller dolgularında ise yüzey kaplamasının rijit ya da esnek olmasının yapı güvenlik sayısı sonuçlarına pek etkisi olmadığı görülmektedir. Kaplama tipinin güvenlik sayısı sonuçlarına etkisi, takviye ve dolgu tipine göre daha az olduğu söylenebilir.

4.4. Maliyet Analiz Sonuçları

Geosentetik donatılı istinat duvarlarının maliyet analizinin sonuçları Çizelge 4.4'te özetlenmiştir. Böylece hangi modelin daha ekonomik olduğu ortaya konmuştur. Maliyet analizinde duvarın 6,0 m yükseklik ve 1,0 m genişliği baz alınmıştır. Granüler ve marjinal dolgu için Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de her bir modelin ve model kombinasyonlarının maliyet analiz karşılaştırmaları grafikler halinde verilmiştir.

Çizelge 4.4. Modellerin maliyet analiz sonuçları

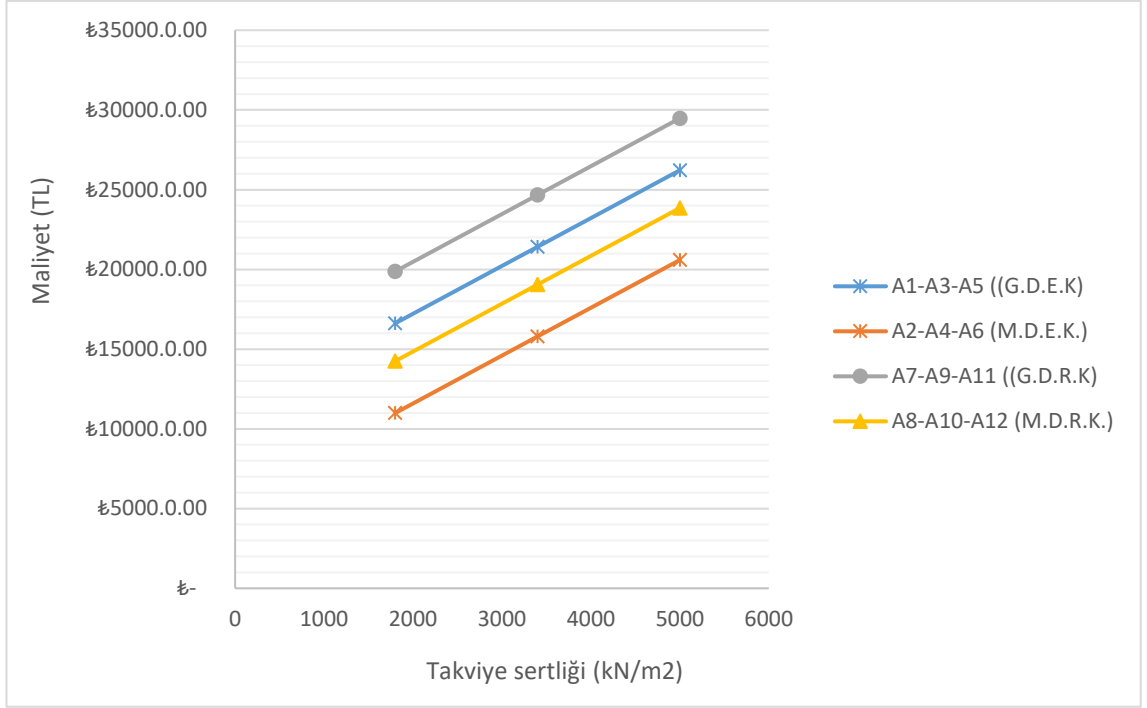
| Model No | Dolgu Tipi | Takviye Sertliği kN/m ² | Kaplama Tipi | Maliyet (TL) |
|------------|------------|---------------------------------------|--------------|-----------------|
| A1 | Granüler | 1800 | Esnek | 16617.390 |
| A3 | | 3400 | | 21417.390 |
| A5 | | 5000 | | 26217.390 |
| A7 | Granüler | 1800 | Rijit | 19875.030 |
| A9 | | 3400 | | 24675.030 |
| A11 | | 5000 | | 29475.030 |
| A2 | Marjinal | 1800 | Esnek | 10990.325 |
| A4 | | 3400 | | 15790.325 |
| A6 | | 5000 | | 20590.325 |
| A8 | Marjinal | 1800 | Rijit | 14247.965 |
| A10 | | 3400 | | 19047.965 |
| A12 | | 5000 | | 23847.965 |

EK 2'de sonlu elemanlar analizinde kullanılan model kombinasyonların maliyet analizleri detaylı olarak verilmiştir. Verilen çizelgelerde maliyet analizinde yer alan pozların çoğu Karayolları Genel Müdürlüğü Şartnamesi Analizleri Kitabı'nda yer alan Poz No'larıdır. Gerekli görülen yerlerde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Birim Fiyatı Poz No'ları kullanılmıştır.

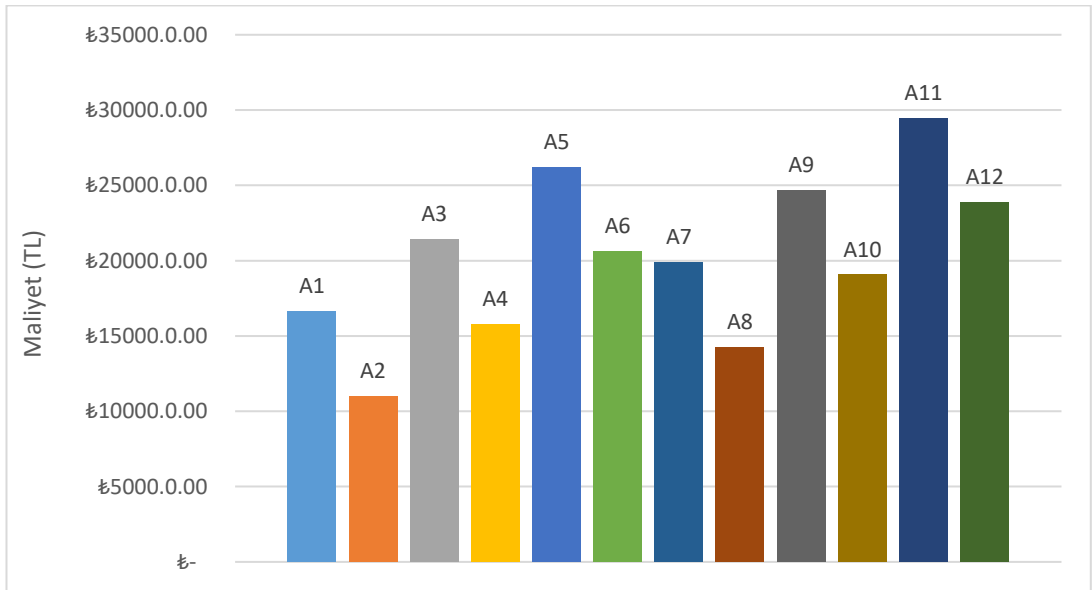
Şekil 4.17’de verilen grafiğe göre esnek yüzey kaplamalı istinat yapısında granüler dolgulu istinat yapısı marjinal dolgulu istinat yapısından daha maliyeli çıkmıştır. Maliyetler yaklaşık 10990.32 TL ile 26217.39 TL arasında değişmektedir. Esnek kaplamalı granüler dolgulu yapının marjinal dolgulu yapıya nazaran maliyeti ortalama 6000 TL fark etmiştir, m^2 ’de 1000 TL maliyet farkı vardır. Rijit yüzey kaplamalı istinat yapısında granüler dolgulu istinat yapısı marjinal dolgulu istinat yapısından daha maliyeli çıkmıştır. Maliyetler yaklaşık 14247.96 TL ile 29475.03 TL arasında değişmektedir. Esnek kaplamalı granüler dolgulu yapının marjinal dolgulu yapıya nazaran ortalama 5500 TL fark etmiştir. m^2 ’de 917 TL maliyet farkı vardır.

Genel olarak bütün kombinasyonlarda maliyet takviye sertliğinin artmasıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. Granüler dolgulu rijit yüzey kaplamalı istinat yapısı (A7-A9-A11) maliyet açısından en fazla çıkan kombinasyondur. En az çıkan kombinasyon marjinal dolgulu esnek yüzey kaplamalı istinat yapısıdır (A2-A4-A6). Maliyetler yaklaşık 10990.32 TL ile 29475.03 TL arasında değişmektedir.

Şekil 4.18’de verilen grafiğe göre marjinal dolgulu, esnek yüzey kaplamalı, takviye sertliği 1800 kN/m olan istinat duvarı (A2 modeli) en düşük maliyetli model olup en yüksek maliyetli model ise granüler dolgulu, rijit yüzey kaplamalı, takviye sertliği 5000 kN/m olan (A11 modeli)’dir. Granüler dolgulu rijit yüzey kaplamalı takviye sertliği 1800 kN/m (A7 modeli) ile marjinal dolgulu, esnek yüzey kaplamalı takviye sertliği 5000 kN/m (A6 modeli) maliyet açısından makul düzeyde birbirine yakındır. Tüm modellerde belirli kriterlere göre marjinal dolgulu istinat yapıları granüler dolgulu istinat yapılarına göre daha ekonomik olduğu görülmektedir.



Şekil 4.17. Model kombinasyonların takviye sertliği ve maliyet karşılaştırılması



Şekil 4.18. Her bir modelin maliyet karşılaştırılması

5. SONUÇ

Geosentetik takviyeli toprak istinat duvarların performansı, Plaxis programı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Yaklaşım ilk olarak, literatürde Yang ve ark. (2012) tarafından bildirilen iyi enstrümanlı tam ölçekli takviyeli toprak duvar testinden elde edilen sonuçlar ile aynı yapının sonlu elemanlar analizi ve analitik yöntem sonuçları karşılaştırılarak sayısal modelin doğrulama analizi yapılmıştır. Bununla birlikte uyarlanan modelin, farklı donatı sertliği, kaplama tipi ve marjinal dolgu kombinasyonları ile sayısal model analizleri yapılmıştır. Seçilen değişkenler modellerde kullanılarak ekonomik yönden makul olan modeli belirlemek için maliyet analizi yapılmıştır.

Genel olarak, doğrulama analizinde görüldüğü gibi tam ölçekli yapıların uygulama sonuçlarının analiz sonuçlarıyla makul düzeyde uyduğu görülmektedir:

- Aynı yükseklikteki düşey basınç ölçerlerin, duvar yüzeyinden mesafesi artıkça sayısal analiz sonuçlarının lokasyondan fazla etkilenmediği, tam ölçekli uygulama ölçümlerinde duvar kaplamasından mesafenin artmasıyla düşey basıncın azaldığı görülmektedir. Arazideki değerlerin değişkenlik göstermesinin sebebinin toprak basıncı altında zamanla yüzeyin yer değiştirmesinden yani deplasmandan kaynaklandığı söylenebilir.
- Yanal basınç ölçerlerde, üzerindeki dolgu yüksekliğinin fazla olmadığı durumlarda yanal basınç önemli ölçüde artmıştır ancak dolgu yüksekliğinin artış gösterdiği durumlarda artış oranı azalmıştır. Sayısal analizde yanal basıncın temelden itibaren ilk aşamada pik değerini ulaştığı, diğer lokasyonlardaki basınç ölçerlerin yüksekliğin artmasından etkilenmediği görülmektedir. Arazi ölçümlerinde temelden itibaren 2 m yüksekliğinde basıncın değişken olduğu görülmektedir, sayısal analiz sonuçlarında ise bu değişkenlik temelden itibaren 1 m yükseklikle sınırlı kalmıştır. Arazi ölçümleri ve sayısal analiz sonuçlarının 2 m'den sonraki yüksekliklerde uyumlu olduğu görülmektedir.

- Arazi ölçüm sonuçları ile K- rijitlik yöntemi sonuçları arasında iyi bir uyum vardır. ASTHOO yönteminde takviye yüklerinin fazla tahmin edildiğini ve tahmin edilen ve ölçülen yük arasındaki tutarsızlığın duvar yüksekliği ile arttığını göstermektedir. Ölçülen donatı yüklerinin büyüklüğü ve dağılımının karşılaştırılmasının, mevcut AASHTO (2012) Basitleştirilmiş yöntemine göre K-sertlik Yöntemi kullanılarak daha doğru olduğu nicel olarak gösterilmiştir.
- Sayısal analiz sonuçlarında ise takviye yükleri, duvar yüksekliğinin artışıyla azalmıştır, üste doğru duvardaki dolgu miktarı azaldığı için bu beklenen bir durumdur. Ölçümlerde ise donatılardaki çekme kuvvetleri sayısal analiz sonuçlarından daha fazladır. Bunun nedeni olarak, geogrid takviyeli kireçle işlenmiş kohezif toprağın ağır silindir sıkıştırıcı kullanılarak sıkıştırılmasının büyük ölçüde takviye gerilimine katkıda bulunduğu söylenebilir.

Yapılan parametrik çalışmada, dolgu etkisinin önemli olduğu, takviye sertliğinin etkisi ve kaplamanın esnekliğinin etkisinin ise daha düşük olduğu görülmüştür, her değişken ise yapı maliyetini önemli ölçüde etkilemektedir:

- Dolgu etkisine bakıldığında, her iki kaplama türünde marjinal dolguda yer altı suyunun drene olduğu durumda, granüler dolgudan yaklaşık 2 kat güvenlidir. Kaplama etkisine bakıldığında, kaplama sertliğinin çok fazla etkili olmadığı görülmektedir. Donatı sertliğine bakıldığında, granüler dolguda takviye sertliği artışı ile doğru orantılı bir artış görülmekte, marjinal dolguda ise yapının deplasmanına göre değişkenlik göstermektedir.
- Marjinal dolgulu duvarların parametrik çalışma sonuçları dikkate alındığında granüler dolgulu duvarlara göre daha güvenli olduğu görülmektedir. Çalışma gerilimi koşullarında orta-yüksek sette dolgu toprağı, duvarın performansında ön plana çıkmıştır. Geogrid takviyelerinin ve kaplamanın, statik yükleme altında küçük bir etkisi olduğu gösterilmiştir.

- Tüm sonuçlarda açıkça görülmektedir ki marjinal dolgulu geosentetik donatılı istinat duvarları granüler dolgulu geosentetik donatılı istinat duvarlardan daha ekonomik çözümler sunmaktadır. Marjinal dolgulu, esnek yüzey kaplamalı, takviye sertliği 1800 kN/m olan istinat duvarı (A2 modeli) en düşük maliyetli model olup en en yüksek maliyetli model ise granüler dolgulu, rijit yüzey kaplamalı, takviye sertliği 5000 kN/m olan (A11 modeli)'dir. Granüler dolgulu rijit yüzey kaplamalı takviye sertliği 1800 kN/m (A7 modeli) ile marjinal dolgulu, esnek yüzey kaplamalı takviye sertliği 5000 kN/m (A6 modeli) maliyet açısından makul düzeyde birbirine yakındır. Bu hesaplamalarda drenaj tasarımı ve maliyetleri hesaba katılmamıştır.

Sonuç olarak, toprakarme bir yapının inşası sırasında temini zor olan granüler dolgu yerine, dolgu cinsinin değiştirilerek temini daha kolay olan marjinal dolgunun kullanılması takviye cinsinin değiştirilerek (daha dirençli takviye kullanılması), bükülme rijitliği daha yüksek kaplama birimi kullanılması, yapının inşaa süresi ve maliyet konusunda avantaj sağlamaktadır. Ayrıca işçilik konusunda, iş yükünde hafifletilmesinde büyük rol oynamaktadır. Yapılan gözlemlere dayanarak, geogrid takviyeli toprak duvarlarda daha sert geogridlerin ve marjinal dolguların drenaj önlemlerin sağlanması halinde, marjinal dolgulardan kaynaklanan sorunları azaltmak için uygulanabilir seçeneklerden biri olarak bulunmuştur.

Tez çalışması sonuçları, statik yükler altında geosentetiklerle güçlendirilen marjinal dolgulardan granüller dolgular kadar performans elde edilebileceğini göstermiştir. Ancak ileri çalışmalarda üç boyutlu sayısal analizler yapılarak parametrelerin daha detaylı araştırılması gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca, geosentetiklerle güçlendirilen marjinal dolguların tekrarlı yüklemeler altında performansının araştırılması gerektiği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ahmadi, H., Bezuijen, A. 2018.** Full-scale mechanically stabilized earth (MSE) walls under strip footing load. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(3): 297–311.
- Alhadj Chehade, H., Dias, D., Sadek, M., Jenck, O., Hage Chehade, F. 2019.** Seismic analysis of geosynthetic reinforced retaining wall in cohesive soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(3): 315–326.
- Alkaya, D., Yeşil, B. 2012.** Metal şerit ve Geosentetik Donatı Kullanılarak Oluşturulan Donatılı Zemin (Toprakarme) Yapıların Spreadsheet Kullanarak Analizi. Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik ABD; Düzce Üniversitesi, DMYO Teknik Programlar, İnşaat Bölümü.
- Allen, T. M., Bathurst, R. J. 2001.** Prediction of soil reinforcement loads in mechanically stabilized earth (MSE) wall. Report No WA-RD 522.1, Washington State Department of Transportation Research report Transportation Building, Washington.
- Aslan, V. Z. 2007.** Design and Numerical Modeling of Reinforced Earth Retaining Structures. *MSc Thesis*, Bogazici University, Istanbul.
- Aydin, M. C., Gelberi, G. 2018.** Morgedik Barajı Geçirimsizlik Problemi ve Çözüm Uygulaması. *Su Vakfı Dergisi*, 3(2): 1–7.
- Balakrishnan, S., Viswanadham, B. V. S. 2016.** Performance evaluation of geogrid reinforced soil walls with marginal backfills through centrifuge model tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(1): 95–108.
- Bathurst, R. J., Hatami, K. 1998.** Seismic response analysis of a geosynthetic-reinforced soil retaining wall. *Geosynthetics International*, 5(1–2): 127–166.
- Bathurst, Richard J. 2007.** Geosynthetics Functions. *International Geosynthetics Society (IGS)*, 1–2.
- Berg, R., Christopher, B., Samtani, N. 2009.** Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes. Report No FHWA GEC 011-Vol I, National Highway Institute Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
- Berilgen, M. 2014.** Geoteknikte Sayısal Analizler: Yöntemler, Esaslar Ve Sınırlamalar. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 15. Ulusal Kongresi, ODTÜ, Ankara.
- Berilgen, M. 2018.** Geoteknik mühendisliğinde modelleme. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa & İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

Binici, E., Öztürk, Ş. 2019. Konsol İstinat Duvar Tasarımı Üzerine Parametrik Bir Çalışma. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(1): 203–210.

Can, S. 2017. Geosentetik Donatılı İstinat Duvarlarının Numerik Analizi ve Tasarım Aşamaları. *Yüksek Lisans Tezi*, Harran üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Şanlıurfa.

Cetin, H., Fener, M., Gunaydin, O. 2006. Geotechnical properties of tire cohesive clayey soil mixtures as a fill material. *Engineering Geology*, 88(1–2): 110–120.

Christopher, B.R., Zornberg, J. G., Mitchell, J. K. 1998. Design guidance for reinforced soil structures with marginal soil backfills. *Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics* , Vol. 2: 797–804.

Christopher, Barry R, Stulgis, R. P. 2005. Low Permeable Backfill Soils in Geosynthetic Reinforced Soil Walls: State-of-the-Practice in North America. *Proceedings of North American Geo-synthetics Conference (NAGS 2005)*.

Elias, V., Christopher, B. R., Berg, R. R. 2001. Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines. Report FHWA-NHI-00-043, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.

Enünlü, A. K. 2007. Investigation of dynamic behavior of geosynthetic reinforcement soil retaining structures under earthquake loads. *Phd Thesis*, Boğaziçi University, Institute of Science and Engineering, Istanbul.

Fratta, D., Bozkurt, M. G. 2014. Lateral Deflection Contribution to Settlement Estimate. Report No WHRP 0092-12-03, Department of Transportation Division of Business Management Research & Library Unit, University of Wisconsin, Madison.

Glendinning, S., Jones, C. J. F. P., Pugh, R. C. 2005. Reinforced soil using cohesive fill and electrokinetic geosynthetics. *International Journal of Geomechanics*, 5(2): 138–146.

Guler, E., Hamderi, M., Demirkan, M. M. 2007. Numerical analysis of reinforced soil retaining wall structures with cohesive and granular backfills. *Geosynthetics International*, 14(6): 330–345.

Guler, Erol 2017. A material which started a new era in geotechnical engineering: geosynthetics. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2(1): 36.

Guler, Erol, Cicek, E., Demirkan, M. M., Hamderi, M. 2012. Numerical analysis of reinforced soil walls with granular and cohesive backfills under cyclic loads. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(3): 793–811.

Gündüz, Z. 2015. Temeller. 2014-2015 Bahar yılı, Sakarya üniversitesi, Sakarya.

Hatami, K., Bathurst, R. J. 2005. Development and verification of a numerical model for the analysis of geosynthetic reinforced soil segmental walls under working stress conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(4): 1066–1085.

Jiang, Y., Han, J., Parsons, R. L. 2020. Numerical evaluation of secondary reinforcement effect on geosynthetic reinforced retaining walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(1): 98–109.

Kitsabunnarat, A. 2008. Predicting The Performance Of Geosynthetic Reinforced Soil Retaining Walls Under Working Stress Conditions and AT Failure. *Phd Thesis*, The University of Wisconsin, Milwaukee, U.S.A.

Koerner, R. 2012. Designing with Geosynthetics (6Th Edition Vol. 1). Xlibris Corporation, Institute Geosynthetic, USA, 466 pp.

Koerner, R. M. 1990. Designing with geosynthetics (2Th Edition). Institute Geosynthetic, U.S.A, 652 pp.

Koerner, R. M., Soong, T. Y. 2001. Geosynthetic reinforced segmental retaining walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 359–386.

Kramer, S. L. 2008. Geotechnical Earthquake Engineering (C. 1). United States of America, Prentice Hall, U.S.A, 653 pp.

Lade, P. V., Lee, K. L. 1976. Engineering properties of soils. Report UCLAENG-7652, University of California, Los Angeles.

Lee, W. F. 2000. Internal Stability Analyses of Geosynthetic Reinforced Retaining Walls. *Phd thesis*, University of Washington, Civil and Environmental Engineering, U.S.A.

Ling, H. I., Liu, H., Mohri, Y. 2005. Parametric Studies on the Behavior of Reinforced Soil Retaining Walls under Earthquake Loading. *Journal of Engineering Mechanics*, 131(10): 1056–1065.

Liu, H. 2003. Finite element simulation of the response of geosynthetic reinforced soil retaining walls. *Phd thesis*, Columbia University, School of Arts and Science, U.S.A.

Mitchell, J. K., Villet, W. C. B. 1987. Reinforcement of Earth Slopes and Embankments. Report 290, Transportation Research Board, Washington.

Myles, B. 2006. the Need for Geosynthetic Standards and Generic Specifications. İkinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, 16-17 Kasım 2006, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.

Önal, O. 2009. Dayanma(İstinat) Yapıları. İMO-MİEK Geoteknik Kurs Programı, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı, İzmir.

Oyegbile, B. O. 2011. Parametric Studies on the Behaviour of Reinforced Soil Retaining Walls under Static and Dynamic Loadings. *MSc Thesis*, The National Technical University, Postgraduate School of Civil Engineering, Athens.

Özben, M. 2006. Yol yapiminda geosentetik malzemelerin kullanımı ve karayolu teknik şartnamesi. İkinci Ulusal Geoteknik Konferansı, 16-17 Kasım 2006, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.

Öztürk, T. E. 2003. Influence of a Parametric Study of Seismic Response Analysis of Reinforced Soil Retaining Structures With Plaxis. *MSc Thesis*, Boğaziçi University, Institute for Graduate Studies in Science and Engineering, Civil Engineering Department, İstanbul.

Pan, Q., Dias, D. 2016. Face stability analysis for a shield-driven tunnel in anisotropic and nonhomogeneous soils by the kinematical approach. *International Journal of Geomechanics*, 16(3): 1–11.

Raja, J., Dixon, N., Frost, M., Fraser, I. 2019. Designing with Marginal Fills : Understanding and Practice. *International Geosynthetics Society(IGS)*, 5

Töremiş, E. İ. 2003. Geotekstilller ve plaxis sonlu elemanlar programı. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Vidal, H. 1969. The principle of reinforced earth. Highway Research Board, 1–16.

Wu, H., Yao, C., Li, C., Miao, M., Zhong, Y., Lu, Y., Liu, T. 2020. Review of application and innovation of geotextiles in geotechnical engineering. *Materials*, 13(7): 2–3.

Yu, Y., Bathurst, R. J. 2017. Influence of Selection of Soil and Interface Properties on Numerical Results of Two Soil–Geosynthetic Interaction Problems. *International Journal of Geomechanics*, 17(6): 04016136(1-16).

Yu, Y., Bathurst, R. J., Allen, T. M. 2016. Numerical Modeling of the SR-18 Geogrid Reinforced Modular Block Retaining Walls. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(5): 04016003(1-13).

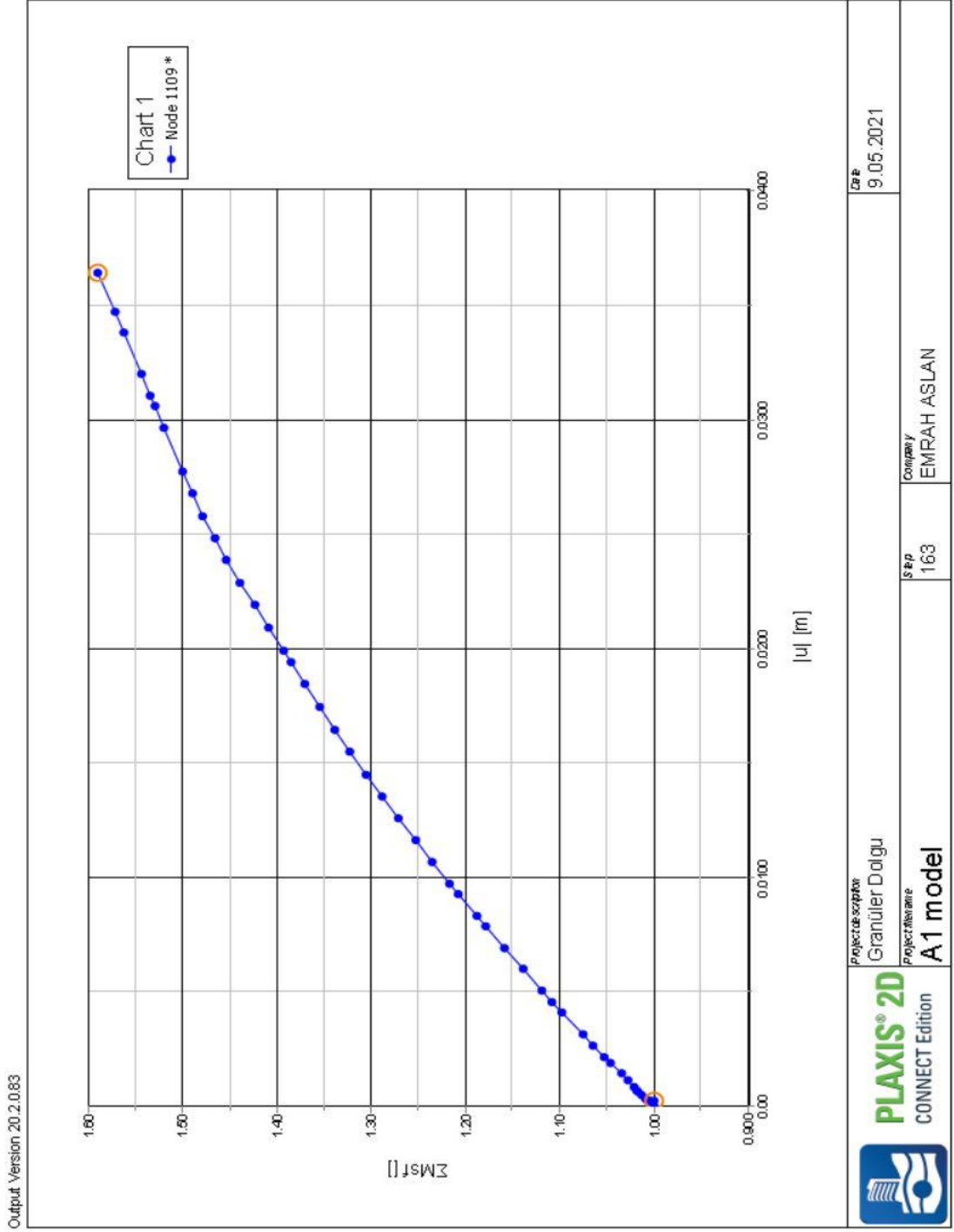
Zarnani, S., Bathurst, R. J. 2009. Numerical parametric study of expanded polystyrene (EPS) geofam seismic buffers. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(3): 318–338.

EKLER

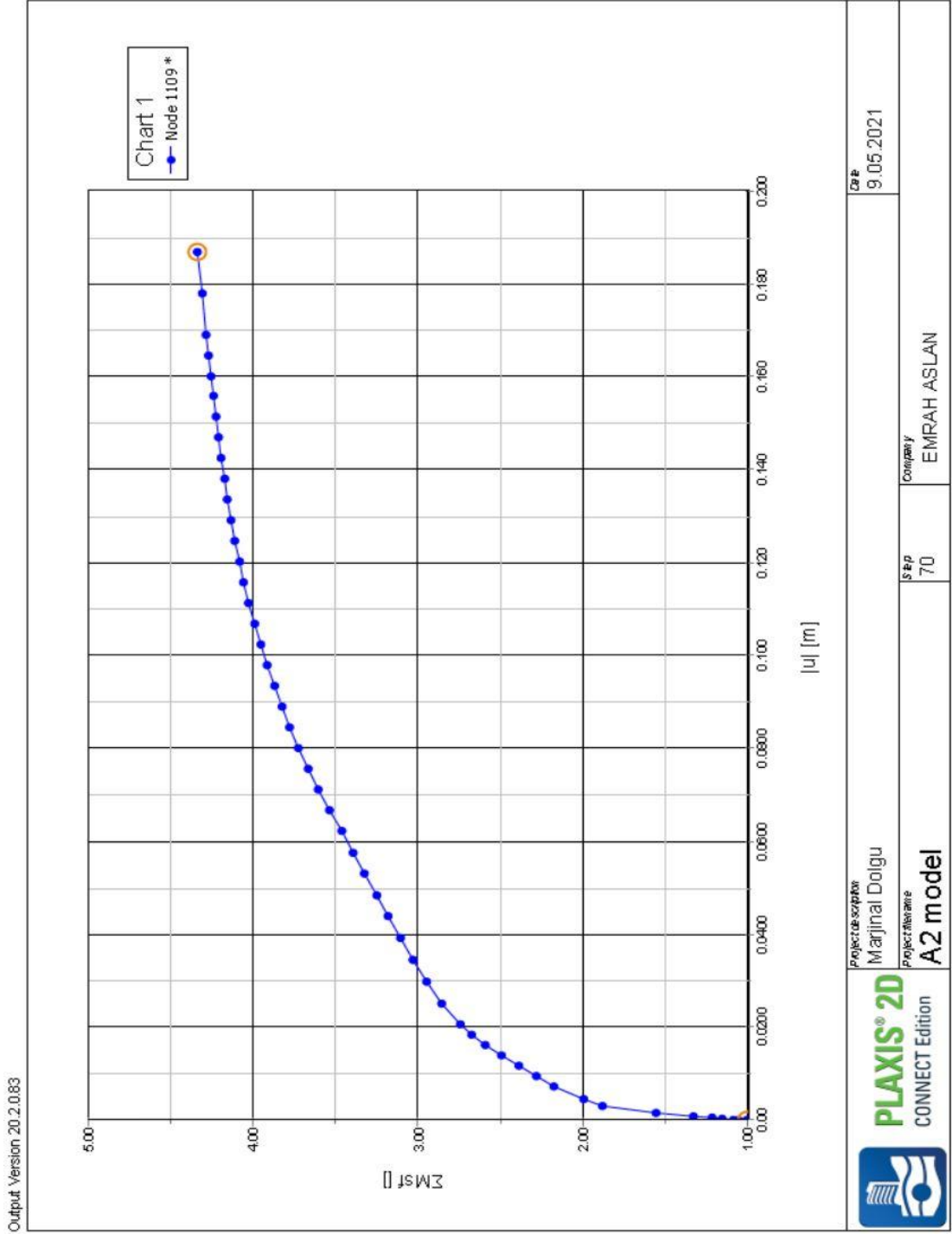
- EK 1** Toplam yerdeğiştirme ve Güvenlik Sayısı Karşılaştırılma Sonuçları
- EK 2** Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Model Kombinasyonların Maliyet analizleri

EK 1

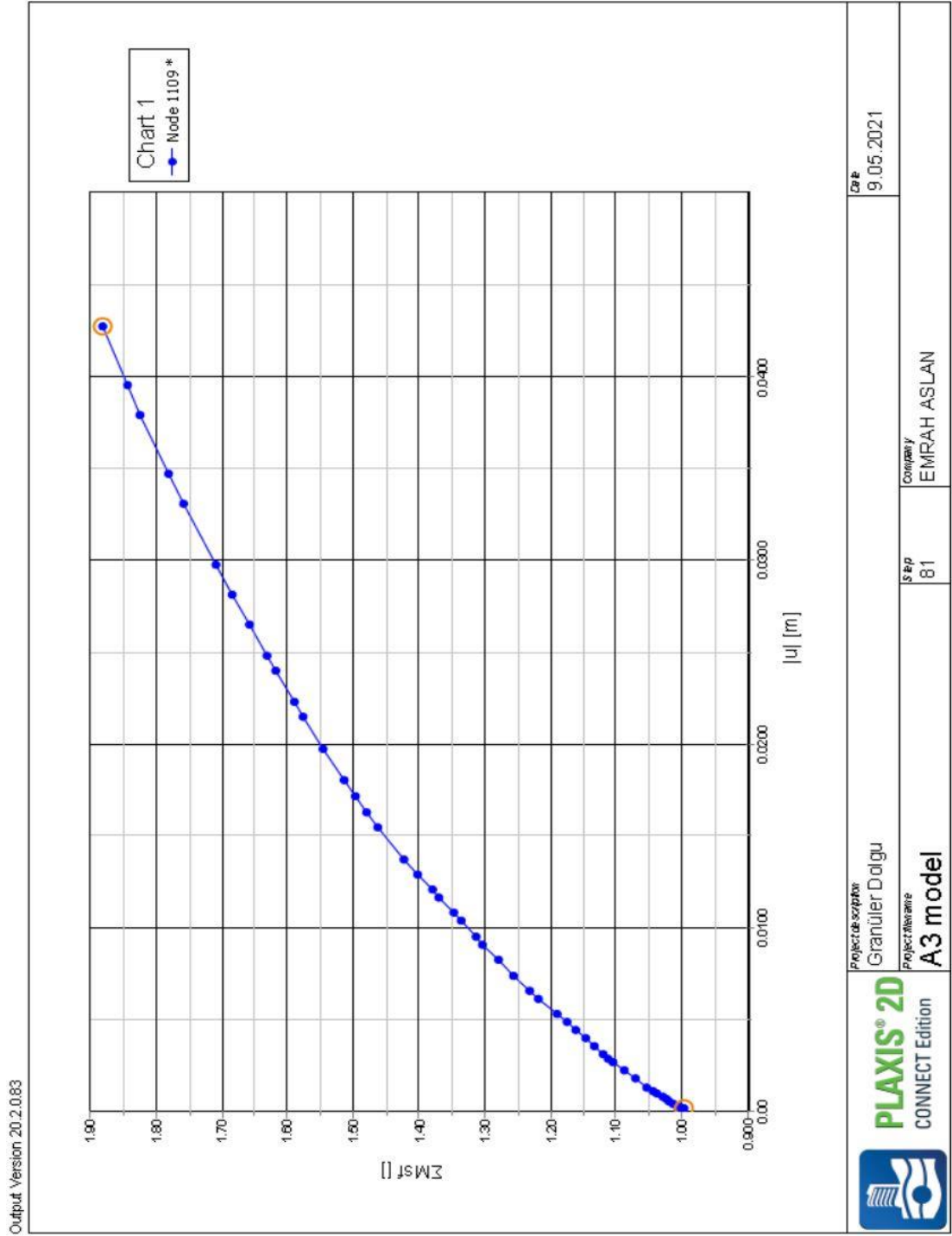
Toplam Yerdeğiştirme ve Güvenlik Sayısı Karşılaştırılma Sonuçları



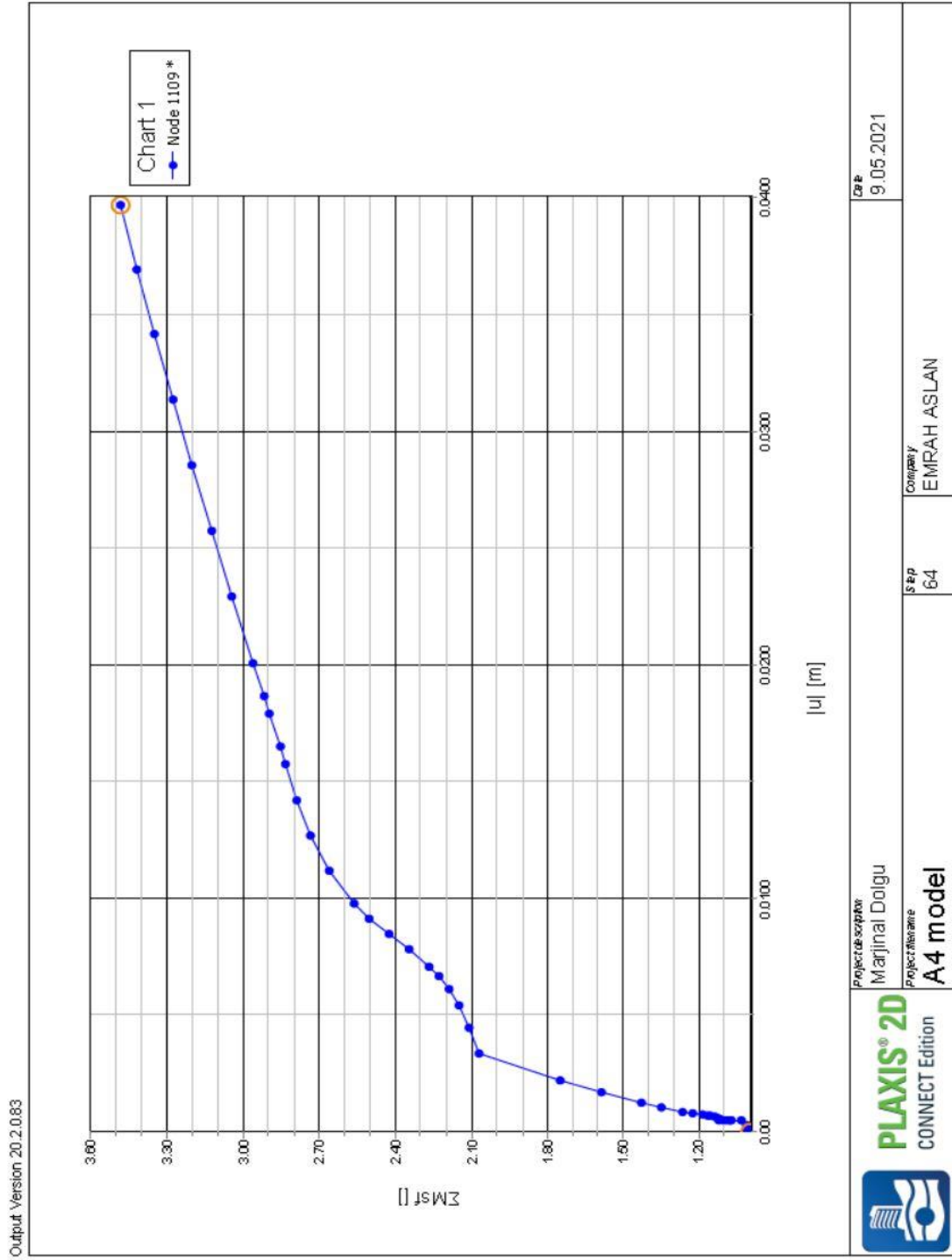
EK 1.1. A1 modeli toplam yerdeğiştirme ve güvenlik sayısı karşılaştırılma sonuçları



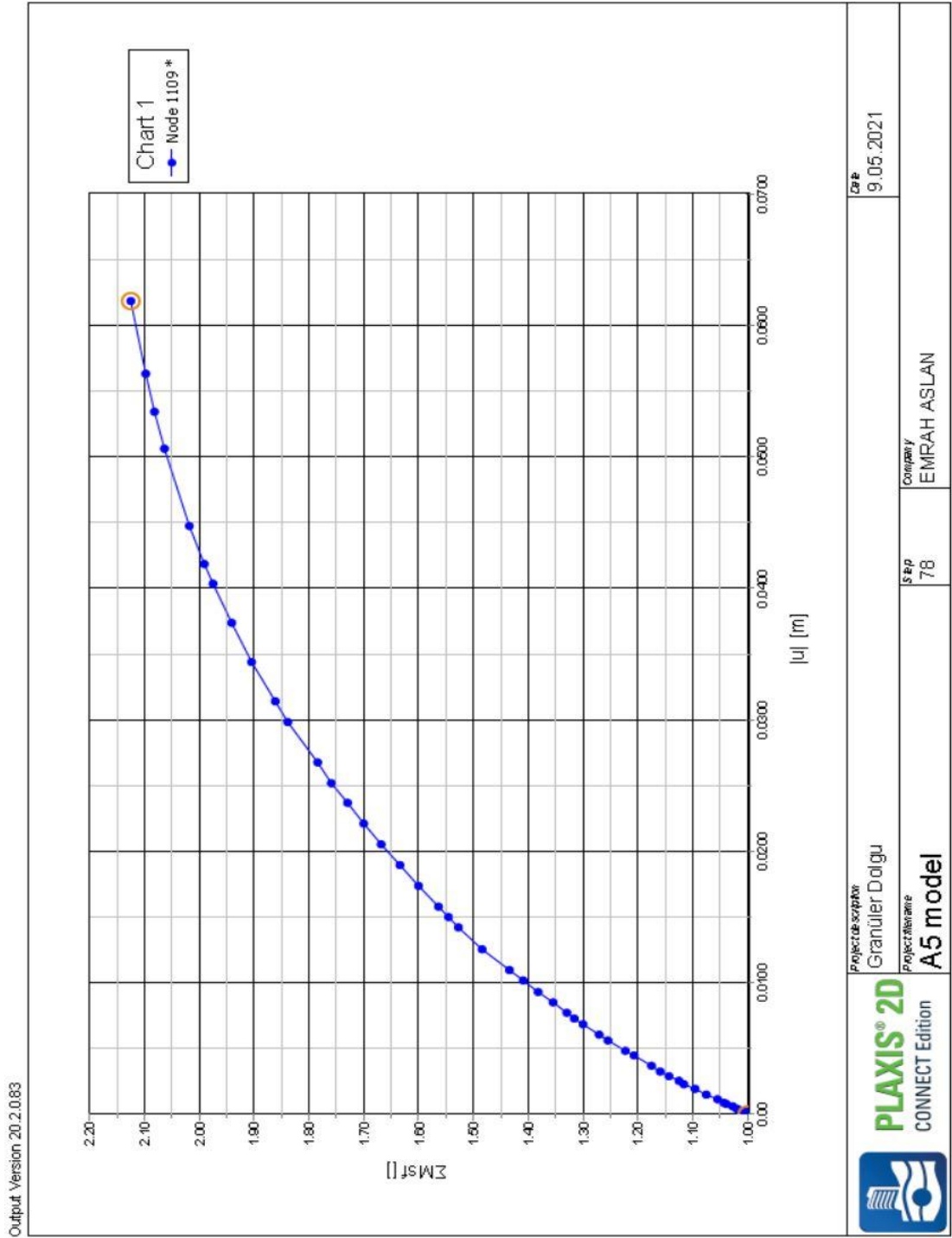
EK 1.2. A2 modeli toplam yerdeğiştirme ve güvenlik sayısı karşılaştırılma sonuçları



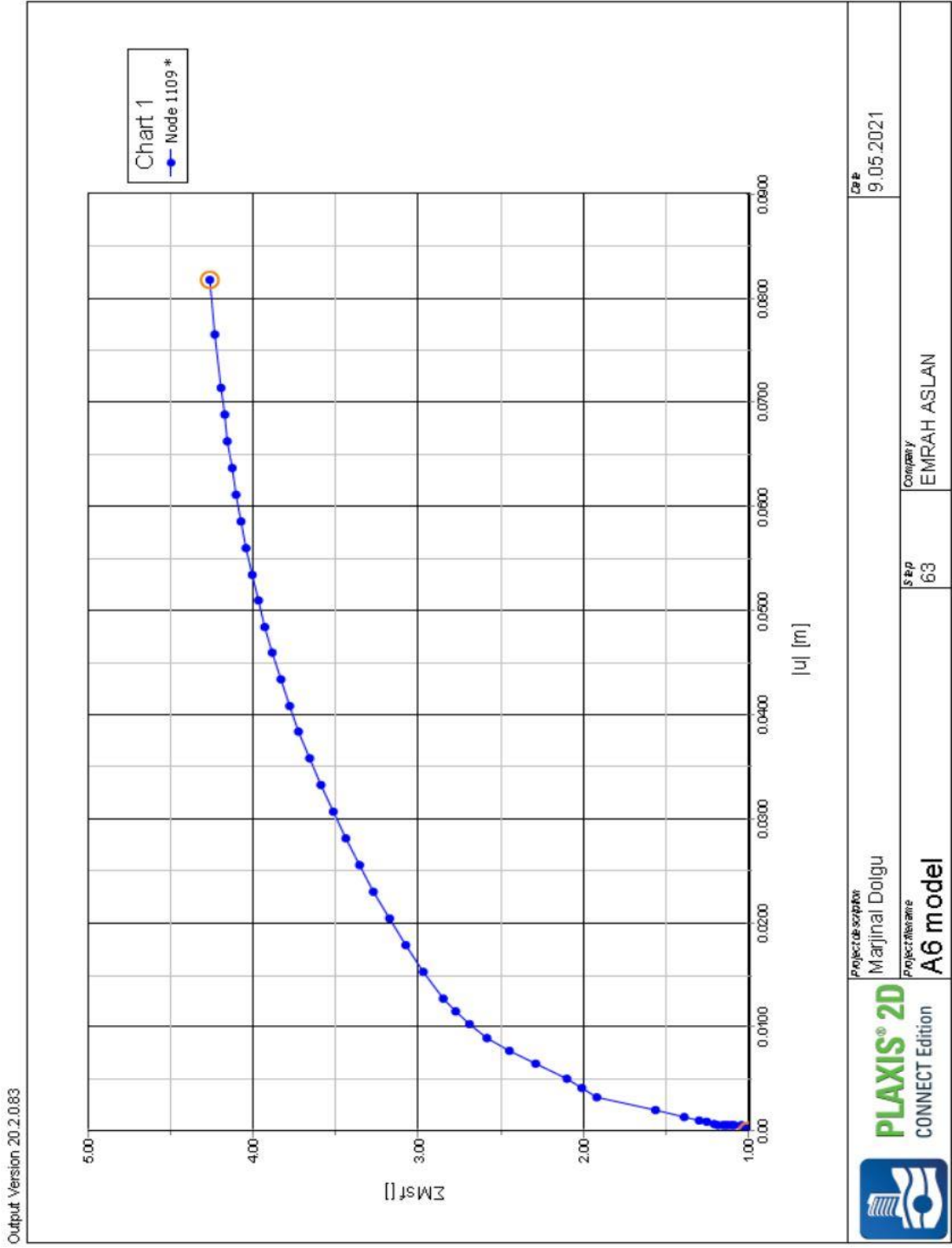
EK 1.3. A3 modeli toplam yerdeğiştirme ve güvenlik sayısı karşılaştırılma sonuçları



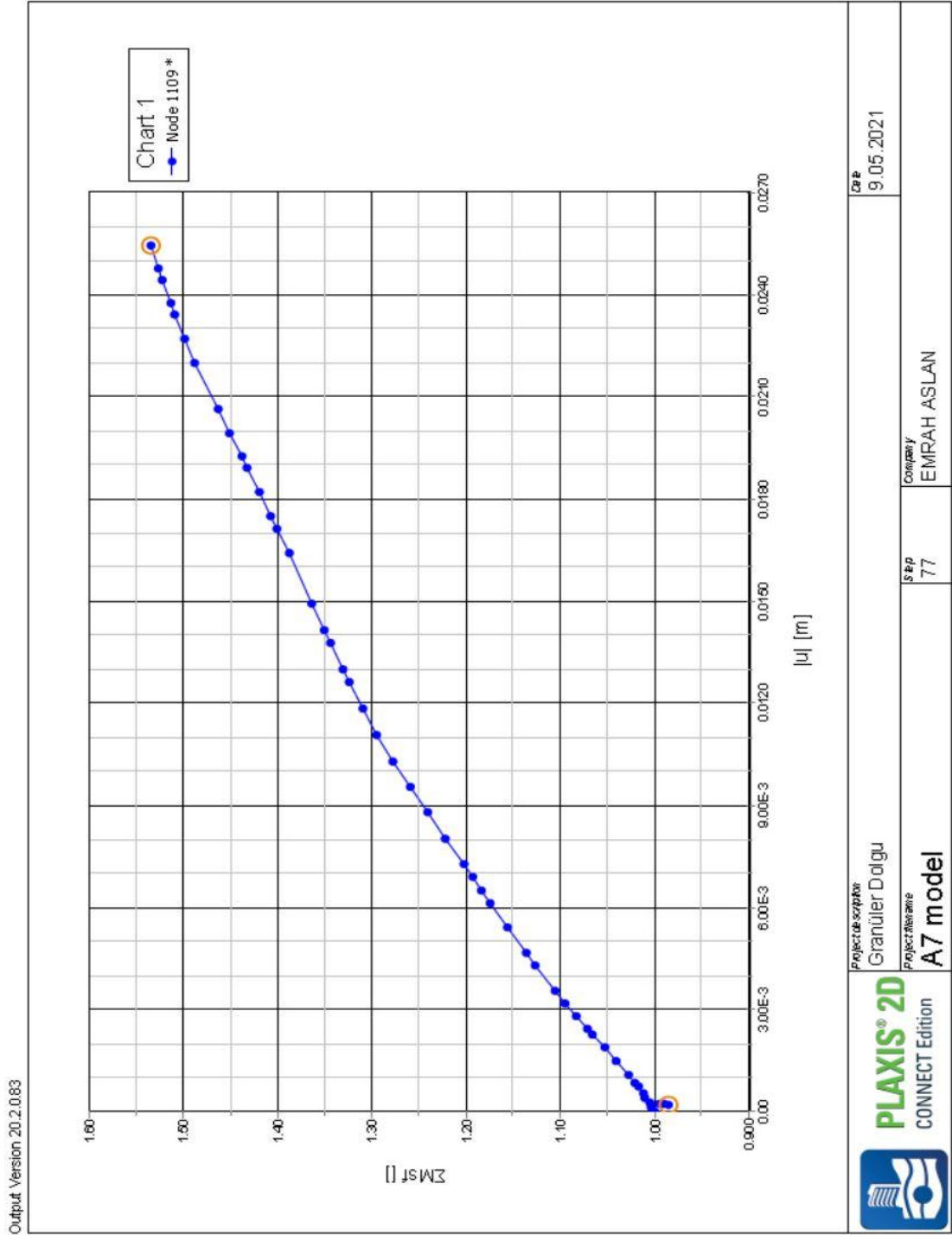
EK 1.4. A4 modeli toplam yerdeğiştirme ve güvenlik sayısı karşılaştırılma sonuçları



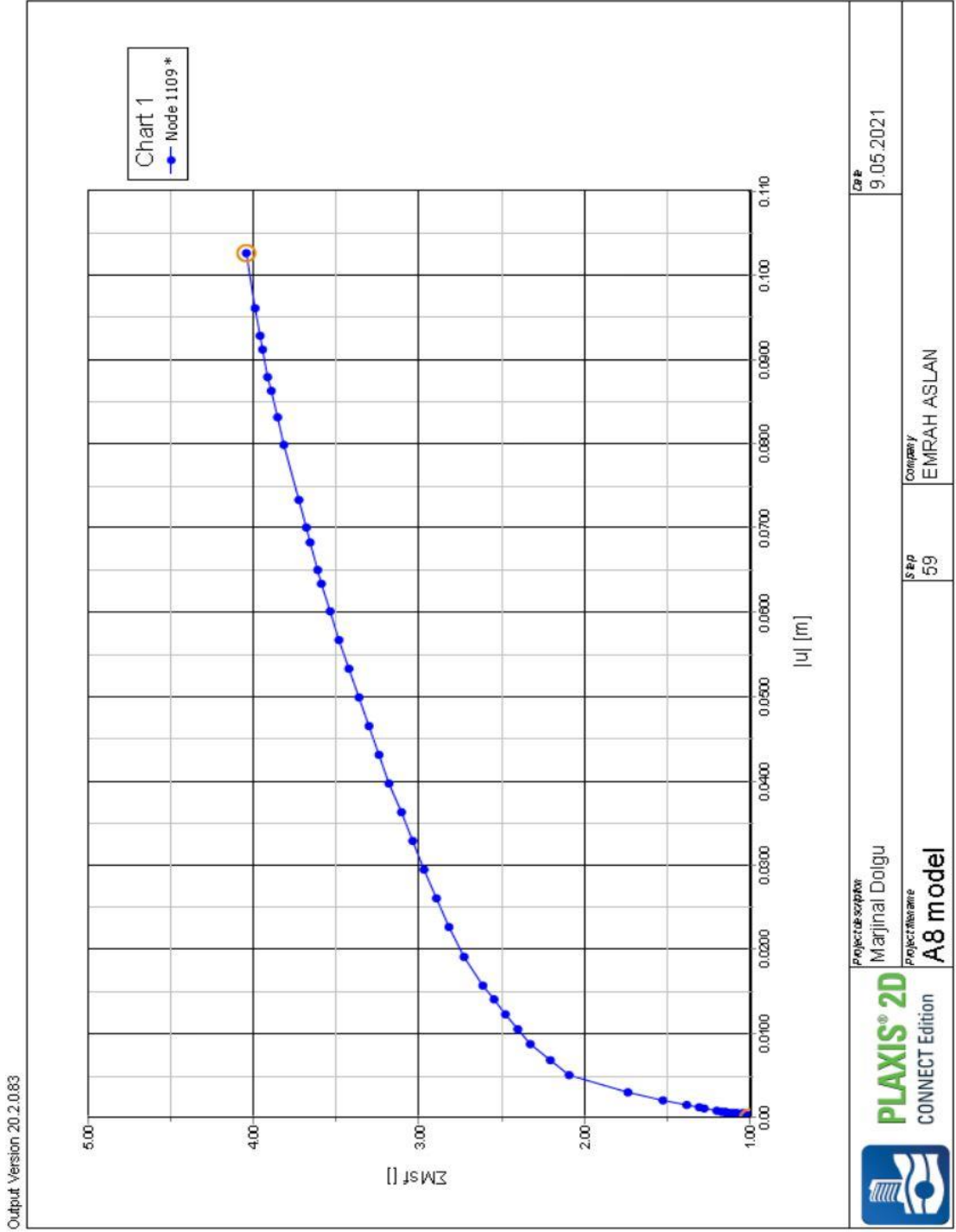
EK 1.5. A5 modeli toplam yerdeğiştirme ve güvenlik sayısı karşılaştırılma sonuçları



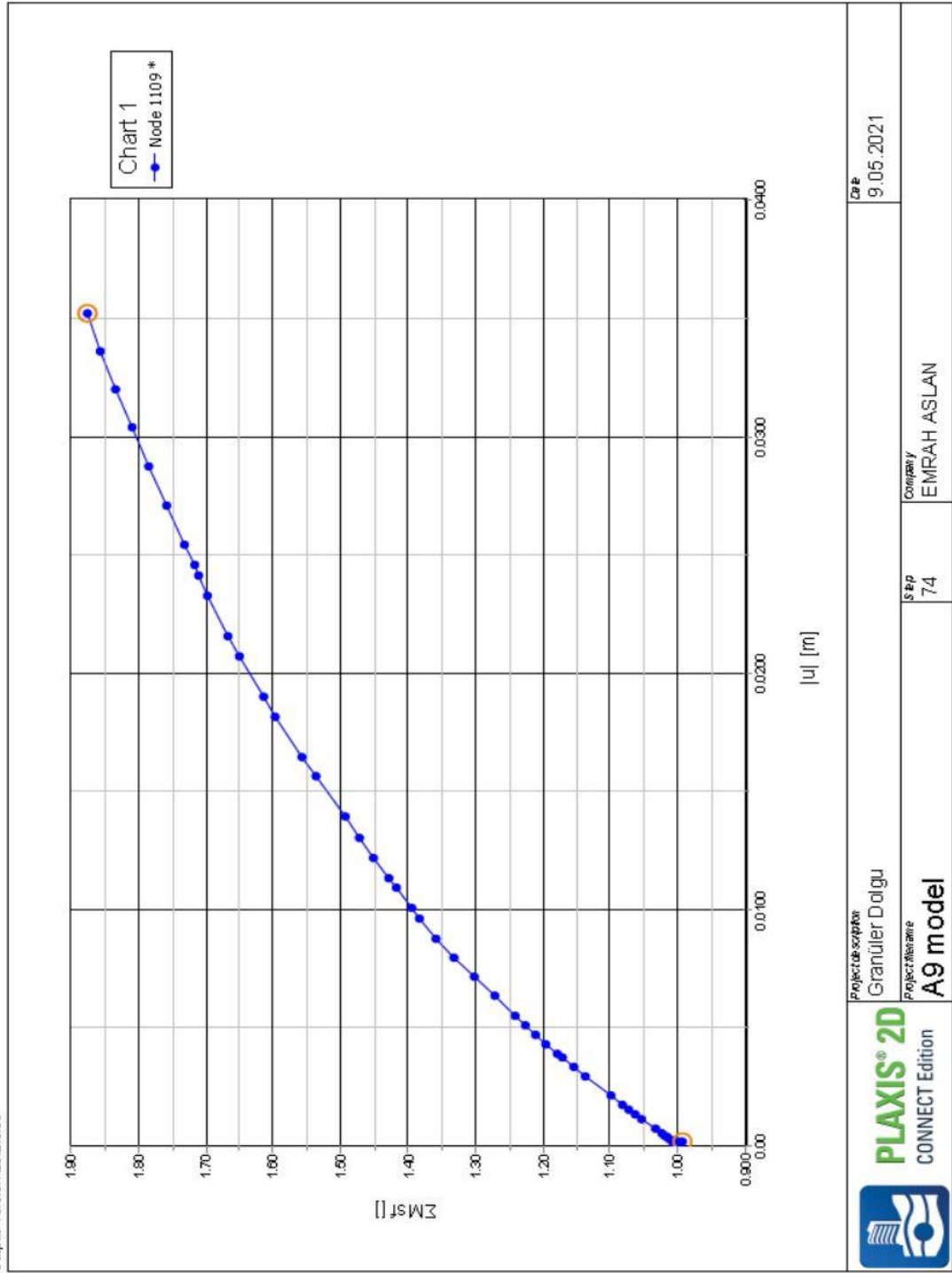
EK 1.6. A6 modeli toplam yerdeğiştirme ve güvenlik sayısı karşılaştırılma sonuçları



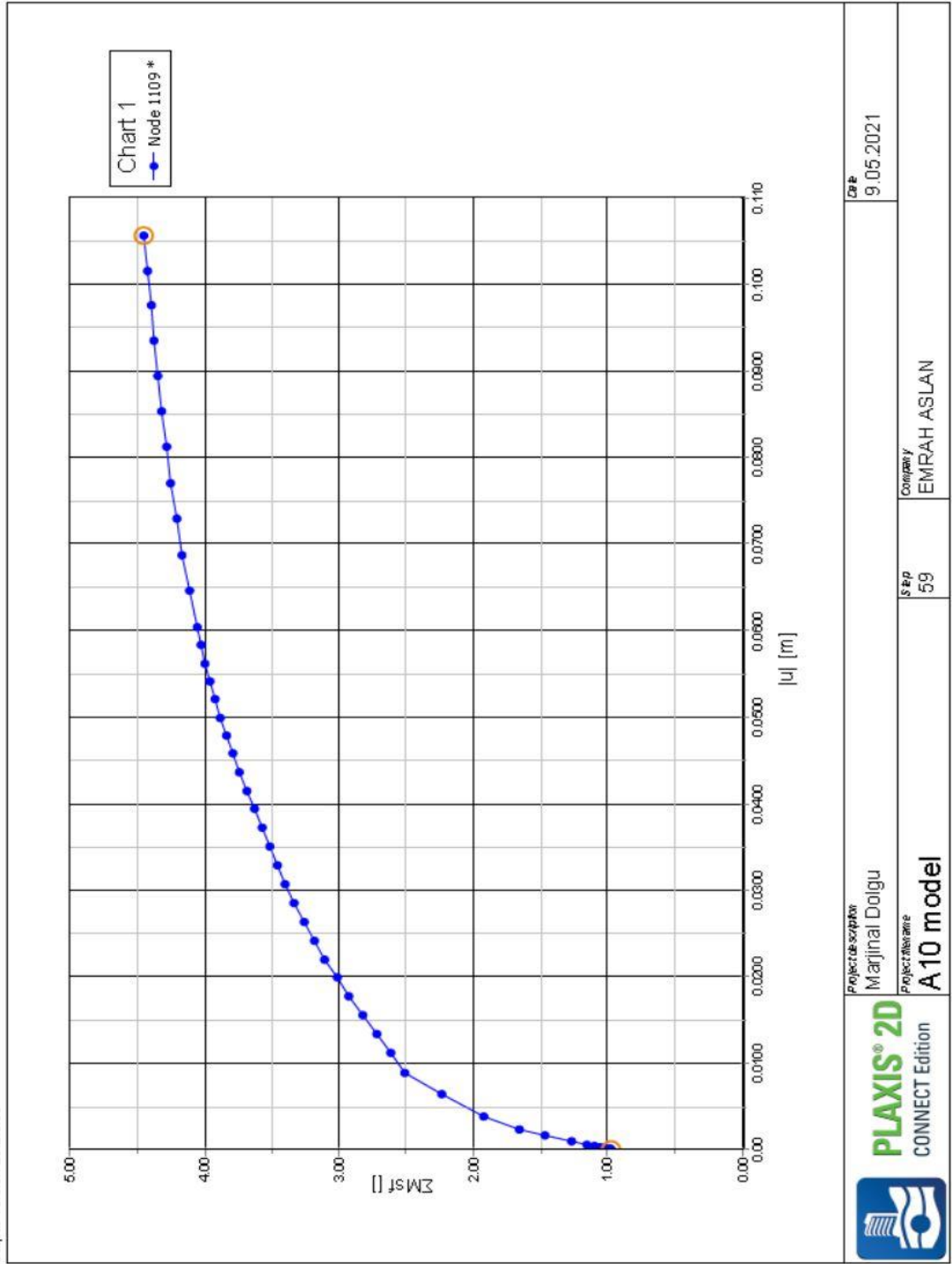
EK 1.7. A7 modeli toplam yerdeğiştirme ve güvenlik sayısı karşılaştırılma sonuçları



EK 1.8. A8 modeli toplam yerdeğiştirme ve güvenlik sayısı karşılaştırılma sonuçları



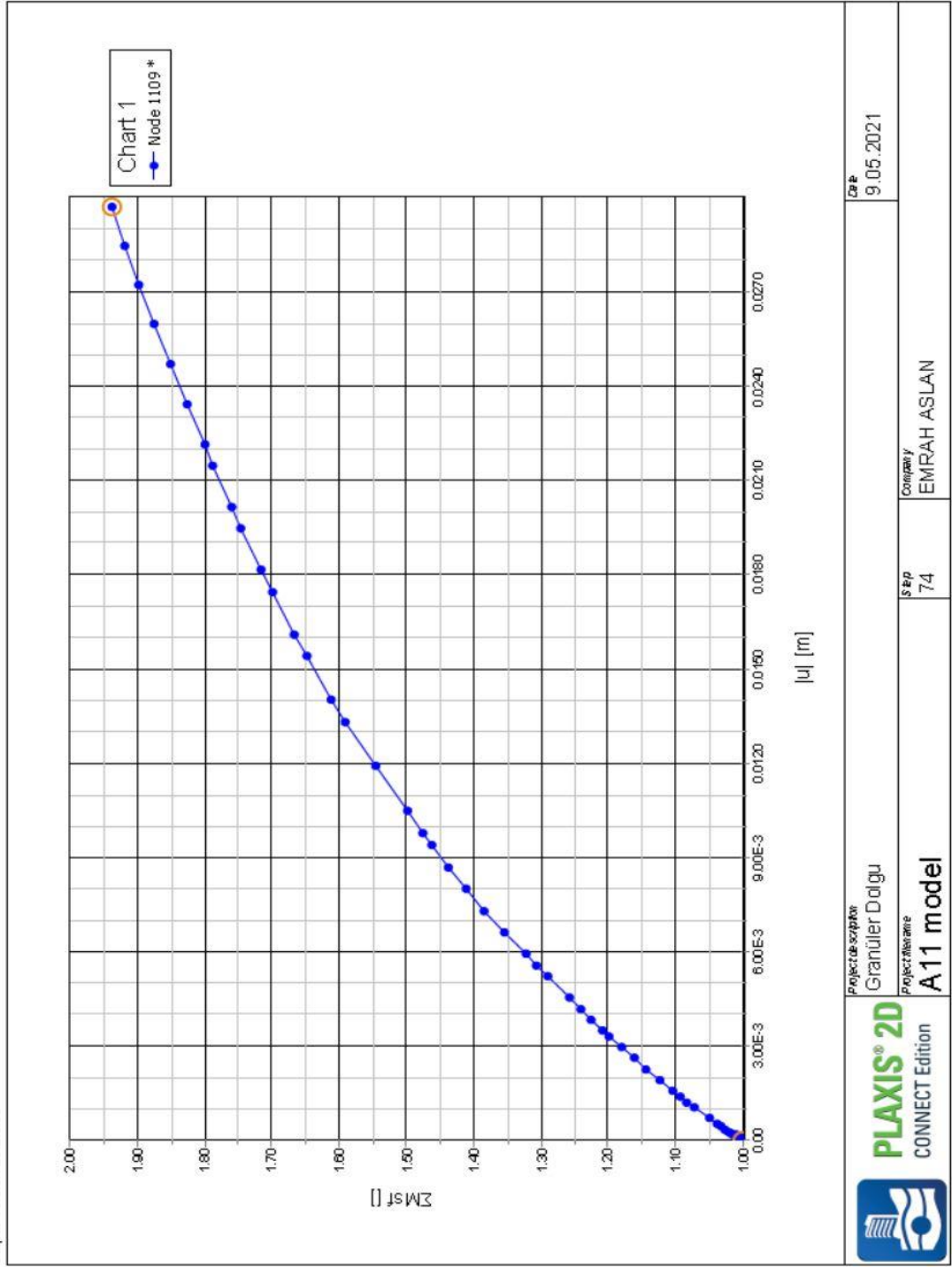
EK 1.9. A9 modeli toplam yerdeğiştirme ve güvenlik sayısı karşılaştırılma sonuçları



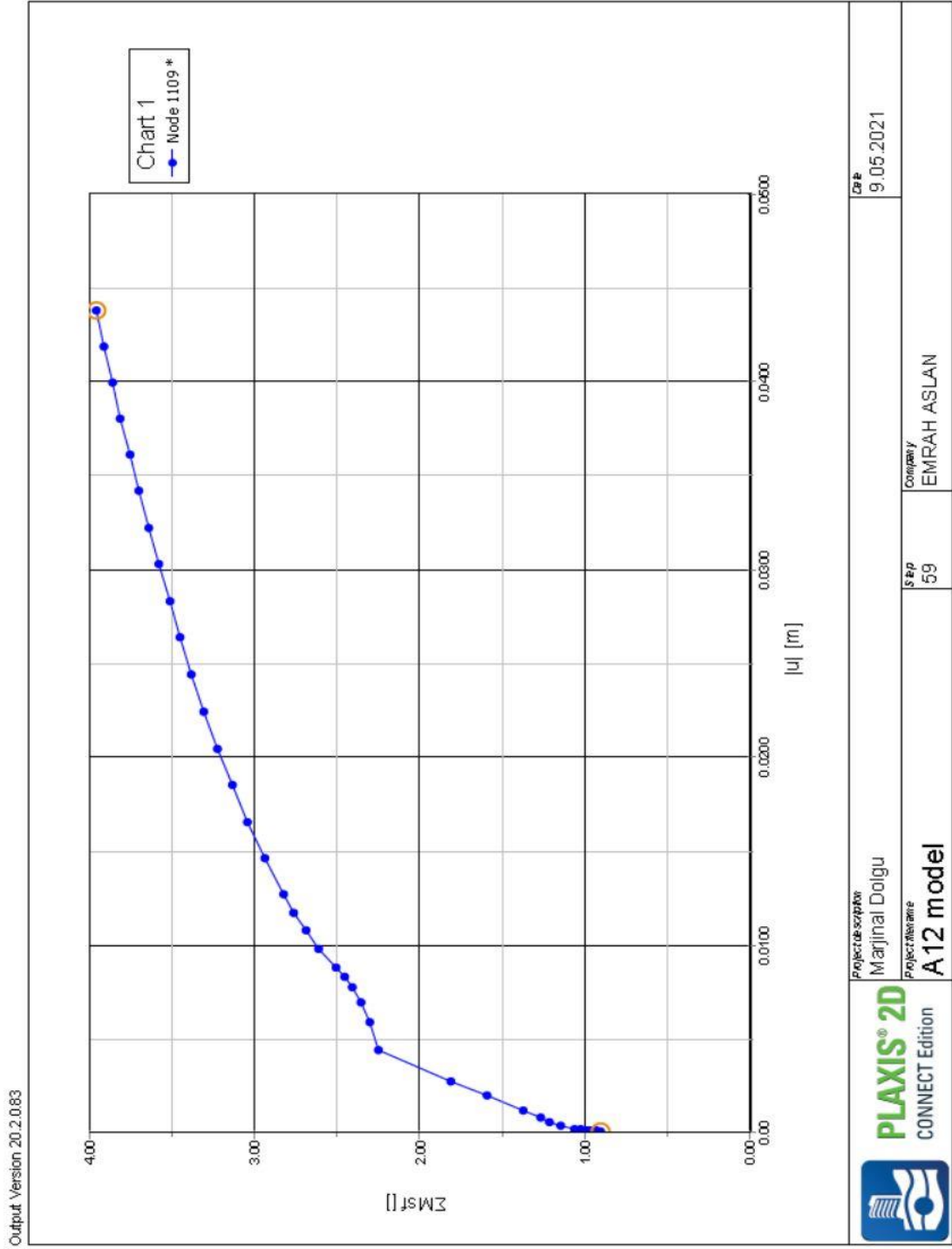
Project descriptor
Marjinal Dolgu
Project Name
A10 model

Step
59Company
EMRAH ASLANDate
9.05.2021

EK 1.10. A10 modeli toplam yerdeğiştirme ve güvenlik sayısı karşılaştırılma sonuçları



EK 1.11. A1 modeli toplam yerdeğiştirme ve güvenlik sayısı karşılaştırılma sonuçları



EK 1.12. A12 modeli toplam yer değiştirme ve gvenlik sayısı karşılaştırılma sonuçları

EK 2

Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Model Kombinasyonların Maliyet analizleri

EK 2.1. A1-A3-A5 Model Geosentetik Donatılı İstinat Duvarı İçin Maliyet Analizi

| No | Poz No | Tanım | Birim | Birim Fiyatı (2021) | MİKTAR | Toplam |
|----|---------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------|--------|---------------------|
| 1 | 15.115.1001 | EL İLE YUMUŞAK TOPRAK KAZILMASI | M3 | 41.13 TL | 0.08 | 3.29 TL |
| 2 | 15.150.1001 | 200 DOZLU DEMİRSİZBETON | M3 | 239.74 TL | 0.08 | 19.17 TL |
| 3 | 10.240.3094 | MODÜLER BLOK (25X30X50) | M2 | 467 TL | 6 | 2802 TL |
| 4 | 15.100.1007 | MODÜLER BLOK YÜZEY MALZEMESİ YÜKLEME, BOŞALTMA VE İSTİFİ | AD | 20.86 TL | 36 | 750.96 TL |
| 5 | KG M/17.201/K | FUGALI BETON BLOKLARDA GEOTEKSTİL VEYA GEOGRİD DONATILI DUVAR YAPILMASI | M2 | 41.18 TL | 6 | 247.08 TL |
| 6 | ÖZEL 1 | GEOSENTETİK DONATI MALZEMESİ NAKLIYATI | M2 | 5.86 TL | 30 | 175.80 TL |
| 7 | ÖZEL 2 | GEOSENTETİK DONATI MALZEMESİ | M2 | 180-340-500 TL | 30 | 5400-10200-15000 TL |
| 8 | KG M/17.203/K | GEOGRİD MALZEMESİ İŞÇİLİĞİ VE DÖŞENMESİ | M2 | 9.45 TL | 30 | 283.5 TL |
| 9 | 15.100.1002 | KUM, ÇAKIL, TUVENAN, STABİLİZE, KİLİN TAŞITA YÜKLENMESİ, BOŞALTMA VE FIGÜRESİ. | M3 | 3.80 TL | 159 | 604.2 TL |
| 10 | 10.130.1003 | ÇAKILLI MALZEME VE NAKLİ | M3 | 32.5 TL | 159 | 5167.5 TL |
| 11 | KG M/15.140 | MAKİNA İLE SERME (KIRMATAŞ, KUM, ÇAKIL VB. MALZEME) | M3 | 2.11 TL | 159 | 335.49 TL |
| 14 | KG M/15.050 | HER CİNS (TİTREŞİMLİ, DARBELİ) MOTORLU KOMPAKTÖRLE SIKIŞTIRMA | SA | 94.30 TL | 1 | 94.3 TL |
| 12 | KG M/15.052/4 | TİTREŞİMLİ SİLİNDİRLE SIKIŞTIRMA YAPILMASI (66-86 HP) | SA | 305.53 TL | 1 | 305.53 TL |
| 13 | KG M/15.047 | ARAZÖZ İLE SULAMA | TON | 15.25 TL | 4.65 | 70.91 TL |
| 14 | 15.315.1005 | Ø 150 mm çapında sert PVC yağmur oluğu temini ve yerine tesbiti | M | 59.61 TL | 6.00 | 357.66 TL |

TOPLAM MALİYET

A1 MODEL: 16617.39 TL

A3 MODEL: 21417.39 TL

A5 MODEL: 26217.39 TL

EK 2.2 . A 2 - A 4 - A 6 Model Geosentetik Donatılı İstinat Duvarı İçin Maliyet Analizi

| No | Poz No | Tanım | Birim | Birim Fiyatı (2021) | MİKTAR | Toplam |
|----|--------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------|--------|--------------------|
| 1 | 15.115.1001 | EL İLE YUMUŞAK TOPRAK KAZILMASI | M3 | 41.13 TL | 0.08 | 3.29 TL |
| 2 | 15.150.1001 | 200 DOZLU DEMİRSİZBETON | M3 | 239.74TL | 0.08 | 19.17 TL |
| 3 | 10.240.3094 | MODÜLER BLOK (25X30X50) | M2 | 467 TL | 6 | 2802 TL |
| 4 | 15.100.1007 | MODÜLER BLOK YÜZEY MALZEMESİ YÜKLEME, BOŞALTMA VE İSTİFİ | AD | 20.86 TL | 36 | 750.96 TL |
| 5 | KGM/17.201/K | FUGALI BETON BLOKLARDA GEOTEKSTİL VEYA GEOGRID DONATILI DUVAR YAPILMASI | M2 | 41.18 | 6 | 247.08 TL |
| 6 | ÖZEL 1 | GEOSENTETİK DONATI MALZEMESİ NAKLIYATI | M2 | 5.86 TL | 30 | 175.80 TL |
| 7 | ÖZEL 2 | GEOSENTETİK DONATI MALZEMESİ | M2 | 180-340-500 TL | 30 | 5400-10200-15000TL |
| 8 | KGM/17.203/K | GEOGRID MALZEMESİ İŞÇİLİĞİ VE DÖŞENMESİ | M2 | 9.45 TL | 30 | 283.5 TL |
| 9 | 15.100.1002 | KUM, ÇAKIL, TUVENAN, STABİLİZE, KİLİN TAŞITA YÜKLENMESİ, BOŞALTMA VE FIGÜRESİ. | M3 | 3.80 TL | 12.5 | 47.5 TL |
| 10 | 10.130.1003 | ÇAKILLI MALZEME VE NAKLI | M3 | 32.5 TL | 12.5 | 406.25 TL |
| 11 | KGM/15.140 | MAKİNA İLE SERME (KIRMATAŞ, KUM, ÇAKIL VB. MALZEME) | M3 | 2.11 TL | 12.5 | 26.375 TL |
| 14 | KGM/15.050 | HER CİNS (TİTREŞİMLİ, DARBELİ) MOTORLU KOMPAKTÖRLE SIKIŞTIRMA | SA | 94.30 TL | 1 | 94.3 TL |
| 12 | KGM/15.052/4 | TİTREŞİMLİ SİLİNDİRLE SIKIŞTIRMA YAPILMASI (66-86 HP) | SA | 305.53 TL | 1 | 305.53TL |
| 13 | KGM/15.047 | ARAZÖZ İLE SULAMA | TON | 15.25 TL | 4.65 | 70.91 TL |
| 14 | 15.315.1005 | Ø 150 mm çapında sert PVC yağmur oluğu temini ve yerine tesbiti | M | 59.61 TL | 6.00 | 357.66 TL |

TOPLAM MALİYET

A2 MODEL: 10990.32 TL

A4 MODEL: 15790.32 TL

A6 MODEL: 20590.32 TL

E K 2.3. A 7 - A 9 - A 11 Model Geosentetik Donatılı İstinat Duvarı İçin Maliyet Analizi

| No | Poz.No | Tamm | Birim | Birim Fiyatı (2021) | MİKTAR | Toplam |
|----|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------|--------|----------------------|
| 1 | 15.115.1001 | EL İLE YUMUŞAK TOPRAK KAZILMASI | M3 | 41.13 TL | 0.08 | 3.29 TL |
| 2 | 15.150.1001 | 200 DOZLU DEMİRSİZ BETON | M3 | 239.74 TL | 0.08 | 19.17 TL |
| 3 | 10.130.2321 | MONOBLOK PREKAST PANEL MALZEMESİ | M2 | 183 TL | 6 | 1098 TL |
| 4 | KGM/16.141/K | TOPRAKARME İÇİN PREKAST CEPHE PANELLERİ YAPILMASI VE YERİNE KONULMASI (HER EBAT VE KALINLIKTAKİ) | M2 | 872.58 TL | 6 | 5235.48 TL |
| 5 | ÖZEL 1 | GEOSENTETİK DONATI MALZEMESİ NAKLIYATI | M2 | 30 TL | 30 | 900 TL |
| 6 | ÖZEL 2 | GEOSENTETİK DONATI MALZEMESİ | M2 | 180-360-500 TL | 30 | 5400 -10200-15000 TL |
| 7 | KGM/17.203/K | GEOGRİD MALZEMESİ İŞÇİLİĞİ VE DÖŞENMESİ | M2 | 9.45 TL | 30 | 283.5 TL |
| 8 | 15.100.1002 | KUM, ÇAKIL, TUVENAN, STABİLİZE, KİLİN TAŞI TA YÜKLENMESİ, BOŞAL TMA VE FIGURESİ. | M3 | 3.80 TL | 159 | 604.2 TL |
| 9 | 10.130.1003 | ÇAKIL | M3 | 32.5 TL | 159 | 5167.5 TL |
| 10 | KGM/15.140 | MAKİNA İLE SERME (KIRMATAŞ, KUM, ÇAKIL VB. MALZEME) | M3 | 2.11 TL | 159 | 335.49 TL |
| 11 | KGM/15.050 | HER CİNS (TİTREŞİMLİ, DARBELİ) MOTORLU KOMPAKTÖRLE SIKIŞTIRMA | SA | 94.30 TL | 1 | 94.3 TL |
| 12 | KGM/15.052/4 | TİTREŞİMLİ SİLİNDİRLE SIKIŞTIRMA YAPILMASI (66-86 HP) | SA | 305.53 TL | 1 | 305.53 TL |
| 13 | KGM/15.047 | ARAZÖZ İLE SULAMA | TON | 15.25 TL | 4.65 | 70.91 TL |
| 14 | 15.315.1005 | Ø 150 mm çapında sert PVC yağmur oluğu temini ve yerine tesbiti | M | 59.61 TL | 6.00 | 357.66 TL |

TOPLAM MALİYET

A7 MODEL:19875.03 TL

A9 MODEL:24675.03 TL

A11 MODEL:29475.03 TL

EK 2.4. A8 - A10 - A12 Model Geosentetik Donatılı İstinat Duvarı İçin Maliyet Analizi

| No | Poz No | Tanım | Birim | Birim Fiyatı (2021) | MİKTAR | Toplam |
|----|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------|--------|----------------------|
| 1 | 15.115.1001 | EL İLE YUMUŞAK TOPRAK KAZILMASI | M3 | 41.13 TL | 0.08 | 3.29 TL |
| 2 | 15.150.1001 | 200 DOZLU DEMİRSİZBETON | M3 | 239.74 TL | 0.08 | 19.17 TL |
| 3 | 10.130.2321 | MONOBLOK PREKAST PANEL MALZEMESİ | M2 | 183 TL | 6 | 1098 TL |
| 4 | KGM/16.141/K | TOPRAKARME İÇİN PREKAST CEPHE PANELLERİ YAPILMASI VE YERİNE KONULMASI (HER EBAT VE KALINLIKTAKİ) | M2 | 872.58 TL | 6 | 5235.48 TL |
| 5 | ÖZEL 1 | GEOSENTETİK DONATI MALZEMESİ NAKLİYATI | M2 | 30 TL | 30 | 900 TL |
| 6 | ÖZEL 2 | GEOSENTETİK DONATI MALZEMESİ | M2 | 180-360-500 TL | 30 | 5400 -10200-15000 TL |
| 7 | KGM/17.203/K | GEOGRİD MALZEMESİ İŞÇİLİĞİ VE DÖŞENMESİ | M2 | 9.45 TL | 30 | 283.5 TL |
| 8 | 15.100.1002 | KUM, ÇAKIL, TUVENAN, STABİLİZE, KİLİN TAŞITA YÜKLENMESİ, BOŞALTMA VE FIGURESİ | M3 | 3.80 TL | 12.5 | 47.5 TL |
| 9 | 10.130.1003 | ÇAKIL | M3 | 32.5 TL | 12.5 | 406.25 TL |
| 10 | KGM/15.140 | MAKİNA İLE SERME (KIRMATAŞ, KUM, ÇAKIL VB. MALZEME) | M3 | 2.11 TL | 12.5 | 26.375 TL |
| 11 | KGM/15.050 | HER CİNS (TİTREŞİMLİ, DARBELİ) MOTORLU KOMPAKTÖRLE SIKIŞTIRMA | SA | 94.30 TL | 1 | 94.3 TL |
| 12 | KGM/15.052/4 | TİTREŞİMLİ SİLİNDİRLE SIKIŞTIRMA YAPILMASI (66-86 HP) | SA | 305.53 TL | 1 | 305.53 TL |
| 13 | KGM/15.047 | ARAZÖZ İLE SULAMA | TON | 15.25 TL | 4.65 | 70.91 TL |
| 14 | 15.315.1005 | Ø 150 mm çapında sert PVC yağmur oluğu temini ve yerine tesbiti | M | 59.61 TL | 6.00 | 357.66 TL |

TOPLAM MALİYET

A8 MODEL: 14247.96 TL

A10 MODEL: 19047.96 TL

A12 MODEL: 23847.96 TL

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Emrah ASLAN
Doğum Yeri ve Tarihi :
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Ercişli Emrah Anadolu Lisesi
Lisans : Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Ens. Tezli Yük. Lisans

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : EMAS İnşaat ve Tahhüt

İletişim (e-posta) :

Yayımları : -