



**T.C.  
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOPRAKARME VE ZEMİN ÇİVİLİ BİR DERİN KAZI  
UYGULAMASININ ÖRNEK BİR PROJE ÜZERİNDE NÜMERİK  
ANALİZLERİNİN YAPILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Oğuzhan TIRAŞÇI**

**DANIŞMAN**

**Prof. Dr. Niyazi Uğur TERZİ**

**AKSARAY, 2024**

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 222303701 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Oğuzhan TIRAŞÇI tarafından hazırlanan “**TOPRAKARME VE ZEMİN ÇİVİLİ BİR DERİN KAZI UYGULAMASININ ÖRNEK BİR PROJE ÜZERİNDEN NÜMERİK ANALİZLERİNİN YAPILMASI**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman: Prof. Dr. Niyazi Uğur TERZİ**

Aksaray Üniversitesi

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

.....

**Üye: Doç. Dr. Can ERENŞON**

Aksaray Üniversitesi

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

.....

**Üye: Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenokon SELÇUK**

Yıldız Teknik Üniversitesi

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

.....

Tez Savunma Tarihi: 27/09/2024

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

.....

Prof. Dr. Mehmet Ali HINIS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

**Oğuzhan TIRAŞÇI**

## TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması ve tamamlanması sürecinde bana destek veren, katkıda bulunan ve beni cesaretlendiren birçok kişiye minnettarım.

Öncelikle, evlatlarını candan öte seven müşfik annem sevgili Emel TIRAŞÇI 'ya, kıymetli fedakâr aziz babam İsmail TIRAŞÇI 'ya ve her zaman en yakın arkadaşım, dert ortağım olan kadirşinas sevgili kız kardeşim Aslıhan TIRAŞÇI 'ya, teşekkürler ederim. Akademik hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini hissettiğim merhum amcam Doç. Dr. Yaşar TIRAŞÇI 'ya da ayrıca minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Elbette; bana bir ağabey yakınlığı hissettiren tez danışmanım Prof. Dr. Niyazi Uğur TERZİ 'ye ve ne zaman ihtiyaç duysam mesaisinden bana vakit ayıran Doç. Dr. Can ERENŞON 'a içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, Aksaray Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümündeki değerli hocalarıma, verdikleri dersler ve önerilerle akademik perspektifimi geliştirdikleri için teşekkür ederim.

Bu tez çalışmamın her aşamasında tecrübe ve bilgisini esirgemeyen meslektaşım büyüğüm değerli Dr. Tahir Erdem ÖZTÜRK 'e içtenlikle teşekkür ederim. Kendisi, bilgi ve deneyimleriyle bu süreçte önemli bir rehberlik sağlamıştır.

Son olarak, araştırma sürecinde desteklerini ve katkılarını esirgemeyen herkese teşekkür ederim. Bu tez, onların kıymetli yardımları olmadan tamamlanamazdı.

Teşekkürlerimle,

Oğuzhan TIRAŞÇI

AKSARAY, 2024

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                     |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------|
| TEŞEKKÜR .....                                                                      | i    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                   | ii   |
| ÖZET.....                                                                           | iv   |
| ABSTRACT .....                                                                      | v    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                               | vi   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                                             | viii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                                       | ix   |
| 1. GİRİŞ .....                                                                      | 1    |
| 2. KAYNAK ÖZETLERİ .....                                                            | 2    |
| 2.1 Zemin Çivisi .....                                                              | 3    |
| 2.1.2 Zemin çivisi uygulamasında kullanılan yapı malzemeleri .....                  | 4    |
| 2.1.3 Zemin çivisi çeşitleri.....                                                   | 5    |
| 2.1.4 Zemin çivili duvarların dizaynında zemin şartlarının tesiri.....              | 6    |
| 2.1.4.1 Zemin çivisi uygulaması için elverişli zemin koşulları .....                | 7    |
| 2.1.4.2 Zemin çivisi imalatının yüksek maliyetle sonuçlandığı zemin koşulları ..... | 7    |
| 2.1.5 Zemin çivisi yapım aşamaları .....                                            | 8    |
| 2.1.6 Zemin çivisinin avantajları .....                                             | 11   |
| 2.1.6.1 İmalat .....                                                                | 11   |
| 2.1.6.2 İmalat etkinliği .....                                                      | 11   |
| 2.1.6.3 İmalat maliyeti .....                                                       | 12   |
| 2.1.7 Zemin çivisi imalatında ideal olan zemin koşulları.....                       | 12   |
| 2.1.8 Zemin çivisi dizaynında yüklerin oluşumu.....                                 | 12   |
| 2.1.9 Zemin çivili duvarların gelişimi .....                                        | 14   |
| 2.1.10 Zemin çivili duvarlarla ilgili dizayn çalışmaları.....                       | 16   |
| 2.1.10.1 Clouterre projesi (Fransız uygulaması).....                                | 16   |
| 2.1.10.2 İskandinav uygulaması – Nordic handbook.....                               | 17   |
| 2.1.10.3 Federal karayolu idaresi (FHWA) uygulaması .....                           | 17   |
| 2.1.10.4 Hong Kong uygulaması .....                                                 | 18   |
| 2.1.11 Derin kazı analiz yöntemleri.....                                            | 18   |
| 2.1.11.1 Limit denge yöntemi .....                                                  | 18   |
| 2.1.11.2 Elastik zemine oturan kiriş yöntemi .....                                  | 19   |
| 2.1.11.3 Yarı sonlu elemanlar yöntemi .....                                         | 19   |
| 2.1.11.4 Sonlu elemanlar yöntemi .....                                              | 19   |
| 2.1.12 Malzeme modelleri .....                                                      | 20   |
| 2.1.12.1 Mohr Coulomb (MC) modeli.....                                              | 21   |
| 2.1.12.2 Hardening Soil (HS) modeli .....                                           | 22   |
| 2.1.12.3 Hardening Soil with Small-Strain Stiffness (HSS) modeli.....               | 23   |
| 2.1.12.4 Jointed Rock modeli (Eklemlili Kaya modeli).....                           | 23   |
| 2.1.12.5 Hoek-Brown modeli.....                                                     | 24   |
| 2.2 Geosentetiklerin Tanımlanması.....                                              | 25   |
| 2.2.1 Geosentetiklerin çeşitleri .....                                              | 26   |
| 2.2.1.1 Geotekstiller .....                                                         | 26   |
| 2.2.1.2 Geogridler .....                                                            | 28   |
| 2.2.1.3 Geomembranlar.....                                                          | 28   |
| 2.2.1.4 Geokompozitler.....                                                         | 29   |
| 2.2.2 Geosentetiklerin hammaddeleri .....                                           | 30   |
| 2.2.3 Geosentetik donatılı duvarların fayda ve kusurları.....                       | 30   |

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.4 Geosentetik donatılı istinat yapıları duvar elemanları .....         | 31        |
| 2.2.4.1 Donatı malzemeleri .....                                           | 31        |
| 2.2.4.2 Dolgu malzemesi .....                                              | 31        |
| 2.2.5 Geosentetik donatıya sahip duvar modellemesi .....                   | 33        |
| 2.2.5.1 Duvar tabakası derinliği ve donatı boyunun belirlenmesi .....      | 33        |
| 2.2.5.2 Geosentetik donatılı duvar tasarım ilkeleri .....                  | 34        |
| <b>3. MALZEME VE YÖNTEM .....</b>                                          | <b>39</b> |
| 3.1 Zemin Çivisi ve Toprakarme Duvar Projesinin Amacı .....                | 39        |
| 3.2 Arazinin Durumu ve Zemin Etüt Çalışmaları Hakkında Bilgiler .....      | 41        |
| 3.2.1 Zemin etüt raporu .....                                              | 41        |
| 3.2.2 Zemin araştırma veri raporu .....                                    | 42        |
| 3.3 Toprakarme ve Zemin Çivili Bir Derin Kazı Uygulaması .....             | 48        |
| <b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>                                        | <b>50</b> |
| 4.1 A-B-C Parselleri Arası Toprakarme ve Zemin Çivili Bir Derin Kazı ..... | 50        |
| 4.1.1 Geogrid donatılı toprakarme duvar .....                              | 50        |
| 4.1.2 Zemin çivili ve püskürtme beton iksa .....                           | 52        |
| 4.1.3 GEO5 şev stabilite tahkikleri ve sonuç .....                         | 63        |
| 4.1.4 Püskürtme beton ve zemin çivileri için güvenlik tahkikleri .....     | 64        |
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                                          | <b>70</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                     | <b>73</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                      | <b>77</b> |

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### TOPRAKARME VE ZEMİN ÇİVİLİ BİR DERİN KAZI UYGULAMASININ ÖRNEK BİR PROJE ÜZERİNDEN NÜMERİK ANALİZLERİNİN YAPILMASI

Oğuzhan TIRAŞÇI

Aksaray Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Niyazi Uğur TERZİ

#### ÖZET

Bu çalışmada, Ankara OSB bölgesinde alanında bulunan bir derin kazı sahasındaki kompozit bir dayanma yapısının detaylı nümerik analizleri ele alınmıştır. Derin kazı alanı zemin çivisi/geosentetik duvar kompozisyonu olarak bütünleşik tasarlanmıştır. Tasarımda birbirinden farklı davranış sergileyen dayanma elemanlarının eşgüdümlü olarak derin kazı güvenliğini sağlamadaki performansları incelenmiştir. Zemin kayma mukavemet değerleri sahada yapılmış olan derin saha sondajlarından temin edilmiş ve bu değerler sonlu elemanlar programında kullanılmıştır. Zemin çivisi ve geosentetik malzemeler için mühendislik parametreleri imalatçı firmalardan alınan ve standartlara uygun olan değerler çerçevesinde kullanılmıştır. Analizlerde geçici derin kazı süresi dikkate alınarak, Pekleşen Zemin modeli kullanılmıştır. Derin kazı modellemesinde kademeli inşa yöntemi esas alınmıştır. Bu sayede imalat süre ve adımları nümerik modelde birebir senaryolaştırılmıştır. Derin kazının nihai derinliğine ulaşıldığında bütün kesit için şev stabilitesi analizi yapılmış olup analiz için modelde Phi/C reduction yöntemi dikkate alınmıştır. Şev ortamındaki olası kayma kesitinde plastik deformasyon noktaları tespit edilmiş sonra göçme kaması elde edilmiştir. Analizlerde hassaslık sağlamak adına zemin çivisi ve geosentetik malzemeler için zemin – yapı arayüzeyleri tanımlanmış ve modelde ağ yoğunlaştırması ile belirginleştirilmiştir. Yapılan analizler çerçevesinde iki farklı derin kazı uygulama yönteminin birlikte yer aldığı bu saha çalışmasında derin kazının güvenli bir biçimde inşa edilebileceği görülmüştür. Çekme gerilmelerine maruz kalan zemin ortamında hem geosentetik donatının hem de zemin çivisi malzemesinin mobilize olma ihtimali olan aktif kamayı stabil zemin kesitine başarı ile bağladığı görülmüştür. Nümerik analizler ile hesaplanan yanıl deformasyonların %1 kazı derinliğinden daha küçük değerlerde olduğunda, kazı kesitinde göçme mekanizmasının görülmediği, şev stabilitesi problemi görülmediği, çivi ve geosentetik malzemede sıyrılma ve kopma problemlerinin ortaya çıkmadığı görülmüştür. Nümerik modelin kompozit iyileştirme metotlarında kullanılabileceği anlaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Geogrid, Nümerik Analiz, Şev Stabilitesi, Zemin Çivisi.

Eylül, 2024; 77 sayfa

## **M.Sc. THESIS**

# **NUMERICAL ANALYSIS OF A DEEP EXCAVATION APPLICATION WITH EARTH REINFORCEMENT AND SOIL NAILS ON A SAMPLE PROJECT**

**Oğuzhan TIRAŞCI**

**Aksaray University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Niyazi Uğur TERZİ**

## **ABSTRACT**

In this study, detailed numerical analyses of a composite retaining structure in a deep excavation area located in Ankara Organized Industrial Zone were investigated. The deep excavation area was designed as an integrated soil nail/geosynthetic wall composition. The performance of the retaining elements that exhibit different behaviors in the design was investigated numerically. Soil shear strength values were obtained from deep field drillings in the field and these values were used in a finite element program. Engineering parameters for soil nail and geosynthetic materials were used within the framework of values obtained from the manufacturing companies and in accordance with the standards. In the analyses, the hardening soil model was used considering the temporary deep excavation period. The stepwise construction method was taken as basis in deep excavation modeling. In this way, the manufacturing period and steps were scenario-based on the numerical model. When the final depth of the deep excavation was reached, a slope stability analysis was performed for the entire section. In the analysis, the Phi/C reduction method was used. Plastic deformation points were determined in the possible shear section in the slope environment, then the collapse wedge was obtained. In order to provide sensitivity in the analyses, the soil-structure interfaces for soil nails and geosynthetic materials were defined and highlighted in the model with mesh densification. Within the scope of the analyses performed, it was observed that deep excavation could be constructed safely in this field study where two different deep excavation application methods were used together. It was observed that both geosynthetic reinforcement and soil nail material successfully connected the active wedge, which is likely to be mobilized, to the stable soil section in the soil environment exposed to tensile stresses. When the lateral deformations calculated by numerical analysis are less than 1% of the excavation depth, no collapse mechanism is observed in the excavation section, no slope stability problem is observed, and no stripping and rupture problems occur in the nail and geosynthetic material. It was understood that the numerical model can be used in composite improvement methods.

**Keywords:** Geogrid, Numerical Analysis, Slope Stability, Soil Nail.

**September, 2024; 77 pages**

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Zemin çivisinin ayrıntılı kesiti (Porterfield vd., 1994).                | 4  |
| Şekil 2.2. Korozyon korumalı çivi tip kesiti (Üstündağ, 2003).                      | 6  |
| Şekil 2.3. Zemin çivisi yapım aşamaları (Porterfield vd., 1994).                    | 9  |
| Şekil 2.4. Zemin çivisi drenaj sistemiyle (Lazarte vd., 2015).                      | 10 |
| Şekil 2.5. Zemin çivilerinin yük iletiminin işleyişi (FHWA, 2003).                  | 13 |
| Şekil 2.6. Zemin çivilerinin çekme kuvvetleri (FHWA, 2003).                         | 13 |
| Şekil 2.7. Zemin ve çivinin etkileşim modeli.                                       | 14 |
| Şekil 2.8. Barajın taşkın savakları.                                                | 15 |
| Şekil 2.9. Geleneksel Sistem ile Yeni Avusturya Tünel Sisteminin kıyaslaması.       | 15 |
| Şekil 2.10. Versailles şehrindeki duvar tip en kesiti.                              | 16 |
| Şekil 2.11. Gerilme – deformasyon ilişkisi (Brinkgreve vd., 2018).                  | 22 |
| Şekil 2.12. Lineer olmayan gerilme-deformasyon eğrisi (Gouw, 2014).                 | 22 |
| Şekil 2.13. G/Gmax – kayma birim şekil değiştirme ilişkisi (Benz, 2007).            | 23 |
| Şekil 2.14. Eklemlili kaya modeli yaklaşımı (Brinkgreve vd., 2018).                 | 24 |
| Şekil 2.15. Hoek ve Brown yenilme ölçütü (Hoek ve Brown, 1980).                     | 25 |
| Şekil 2.16. Woven geotekstil (URL-1)                                                | 27 |
| Şekil 2.17. Nonwoven geotekstil (URL-2)                                             | 28 |
| Şekil 2.18. Geogrid (URL-3)                                                         | 28 |
| Şekil 2.19. Yüzeye geomembran serilmesi (URL-4)                                     | 29 |
| Şekil 2.20. Geokompozit (URL-5)                                                     | 29 |
| Şekil 2.21. Duvar yüzey elemanları.                                                 | 32 |
| Şekil 2.22. Stabilite kontrolleri.                                                  | 34 |
| Şekil 2.23. Donatı uzunluğu.                                                        | 35 |
| Şekil 2.24. Donatı kaplama tabakası oranı.                                          | 36 |
| Şekil 2.25. Duvar üzerindeki tesir eden kuvvetler.                                  | 37 |
| Şekil 3.1. A-B-C parsellerinin vaziyet planı.                                       | 39 |
| Şekil 3.2. Planlanan imalatların kesit görünüşü.                                    | 40 |
| Şekil 3.3. Yapılan sondajların yerleri ve parsellerin arazi kotları.                | 43 |
| Şekil 3.4. A-A' jeolojik kesiti.                                                    | 47 |
| Şekil 3.5. B-B' jeolojik kesiti.                                                    | 48 |
| Şekil 4.1. A parseli ve B-C parseli arasında yapılacak imalat kesiti.               | 50 |
| Şekil 4.2. Arazi kotları, yapılacak imalatlar ve kazı/dolgu alanlarının kesiti.     | 52 |
| Şekil 4.3. İksa ve toprakarme duvar için oluşturulan analiz modeli                  | 53 |
| Şekil 4.4. Tasarlanan sistem imal edilmesi durumunda (Safety Analizi).              | 53 |
| Şekil 4.5. Tasarlanan sistem imal edilmesi durumunda deforme olan ağ yapısı.        | 54 |
| Şekil 4.6. Statik durumda 9.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler.  | 54 |
| Şekil 4.7. Statik durumda 8.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler.  | 55 |
| Şekil 4.8. Statik durumda 7.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler.  | 55 |
| Şekil 4.9. Statik durumda 6.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler.  | 56 |
| Şekil 4.10. Statik durumda 5.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler. | 56 |
| Şekil 4.11. Statik durumda 4.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler. | 57 |
| Şekil 4.12. Statik durumda 3.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler. | 57 |
| Şekil 4.13. Statik durumda 2.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler. | 58 |
| Şekil 4.14. Statik durumda 1.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler. | 58 |
| Şekil 4.15. Statik durumda 1.sıra zemin çivisinde etkili olacak eksenel kuvvetler.  | 59 |
| Şekil 4.16. Statik durumda 2.sıra zemin çivisinde etkili olacak eksenel kuvvetler.  | 59 |
| Şekil 4.17. Statik durumda 3.sıra zemin çivisinde etkili olacak eksenel kuvvetler.  | 60 |
| Şekil 4.18. Statik durumda 4.sıra zemin çivisinde etkili olacak eksenel kuvvetler.  | 60 |

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.19.</b> İmalat sonrası toprakarme duvar panellerinde yatay deplasmanlar..... | 61 |
| <b>Şekil 4.20.</b> İmalat sonrası püskürtme beton duvarda yatay deplasmanlar. ....      | 61 |
| <b>Şekil 4.21.</b> Geo5 Şev Stabilite analiz modeli.....                                | 63 |
| <b>Şekil 4.22.</b> Geo5 Şev Stabilite analiz sonuçları. ....                            | 64 |
| <b>Şekil 4.23.</b> Plaka bağlantı kesiti.....                                           | 68 |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1. Farklı zeminler için malzeme modelleri .....                   | 20 |
| Çizelge 2.2. Dolgu malzemesi standartları .....                             | 32 |
| Çizelge 2.3. Minimum donatı boyu .....                                      | 33 |
| Çizelge 2.4. Duvar gömülme derinliği.....                                   | 33 |
| Çizelge 2.5. Azaltma katsayıları. ....                                      | 36 |
| Çizelge 2.6. Dolgu tipolojisine göre $C_i$ katsayıları. ....                | 37 |
| Çizelge 3.1. Sismik ölçüm sonuçları.....                                    | 41 |
| Çizelge 3.2. Sismik ölçüm sonuçları.....                                    | 42 |
| Çizelge 3.3. Yapılan sondaj verileri.....                                   | 43 |
| Çizelge 3.4. Sondajlarda karşılaşılan zemin tabakalanması. ....             | 44 |
| Çizelge 3.5. Presiyometre deney sonuçları .....                             | 45 |
| Çizelge 3.6. Laboratuvar deney sonuçları.....                               | 46 |
| Çizelge 3.7. Laboratuvar deney sonuçları.....                               | 47 |
| Çizelge 3.8. Zemin parametreleri.....                                       | 49 |
| Çizelge 3.9. Yapısal eleman özellikleri.....                                | 49 |
| Çizelge 4.1. Toprakarme duvarda kullanılan geogrid donatı özellikleri. .... | 51 |
| Çizelge 4.2. İksa kazısı ve toprakarme duvar analiz sonuçları. ....         | 62 |
| Çizelge 4.3. Zemin çivilerinde oluşan eksenel kuvvetler. ....               | 62 |
| Çizelge 4.4. Geogridler üzerinde oluşan eksenel kuvvetler.....              | 62 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

|                         |                                                                |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>AASHTO</b>           | Amerikan Karayolları Birliği                                   |
| <b>C<sub>i</sub></b>    | Zemin Geogrid Etkileşim Oranı                                  |
| <b>c</b>                | Kohezyon                                                       |
| <b>CFG</b>              | Fransız Geotekstil Komitesi                                    |
| <b>D</b>                | Bozulma Faktörü                                                |
| <b>E</b>                | Elastisite Modülü                                              |
| <b>E<sub>rm</sub></b>   | Kaya Kütlesinin Elastisite Modülü                              |
| <b>FHWA</b>             | Federal Karayolu İdaresi                                       |
| <b>GSİ</b>              | Jeolojik Dayanım İndeksi                                       |
| <b>HAF</b>              | Yüksek Aşınma Fırın Siyahı                                     |
| <b>K<sub>a</sub></b>    | Aktif Rankine Toprak Basıncı                                   |
| <b>L</b>                | Zemin Çivisinin Uzunluğu                                       |
| <b>m<sub>i</sub></b>    | Sağlam Kayanın Ampirik Model Parametresi                       |
| <b>NATM</b>             | Avusturya Yeni Tünel Açma Yöntemi                              |
| <b>q<sub>u</sub></b>    | Zemin Türüne Göre Çiviye Aktarılan Kök Dayanımı                |
| <b>R<sub>po</sub></b>   | Zemin Çivisinin (Grout+Donatı) Çevre Zeminden Sıyrılma Direnci |
| <b>RF<sub>cdb</sub></b> | Biyolojik ve Kimyasal Bozulma İçin Azaltma Faktörü             |
| <b>RF<sub>cr</sub></b>  | Sürtünme İçin Azaltma Faktörü                                  |
| <b>RF<sub>id</sub></b>  | Yapım Hasarı İçin Azaltma Faktörü                              |
| <b>RT</b>               | Çivinin Çekme Potansiyeli                                      |
| <b>RF</b>               | Yüzey Potansiyeli                                              |
| <b>RP</b>               | Çekme Potansiyeli                                              |
| <b>s</b>                | İki Çivi Arası Yatay Mesafe                                    |
| <b>SPT</b>              | Standard Penetration Test                                      |
| <b>T<sub>max</sub></b>  | Çiviye Gelen Maksimum Eksenel Kuvvet                           |
| <b>TS</b>               | Türk Standardı                                                 |
| <b>T<sub>ult</sub></b>  | Geogrid Donatı Nihai Gerilme Direnci                           |
| <b>v</b>                | Poisson Oranı                                                  |
| <b>σ<sub>ci</sub></b>   | Sağlam Kayanın Tek Eksenli Basınç Dayanımı                     |
| <b>φ</b>                | Granüler Dolgunun İçsel Sürtünme Açısı                         |
| <b>ψ</b>                | Dilatasyon Açısı                                               |
| <b>γ</b>                | Granüler Dolgunun Birim Hacim Ağırlığı                         |

## 1. GİRİŞ

Sanayi ve ticaretin gelişmesiyle birlikte, şehir merkezlerindeki nüfus yoğunluğu artmış ve beraberinde inşaat talebini de arttırmıştır. Bu durum, nitelikli sağlam zemin parsellerini hızla azaltmış ve kent merkezlerinden uzak atıl ve zayıf zemin ortamlarını imara açmaya mecbur bırakmıştır. Sanayi tesisleri iş potansiyelleri gereği geniş alanlara ihtiyaç duyarlar. Ancak geniş alanların imara açılması sürecinde dolgu ve yarma işlerine de gereksinim duyulabilir. Yüksek kot farklılıkların tesviye edilmesi ise geoteknik tasarımlar ile mümkündür. Özellikle derin kazılar yapıldığında, zeminin stabil hale getirilmesi büyük bir sorumluluktur. Zeminin stabilizasyonu sağlanamadığında veya 5 metreyi aşan derin kazı uygulamalarında, kazı alanının stabil halde tutulması, derin kazı projelerinin öncelikli tasarım kriteridir. Geoteknik mühendisleri, çok çeşitli destek sistemleri arasından en uygun olanını seçmelidirler. Bu sistemler kullanılırken, sadece kazılan zeminin yan kaymasını değil, çevredeki binaların, yolların ve arsaların da stabilitesini göz önünde bulundurmalarıdır. Geoteknik araştırmaların yapı zemin ve çevre gerilmelerini dikkate alması, iksa sistemlerinin güvenli bir şekilde projelendirilmesine katkı sağlar. Nümerik analiz yöntemlerindeki gelişmeler sayesinde, iksa projelerinin tasarım ve uygulama gerçekçi ve güvenilir çözümler elde edilebilmektedir. Bu teze konu olan zemin çivisi sistemleri, diğer iksa sistemlerine göre ekonomik olmaları, uygulama sürelerinin kısalması ve sınırlı alanlarda çalışma imkânı sağlamalarıyla avantajlara sahiptir. Bu avantajlar sayesinde, bu sistemlerin uygulamaları giderek yaygınlaşmaktadır. Geosentetik malzemelerle güçlendirilmiş istinat duvarları, geleneksel istinat duvarları ve masif taş duvarlarına kıyasla, inşaat sürecinin daha hızlı ve kolay olması, maliyet açısından daha avantajlı olmaları, kullanım ömürleri boyunca daha etkin performans göstermeleri ve çevreyle daha uyumlu ön yüz kaplama elemanlarına sahip olmaları gibi birçok avantaja sahiptir. Tabakalı bir iyileştirmede kontrollü dolgu yükseltmelerinde geosentetik kullanılması etkin bir sanat yapısı olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada, toprakarme bir duvar ile eşgüdümlü çalışan bir zemin çivisi uygulamasının nümerik analizleri ele alınacaktır. Bu iki yöntemin başlı başına olumlu ve olumsuz yönleri bulunmakla birlikte, uygulama esnasında farklılıklar ortaya çıkabilir. Analizin temel amacı, sonlu elemanların sağladığı imkanlar çerçevesinde destek elemanlarına etki eden kuvvetlerin incelenmesidir. KVKK kapsamında verilerin kullanıldığı parsel lokasyon bilgileri tez içinde yer almamaktadır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Akçay (2014), granüler zeminlerde zemin çivilerinin sıyırılma miktarının zeminin aşırı konsolidasyon seviyesi ile olan ilişkisini araştırmıştır. Bu amaçla, SW zemin sınıfına ait kum kullanarak bir laboratuvar deney düzeneği kurmuştur. Deneylerde kullanılan zemin çivileri, 10-45 cm aralığında değişen  $\phi$  20 mm nervürlü donatılardan seçilmiştir. Laboratuvarında, her biri için 9 adet donatının sıyırılma testlerini gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, normal konsolide (NC) kum ile aşırı konsolide (OC) kum arasındaki sıyırılma kapasitesinin büyük oranda aynı kaldığı ortaya konulmuştur. Deney sonuçlarına bakıldığında, aşırı konsolidasyon oranının (OCR) 40 kat arttığı, ancak sıyırılma kapasitesinin en fazla 3,5 kat yükseldiği tespit edilmiştir.

Demirkoç (2007), derin kazılarla ilgili olarak zemin çivili ve ankrajlı iksa teknikleri üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. İlk aşamada, bu destekleme sistemlerini klasik analiz yöntemleriyle tasarlamış ve ardından sonlu elemanlar yöntemiyle tasarlanan sistemlerin deformasyon hareketlerini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, killi zeminlerde kazı derinliği az olduğunda zemin çivili sistemler ekonomik olurken, 10 metreyi aşan derinliklerde ankrajlı sistemlerin daha uygun maliyetli olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, kumlu zeminlerde ankrajlı sistemlerin daha az maliyetli olduğu sonucuna varılmıştır.

Kabakçı (2017), zemin çivili duvarların yapım süreçlerini ele almış, gerekli malzemeleri tanımlamış ve bu sistemlerin uygulanabileceği uygun zemin koşullarını belirtmiştir. Ayrıca, yapım aşamaları benzer olan diğer iksa sistemleriyle karşılaştırmalar yaparak, zemin çivili duvarların avantajlarını ve dezavantajlarını, performans ve maliyet açısından değerlendirmiştir.

Şahin (2019), eğimli bir zeminde deprem etkileri altında oluşan yer değiştirmeleri araştırmış ve bu yer değiştirmeleri ve kaymaları önlemek için kazık ve ankraj ile kazık ve zemin çivisi tatbiklerini mukayese etmiştir. Yapılan statik analizler her iki yöntemin de kabul edilebilir düzeyde deplasmanlar ürettiğini göstermiştir. Ancak, dinamik analizler kazık ve zemin çivisi uygulamasının daha büyük deplasmanlara neden olduğunu belirtmiştir. Netice itibarıyla, deprem tesiri altındaki bölgelerde kazık ve ankrajın kombinasyon halinde imal edilmesinin daha emniyetli ve etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Kaymakçı vd. (2017), Esenler ilçesindeki İstanbul'da taşıma kapasitesi düşük bir zeminin güçlendirilmesini bir vaka çalışması olarak incelemişlerdir. Bu süreçte, belirli bir derinlikte kazı yapıldıktan sonra yüksek çekme mukavemetine sahip geogridler serildi ve ardından kaya dolgu ile zemin takviye edilmiştir. Güçlendirilen zemin üzerine, ön kısmı gabion olan geosentetik takviyeli bir istinat duvarı inşa edilmiş ve limit denge yöntemiyle analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, zemin güçlendirme çalışmasının duvar altındaki taşıma kapasitesini 1,5 kat artırdığını göstermiştir.

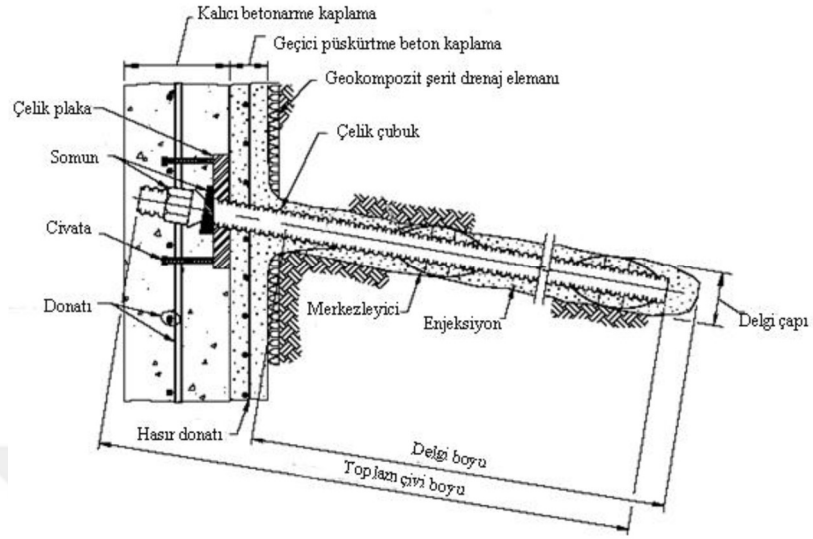
Özkoç (2006), eğimde bozulma yaşanan bir araziye OASYS SLOPE programıyla teorik olarak iyileştirmeye çalışmıştır. Zemin ankrajı, zemin çivisi ve geoduvar uygulamalarını incelediği çalışmada, yöntemlerin toptan kayma karşı yeterli güvenlik sağlayamadığı bulunmuştur. Şevin ön ve topuk kısımlarına kohezyonsuz dolgu eklenerek güvenlik artırılmış, fakat yine de şevin stabilitesi sağlanamamıştır. Ancak, GEOLON tipi donatının dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda şev stabilitesinin sağlandığı görülmüştür.

Güler ve Demirkan (2002), çeşitli zemin tiplerinde geoduvar tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Geotekstil ( $EI=2000$  kN/m) ve geogrid ( $EI=1000$  kN/m) takviyeler kullanılarak, duvarın yatay deplasmanları ve donatılardaki gerilme kuvvetleri statik ve dinamik yük koşullarında PLAXIS yazılımıyla hesaplanmıştır. Donatının eksenel dayanımının arttığını, duvarın deplasman miktarını azalttığı sonucuna varılmıştır.

## **2.1 Zemin Çivisi**

Derin kazı inşa imalatlarında kazı dayanımını artırmak ve yamacın stabilitesini sağlamak için önemli bir rol oynayan destekleme elemanlarına zemin çivisi denir. Bu çiviler genellikle çelik çubuklar veya fiber halatlar gibi malzemelerden oluşur ve zemin yüzeyinden zemine güvenli bir şekilde yük aktarımını sağlamak için kullanılırlar. Ayrıca, çimento enjeksiyonuyla delik içerisindeki boşlukların doldurulmasıyla korozyona karşı koruma sağlanır ve enjeksiyon çevresel etki alanını genişleterek çevresel etki kuvvetini artırır. Zemin çivileriyle yapılan destekleme sistemlerinde, yüzeyin aktif bölgelerinin stabil kalması için kaplama işlemi önemlidir. Bu işlem, zemin çivileriyle desteklenen yüzeyin stabilitesine katkı sağlar. Şekil 2.1'de Zemin çivisi uygulamasının tipik bir kesiti, bir pasif ankraj olarak tanımlanan zemin

yüzeyine yerleştirilmiş bir yapıdır. Bu kesit, zemin çivilerinin temel işlevini göstermektedir.



Şekil 2.1. Zemin çivisinin ayrıntılı kesiti (Porterfield vd., 1994).

### 2.1.2 Zemin çivisi uygulamasında kullanılan yapı malzemeleri

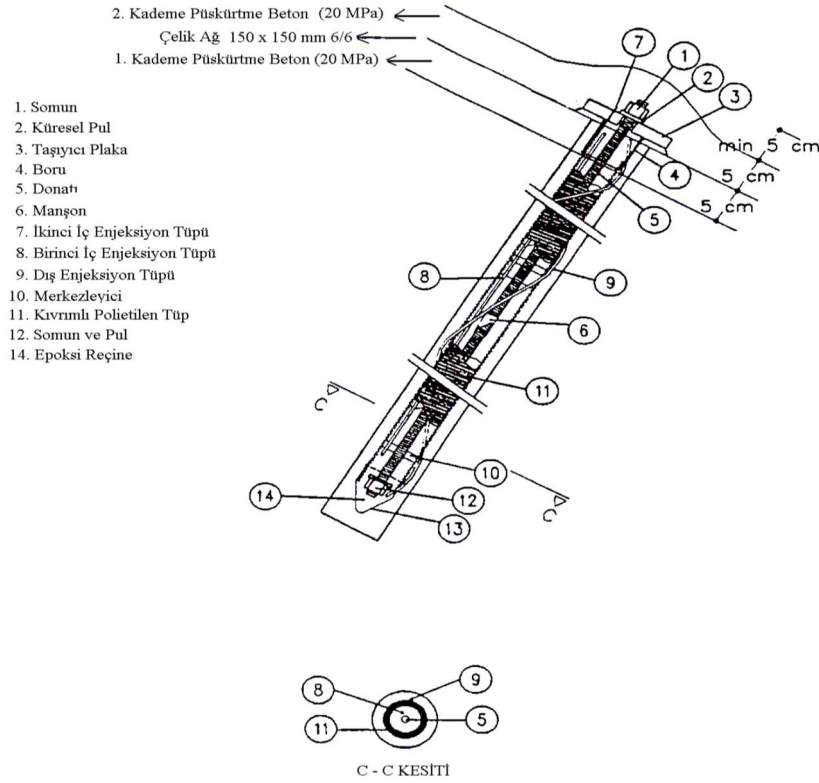
Zemin destekleme işlemlerinde kullanılan ekipmanlar, genellikle yer kazısını yapmak ve hafriyatı nakletmek için gereken iş makinelerini, çivi uygulaması için ihtiyaç duyulan delme araçlarını ve şev yüzeylerini kaplamak için gerekli materyalleri içerir. Bu ekipmanlar, çivilerin yerleştirilmesi ve paslanmayı önleyici elemanların montajı, deliklere enjekte edilecek malzemenin hazırlanması, drenaj için gerekli olan malzemelerin sağlanması, kaplama için kullanılan malzemelerin temini ve zemin çivisi donatısı ile döşeme yapısı arasındaki etkileşimi temin eden sistemleri içerir. (Elias ve Juran, 1991).

### 2.1.3 Zemin çivisi çeşitleri

Zemin çivileri, oksidasyona karşı korunma seviyelerine ve kullanılan montaj yöntemlerine bağlı olarak farklı kategorilere ayrılabilir:

- Zemin çakma çivileri; Bu tür çiviler, geçici takviye uygulamaları için idealdir. Genellikle 15-46 mm çapında çelik donatı elemanlarından oluşur ve maliyetleri düşüktür. Homojen ve dayanıklı bir zemin oluşturabilmek için sık aralıklarla, genellikle ortalama m<sup>2</sup> başına 2-4 adet şeklinde yerleştirilirler. Çakma çiviler, havalı çekiçler, darbe-titreşimli çekiçler veya hidrolik çekiçlerle zemine monte edilirler. Bu prosedür hızlı ve iktisadidir; saatte tahmini olarak 3-5 tane çivi monte eder. Fakat sert bloklar, büyük daneler, aşınmış kayalar gibi zemin koşulları çivinin boyutunu sınırlayabilir.
- Enjeksiyonlu zemin çivileri; Bu tür çiviler, sürekli veya geçici imalatlar için uygundur. Çap aralığı 15mm ile 46 mm ölçeğinde değişken çelik donatı bileşenlerinden oluşurlar. Zemindeki donatı çapına göre uygun delinmiş sondaj deliklerine yerleştirilirler. Sondaj delikleri, karotla, rotari, darbeli veya burgulu sondaj gibi çeşitli yöntemlerle açılabilir. Enjeksiyon imalatı, sondaj deliğinin alt kısmında yerçekimi veya daha düşük basınçla işlem yapılır. Çivilerin enjeksiyonu, deliğin dip kısmından başlayıp ağızına doğru gerçekleştirilmelidir; aksi takdirde çimento ayrışabilir veya göçme meydana gelebilir. Çiviler arası mesafe, projenin gereksinimlerine ve zeminin özelliklerine bağlı olarak uygun aralıklarla belirlenir.
- Jet enjeksiyonlu zemin çivileri; Jet enjeksiyonlu çiviler, çelik donatılı zemin çivileri ile birlikte uygulanan birleşik bir çivileme tekniğidir. Geçici uygulamalar için kullanıldığı gibi korozyon koruması gerektiren kalıcı uygulamalarda da tercih edilebilirler. Jet enjeksiyonlu çiviler, 70 Hz'e kadar yüksek frekansta ve 2000 PSI'dan yüksek enjeksiyon basıncı altında titreşimli darbeli sürücülerle gerçekleştirilir. Enjeksiyon işlemi, çivinin boyunca küçük bir boru veya çelik bir tüp aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu uygulama, çevrede hidrolik kırılmaları teşvik edecek düzeyde basınç oluşturarak zeminin kompaksiyonunu ve iyileştirmesini sağlar. Ayrıca, daneli zeminlerin direncini artırır.
- Korozyona dayanıklı kapsüllü çiviler; Bu tür çiviler, yüksek düzeyde korozyon koruması gerektiren kalıcı uygulamalar için kullanılır. Çelik donatı çubuğu, enjeksiyon veya plastik/çelik bir tüp aracılığıyla rutubetten korunur. Özellikle

Amerika'da, epoksi kaplı zemin çivisi gibi korozyona dayanıklı çeşitler geliştirilmiştir. Korozyon korumalı çivilerin tipik kesiti Şekil 2.2'de sunulmaktadır.



Şekil 2.2. Korozyon korumalı çivi tip kesiti (Üstündağ, 2003).

#### 2.1.4 Zemin çivili duvarların dizaynında zemin şartlarının tesiri

Farklı zemin tipleri ve saha şartlarında zemin çivili duvarlar yapılabilmektedir. Araştırmalar, elverişli zeminlerde zemin çivisi imalatlarının diğer imatlara göre daha iktisadi olduğunu göstermiştir. Ancak belirli zemin koşulları, zemin çivili duvarların uygulanmasını engelleyebilir. Zorlu zemin koşullarında zemin çivili duvarların inşası hem inşaat aşamasında hem de ilerleyen dönemlerde maliyetli olabilir. Bu sorunların proje başlamadan önce tespit edilmesi, projenin başarısını sağlamak açısından önemlidir. Bu nedenle, projeden önce saha analizi yapılmalı ve bölgenin jeolojik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmelidir. Zemin çivisi uygulamasının iktisadi ve teknik imalat açısından uygun olduğu zemin koşulları şunlardır:

- Kazı işlemi sırasında oluşturulan 1 veya 2 metre derinliğindeki seviyelerde, zemin desteksiz olarak 1-2 gün süreyle kendi ağırlığını taşıyıcı olmalıdır.

- Tüm zemin çivileri yeraltı su seviyesinin üzerinde yer almalıdır.

Zemin çivili duvarların tasarımında, çivilerin zeminle etkileşim içinde olması ve bağlantı kuvvetleri oluşturması gereklidir. Zemin çivili duvar imalatlarının daha iktisadi olması için bu bağlantının gerekli dayanıma ulaşması önemlidir. Doğal ortamda var olan yamacın dikleştirilmesi veya zemin çivileriyle yeni bir duvar inşa etmek için adım adım kazılar yapılmalıdır.

#### **2.1.4.1 Zemin çivisi uygulaması için elverişli zemin koşulları**

- a. İnce taneli zeminler arasında sert killer, siltli killer ve killi silt bulunmaktadır; bunlar SPT-N değeri en az 9 olan ve plastisite indeksi 15'in altında olan zeminler
- b. Sıkı-çok sıkı granüler zeminler SPT-N değeri 30'dan büyük olan ve ince taneli zemin yüzdesi 10-15'i aşmayan zeminler
- c. Ayrışmış kayalar süreksizlik düzlemi olmayan kayalar
- d. Buzul toprağı ince taneli oranı sınırlı, sıkı ve iyi derecelenmiş granüler zeminler

#### **2.1.4.2 Zemin çivisi imalatının yüksek maliyetle sonuçlandığı zemin koşulları**

- Kuru, düşük dereceli kohezyonsuz zeminler: Bu tür zeminlerin kuruluğı ve ince tanecik yapısı, dik kazı işlemlerini zorlaştırır.
- Yüksek yeraltı su seviyesine sahip zeminler: Zemin çivili duvar yapılırken, suyun uzaklaştırılması gereklidir. Fazla su içeren gevşek granüler zeminlerde, zemin çivisi inşaatı ekonomik değildir ve suyun püskürtme beton çalışmalarını zorlaştırır.
- Büyük taşlar ve kaya blokları içeren zeminler: Bu tür zeminlerde delme işlemleri zor olduğu için, inşaat maliyetini artırır.
- İnce tanecikli, yumuşak ve çok yumuşak ve zeminler: Bu tür zeminlerde enjeksiyon işlemleriyle sağlanan bağlantı yetersizdir. Bu durumda, gereken dayanımı elde etmek için çok uzun çiviler kullanılması gerekebilir. Ayrıca, yüksek plastisiteli killi zeminlerde deformasyon sorunları olabilir ve şişme nedeniyle ekstra basınçlar ortaya çıkabilir.
- Organik zeminler: Organik silt ve kil mineralleri, yetersiz yapışma dayanımına sahiptir ve daha uzun çivilerin kullanılmasını gerektirir. Ayrıca, organik zeminlerde korozyon riski daha yüksektir.
- Yüksek korozyona sahip zeminler

- Sürekli donma ve çözülmenin olduğu zeminler: Bu durumda, zeminin püskürtme betonla teması zayıflar ve ek önlemler alınması gerekebilir.
- Yüksek sıvılaşma potansiyeline sahip gevşek granüler zeminler.

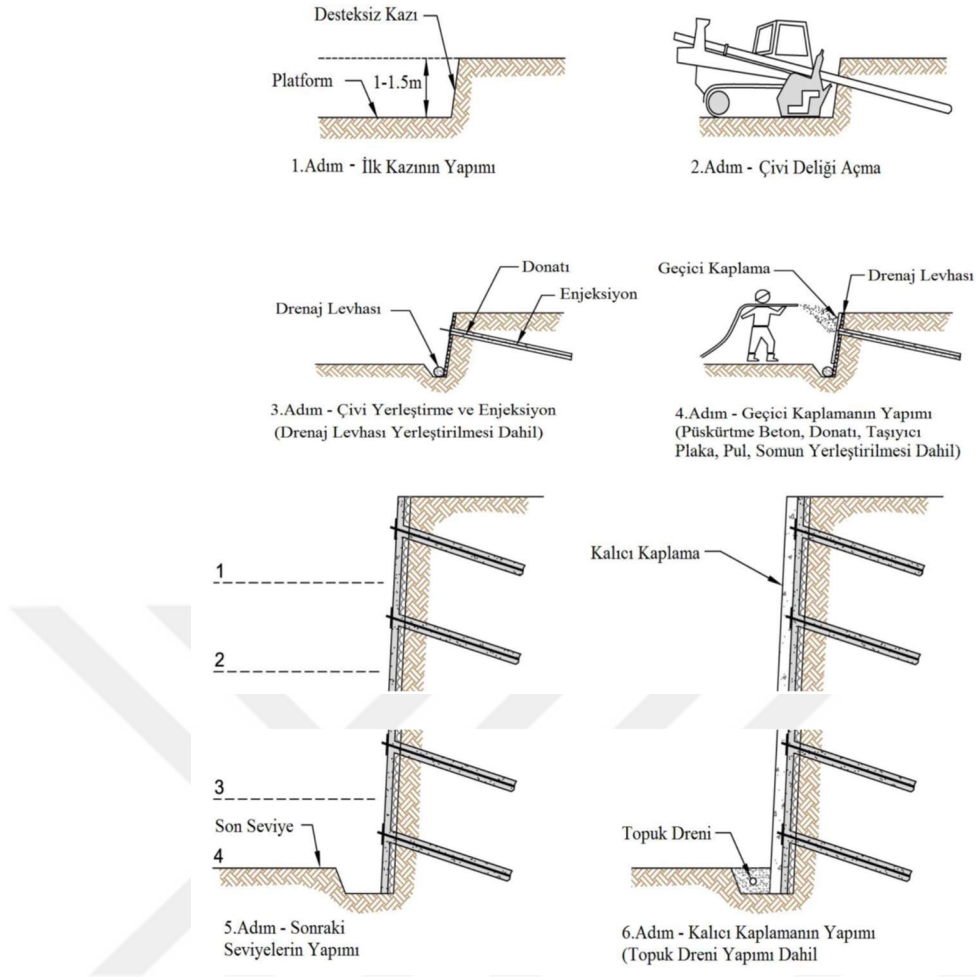
Öte yandan, doğal, homojen veya agresif olmayan dolgu malzemeleriyle yapılan zeminlerde zemin çivili duvar inşaatı için engel yoktur. Ancak, değişken zemin özelliklerine, agresif yapıya ve farklı oturma davranışlarına sahip dolgularda zemin çivili duvar imalatı önerilmez. Ancak, dolgu malzemesi uygunsa, göçme veya oturma sorunlarını önlemek için önce zemin iyileştirme yöntemleri uygulanabilir, ardından zemin çivisi çalışmaları gerçekleştirilebilir.

### **2.1.5 Zemin çivisi yapım aşamaları**

Zemin çivisi uygulamalarında en yaygın yöntem, çivinin montajından önce delik açılması ve ardından deliğin enjeksiyon ile doldurulmasıdır. Alternatif bir yöntem ise çivinin enjeksiyonsuz olarak doğrudan zemine çakılmasıdır. Korozyona karşı korumasız olmasına rağmen bu yöntem genellikle geçici zemin stabilizasyonlarında tercih edilen bir yöntemdir. İçi boş çelik çivilerle yapılan uygulamalar da bulunmaktadır; bu çiviler zemini delerken aynı anda enjekte etme işlemi yapar ve diğer tekniklere kıyasla daha hızlı bir yapım sağlanır. Zemin çivili duvarın yapım aşamaları, çivi deliğinin önce açılması ve ardından çivinin yerleştirilerek enjeksiyonlanmasıyla gerçekleştirilir ve bu aşamalar Şekil 2.3'te detaylı olarak gösterilmiştir.

Zemin çivili duvar inşaat safhaları şu şekilde listelenebilir:

1. Kazı inşası gerçekleştirilir.
2. Zeminde çiviler için delim işlemi gerçekleştirilir.
3. Çivilerin montajı ve enjeksiyon işlemi yapılır. Drenaj levhaları yerleştirilir.
4. Geçici yüzey oluşturulur.
5. Bu aşamalar istenilen kazı kotuna erişmek için tekrarlanır.
6. Son olarak kalıcı kaplama yapılır.

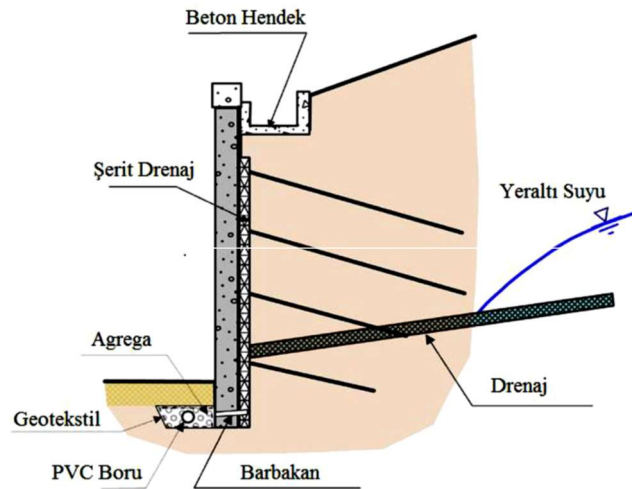


**Şekil 2.3.** Zemin çivisi yapım aşamaları (Porterfield vd., 1994).

İlk çivinin yerleştirileceği derinlik yaklaşık olarak 1 ile 1,5 metre arasında olacak şekilde kazı imalatı gerçekleştirilir. Kazı işlemi sırasında zeminin mümkün olduğunca düzgün olmasına özen gösterilmelidir, çünkü düzensiz kazılan alanlar fazla püskürtme beton kullanımına neden olabilir. Kazı sürecinde zeminin şişme, aşırı deformasyon veya diğer olumsuz durumlar açısından sürekli olarak gözlemlenmesi önemlidir. Zemin aşırı şekilde deforme olursa, önceden zeminde bir set oluşturularak önlem alınabilir. Delgi makinesinin verimli çalışabilmesi için kazı alanında uygun platformlar oluşturulmalıdır. İlk sıranın kazılmasının ardından, çivilerin monte edileceği delikler açılır. Bu delikler genellikle 15°'lik açılarla açılır, ancak 10°, 20° ve 25°'lik açılar da kullanılabilir. Altyapı sistemlerinin bulunduğu veya çakışmaması gereken alanlarda, 20° ve 25°'lik açılarla delikler açılabilir. Deliklerin birbirlerine çakışmamasına dikkat edilmelidir. (Geotechnical Engineering Manual [GEM], 2015).

Çivilerin montajı sırasında bir adet atlayarak devam edilmelidir. Yeni bir delme işlemi için yaklaşık 1,5 metrelik bir alanda en az 24 saat beklenmelidir. Delme işleminden sonra, deliklerin içinde göçme veya malzeme dökülmesi olup olmadığı kontrol edilmelidir. Tüm çivi delikleri açıldıktan sonra, çivi boyutları projeye uygun olup olmadığı kontrol edilmelidir. Çivilerin enjeksiyonla temas ettiği ortamın sıcaklığı 0°C'nin üzerinde olmalıdır, aksi takdirde enjeksiyonun donması riski vardır. Delikler açıldıktan sonra çiviler yerleştirilir. Çivi deliğe tam oturmuyorsa, delik yeniden açılmalıdır. Donatı zorla deliğe itilmeden veya kesilmeden yerleştirilmelidir. Enjeksiyon karışımı, projeye uygun şekilde hazırlanmalı ve çivi deliği tamamen doldurulmalıdır. Enjeksiyon işlemi, çivi ile çevre zemin arasında güçlü bir bağ oluşturur. Bu bağ direnci genellikle yeterlidir, ancak zayıf zeminlerde daha yüksek bir bağ direnci gerekebilir.

Granüler zeminlerde, kendi akışı ile ilerleyen enjeksiyona göre düşük basınçla enjekte edilen enjeksiyon, daha yüksek tutunma gücü gösterir. İnce taneli zeminlerde basınçlı enjeksiyon pek tercih edilmez çünkü sadece küçük bir tutunma gücü artışı sağlar (Lazarte vd., 2015). Eğer çivi deliklerinden dışarı atılması gereken zemin yeterince alınamazsa, enjeksiyonla zemin arasında meydana gelen tutunma gücü öngörülenden daha az olabilir. Deşarj işlemi, sürekli duvarlar için yeraltı suyu seviyesine bağlı olarak uygulanabilir, ancak daimî duvarlar için mutlaka yapılmalıdır. Kazı yüzeyi ile çelik örgü arasına drenaj levhaları yerleştirilir. Şekil 2.4'de Zemin çivisi drenaj sistemiyle görülebilir.



**Şekil 2.4.** Zemin çivisi drenaj sistemiyle (Lazarte vd., 2015).

### **2.1.6 Zemin çivisinin avantajları**

Zemin çivisinin avantajları, yapım, performans ve maliyet gibi üç temel kategoride sıralanabilir (Lazarte vd., 2015).

#### **2.1.6.1 İmalat**

- Genellikle kısa oldukları için zemin çivileri, sınırlı alanlarda çalışma olanağı sağlar.
- Diğer büyük ekipman gerektiren yöntemlere kıyasla çevresel etkileri daha azdır, örneğin fore kazık ve kazık çakma gibi.
- Alternatif destek borulu sistemlere nazaran, kazı ortamı daha rahat ve kolaydır.
- Üretim süreci son derece hızlıdır ve ankraj sistemlerine kıyasla malzeme kullanımı azdır.
- Zorluklarla karşılaşıldığında, çivinin eğimi veya konumu daha kolay değiştirilebilir, bu da ek maliyetler gerektirmez.
- Zemin çivili sistemlerde, yukarıdan çalışma alanına gerek duyulmaz; bu özellik, özellikle köprü ayaklarında gereken imalatlarda avantaj sağlar.
- Zemin çivisi küçük ekipmanlar gerektirdiğinden uzak bölgelere taşınması iktisadi açıdan daha avantajlı olabilir.
- Nitelikli yükleniciler, fazlasıyla zemin çivisi imalatı konusunda deneyime sahiptir.

#### **2.1.6.2 İmalat etkinliği**

- Zemin çivisi, alternatif yapılarla kıyaslandığında daha esnek bir yapıya sahiptir ve belirli bir limite kadar büyük miktarda ve çeşitli oturumları tolere edebilir.
- Yol imalatı esnasında zemin çivisi üretim faaliyetlerinin titizlikle kontrol edilmesi durumunda, belirlenen zemin çivisi duvarının sapmaları kabul edilebilir sınırlar içinde muhafaza edilir.
- Zemin çivisi duvarları, deprem vb. hadiseler esnasında dayanıklı performans sergiler.
- Şekillendirilmiş yüzey, zemin çivili duvarlara uygulandığında, çevreyle uyumlu ve daha doğal bir estetik sunar.
- Ankrajlı duvarlara kıyasla zemin çivili duvar için yüzey başına düşen güçlendirme eleman sayısı yüksektir.

### 2.1.6.3 İmalat maliyeti

- Zemin çivili duvarlar genellikle 3 ile 5 metre veya daha yüksek betonarme duvarlara kıyasla daha iktisadidir.
- Zemin çivili duvar prosedürüne tabi şekilde yapıldığında, tipik olarak ankrajlı duvarlara kıyasla eşit veya daha ekonomik maliyetlere sahiptir.
- Püskürtme beton tabakasının maliyeti, çoğunlukla alternatif tabaka imalatlarına sahip yapılarla kıyaslandığında daha ekonomiktir.

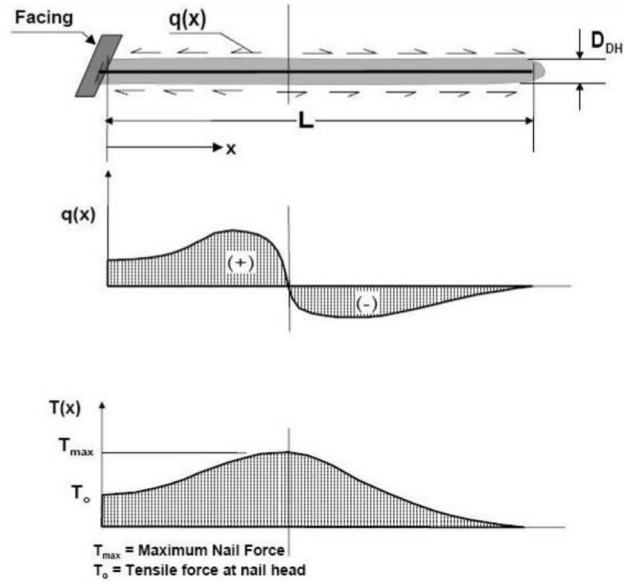
### 2.1.7 Zemin çivisi imalatında ideal olan zemin koşulları

Belirtilen koşullar, iktisadi açıdan daha etkin ve teknik açıdan daha uygun kabul edilir (Lazarte vd., 2003).

- Kendi başına 1 ile 2 metre yüksekliğinde duran ve dikey olarak 1 veya 2 gün boyunca kalabilen desteksiz zeminler tercih edilir.
- Ekseriyetle geçirgen zemin türlerinde zemin çivilerinin uygulandığı yerlerde yeraltı su seviyesinin üzerinde kalması avantajlıdır.
- Zemin çivilerinin çivinin montajı ve enjeksiyonla kaplanması sürecinde kılıf kullanmadan uygulanmasına izin veren zeminler, tercih edilen durumlar arasındadır.

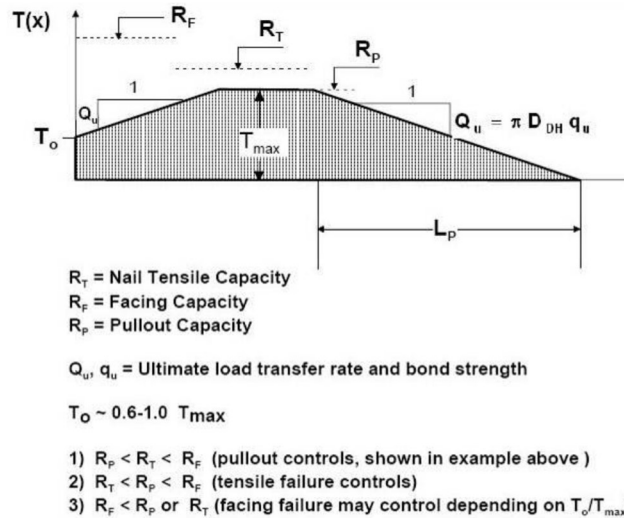
### 2.1.8 Zemin çivisi dizaynında yüklerin oluşumu

Zemin çivisi uygulamalarında, iki temel alan mevcuttur: aktif ve pasif bölgeler. Aktif bölgede, zemin ile çivi arasındaki yükler, kazı yüzeyi boyunca yanal yönde taşınır. Pasif bölgede ise, karşı direnç gösteren gerilmeler genleşme yönüne doğru etki eder. Çekme kuvvetleri, zemin çivisinin uç kısmında başlar, orta kısımlarda maksimuma ulaşır ve tekrar uç kısmında azalır. Kayma gerilmesi (T) ve enjeksiyon-çivi arasındaki hareketli kayma gerilmesinin (q) değişimi Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Federal Highway Administration [FHWA], 2003).



**Şekil 2.5.** Zemin çivilerinin yük iletiminin işleyişi (FHWA, 2003).

Dizaynı anlatmak için, çekme kuvveti en yalın şekliyle Şekil 2.6'da sunulmuştur. Çivinin gerilme kuvveti, çivinin ucuyla sıfırdan başlar ve birim uzunluk başına çekme kapasitesi olarak adlandırılan sabit bir eğimle artar (QU). Bu kuvvet, en yüksek değerine (Tmax) ulaşır ve sonrasında çivinin başındaki QU değeri azalarak (TO) değerine iner. Çivinin maksimum gerilmesi, çekme kapasitesi (RP), gerilme kapasitesi (RT) veya kaplama kapasitesi (RF) ile kısıtlıdır (FHWA, 2003). Şekil 2.7'de ise zemin ve çivinin etkileşim modeli görülmektedir.



**Şekil 2.6.** Zemin çivilerinin çekme kuvvetleri (FHWA, 2003).

$RT$  = Çivinin Çekme Potansiyeli

$RF$  = Yüzey Potansiyeli

$RP$  = Çekme Potansiyeli

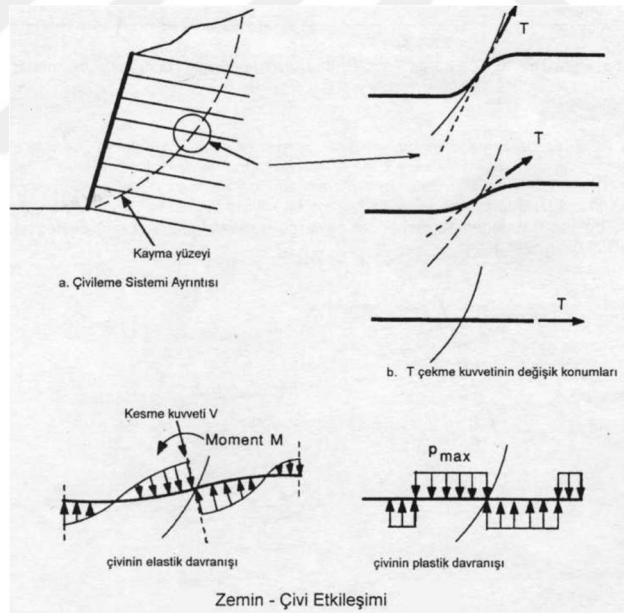
$Q_u, q_u$  = Son yük transfer hızı ve bağlanma mukavemeti

$T_o \sim 0.6 - 1.0 T_{max}$

1)  $RP < RT < RF$  (Çekme kontrolleri yukarıdaki örnekte gösterilmiştir.)

2)  $RT < RP < RF$  (Çekme dayanımı kontrolleri)

3)  $RF < RP$  veya  $RT$  (Kaplama dayanımı  $T_o/T_{max}$  değerine bağlı olarak kontrol edilebilir.) (FHWA, 2003)



Şekil 2.7. Zemin ve çivinin etkileşim modeli.

### 2.1.9 Zemin çivili duvarların gelişimi

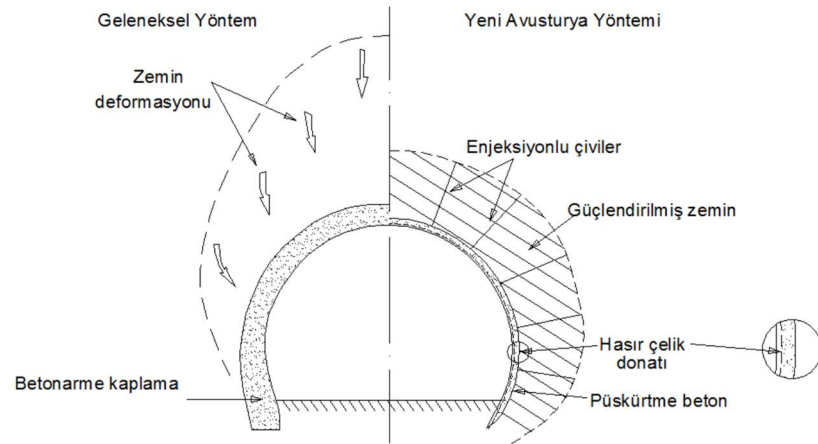
1960'ların başlarında, kaya ankrajları ve çoklu ankraj sistemleriyle birlikte dolgu güçlendirme teknolojilerinden biraz faydalanılarak geliştirilmiştir (Clouterre, 1991; FHWA, 1998). Fransa'da, 1961'de Notre Dame de Commier barajında, şist zeminde yapılan taşkın savaklarının dayanıklılığını artırmak vasıtasıyla enjeksiyon yapılan

pasif ankrajlar ve ön cepesinde betonarme yüzey olan bir metot uygulanmıştır (Bonazzi ve Colombet, 1961). Bu sistemin tasarlanan tip kesiti Şekil 2.8’de sunulmuştur.



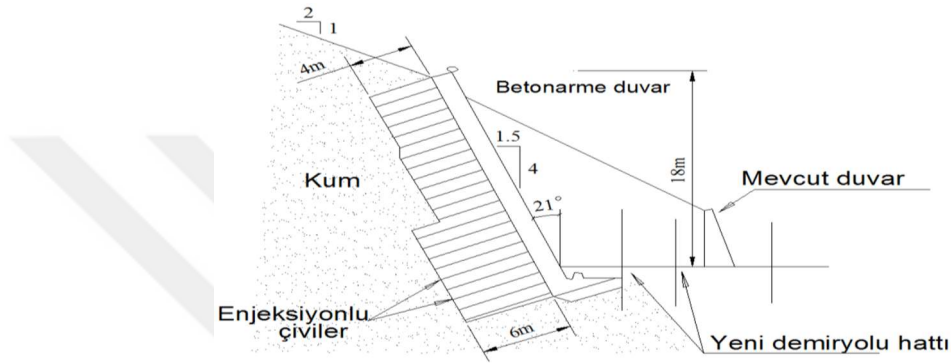
**Şekil 2.8.** Barajın taşkın savakları.

1964 yılında, Rabcewicz tüneli ile yeraltı galerisini sağlamlaştırmak amacıyla Yeni Avusturya Tünel Metodu (NATM) keşfedilmiştir. NATM yöntemi, kazılması sonrasında zeminin pasif ankrajlarla güçlendirilmesini içerir. Bu yöntem sayesinde Rabcewicz, 3 m ile 6 m arasında değişen uzunluktaki çivilerden yararlanarak son kaplama betonunda önemli ölçüde azalma elde etmiştir. Geleneksel yöntem ile Yeni Avusturya Metodu arasındaki farkları açıklayan detaylı bir kesit, Bruce ve Jewell'e (1986) göre Şekil 2.9’da sunulmuştur. Zemin çivili tekniklerin, bu yöntemden ilham alarak geliştiği söylenebilir.



**Şekil 2.9.** Geleneksel Sistem ile Yeni Avusturya Tünel Sisteminin kıyaslaması.

Yeni Avusturya Tünel Metoduna benzer bir yaklaşımla çalışan bu prosedürün, yumuşak kaya ve zemin şevlerinde uzun ve kısa vadeli kazı takviye yöntemi olarak kullanılabileceği öngörülmektedir. İlk olarak, zemin çivili duvarın uygulaması Fransa'nın Versailles şehrinde, 1972 yılında demiryolu genişletme çalışmaları sırasında yarma kesitlerinde denenmiştir (Rabejac ve Toudic, 1974). Aşağıda Şekil 2.10'da görülen, 18 metre yüksekliğindeki geçici destek sistemi, 4 metre ile 6 metre arasında değişen boyutlardaki zemin çivilerinin, düşey aralıklarla sıkı ve dengeli bir şekilde Fontainbleau kumuna uygulandığı bir örneği göstermektedir.



**Şekil 2.10.** Versailles şehrindeki duvar tip en kesiti.

1975 ile 1981 seneleri arasında, zemin çivileri ile ilgili ilk inceleme projesi Almanya'nın Karlsruhe Üniversitesi'nde gerçekleştirildi (Gässler ve Gudehus, 1981; Schlosser ve Unterreiner, 1991). Bu çalışmayı takiben, 1986'da Fransa'da Clouterre tarafından yürütülen inceleme programıyla çalışmalar sürdürüldü. Yapılan araştırmaların sonuçları 1991'de yayımlandı ve Fransa'da zemin çivili duvar dizaynı popüler hale geldi ve diğer ülkelerde de benimsendi.

#### **2.1.10 Zemin çivili duvarlarla ilgili dizayn çalışmaları**

##### **2.1.10.1 Clouterre projesi (Fransız uygulaması)**

Fransa'da gerçekleştirilen zemin çivili duvar çalışmaları, Fransız Ulusal Araştırma Projesi Clouterre aracılığıyla sürdürülen Clouterre Projesi'ne bağlıdır. Bu projenin İngilizce çevirisi, dokümanın hazırlanmasının ardından 1993'te tamamlanmıştır. "Clouterre" kelimesi, kelime manası olarak "çivili zemin" manasını taşır. Bu belge, 1986-1990 yılları arasında Fransız Ulusal Araştırma Projesi Clouterre kapsamında hazırlanmış olup, ortalama bir bütçeyle, toplamda 3.000.000 dolar harcanmıştır.

Dokümanda, zemin araştırmalarından saha kalite kontrolüne kadar her model teorisi ve imalat detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Ancak, bu kapsamlı dokümanda, yalnızca püskürtme betonlu rijit yüzey elemanlı düşey duvarların ve dik şevlerin model ve uygulamaları detaylı olarak ele alınmış olup, diğerk çalışma örneklerine yer verilmemiştir (Construction Industry Research and Information Association [CIRIA], 2005).

#### **2.1.10.2 İşkandinav uygulaması – Nordic handbook**

Bir grup geoteknik uzmanın İsveç, Norveç, Finlandiya ve Danimarka'dan yayınladığı Nordic Handbook of Reinforced Soils and Fills (Rogbeck vd., 2002) isimli belge, 2002'de Nordic Geosynthetic Group vasıtasıyla hazırlanmıştır. Bu belgede, güçlendirilmiş zeminler ve dolguların modellenmesi ve uygulanması, zemin çivili duvarlar dışında, geniş bir şekilde ele alınmıştır. ENV 1997 (1994 ve 1999) ise bu yöntemlerin modellenmesi için önemli bir kaynak sağlamıştır. Dokümanda, dik yarımklı zemin çivili duvarlar ve normal şev iyileştirmeleri gibi örnekler de bulunmaktadır. Ancak, kaplamalarla ilgili detaylı bilgiye pek rastlanmamaktadır (CIRIA, 2005).

#### **2.1.10.3 Federal karayolu idaresi (FHWA) uygulaması**

Amerika Birleşik Devletleri otoban projelerinde zemin çivili duvar yapılarının dizaynı, FHWA (1996) tarafından yayımlanan ve 1998'de güncellenen "Manual for design and construction monitoring of soil nail walls" belgesinde belirtilen dizayn ve uygulama açıklamaları temel alınarak geliştirilmiştir. Bu belge, zemin çivili duvarların inşası ile ulaşım altyapısı için kullanılmasına ilişkin kılavuz niteliğindedir. Ayrıca, bu belge, zemin çivili duvarların seçimi, tasarımı ve detaylandırılması gibi konularda rehberlik sağlar.

FHWA (2003) tarafından yayımlanan "Geotechnical Engineering Circular No 7" belgesi, önceki belgedeki bilgileri gözden geçirerek revize etmiştir. Ayrıca, ABD'deki zemin çivili duvarların saha denetimi, daha önce FHWA tarafından 1994'te yayımlanan "Soil nailing field inspectors' manual" belgesiyle gerçekteştirilmekteydi.

Bu belgeler, zemin çivili duvarlar ilgili detaylı bilgi sunarken, püskürtme beton kaplamalı dik duvarlar ve eğimli yüzeyler gibi diğerk yapı tipleriyle ilgili bilgi sunmada sınırlıdır (CIRIA, 2005).

#### **2.1.10.4 Hong Kong uygulaması**

Zemin çivili duvarların Hong Kong'da yoğun olarak kullanımı, tipik olarak olağan şevlerin sağlamlaştırılması amacıyla gerçekleştirilir. 1970 ve 1980'lerde, bir dizi olayda yaşanan şev kaymaları ciddi felaketlere neden olmuştur. Bu tür olayların önlenmesi için "Landslip Preventative Measures Programme" kapsamında bir dizi çalışma yürütülmüştür. Günümüzde, zemin çivisi tekniği, devlet arazilerinde kabul edilemeyecek standartlara sahip şevlerin güçlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Hong Kong'daki şev mühendisliği tatbiklerinde, 1984 yılında Geoteknik Kontrol Ofisi tarafından yayımlanan "Geotechnical Manual for Slopes" dokümanı ile denetlenmektedir. Zemin çivili duvarlarla ilgili mevcut uygulamalar, Watkins ve Powell tarafından 1992'de yayımlanan "Soil Nailing to Existing Slopes as Landslip Preventative Works" dokümanına dayanmaktadır. Watkins ve Powell, şev stabilitesinin analizini ve zemin çivisi modelleme prosedürünü emniyet faktörleriyle birlikte detaylı olarak ele almışlardır (CIRIA, 2005).

#### **2.1.11 Derin kazı analiz yöntemleri**

Derin kazıların analiz edilmesi, diğer yapı elemanlarının analizine kıyasla daha karmaşıktır. Çünkü hesaplamalar için gereken parametrelerin çeşitliliği, zeminin heterojen yapısı ve yeraltı suyu gibi öngörülmesi zor faktörlerin hesaplamalara dahil edilmesi gerekliliği vardır (Büyükgökçe, 2018). Derin kazı destek sistemlerinin analizi için birçok hesaplama yöntemi bulunmaktadır, ancak en yaygın olarak kullanılan dört yöntem öne çıkmaktadır. Bu yöntemler şunlardır: limit denge yöntemi, elastik zemine oturan kiriş yöntemi, yarı sonlu elemanlar ve sonlu elemanlar yöntemleridir (Gaba vd., 2003).

##### **2.1.11.1 Limit denge yöntemi**

Bu yöntem kayma direncinin bütünüyle gerçekleştiği tahmini ile hesaplamalar yapar. Bu yöntemde, belirli parametreler güvenlik sayıları ile çarpılarak kullanılır, böylece duvarın zemin içine gömülme derinliği, momentler ve kesme kuvvetleri hesaplanır. Doğrusal yük dağılımları, iksa sistemi üzerindeki derinlikle orantılı olarak artar; ancak çoklu sıralı ankrajlı sistemlerde arka kısımda gerçek yük dağılımları farklılık gösterebilir. Bu yöntemde, zemin ile duvar arasındaki etkileşim ihmal edilir; zeminin

ve duvarın gerçek gerilmeleri hesaba katılmaz, duvar ve çevresindeki deplasmanlar hesaplamaya dahil edilmez (Aslan, 2017).

#### **2.1.11.2 Elastik zemine oturan kiriş yöntemi**

Yapı ve zemin arasındaki etkileşime odaklanan bu tetkik yöntemi, iksa duvarını bir kiriş gibi, zemini ise yaylarla benzeterek tasarlar. Bu analiz yönteminde, zeminin rijitliği ve yayların rijitliği arasında bir benzetme yapılır ve yay sabitleri genellikle zemin faktörlerinden birisi olan yanal yatak katsayısı olarak hesaplanır. Elastik zemine oturan kiriş yönteminde, derinliğe bağlı olarak farklı yay sabitleri tanımlanabilir ve maksimum ve minimum yay kuvvetleri, aktif ve pasif basınçlar için tasarlanabilir. Bu yöntem, zeminin yaylarla modellenmesi neticesinde duvara tesir eden kesme kuvvetleri, eğilme momentleri, duvar deplasmanları ve ankraj kuvvetlerinin belirlenebilmesi gibi avantajlar sunar. Ancak bu yöntemin dezavantajı, çevredeki yapıların ve duvar çevresindeki zeminin hareketi ile ilgili tam bir bilgiye sahip olunamamasıdır (Karakoç, 2010).

#### **2.1.11.3 Yarı sonlu elemanlar yöntemi**

Yarı sonlu elemanlar yöntemi, yatak katsayısı yöntemine benzer bir şekilde hesaplanır. Bu teknikte, duvar çevresindeki zemin elastik bir zemin olarak tasarlanır, yay benzetmesi kullanılmaz. Yarı sonlu elemanlar yöntemiyle, zemin ile yapı arasındaki etkileşim, ankraj kuvvetleri, kesme kuvvetleri, eğilme momentleri ve dayanma yapısı deplasmanları belirlenebilir. Ancak elastik kirişe oturan yöntemden farklı olarak, çevredeki yapılar ve dayanma yapısı çevresindeki zeminin nitelikleri ile ilgili bilgi sağlanamaz (Büyükökçe, 2018).

#### **2.1.11.4 Sonlu elemanlar yöntemi**

1950'lerin başlarında ilk kez inşaat mühendisliğinde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, mühendislik problemlerine etkili çözümler getirmiştir. Bu yöntemin dünya çapında yaygınlaşması, bilgisayar teknolojilerinin giderek yaygınlaşmasıyla gerçekleşmiştir. Günümüzde, inşaat mühendisliğinde elastisite problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan bu yöntem, mühendisliğin çeşitli alanlarına fayda sağlamaktadır. Özellikle geoteknik mühendisliğinde, yeraltı suyu ve boşluk suyunun tesirlerini, sınır koşullarını ve deformasyonları, gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini

ortaya koymaktadır. Bu nedenle, destekli derin kazıların modellenmesinde deplasmanların belirlenmesinde sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntemle belirlenen yer değiştirmeler, sonlu elemanların niteliklerine, destek özelliklerine, zemin niteliklerine ve kullanılan malzemelere bağlı olarak hesaplanmaktadır (Finno, 2005).

Her bir adımı ayrı ayrı tasarlamak mümkündür, bu hem düzgün hem de homojen olmayan kazı geometrilerinde geçerlidir. Ayrıca, yapı ile zemin arasındaki etkileşim kontrol edilerek, her aşamadaki sorunlar detaylı bir şekilde belirlenebilir. Bu yöntemle hem iki boyutlu hem de üç boyutlu analizler elde etmek mümkündür. Bu analizlerle, modellenen destek sistemlerinde ve zeminde meydana gelen yer değiştirmeleri belirlemek imkân dahilindedir. Her kazı aşamasındaki yer değiştirme, eğilme momenti ve kesme kuvvetleri hakkında bilgi edinildiğinden, kazı süresi esnasında oluşabilecek en tehlikeli durum kolayca belirlenebilir (Büyükgökçe, 2018).

#### 2.1.12 Malzeme modelleri

Malzeme modeli seçimi, sonlu elemanlar analizinin çıktılarına büyük derecede etkilemektedir. Geçen yıllar süresince, çeşitli yapısal malzeme modelleri tasarlandı ve bu malzeme modelleri farklı özelliklere sahiptir, bu nedenle mühendislerin analizleri mümkün olduğunca doğru yapabilmeleri için bu modelleri bilmesi önemlidir. Plaxis malzeme modelleri kılavuzunda, zemin türüne göre malzeme modellerinin uygulanabilirliği Çizelge 2.1'de sunulduğu gibi derecelendirilmiştir (Plaxis, 2019).

**Çizelge 2.1.** Farklı zeminler için malzeme modelleri (Plaxis, 2019).

| Malzeme Modeli    | Beton | Kaya | Çakıl | Kum | Silt | OC Kil | NC Kil | Turba |
|-------------------|-------|------|-------|-----|------|--------|--------|-------|
| Linear Elastic    | C     | C    |       |     |      |        |        |       |
| Mohr-Coulomb      | B     | B    | C     | C   | C    | C      | C      | C     |
| Hardening Soil    |       |      | B     | B   | B    | B      | B      |       |
| HS Small          |       |      | A     | A   | A    | A      | B      |       |
| UBC3D-PLM         |       |      | B*    | B*  | B*   |        |        |       |
| Soft Soil Creep   |       |      |       |     |      |        | A*     | A*    |
| Soft Soil         |       |      |       |     |      |        | A*     | A*    |
| Jointed Rock      |       | A**  |       |     |      |        |        |       |
| Modified Cam-Clay |       |      |       |     |      |        | C      | C     |
| NGI-ADP           |       |      |       |     |      | A*     | A*     | A*    |
| UDCAM-S           |       |      |       |     |      | A*     | A*     | A*    |
| Hoek-Brown        |       | A**  |       |     |      |        |        |       |
| Concrete          | A     |      |       |     |      |        |        |       |

Bu bağlamda;

A: Plaxis'te kullanılan en iyi standart model,

B: Uygulanabilir model,

C: İlk (yaklaşık) yaklaşım için model olarak adlandırılmaktadır.

\*: Zamanla değişen davranışın kritik olduğu durumlarda Soft Soil Creep modeli; sıvılaşma içeren kumlu zeminlerin dinamik analizi için UBC3D-PLM modeli,

\*: Yalnızca drenajsız kayma mukavemetinin bilindiği durumlarda kısa dönem analizi için NGI-ADP modeli ve tekrarlı yükleme analizi için UDCAM-S modeli,

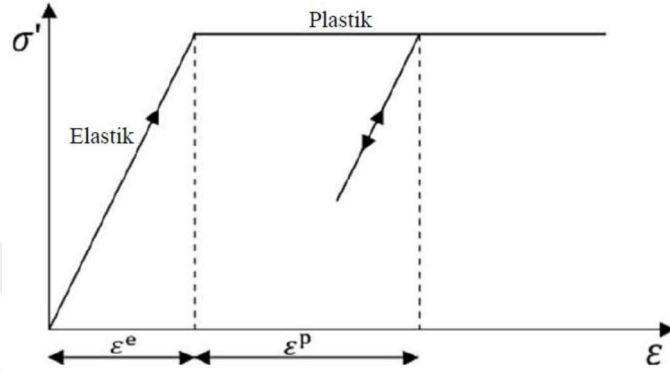
\*\* : Anizotropi ve tabakalaşma durumlarında Jointed Rock modeli ve genel olarak kaya için Hoek-Brown modelidir. Zemin modelleri arasında, Mohr-Coulomb, Hardening Soil ve Hardening Soil with Small-Strain Stiffness, derin kazı projelerinin gerilme-deformasyon analizlerinde en yaygın tercih edilen zemin modelleridir.

#### **2.1.12.1 Mohr Coulomb (MC) modeli**

Mohr-Coulomb yenilme kriteri, uzun zamandır esas alınan en temel modeldir. Bu model, lineer elastik-mükemmel plastik gerilme-gerinim bağlantısına vakıftır ve Coulomb başarısızlık kriteri ile Hooke yasasından oluşur. Zeminin lineer elastik davranışı, Hooke yasasıyla temsil edilir. Mohr-Coulomb yenilme kriteri, plastik bölgede, zeminin sertleşmesini göz ardı ederek sabit bir gerilme seviyesi varsayarak akma yüzeyindeki gerilme durumunu ön görmek etmek için kullanılır. Modelin doğrusal elastik kısmı elastisite teorisine, mükemmel plastik kısmı ise Mohr-Coulomb yenilme kriterine dayanır. Mohr-Coulomb modeli, zemin veya kaya davranışını kabaca gösterir. Başlangıç değerlendirme analizi için bu modelin tercih edilmesi önerilir. Her zemin tabakasında, sabit bir rijitlik veya derinlikle doğrusal olarak artan bir rijitlik belirlendiği için hesaplamalar orantılı olarak hızlı gerçekleşir ve analiz sonucunda yaklaşık yer değiştirme tahmini elde edilir. Mohr-Coulomb malzeme modelinin zeminin gerilme-deformasyon ilişkisini belirlemek için beş giriş faktörüne ihtiyaç vardır. Lineer elastik-ideal plastik malzeme gerilme-deformasyon ilişkisi Şekil 2.11'de sunulmuştur. Aşağıda, bu giriş parametreleri listelenmiştir:

Şekil 2.11’de sunulan parametreler arasında:

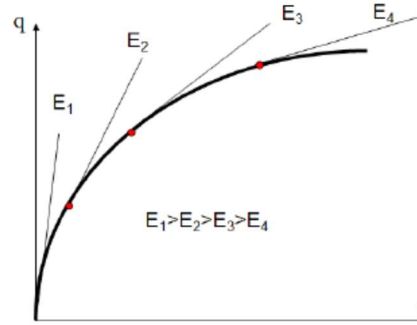
- Elastisite modülü ( $E$ )
- Dilatasyon açısı ( $\psi$ )
- Kohezyon ( $c$ )
- Poisson oranı ( $\nu$ )
- İçsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) bulunmaktadır.



Şekil 2.11. Gerilme – deformasyon ilişkisi (Brinkgreve vd., 2018).

#### 2.1.12.2 Hardening Soil (HS) modeli

Gerçek zeminin lineer olmayan gerilme-deformasyon davranışı, gerilmeler arttıkça zeminin rijitlik modülünün azaldığı şeklinde olmaktadır, Şekil 2.12 ’de gösterildiği gibi. Bu lineer olmayan davranış modeli, Duncan ve Chang (1970) vasıtasıyla ilerletilen hiperbolik modelin temelini oluşturur (Gouw, 2014).



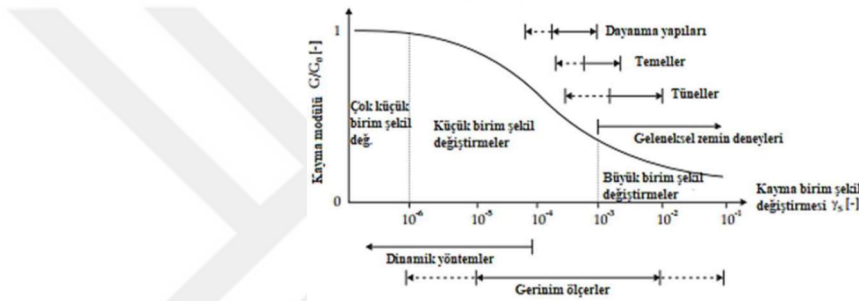
Şekil 2.12. Lineer olmayan gerilme-deformasyon eğrisi (Gouw, 2014).

Hardening Soil zemin modeli, hiperbolik modele kıyasla geliştirilmiş ve hem yumuşak hem de sert zeminlerin tepkilerini araştırmak için kullanılmıştır. Lineer elastik ideal

plastik (MC) modelinde sabit zemin rijitliği bulunurken, Hardening Soil modelinde zeminin rijitlik modülü gerilme durumuna bağlı olarak değişmektedir.

### 2.1.12.3 Hardening Soil with Small-Strain Stiffness (HSS) modeli

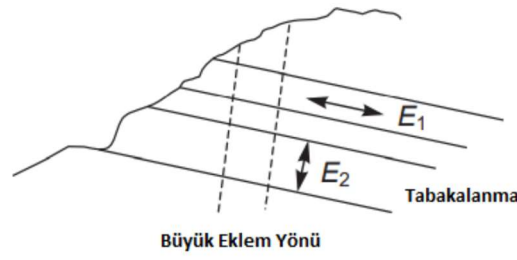
Hardening Soil modeli, zeminlerin boşaltma ve yeniden yükleme süreçlerinde elastik materyal davranışını öngörmektedir. Ancak, zeminlerin tam olarak elastik olduğu kısımda birim şekil değişim skalası çok azdır (Plaxis, 2019). Hardening Soil with Small-Strain Stiffness modeli, Hardening Soil modeline ilave olarak, zeminlerin minimal deformasyonlarında lineer olmayan yükselen rijitliğini hesaplamaktadır, ki bu Şekil 2.13'de görülebilir.



Şekil 2.13.  $G/G_{max}$  – kayma birim şekil değiştirme ilişkisi (Benz, 2007).

### 2.1.12.4 Jointed Rock modeli (Eklemlı Kaya modeli)

Kaya tabakaları, çeşitli yönler ve özelliklere sahip olabilirler. Bu koşulda, özel şartlara tabii olduklarında ayrı tutum sergilemeleri umulur. Kaya malzemelerinin bu yönlü tutumlarına anizotropi denir. Kayaç anizotropisi, elastik ve plastik olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Elastik anizotropi, farklı yönler sahip farklı elastik rijitlik özelliklerinden kaynaklanırken, plastik anizotropi, farklı dayanım özelliklerinin farklı yönler göre kullanılmasıyla ilgilidir, bu da Jointed Rock (Eklemlı Kaya Modeli) modelinde ele alınır. Şekil 2.14'de tabakalı bir kaya kütlesi ve farklı yönler sahip malzeme özellikleri gösterilmektedir.

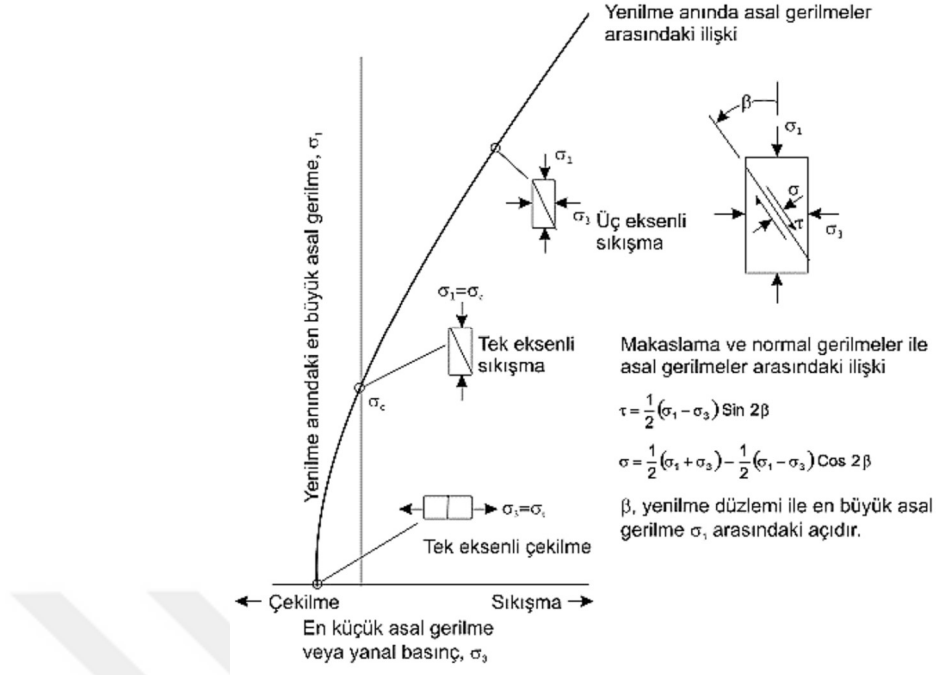


**Şekil 2.14.** Eklemlili kaya modeli yaklaşımı (Brinkgreve vd., 2018).

Eklemlili kaya modeli (Jointed Rock Model), tabakalı ve eklemlili kaya kütlelerinin tepkisinin oluşturduğu anizotropik, elastik, tam plastik bir sistem modeli olmaktadır. Bu modelin içeriğinde bir tabakalaşma doğrultusuna ve ana eksen yönünde olan som kayaların mevcut olduğu düşünülür. Som kayanın, bir yön ve beş parametre ile ölçülebilen malzemenin enine anizotropik elastik özelliklere sahip olduğu varsayımı yapılır. Esas eklemlili ekseninde kayma gerilmelerinin Coulomb kriterine göre sınırlandırıldığı varsayım yapılmaktadır. Bu doğrultuda en yüksek kayma gerilmesine eriştiği zaman, plastik kayma durumu söz konusu olacaktır. İlk düzlemin elastik anizotropi ile örtüştüğünü varsayan maksimum üç tane kayma düzlemi girilebilmektedir. Her bir katman, değişik kayma mukavemeti niteliklerinden oluşabilir. Plastik kayma hareketinin ötesinde, bu üç düzleme dik yönlü çekme gerilmeleri, önceden saptanan çekme gerilmesi dayanımına bağlı olarak sınırlanır.

#### 2.1.12.5 Hoek-Brown modeli

Kaya, çoğunlukla zeminlere nazaran daha fazla bir rijitliğe sahip olması sebebiyle kaya tepkisi zemin tepkisinden farklılık gösterir. Kaya rijitliği değişmeyen varsayımı yapılır, bu nedenle rijitlik ile gerilme seviyesi arasında doğrudan bir bağlantı bulunmamaktadır. Ancak, kesme mukavemeti gerilme seviyesine bağlı olduğundan bu kritik öneme sahiptir. İlk yaklaşım, Mohr-Coulomb yenilme kriteri aracılığıyla kaya kesme mukavemetini tasarlamaktadır. Fakat Mohr-Coulomb modeli, kaya için farklı gerilme seviyelerini dikkate almaz. Ayrıca, kaya önemli çekme mukavemetine sahip olabilir. Kaya için, Hoek-Brown modeli üstün bir doğrusal olmayan gerilme-gerinim ilişkisini temsil eder, bu da kesme ve çekme mukavemetini hesaba katar.



**Şekil 2.15.** Hoek ve Brown yenilme ölçütü (Hoek ve Brown, 1980).

Hoek-Brown malzeme modeli, kayanın gerilme-deformasyon ilişkisini belirlemek için altı veri değişkenine gereksinim duymaktadır. Bu giriş değişkenler şunlardır:

- Kaya kütesinin elastisite modülü ( $E_{rm}$ )
- Sağlam kayanın tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_{ci}$ )
- Poisson oranı ( $\nu$ )
- Bozulma faktörü ( $D$ )
- Jeolojik dayanım indeksi ( $GSI$ )
- Sağlam kayanın ampirik model parametresi ( $m_i$ )

## 2.2 Geosentetiklerin Tanımlanması

Yapısal mühendislik imalatlarında zemin içinde ve gerektiğinde farklı yapı materyalleriyle birlikte uygulanan yapay yüzey bileşenlerinin yaygın adıdır. Bu tanımlamaya, neredeyse bütünüyle polimer bazlı geniş bir ürün skalası dahildir. Günümüzde, kapsamlı ürün tasarımı ve imalatı sayesinde, bu ürünler geoteknik, çevresel, hidrolik ve ulaşım mühendislik disiplinlerinde kullanılmaktadır. (Shukla,2002) Bu yapı malzemesinin uygulama sahalarının bu kapsamda olması nedeniyle, kavram olarak geosentetik kavramı uygun görülmüştür. "Geo" zemin anlamına gelirken, "sentetik" ise geosentetik imalatı için ihtiyaç duyulan, özellikle

polimerlerin yanı sıra fiberglas, lastik, kauçuk gibi plastik endüstrisi ürünlerini ifade eder. (Koerner, 1998)

## **2.2.1 Geosentetiklerin çeşitleri**

### **2.2.1.1 Geotekstiller**

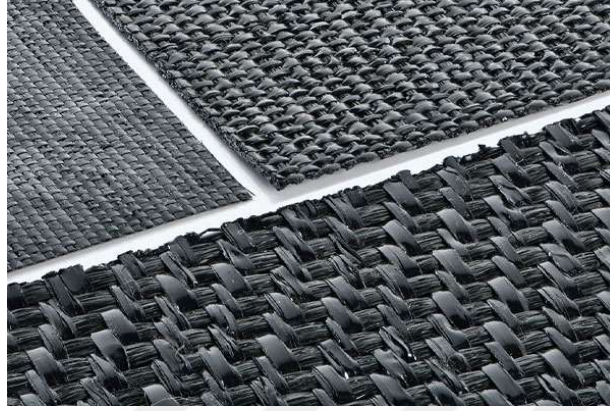
Geotekstiller, insan inşası bir projenin, yapının veya sistemin bileşeni olmak suretiyle, zemin, kaya ve toprakla veya geoteknik yapısal mühendisliği ile alakadar diğer malzemelerle birlikte kullanılan geçirimli tekstil ürünleridir (Ingold ve Miller, 1998). Geotekstillerin imalatında fiberler, filamentler ya da ipliklerden yararlanılır. Fiberler, kesilmiş film şeritlerini de ihtiva eden bükülebilirlik, incelik ve yüksek boy/kalınlık miktarı ile tasvir edilen malzemelerdir. Filamentler ise tanımlı uzunluğa hâkim fiberlerdir. İplik (yarn) terimiye belirli bir uzunluğa sahip, nispeten küçük kesit alanlı, bükülmüş veya bükülmemiş fiber veya filamentlerin monte edilmiş, geotekstil imalatına hazır duruma getirilmiş halini ifade eder (Giroud, 1986).

Geotekstiller, çok türlü niteliklere göre alt sınıflara ayrılır. Bu özelliklerin önde gelenleri; üretim tekniği, polimer unsuru, ağırlığı ve mühendislik disiplini. Üretim teknik usulüne göre sınıflandırmada genellikle iki ana sınıf mevcuttur: woven (örgülü) ve nonwoven (örgüsüz) ürünler. Bu gruplar da kendi içlerinde kullanılan ipliğin ve fiberin çeşidine göre alt gruplara bölünürler.

#### **2.2.1.1.1 Woven (örgülü) geotekstiller**

Woven geotekstiller, ipliklerin bir tanesi üretim yönü istikametinde, diğeri ise buna dik olarak uzanması ve farklı modellerde örülmesiyle üretilir. Bu tür geosentetikler, belirli bir matematiksel yaklaşımla tek filamentli, çok filamentli, şerit esaslı, kesikli film gibi şekillerde sınıflandırılabilir. Tek filamentli (monofilament) iplikler, yaygın olarak çapları 0.1 mm'den birkaç mm'ye kadar değişkenlik gösteren, yuvarlak kesitlere sahip, beraberce metalurji işlemine tabi tutulmuş, soğutulmuş, ısıl çekim yapılmış ve ısıl son işleme tabi tutulmuş ipliklerdir. Bu tür iplikler, suyun içinden geçişine zayıf direnç göstermekte olan tül veya elek tipi geotekstil imalatında kullanılır. Bu tip geotekstiller, klasik örgü teknikleriyle elde edilir. Çok filamentli iplikler ise çok ince ve öngörülebilir uzunluğa sahip ipliklerin bir toplamıdır. Bu tip geosentetikler, eğrilmemiş ipliklerden örülür. Bant ürünler ise eğrilmemiş, düz, çok uzun filmlerden

çekilmiş şeritlerden yapılır. 5 mm'den daha az genişlikteki şeritlerden örülen geosentetiklerin su geçirgenliği zayıf olur. Kesikli film tipi imalatlar ise liflendirilmiş film ipliklerden yapılmıştır (Özkoç, 2006). Şekil 2.16'da ise woven (örgülü) geotekstil görülmektedir.



**Şekil 2.16.** Woven geotekstil (URL-1).

#### **2.2.1.1.2 Nonwoven (örgüsüz) geotekstiller**

Nonwoven geotekstiller, sentetik kısa elyafların iğneleme yöntemiyle makineler vasıtasıyla keçe şekline getirilmesiyle oluşan ürünlerdir. Bu tür geotekstillerde, atkı ve çözümlü bulunmaz; ancak elyafların birbirine karışması ve ısıtma işlemiyle oluşan bir mukavemet vardır. Örgüsüz geotekstilleri sınıflandırırken, fiberlerin bağlanma şekli temel alınarak, ısıtma, kimyasal veya mekanik birleştirme yöntemleriyle kategorize etmek imkân dahilindedir. Makineler vasıtasıyla birleştirmede, lifler gevşek bir ağ durumunda konveyörün üzerine serilir ve bu ağ, karşılıklı kancalı iğnelerle ekipmanlanmış bir panonun altından geçirilir. Termik birleştirme yönteminde ise ağın üstü eritilerek liflerin birbirine yapıştırılması sağlanır. Kimyasal birleştirme ise akrilik yapıştırıcılar kullanılarak gerçekleştirilir. (Töremiş, 2003) Bu farklı birleştirme yöntemleri, örgüsüz geotekstillerin yapısal özelliklerini ve kullanım alanlarını belirler. Fransız Geotekstil Komitesi (CFG)'nin sınıflandırması gibi parametreleri içeren bir sınıflandırma, geotekstillerin sınıflandırılmasında kullanılabilir. Şekil 2.17'de ise nonwoven (örgüsüz) geotekstil görülmektedir.



**Şekil 2.17.** Nonwoven geotekstil (URL-2).

#### **2.2.1.2 Geogridler**

Geogridler, dikdörtgen şekilde birleştirilmiş güçlü çekme mukavemetine sahip ipliklerin veya delikler açılmış geosentetik malzemenin her iki yönde çekilmesiyle oluşur. Zeminle kitlenerek veya sürtünmeyle, güçlü çekme kuvvetleri zemine aktarabilme yeteneğine sahiptirler. Bu sayede, zeminle birlikte çalışarak üzerlerine gelen büyük yükleri karşılayabilir ve çekme kuvvetlerini daha sağlam bir zemine aktararak bir ankraj gibi işlev görebilirler. Yol inşaatlarında, seviye dengelemelerinde ve temel altı zemininin ıslah edilmesinde kullanılabilirler. Geogridlerin tek yönlü veya iki yönlü çalışabilmesi, imalat şekline bağlıdır. Hangi tür geogridin hizmet sunacağı, uygulamadaki kuvvet aktarım şekline göre seçilir. Örneğin, yol inşaatlarında tek yönlü geogridler tercih edilirken, geosentetik donatılı istinat duvarlarında her iki yönde işlev gören geogridler kullanılabilir (Özkoç, 2006). Şekil 2.18’de ise geogrid görülmektedir.



**Şekil 2.18.** Geogrid (URL-3).

#### **2.2.1.3 Geomembranlar**

Geomembranlar, geniş yüzey alanlarına sahip ve sürekli olarak her iki yönde kullanılan, yalıtım amaçlı geosentetiklerdir. Bu malzemeler, genellikle geçirimsiz yüzey örtüleridir ve bu özellikleri nedeniyle genellikle su tutma yapıtlarında ve katı

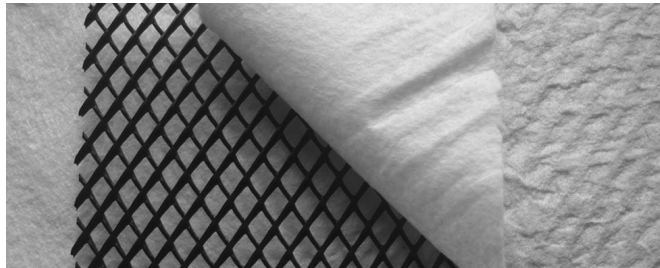
atık depolama bölgelerinde tercih edilirler. Söz konusu yalıtım malzemeleri, uzun vadeli projelerin yalıtımını sağlayacakları için her türlü zorlamaya dayanacak özelliklere sahiptirler. Bu nedenle, genellikle yüksek yoğunluklu polietilen hammaddesinden üretilirler. Geomembranlar, ek yerlerinde kaynak işlemleriyle birleştirilirler, bu işlemlere dikiş de denir. Geomembranın monomer yapısına ve imalat şekline bağlı olarak, kaynak işlemi genellikle ısı işlem veya yapıştırma şeklinde gerçekleştirilir (Özko, 2006). Şekil 2.19’da ise geomembran serimi görülmektedir.



**Şekil 2.19.** Yüzege geomembran serilmesi (URL-4).

#### **2.2.1.4 Geokompozitler**

Geokompozitler, çok sayıda geosentetik imalat ürününün bir arada kullanılmasıyla Şekil 2.20’de görüldüğü gibi meydana gelir. Bu kompozitler, tek başına kullanılan geosentetik malzemeden daha etkili çözümler sunarak birden fazla fonksiyonu yerine getirebilirler. Örneğin, su tutma yapılarında geomembran, geçirimsizlik temin ederken, örgüsüz geotekstil ile birlikte kullanılarak sürtünme artırılarak anroşmanın geomembran üzerinden kayması engellenebilir. Bazı durumlarda ise örgülü geotekstil, emniyet maksadıyla diğer geosentetik malzemelerle bir arada kullanılabilir (Özko, 2006).



**Şekil 2.20.** Geokompozit (URL-5).

### **2.2.2 Geosentetiklerin hammaddeleri**

Geosentetikler, sentetik polimerlerden meydana gelirler. Polimerler, monomerlerin kimyasal işlemlerle birleştirilerek uzun moleküler zincirler oluşturulmasıyla oluşturulurlar. Monomerler ise termoplastiklerin sonucudur ve plastik dokumalardır, bu nedenle ısıtılıp soğutulabilirler. Geosentetiklerin hammaddeleri olarak kullanılan polimer çeşitleri şunlardır (Aksoy, 1993):

- Polipropilen
- Polyester
- Poliamid
- Polietilen
- Polivinil Klorid
- Etenekopolimer bitüm

### **2.2.3 Geosentetik donatılı duvarların fayda ve kusurları**

Geleneksel istinat duvarları ve masif istinat duvarlarıyla karşılaştırıldığında, geosentetik donatılı istinat duvarları birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlardan bazıları şunlardır:

Geosentetik donatılı istinat duvarlarının imalatı hızlı ve basit bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu duvarların inşası için kalifiye elemanlara gereksinim duyulmaz, diğer istinat duvarlarına kıyasla yapımı daha basittir. Diğer alternatiflere göre daha az yer gerektirir.

Geosentetik donatılı istinat duvarları, rijitlik gerektirmediğinden şekil değiştirmesine karşı toleranslıdır. Bu durum, zayıf temel koşullarında bile deformasyonu emebilmesi, rijitliği ve esnekliği ile bir avantaj sağlar. Üretim materyali maliyetleri düşüktür, hızlı bir şekilde inşa edilebilir ve farklı üreticiler arasındaki rekabet nedeniyle maliyeti diğer alternatifleri göz önüne alındığında fazlasıyla düşüktür.

Farklı şekil ve tarzlarda ön yüz elemanları üretilebilir ve uygulanabilirlikleri, geosentetik donatılı istinat duvarlarına görsel ve doğal bir görünüm kazandırılmasını sağlar (Elias vd., 2001).

Tüm yapı tiplerinde olduğu gibi, geosentetik donatılı istinat duvarının bazı dezavantajları da vardır. Bunlar arasında iç ve dış stabiliteyi sağlamak için nisbi olarak daha büyük duvar arkası genişliğine gereksinim duyulması, granüler dolgu malzemesinin belirli kriterler gerektirmesi ve doğal zeminin bu kriterleri karşılayamaması durumunda uygun dolgu malzemesini getirmenin girdi giderlerini artırması, bu şekildeki yapılar için tam standartlaşmış şartname ve uygulama yönetmeliklerinin mevcut olmaması, ve geosentetik donatının korozyondan korunması için tasarımın kriterlere uygun olması gerekliliği yer alır. Ayrıca, ultraviyole ışınlarına maruz kalan polimer donatının potansiyel yıpranmasını önlemek ve yüzey elemanlarıyla temas eden noktaların bozulmasını engellemek de önemlidir (Elias vd., 2001).

#### **2.2.4 Geosentetik donatılı istinat yapıları duvar elemanları**

##### **2.2.4.1 Donatı malzemeleri**

Geosentetik donatılı istinat duvar yapılarında daha çok uygulanan materyal genellikle geogridlerdir. Geogrid kullanımının sağladığı faydalar şunlardır: Duvar ön düzlem yüzeyindeki ön üretimli elemanlara bağlanma daha zahmetsizdir. Bodkin adı verilen çubuklar aracılığıyla birbirlerine kolaylıkla ve etkili bir şekilde eklenirler. Geogrid ruloları kolayca açılıp serilebilir, bu sebebiyetle şerit donatıların tek tek yerleştirilmesinden daha hızlıdır. Geogridler arzulanan uzunlukta kolayca kesilebilirler ve kesim yerlerinde özel bir proses gerektirmezler. Ayrıca, hafif olduklarından nakilleri daha zahmetsizdir ve değişken türler ve kaliteler arasında ayırım yapmak kolaydır. Geogridlerin ultraviyole ışınlarına karşı dirençleri oldukça yüksektir. Bu nedenle, özel kapalı lojistik saha depolama alanları gerektirmezler ve sert dolgu malzemesinin hasarından korunmak için özel tabaka imalatı gerektirmezler.

##### **2.2.4.2 Dolgu malzemesi**

Donatı malzemesi için gereken koşullar aşağıdaki gibidir: Söz konusu materyal malzemenin granülometrisi uygun olmalıdır ve %95 Proktor sıkılığında ve  $\pm 2$  wopt sıkıştırılmalıdır. Ayrıca, minimum içsel sürtünme açısı  $34^\circ$  olan granüler malzeme tercih edilmelidir. Malzeme, kimyasal veya organik maddeler içermemelidir. TS ve

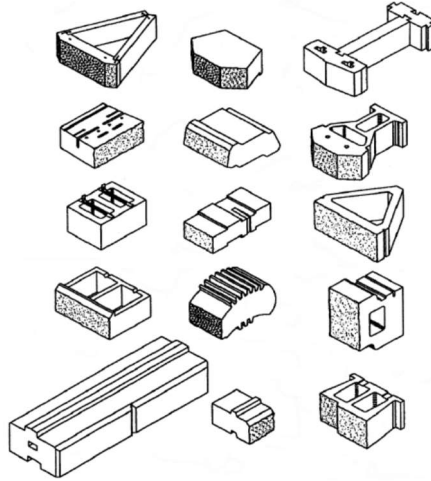
AASHTO standartlarında kullanılması istenen malzemenin standardı Çizelge 2.2’de bulunmaktadır.

**Çizelge 2.2.** Dolgu malzemesi standartları.

| TS        |         | AASHTO   |        |
|-----------|---------|----------|--------|
| Elek      | % Geçen | Elek     | %Geçen |
| 102 mm    | 100     | 250 mm   | 100    |
| 4.75 mm   | 100-20  | 75 mm    | 75     |
| 0.425 mm  | 0-60    | 10 mm    | 10     |
| 0.0075 mm | 0-15    | 75 $\mu$ | 0-15   |

#### 2.2.4.3 Ön yüzey elemanları

Donatılandırılmış zemin sistemlerinde kullanılan ön yüzey elemanının temel işlevi, donatıların yüzeye bağlanarak dik yüzeydeki yamaç erozyonu önlemektir. Ayrıca, arka dolgunun drenajını sağlamak için alan sağlar. Ön yüzey, prefabrike (ön üretimli) beton paneller, basit modüler blok elemanlar, gabionlar ve geosentetik donatıların birleştirilmesiyle oluşturulabilir. Şekil 2.21’de yüzey elemanları görülmektedir.



**Şekil 2.21.** Duvar yüzey elemanları.

## 2.2.5 Geosentetik donatıya sahip duvar modellemesi

### 2.2.5.1 Duvar tabakası derinliği ve donatı boyunun belirlenmesi

Donatı boyunun minimum gereksinimleri, yük durumlarına bağlı olarak Çizelge 2.3’de belirtildiği gibi belirlenebilir. Her durumda donatı uzunluğu 2,5 metreden fazla olmalıdır (FHWA, 2009). Bu uzunluk, taşıma ekipmanlarının üzerinde kullanılan kompaksiyon ekipmanlarının kullanımını sağlamak için önerilir. Ancak, küçük kompaksiyon ekipmanları kullanılacak ve duvar tasarımı gereksinimleri karşılanacaksa, 2,5 metre yerine 1,8 metre de düşünülebilir.

**Çizelge 2.3.** Minimum donatı boyu.

| Durum Minimum                      | L/H Oranları |
|------------------------------------|--------------|
| Statik veya Trafik Sürşarj Yükleme | 0.7          |
| Eğimli Geri Dolgu Yükleme          | 0.8          |
| Sismik Yükleme                     | 0.8-1.1      |

Genellikle, donatı uzunluğu, duvar boyunca homojen bir şekilde dağıtılmalıdır. Bazı özel yapı tiplerinde, duvarın temelinde donatı uzunluğu kısa olabilir, ancak bu durum tepe noktasında donatı tabakalarının daha uzun kullanılmasıyla telafi edilir. Bu tür özel yapılar dışında, donatı uzunluğu genellikle yapı boyunca dengeli bir şekilde dağıtılır. Duvarın gömülme derinliği, taşıma potansiyeli, oturma ve eğim dengelemesi için belirlenir. Minimum gömülme derinliği, Çizelge 2.4’de belirtildiği gibi en az 2 ft (0,6 m) olmalıdır. Taban betonu ise 20-40 cm kalınlığında ve 40 cm genişliğinde olabilir (Güler, 2006).

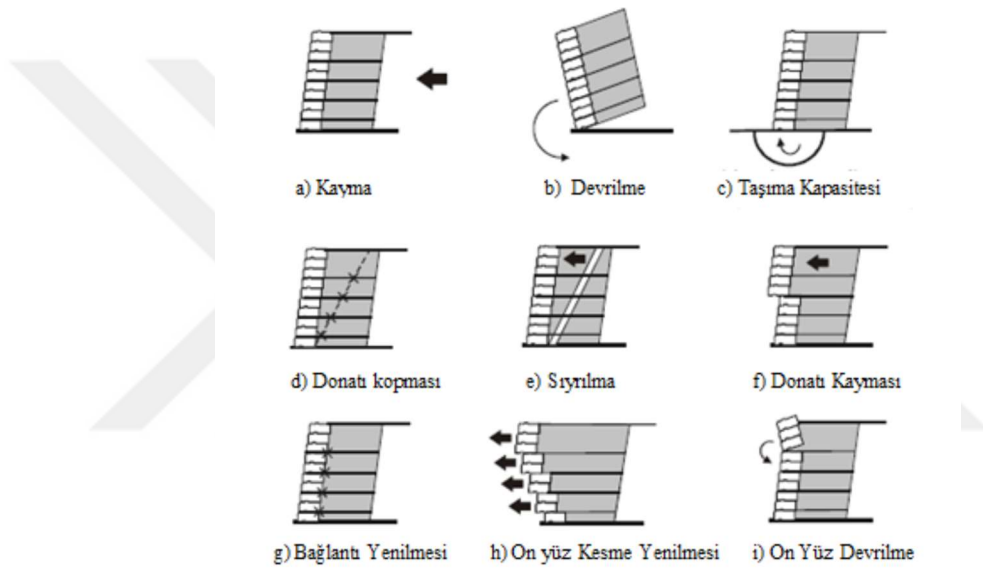
**Çizelge 2.4.** Duvar gömülme derinliği.

| Duvar Önündeki Eğim | Temel Ayağının Minimum Gömülme Derinliği |
|---------------------|------------------------------------------|
| Tüm Durumlarda      | 0,6 m Minimum                            |
| Yatay (Duvar)       | H/20                                     |
| Yatay (köprü ayağı) | H/10                                     |
| 3H:1V               | H/10                                     |
| 1H:1V               | H/7                                      |
| 1.5H:1V             | H/5                                      |

### 2.2.5.2 Geosentetik donatılı duvar tasarım ilkeleri

Genel olarak, donatılı destek duvarlarının tasarım ilkeleri, iç denge taleplerine cevap verilebilmesi için ve duvarın dış denge kontrolü olarak iki ana kategoriye bölünebilir. Şekil 2.22’de gerekli denge incelemelerinin nasıl yapıldığı gösterilmektedir.

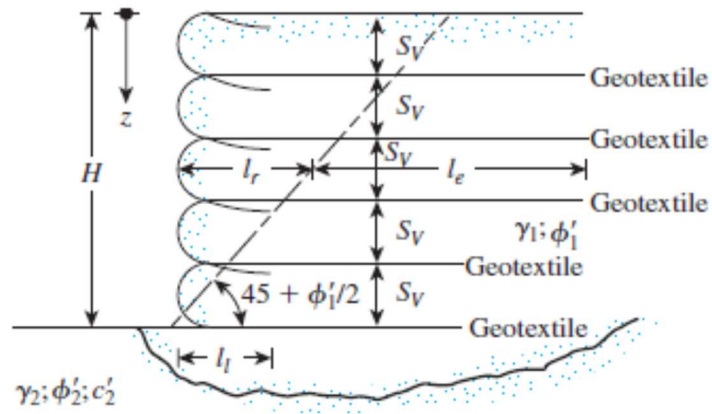
İç denge kontrolü, ön yüz elemanlarının bütünlük halinde değerlendirilmesini ve donatının çekme ile gerilme direncinin belirlenmesini içerir. Dış denge kontrolleri ise duvarın kayma, devrilme, taşıma kapasitesi ve toptan göçme direncini içerir (Das, 2011).



Şekil 2.22. Stabilite kontrolleri.

-İç denge hesaplamaları;

Şekil 2.23’de sunulan iç denge hesaplamalarını yapmak için, geosentetik donatılı duvarda donatı uzunluğu, gömülme uzunluğu ( $l_e$ ) ile Rankine uzunlukları ( $l_r$ ) toplamını temsil eder. Donatılar arası mesafe ise  $S_v$  olarak adlandırılır (Das, 2011).



Şekil 2.23. Donatı uzunluğu.

İlk olarak, aktif toprak basıncı hesaplanır, Eşitlik (2.1);

$$\sigma'_a = Ka \sigma'_0 = Ka \gamma_1 z \quad (2.1)$$

$Ka$  = Aktif Rankine toprak basıncı  $= \tan^2 (45 - \phi_1/2)$

$\gamma_1$  = Granüler dolgunun birim hacim ağırlığı

$\phi_1$  = Granüler dolgunun içsel sürtünme açısı

İzin verilebilir gerilme direnci ( $T_{all}$ ), donatı nihai gerilme direncinin ( $T_{ult}$ ) azaltma faktör katsayılarına bölünmesiyle hesaplanır. Donatı için izin verilebilir gerilme direnci aşağıdaki formülle bulunabilir (Koerner, 2005), Eşitlik (2.2);

$$T_{all} = \frac{T_{ult}}{RFid \times RFcr \times RFcdb} \quad (2.2)$$

$T_{ult}$  = Geogrid donatı nihai gerilme direnci

$RFid$  = Yapım hasarı için azaltma faktörü

$RFcr$  = Sürtünme için azaltma faktörü

$RFcdb$  = biyolojik ve kimyasal bozunma için azaltma faktörü

Önerilen azaltım değerleri Çizelge 2.5’de gösterilmiştir (Koerner, 2005).

**Çizelge 2.5.** Azaltma katsayıları.

|            |         |
|------------|---------|
| $RF_{id}$  | 1.1-1.4 |
| $RF_{cr}$  | 2-3     |
| $RF_{cdb}$ | 1.1-1.5 |

Donatı tabakaları arasındaki mesafenin herhangi bir z derinliğinde belirlenmesi:

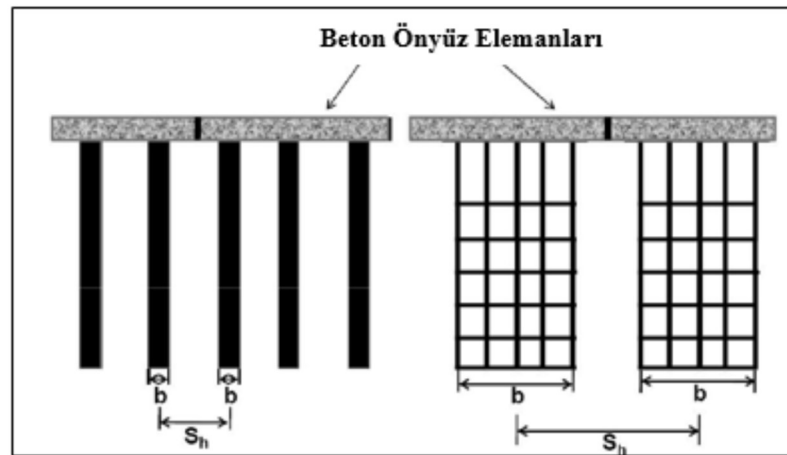
$$S_V = \frac{T_{all} C_r}{\sigma'_a FS_{(B)}} = \frac{T_{all} C_r}{(\gamma_1 HK_a)(FS_{(B)})} \quad (2.3)$$

$FS(B)$  = Güvenlik faktörü, bağlantının kopmasını engellemek için koruma sağlar ve genellikle 1,5 olarak belirlenir, Eşitlik (2.3).

$C_r$  = Geogrid için kaplama oranı (Şekil 2.24) hesaplanması, Eşitlik (2.4):

$$C_r = \frac{b}{s_h} \quad (2.4)$$

Sürekli donatılarda kaplama oranı 1 olmaktadır.



**Şekil 2.24.** Donatı kaplama tabakası oranı.

Geogrid donatı uzunluğu, Şekil 2.23'e başvurularak aşağıdaki şekilde belirlenir, Eşitlik (2.5), Eşitlik (2.6), Eşitlik (2.7) ile çözümlenir.

$$L = l_r + l_e \quad (2.5)$$

$$l_r = \frac{H-z}{\tan\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right)} \quad (2.6)$$

$$l_e = \frac{S_v K_a [FS(P)]}{2C_r C_i \tan \phi} \quad (2.7)$$

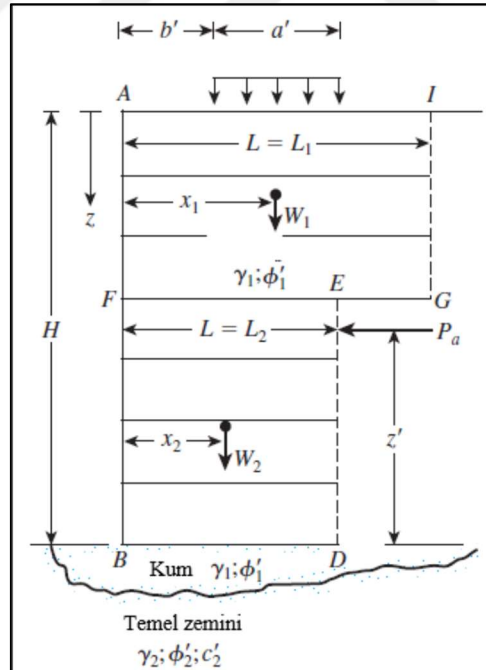
Zemin geogrid etkileşim oranı ( $C_i$ ), laboratuvar deneylerinden elde edilen verilere dayanarak belirlenebilir. Dolgu tiplerine göre yaklaşık  $C_i$  değerleri Tablo 2.6'da sunulmuştur.

**Çizelge 2.6.** Dolgu tipolojisine göre  $C_i$  katsayıları.

| Dolgu Türü                             | $C_i$    |
|----------------------------------------|----------|
| Çakıl, Kumlu Çakıl                     | 0.75-0.8 |
| İyi Derecelendirilmiş Kum, Çakıllı Kum | 0.6-0.75 |
| İyi Derecelendirilmiş Kum, Siltli Kum  | 0.55-0.6 |

-Dış denge hesaplamaları;

Etap 1: Duvarın devrilmesini önlemek için, yaklaşık olarak B noktasına göre duvara uygulanan devirme momentleri Şekil 2.25'de belirtilen yönlerde hesaplanır.



**Şekil 2.25.** Duvar üzerindeki tesir eden kuvvetler.

$$M_0 = P_a Z' \quad (2.8)$$

$$P_a = \text{Aktif Güç} = \int_0^H \sigma'_a dz \quad (2.9)$$

Duvarın uzunluğu boyunca devrilmesini önleyen momentler hesaplanır, Eşitlik (2.10) ve Eşitlik (2.11) formülleri;

$$M_R = W_1x_1 + W_2x_2 + \dots + qa' \left( b' + \frac{a'}{2} \right)$$

$$W_1 = (\text{alan } AFEGI)(1)(\gamma_1) \quad (2.10)$$

$$W_2 = (\text{alan } FBDE)(1)(\gamma_2)$$

$$FS_{(devrilme)} = \frac{M_R}{M_O} = \frac{W_1x_1 + W_2x_2 + \dots + qa' \left( b' + \frac{a'}{2} \right)}{\left( \int_0^H \sigma'_a dz \right) z'} \quad (2.11)$$

Etap 2. Kayma kontrolü, Eşitlik (2.12) 'e dayanarak gerçekleştirilir.

$$FS_{(kayma)} = \frac{(W_1 + W_2 + \dots + qa') [\tan(k\phi'_1)]}{P_a} \quad (2.12)$$

$k \cong 2/3$  alınabilir.

Etap 3: Taşıma gücü yenilmesi kontrolü için ilk olarak zeminin taşıma kapasitesi hesap edilir, Eşitlik (2.13);

$$q_{ult} = c'_2 N_2 + \frac{1}{2} \gamma_2 L_2 N_\gamma \quad (2.13)$$

$N_c$  ve  $N_q$  taşıma gücü kriterleri, içsel sürtünme açısına bağlı olarak Terzaghi taşıma gücü faktörlerinden elde edilen değerlerle hesaplamalara dahil edilir. Taşıma gücü yenilmesine karşı güvenlik kriteri şu şekilde Eşitlik (2.14) ile hesaplanabilir:

$$FSFS_{(taşıma \text{ gücü})} = \frac{q_{ult}}{\sigma'_{o(H)}} \quad (2.14)$$

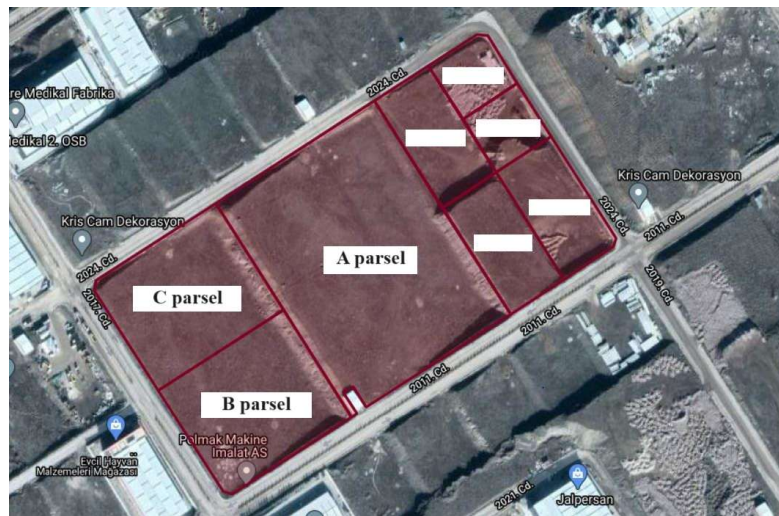
Tipik olarak, devrilme, kayma ve taşıma gücü yenilmesi için minimum güvenlik kriteri olarak 3 alınması önerilir.

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

Organize Sanayi Bölgesi sınırları içinde yer alan, bir arazide Lojistik Depo inşa edilecektir. Parselin arazi tesviye kotu yaklaşık +877m olarak belirlenmiştir. A parseline komşu olan B ve C parsellerin arazi kotları +862m'dir. Mevcut kotlara göre inşaat sahası olan A parseli ile alt kotta bulunan B ve C parselleri arasında 15 metre, kot farkı bulunmaktadır. Arazinin mevcut durumuna göre düşük ve yüksek kotlarda bulunan parsellerin arasında şevli bölgeler bulunmakta ve parsel sınırları bu şevlerin ortasından geçmektedir. Parsel kullanım alanlarını genişletmek ve parsel sınırlarına mümkün olduğu kadar yaklaşabilmek amacıyla alt kotta bulunan parsellerde zemin çivili ve püskürtme beton ile iksa kazısı yapılması, üst kotlarda bulunan parsellerde ise geogrid donatılı toprakarme duvar imalatı ile dolgu yapılması planlanmıştır. Bu tez kapsamında, Lojistik Deposunun inşa edileceği parsel sınırlarında uygulanmak üzere zemin çivili ve püskürtme beton ile iksa ve geosentetik donatılı toprakarme duvar projesi üzerinden nümerik analizleri yapılacaktır. Söz konusu A parseli için Mühendislik ve Jeoteknik firması tarafından hazırlanan “Zemin Etüt Raporu” ve Sondaj firması tarafından “Zemin Araştırma Veri Raporu” kullanılmıştır.

#### 3.1 Zemin Çivisi ve Toprakarme Duvar Projesinin Amacı

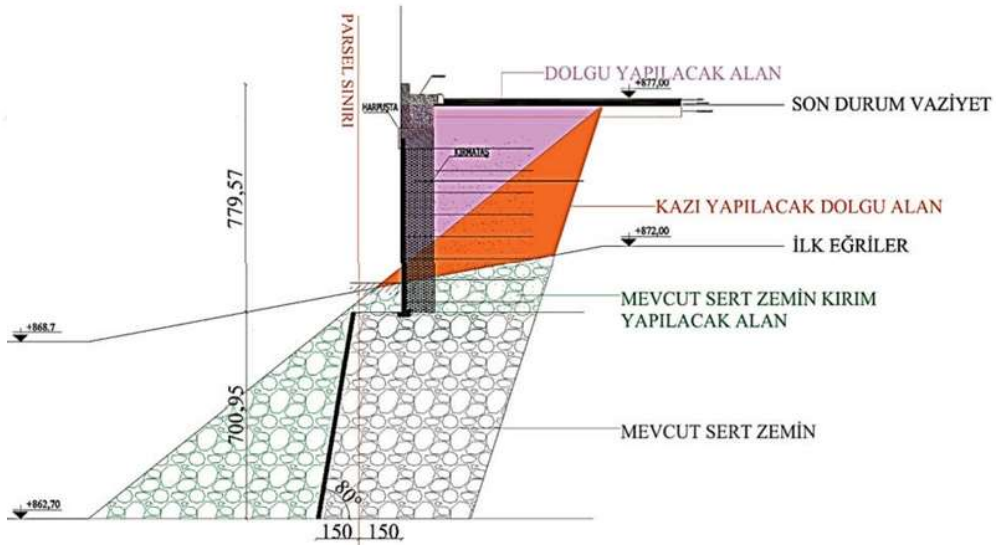
Organize Sanayi Bölgesi inşası planlanan Lojistik Depo A parselin üzerinde inşa edilecektir.



Şekil 3.1. A-B-C parsellerinin vaziyet planı.

Şekil 3.1’de görüldüğü üzere, inceleme alanı olan A parselin altında B ve C parseller bulunmaktadır. Söz konusu proje kapsamında A parselde inşa edilecek lojistik deposu için arazi tesviye kotu +877m olarak belirlenmiştir. Alt kotta bulunan B ve C parsellerin arazi kotu +862m’dir. A parsel ile komşu olan parsellerin sınırı, parseller arasındaki şevli bölgelerin ortasından geçmektedir. Parsel kenarlarındaki şevler nedeniyle alt ve üst kottaki parsellerde kullanılamayan alanlar oluşmaktadır. Parsel kullanım alanlarını genişletmek ve parsel sınırlarına mümkün olduğu kadar yaklaşabilmek amacıyla alt kotta bulunan parsellerde zemin çivili ve püskürtme beton ile iksa kazısı yapılması, üst kotlarda bulunan parsellerde ise geogrid donatılı toprakarme duvar imalatı ile dolgu yapılması planlanmaktadır.

İksa kazılarının uygun açı yapılabilmesi için alt kotlarda ve toprakarme duvar panellerinin temelleri ve panellerin yerleştirilmesi, çalışma payı vs. için üst kotlarda parsel sınırına kadar 1.5 metre çekme mesafesi bırakılması uygun görülmüştür. Hazırlanacak proje için örnek kesit aşağıdaki şekilde verilmiştir.



**Şekil 3.2.** Planlanan imalatların kesit görünüşü.

Şekil 3.2’de görüldüğü üzere, üst kotta bulunan A parselinde parsel alanını genişletmek için geogrid donatılı toprakarme duvar imalatı, alt kotta bulunan B ve C parsellerinde zemin çivili ve püskürtme beton uygulamalı kazı yapılacaktır. Mevcut zemin koşullarının ve arazideki zemin profilinin belirlenerek zemin parametrelerinin tayin edilebilmesi amacıyla söz konusu sahada Ekim 2020 tarihinde zemin etüt çalışmaları

yapılmış ve bu kapsamda “Zemin Etüt Raporu” ve “Zemin Araştırma Veri Raporu” hazırlanmıştır.

### 3.2 Arazinin Durumu ve Zemin Etüt Çalışmaları Hakkında Bilgiler

#### 3.2.1 Zemin etüt raporu

Yapılan çalışmalarda arazi çalışmalarında 3 adet zemin sondajı ve 3 adet araştırma çukuru açılmış, 5 profilde jeofizik ölçüm yapılmıştır. İnşaat sahasında yapılan sondajlar 3'er metre olmak üzere toplam 9 metre derinliğinde açılmış, 1,5 metre derinlikte karot numuneleri alınmış ve 2 metre derinlikte presiyometre deneyi yapılmıştır. Sahada yapılan jeofizik ölçümler neticesinde Çizelge 3.1'de yüzeyde 1.tabaka için kayma dalgası hızları  $V_{s1}=148-272$  m/sn, 2.tabaka için ise  $V_{s2}=469-612$  m/sn ölçülmüştür. 1.tabakanın Elastisite Modülü  $E_1=1252-4296$  kg/cm<sup>2</sup>, 2.tabakanın Elastisite Modülü ise  $E_2=13400-22563$  kg/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 3.1.** Sismik ölçüm sonuçları (Zemin Etüt Raporundan alınmıştır).

| Sismik Profiller | Tabakalar | P Dalga Hızı (Vp) | S Dalga Hızı (Vs) | Vs(30) |
|------------------|-----------|-------------------|-------------------|--------|
| Serim-1          | 1. Tabaka | 1524              | 211               | 473,00 |
|                  | 2. Tabaka | 2003              | 469               |        |
| Serim-2          | 1. Tabaka | 1455              | 148               | 498,00 |
|                  | 2. Tabaka | 2029              | 612               |        |
| Serim-3          | 1. Tabaka | 1592              | 272               | 497,00 |
|                  | 2. Tabaka | 1990              | 565               |        |
| Serim-4          | 1. Tabaka | 1526              | 213               | 511,00 |
|                  | 2. Tabaka | 2101              | 578               |        |
| Serim-5          | 1. Tabaka | 1513              | 201               | 468,00 |
|                  | 2. Tabaka | 2046              | 482               |        |

**Çizelge 3.2.1. Sismik ölçüm sonuçları (Zemin Etüt Raporundan alınmıştır).**

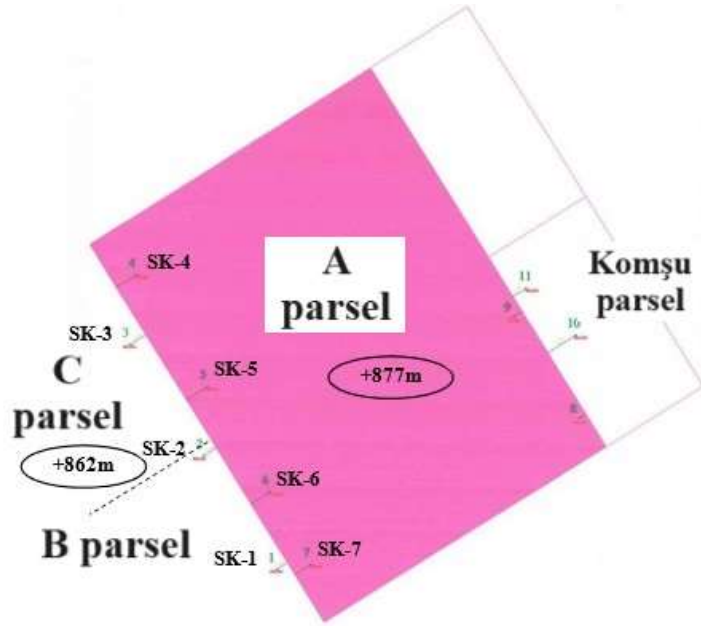
| Ölçü No | Tabaka No | Ed    | Dayanım      |
|---------|-----------|-------|--------------|
| Serim-1 | 1         | 2566  | Zayıf sağlam |
|         | 2         | 13400 |              |
| Serim-2 | 1         | 1252  | Zayıf sağlam |
|         | 2         | 22563 |              |
| Serim-3 | 1         | 4296  | Zayıf sağlam |
|         | 2         | 19220 |              |
| Serim-4 | 1         | 2616  | Zayıf sağlam |
|         | 2         | 20430 |              |
| Serim-5 | 1         | 2326  | Zayıf sağlam |
|         | 2         | 14225 |              |

3 metre derinliğe kadar yapılan sondajlardan alınan karotların RQD değerlerine göre zemin profilini oluşturan kaya birimler orta derecede ayrılmış (W3) durumdadır. Ayrıca yüzeyden 8 metre derinliğe kadar değişen derinlikte dolgu birimin gözlendiği belirtilmiştir.

### **3.2.2 Zemin araştırma veri raporu**

Mühendislik firması tarafından yapılan sondajların inceleme sahasının içinde yapılmış olması, kaya birimin yüzeyde bulunması ve sondaj derinliklerinin 3 metrede bırakılmış olması gibi sebeplerden dolayı, parsel sınırlarında yapılacak iksa kazıları ve toprakarme duvar tasarımı için parsel sınırlarında yeni sondajların açılması ve yeni bir zemin etüt çalışmasının yapılması zaruri olmuştur.

Ekim 2020 tarihinde aynı sahada zemin etüt çalışmaları yapılmış ve “Zemin Araştırma Veri Raporu” hazırlanmıştır. Etüt çalışmaları kapsamında 11 adet sondaj kuyusu açılmış ve 4 adet kuyuda 18 adet presiyometre deneyi yapılmıştır.



**Şekil 3.3.** Yapılan sondajların yerleri ve parsellerin arazi kotları.

Yapılan çalışmalara göre Şekil 3.3’de zemin profilinin SK-1 ve SK-3 sondajlar dışında 0,5-7,4 metre derinliklere kadar yerel malzemeden oluşmuş serbest dolgu birim, 3,1-10,5 metre derinlikleri arasında zayıf-çok zayıf durumda ayrılmış andezit birim, onun altında ise orta-iyi kaya kalitesinde andezit birimden oluştuğu görülmüştür.

**Çizelge 3.3.** Yapılan sondaj verileri (zemin araştırma veri raporundan alınmıştır).

| Sondaj No. | Kot(m.) | Derinlik (m.) |
|------------|---------|---------------|
| SK-1       | 862,467 | 12,00         |
| SK-2       | 862,329 | 12,00         |
| SK-3       | 861,874 | 14,00         |
| SK-4       | 876,503 | 18,00         |
| SK-5       | 876,916 | 17,00         |
| SK-6       | 877,093 | 18,00         |
| SK-7       | 876,489 | 17,00         |

Sondajlardan alınan karot numunelerinin özelliklerine göre:

Ayrışmış andezit birimde Karot yüzdesi: %50- %80 aralığında

RQD : %0 - %55 aralığında

Sağlam andezit birimde Karot yüzdesi: %68- %100 aralığında

RQD : %50- %96 aralığında gözlenmiştir.

Sondaj kuyularında yeraltı suyu gözlemlerinin yapıldığı ancak yeraltı suyun rastlamadığı belirtilmiştir. Zemin tabakalanması Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'te gösterilmektedir.

**Çizelge 3.4.** Sondajlarda karşılaşılan zemin tabakalanması.

| Sondaj No: | Derinlik (m) | Açıklama                                  |
|------------|--------------|-------------------------------------------|
| SK-1       | 0.0 – 4.5    | Çok zayıf – zayıf kaya (ayrışmış andezit) |
|            | 4.5 – 12.0   | Orta – iyi kaya (andezit)                 |
| SK-2       | 0.0 – 1.2    | Dolgu                                     |
|            | 1.2 – 3.1    | Çok zayıf – zayıf kaya (ayrışmış andezit) |
|            | 3.1 – 12.0   | Orta – iyi kaya (andezit)                 |
| SK-3       | 0.0 – 4.5    | Çok zayıf – zayıf kaya (ayrışmış andezit) |
|            | 4.5 – 14.0   | Orta – iyi kaya (andezit)                 |
| SK-4       | 0.0 – 5.1    | Dolgu                                     |
|            | 5.1 – 9.1    | Çok zayıf – zayıf kaya (ayrışmış andezit) |
|            | 9.1 – 18.0   | Orta – iyi kaya (andezit)                 |
| SK-5       | 0.0 – 4.8    | Dolgu                                     |
|            | 4.8 – 7.4    | Çok zayıf – zayıf kaya (ayrışmış andezit) |
|            | 7.4 – 17.0   | Orta – iyi kaya (andezit)                 |
| SK-6       | 0.0 – 4.5    | Dolgu                                     |
|            | 4.5 – 7.5    | Çok zayıf – zayıf kaya (ayrışmış andezit) |
|            | 7.5 – 18.0   | Orta – iyi kaya (andezit)                 |
| SK-7       | 0.0 – 7.4    | Dolgu                                     |
|            | 7.4 – 10.5   | Çok zayıf – zayıf kaya (ayrışmış andezit) |
|            | 10.5 – 17.0  | Orta – iyi kaya (andezit)                 |

**Çizelge 3.5.** Presiyometre deney sonuçları (zemin etüt raporundan alınmıştır).

| SK-1 | Derinlik<br>(m) | Limit Basınç<br>PL<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | Net Limit<br>Basınç<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | Elastisite<br>Modülü<br>E <sub>m</sub><br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|------|-----------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|      | 3,00            | 70,00                                       | 69,50                                        | 7858                                                            |
|      | 6,00            | 70,00                                       | 69,40                                        | 30840                                                           |
|      | 9,00            | 70,00                                       | 69,40                                        | 13697                                                           |
|      | 12,00           | 70,00                                       | 69,40                                        | 17402                                                           |
| SK-6 | Derinlik<br>(m) | Limit Basınç<br>PL<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | Net Limit<br>Basınç<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | Elastisite<br>Modülü<br>E <sub>m</sub><br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|      | 3,00            | 70,00                                       | 69,50                                        | 5772                                                            |
|      | 6,00            | 70,00                                       | 69,50                                        | 7824                                                            |
|      | 9,00            | 70,00                                       | 69,40                                        | 20560                                                           |
|      | 12,00           | 70,00                                       | 69,40                                        | 13697                                                           |
|      | 15,00           | 70,00                                       | 69,40                                        | 13815                                                           |
|      | 18,00           | 70,00                                       | 69,40                                        | 20226                                                           |

Laboratuvarda yapılan deney sonuçlarına göre karot numunelerinin birim hacim ağırlık, nokta yükleme ve tek eksenli basınç dayanımları aşağıdaki Çizelge 3.6’da verilmiştir.

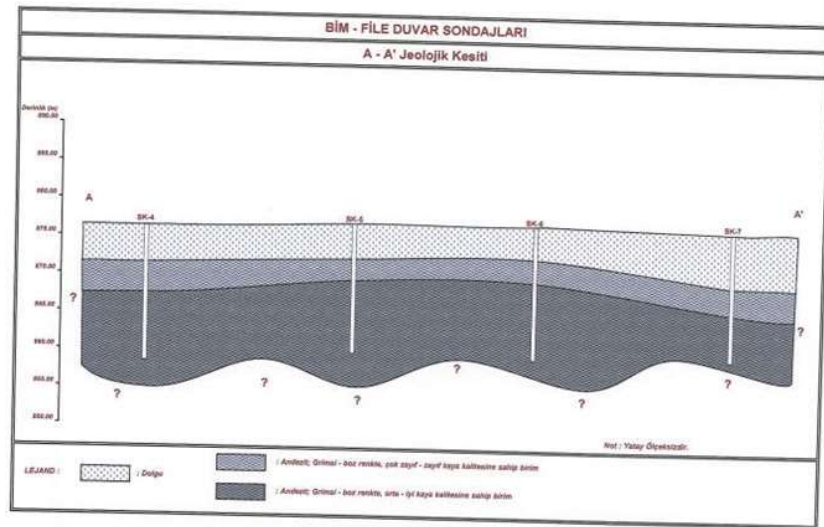
**Çizelge 3.6.** Laboratuvar deney sonuçları (zemin etüt raporundan alınmıştır).

| Sondaj<br>Kuyusu<br>Adı | Tipi ve<br>Adı | Derinlik<br>(m.) | Doğal<br>Birim<br>Hacim<br>Ağırlık | Nokta<br>Yükleme<br>(kPa) | Tek eksenli<br>Basınç<br>Dayanımı<br>(Kaya)<br>(MPa) |
|-------------------------|----------------|------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------|
| SK-1                    | CR-            | 1,50-3,00        | 2,25                               | 2217,99                   | 41,95                                                |
| SK-1                    | CR-            | 6,00-7,50        | -                                  | -                         | 44,78                                                |
| SK-1                    | CR-            | 10,50-12,00      | 2,3                                | 2517,32                   | 48,02                                                |
| SK-2                    | CR-            | 3,00-4,50        | 2,21                               | 2119,68                   | 44,84                                                |
| SK-2                    | CR-            | 7,50-9,00        | -                                  | -                         | 45,34                                                |
| SK-3                    | CR-            | 1,50-3,00        | -                                  | -                         | 49,71                                                |
| SK-3                    | CR-            | 4,50-6,00        | 2,26                               | 2414,59                   | 47,8                                                 |
| SK-3                    | CR-            | 9,00-10,50       | -                                  | -                         | 41,58                                                |
| SK-4                    | CR-            | 4,50-6,00        | -                                  | -                         | 42,3                                                 |
| SK-4                    | CR-            | 7,50-9,00        | 2,28                               | 2322,43                   | 44,81                                                |
| SK-4                    | CR-            | 16,50-18,00      | -                                  | -                         | 45,49                                                |
| SK-5                    | CR-            | 4,50-6,00        | 2,21                               | 2281,35                   | 45                                                   |
| SK-5                    | CR-            | 9,00-10,50       | 2,19                               | 2428,42                   | 46,04                                                |
| SK-5                    | CR-            | 13,50-15,00      | -                                  | -                         | 49,62                                                |

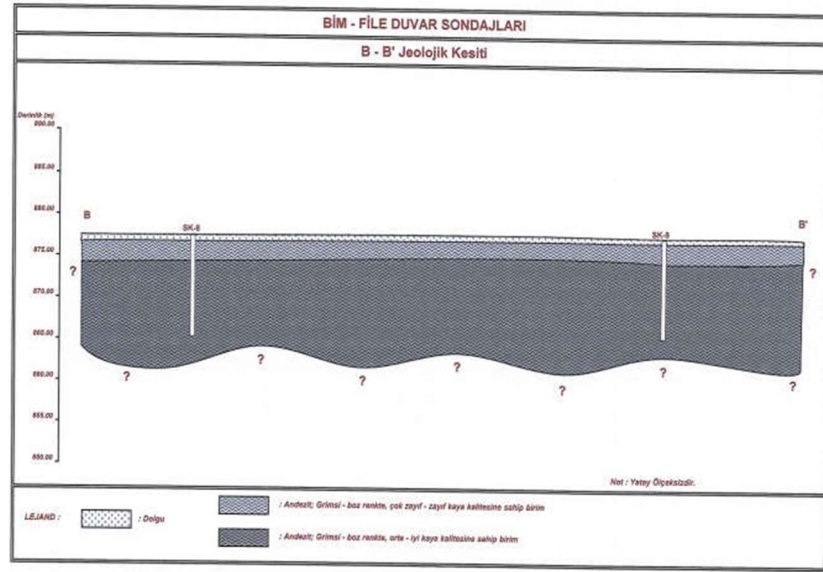
**Çizelge 3. 6 (devam).** Laboratuvar deney sonuçları (zemin etüt raporundan alınmıştır).

| Sondaj Kuyusu Adı | Tipi ve Adı | Derinlik (m.) | Doğal Birim Hacim Ağırlık | Nokta Yükleme (kPa) | Tek eksenli Basınç Dayanımı (Kaya) (MPa) |
|-------------------|-------------|---------------|---------------------------|---------------------|------------------------------------------|
| SK-6              | CR-         | 6,00-7,50     | 2,3                       | 2474,5              | 50,01                                    |
| SK-6              | CR-         | 10,50-12,00   | -                         | -                   | 49,23                                    |
| SK-6              | CR-         | 15,00-16,50   | 2,21                      | 2566,66             | 48,72                                    |
| SK-7              | CR-         | 7,50-9,00     | 2,21                      | 2514,11             | 50                                       |
| SK-7              | CR-         | 12,00-13,50   | 2,26                      | 2851,69             | 41,6                                     |
| SK-7              | CR-         | 15,00-17,00   | -                         | -                   | 44,96                                    |

Sondaj verilerine göre arazi için çıkarılan iki jeolojik kesit Şekil 3.4 ve 3.5’de verilmektedir.



**Şekil 3.4.** A-A' jeolojik kesiti.



**Şekil 3.5. B-B' jeolojik kesiti.**

Söz konusu inceleme alanında hâkim zemin formasyonu olan sağlam andezit kaya için GSI (jeolojik mukavemet indeksi) sınıflandırması yapılmış ve kaya birimler iyi olarak sınıflandırılmıştır.

### 3.3 Toprakarme ve Zemin Çivili Bir Derin Kazı Uygulaması

Lojistik Deposunun inşa edileceği A parseline komşu olan ve düşük kotta bulunan B-C parsellerinin kullanım alanını büyütmek amacıyla iksa kazısı ve dolgu imalatları yapılacaktır. Düşük kotta bulunan arazilerde, parsel sınırına yaklaşacak şekilde genişletme yapılabilmesi için zemin çivisi ve püskürtme beton iksa uygulaması, yüksek kottaki araziler için ise geogrid donatılı toprakarme duvar imalatları yapılacaktır. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere, lojistik deponun inşa edileceği A parselinin arazi kotu +877m’de bulunurken düşük kottaki komşu B-C parsellerinin arazi kotu +862m’de bulunmaktadır ve aralarında 15 metrelik kot farkı vardır. Geogrid donatılı toprakarme duvarların ve zemin çivili püskürtme beton iksa duvarlarının tasarımında sonlu elemanlar analizleri kullanılarak çivilerde ve duvarlardaki deplasmanlar hesaplanmış, çivilerdeki ve donatılardaki yükler elde edilmiştir. Toprakarme duvarların stabilite hesaplarında ve geogrid donatıların belirlenmesinde ise limit denge analizleri yapılmıştır. Analizlerde ve tasarımda kullanılmak üzere belirlenen zemin parametreleri ve yapısal eleman özellikleri (püskürtme beton, zemin çivisi, geogridler, betonarme paneller) Tablo 3.7 ve Tablo 3.8’de verilmiştir.

**Çizelge 3.7. Zemin parametreleri.**

| ZEMİN PARAMETRELERİ                                |                |                |                   |                |
|----------------------------------------------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|
| Parametre                                          | Tabii Dolgu    | Toprakarme     | Üst Zayıf Andezit | Alt Sağlam     |
|                                                    |                | Geri Dolgu     | (ayrışmış)        | Andezit        |
| Bünye Modeli                                       | Hardening Soil | Hardening Soil | Hardening Soil    | Hardening Soil |
| Malzeme Tipi                                       | Drenajlı       | Drenajlı       | Drenajlı          | Drenajlı       |
| Birim Hacim Ağırlık, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 17.0           | 20.0           | 21.0              | 22.0           |
| Doygun B.H.A, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )        | 18.0           | 21.0           | 22.0              | 23.0           |
| Deviatorik ref. modülü, $E^{ref}$ (kPa)            | -              | -              | 100.0E3           | 250.0E3        |
| Sıkışma ref. modülü, $E^{ref}$ (kPa)               | -              | -              | 100.0E3           | 250.0E3        |
| Yük. -boş. modülü, $E^{ref}$ (kPa)                 | -              | -              | 300.0E3           | 750.0E3        |
| Elastisite Modülü, $E$ (kPa)                       | 30.0E3         | 35.0E3         | -                 | -              |
| Poisson Oranı, $\nu'$                              | 0.35           | 0.25           | 0.25              | 0.20           |
| Efektif kohezyon, $c'$ (kPa)                       | 10             | 5              | 50                | 100            |
| Kayma mukavemeti açısı, $\phi'$ (°)                | 35             | 38             | 35                | 40             |
| Genişleme açısı, $\psi$ (°)                        | 5              | 8              | 5                 | 10             |

**Çizelge 3.8. Yapısal eleman özellikleri.**

| YAPISAL ELEMANLAR                             |                     |                        |                      |                          |                          |
|-----------------------------------------------|---------------------|------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| Parametre                                     | Duvar Paneli (15cm) | Püskürtme Beton (20cm) | Zemin Çivisi (□32mm) | Geogrid Donatı (37.5 kN) | Geogrid Donatı (50.0 kN) |
| Malzeme Tipi                                  | Elastik             | Elastik                | Elastik              | Elastik                  | Elastik                  |
| Normal Rijitlik, $EA$ (kN/m)                  | 3.75E6              | 5.6E6                  | 152.0E3              | 1.8E3                    | 2.5E3                    |
| Eğilme Rijitliği, $EI$ (kN.m <sup>2</sup> /m) | 7.0E3               | 18.67E3                | -                    | -                        | -                        |
| Ağırlık, $w$ (kN/m/m)                         | 3.75                | 5.0                    | -                    | -                        | -                        |
| Poisson Oranı, $\nu$                          | 0.2                 | 0.2                    | -                    | -                        | -                        |
| L-mesafe (m)                                  | -                   | -                      | 2                    | -                        | -                        |



dolgu serilerek saha betonu ve asfalt kaplama yapılacaktır. Toprakarme duvar tasarımında söz konusu dolgu ve ilave araç yükleri sürüş yükü olarak hesaba katılmıştır.

Tasarımda geogrid donatıların özellikleri, kullanılacak malzemelerin çekme dayanımları ve uzun süreli mukavemetleri dikkate alınarak kullanılmıştır. Çizelge 4.1’de kullanılan malzemenin nitelikleri özetlenmektedir. Bu nedenle imalatlar sırasında bu özelliklere sahip malzemelerin kullanılması önem arz etmektedir. Yapılan hesaplar sonucunda toprakarme duvar ve geogrid donatılar için stabilite sonuçları aşağıda verilmiştir.

İksa kazısı ve toprakarme duvardan oluşan sistemin genel stabilitesinin kontrolü için ise kazı bölgesinde düşeyde 4 sıra zemin çivisi uygulanmış ve ilk aşamada genel stabilite bu durum için kontrol edilmiştir.

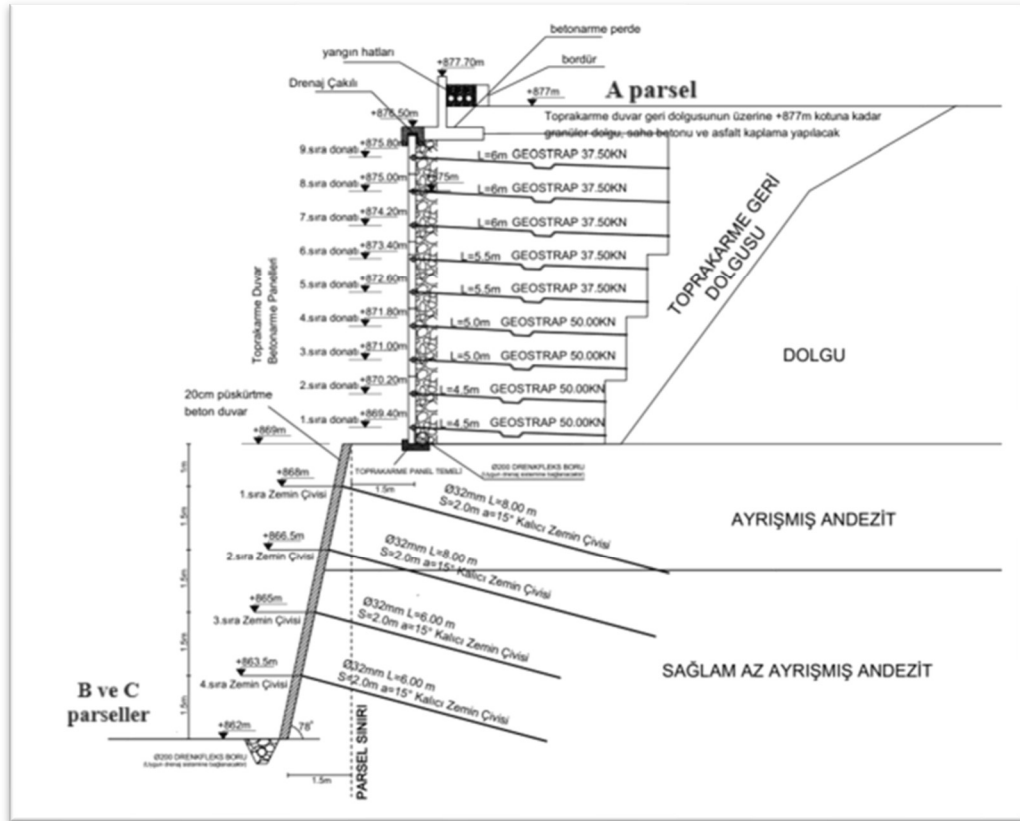
**Çizelge 4.1.** Toprakarme duvarda kullanılan geogrid donatı özellikleri.

| Geogrid Donatı Tipi  | Donatı Çekme Dayanımı,<br>$T_{ult}$ (kN/m) | Donatı uzun süreli tasarım<br>dayanımı, $R_t$ (kN/m) (kullanım<br>süresi 60 yıl) * |
|----------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Geogrid Donatı TİP-1 | 37.5                                       | 27.0                                                                               |
| Geogrid Donatı TİP-2 | 50.0                                       | 38.0                                                                               |

Yapılan hesaplara göre, 9 sıra geogrid donatı kullanılması ve iksa kazısı yapılarak düşeyde dört sıra zemin çivisi imal edilmesi durumunda genel stabilite probleminin olmadığı ve toprakarme duvarın iç ve dış stabilite tahkiklerinin sağlandığı görülmektedir.

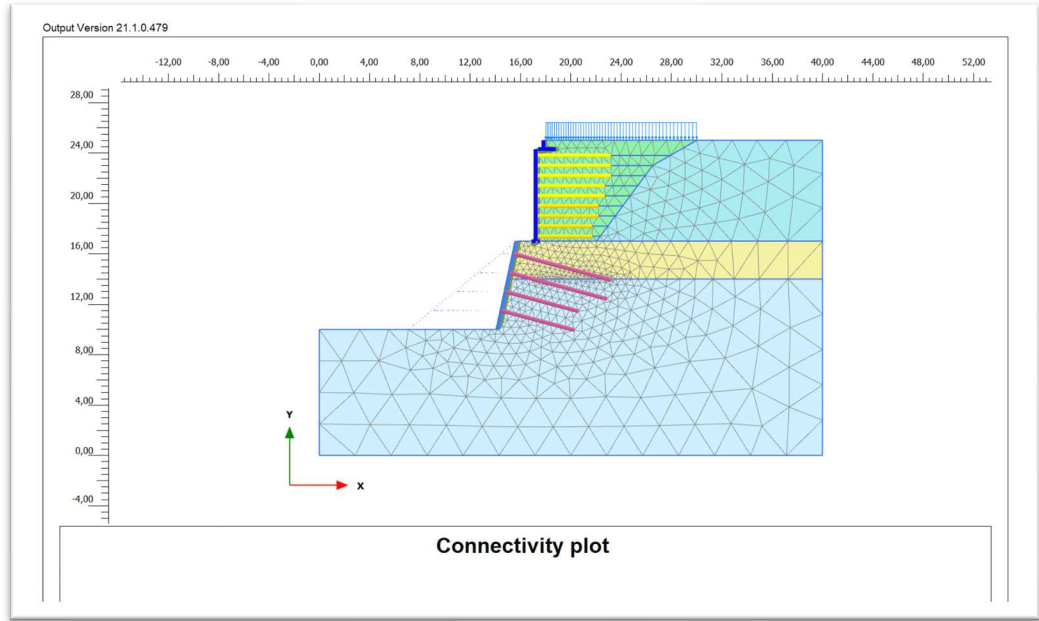
#### 4.1.2 Zemin çivili ve püskürtme beton iksa

Düşük ve yüksek kotta bulunan parsellerin, parsel sınırına kadar genişletilmesi için iksa kazısı yapılması gerektiği yukarıdaki bölümlerde belirtilmiştir. Arazi kotları, yapılacak imalatlar ve kazı/dolgu alanları Şekil 4.2’de verilmiştir. Modelleme sürecinde, iksa sistemi üzerine  $20 \text{ kN/m}^2$  büyüklüğünde bir sürşarj yükü uygulanmış ve bu yük etkisi altında sistemin davranışları incelenmiştir.

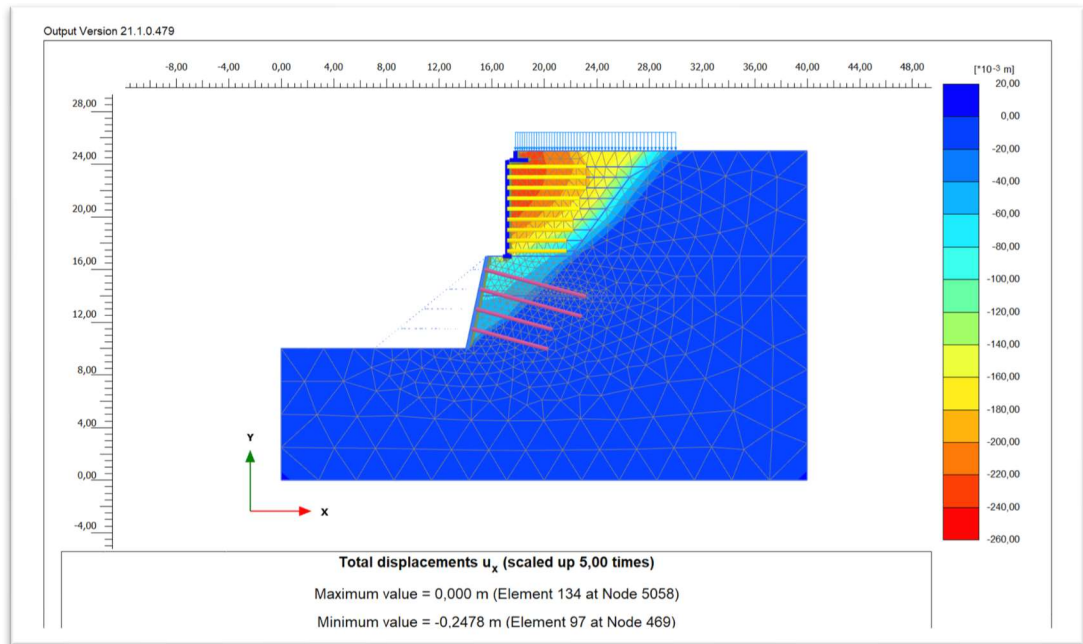


Şekil 4.2. Arazi kotları, yapılacak imalatlar ve kazı/dolgu alanlarının kesiti.

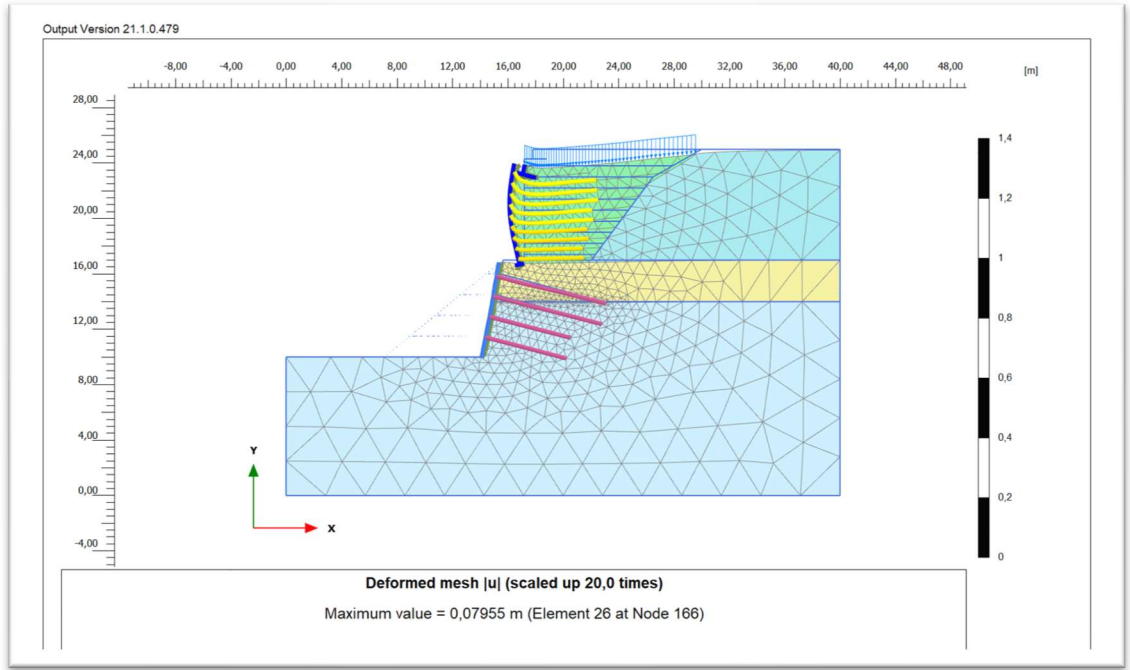
Yukarıda özetlenen bilgiler çerçevesinde yürütülen sonlu elemanlar analizleri Şekil 4.3 ile 4.20 arasında gösterilmektedir.



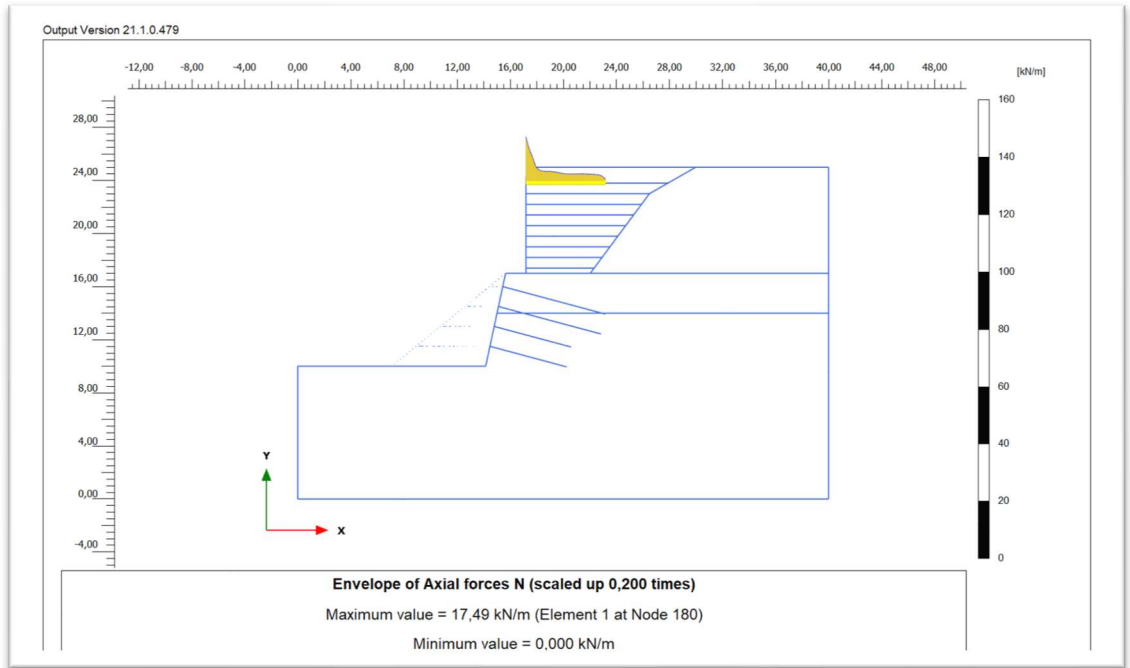
Şekil 4.3. İksa ve toprakarme duvar için oluşturulan analiz modeli.



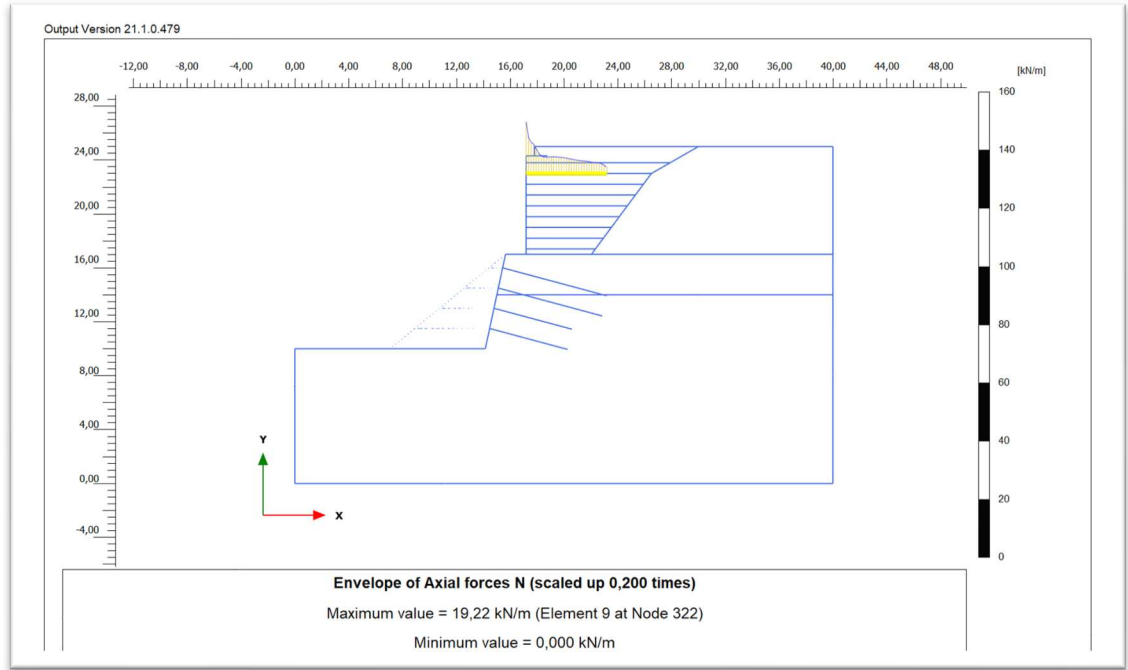
Şekil 4.4. Tasarlanan sistem imal edilmesi durumunda (Safety Analizi).



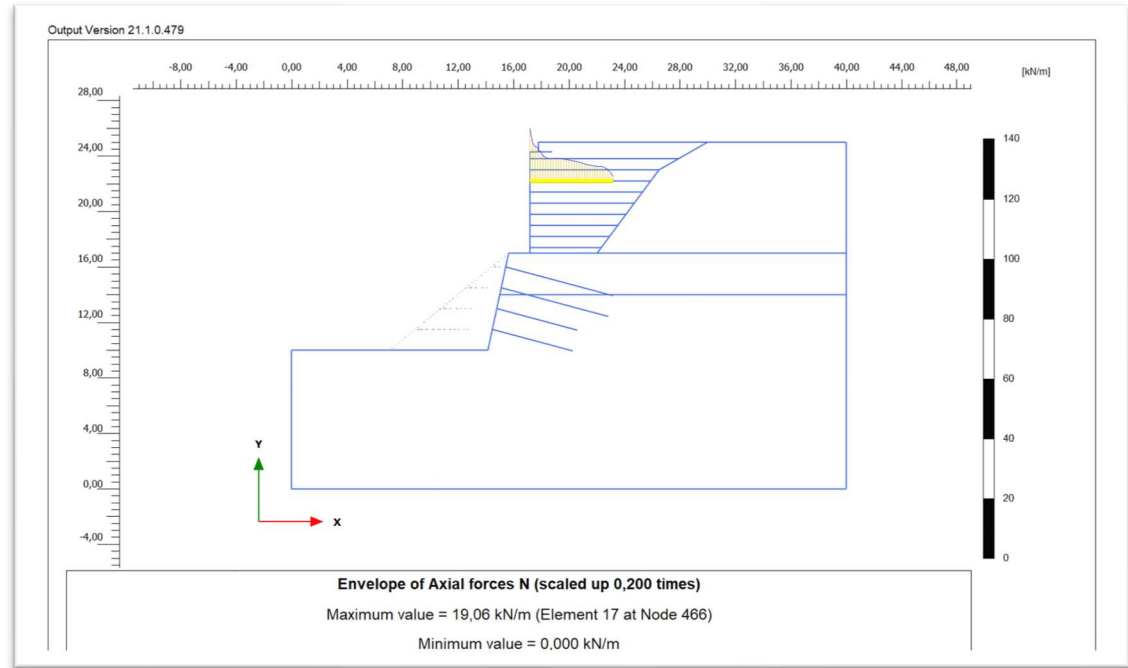
Şekil 4.5. Tasarlanan sistem imal edilmesi durumunda deforme olan ağ yapısı.



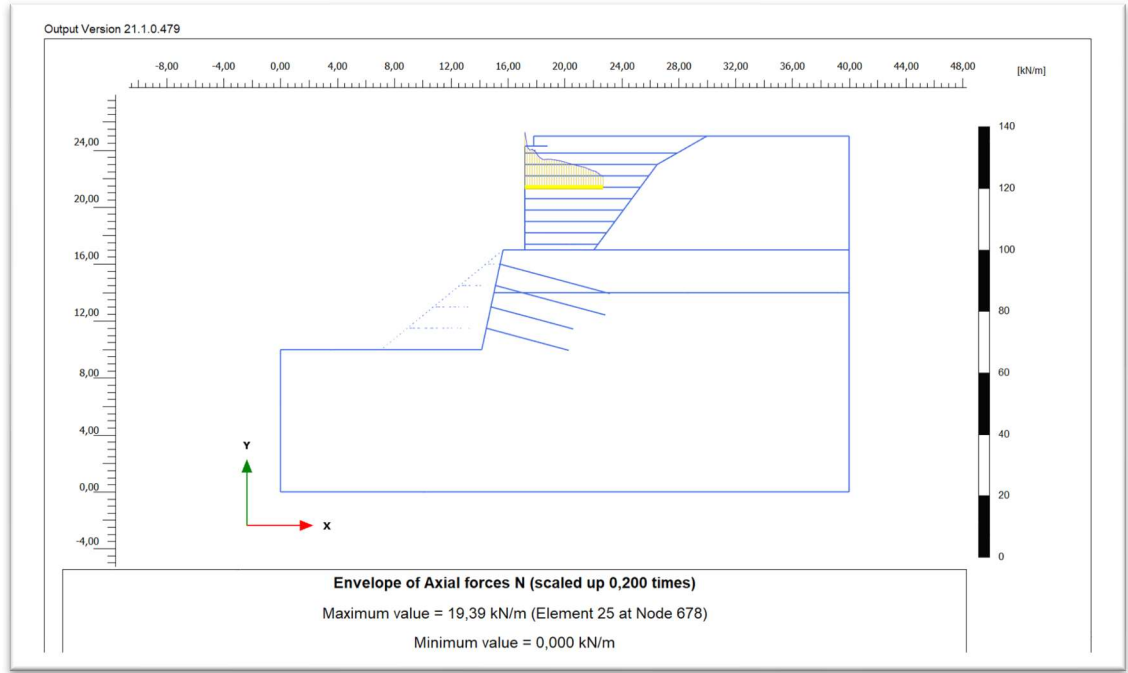
Şekil 4.6. Statik durumda 9.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler.



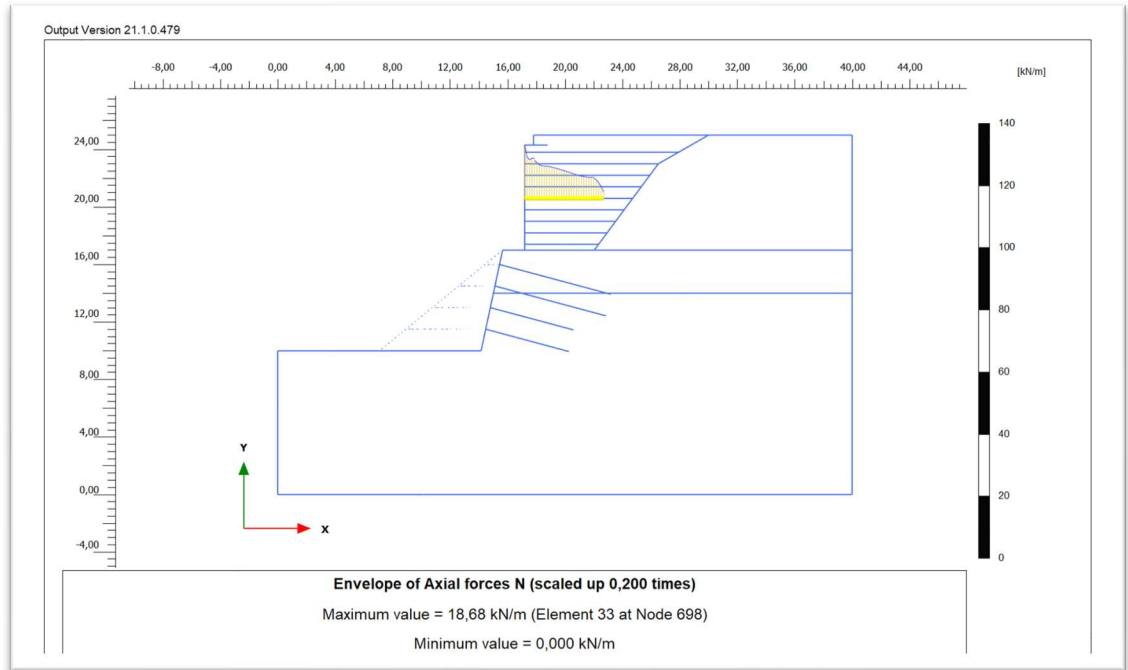
Şekil 4.7. Statik durumda 8.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler.



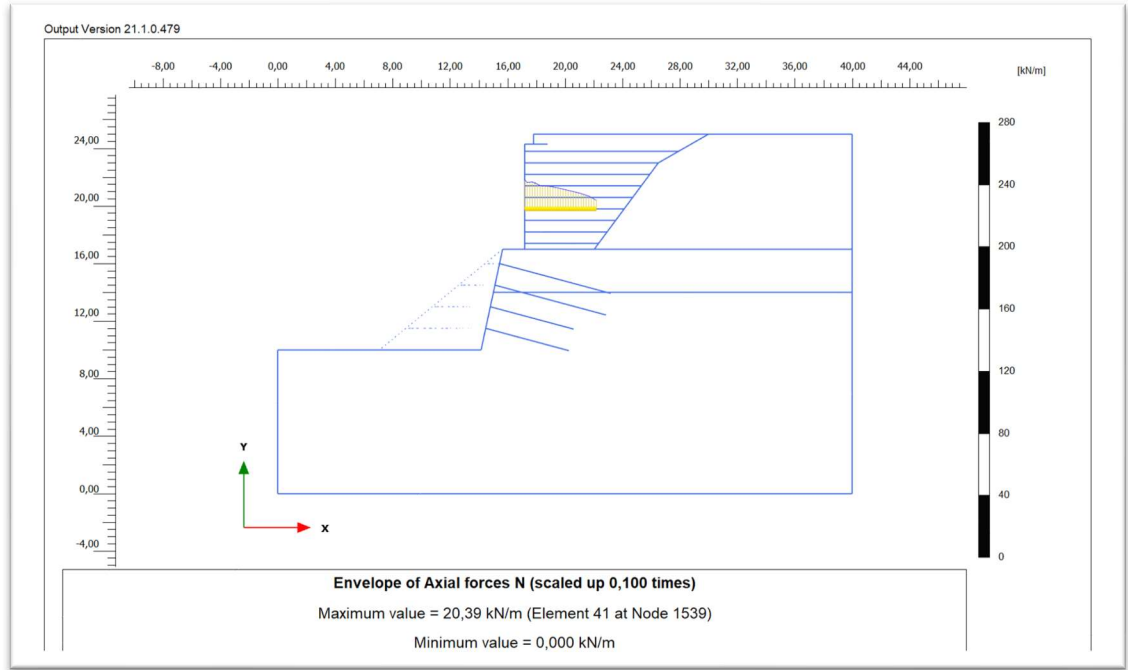
Şekil 4.8. Statik durumda 7.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler.



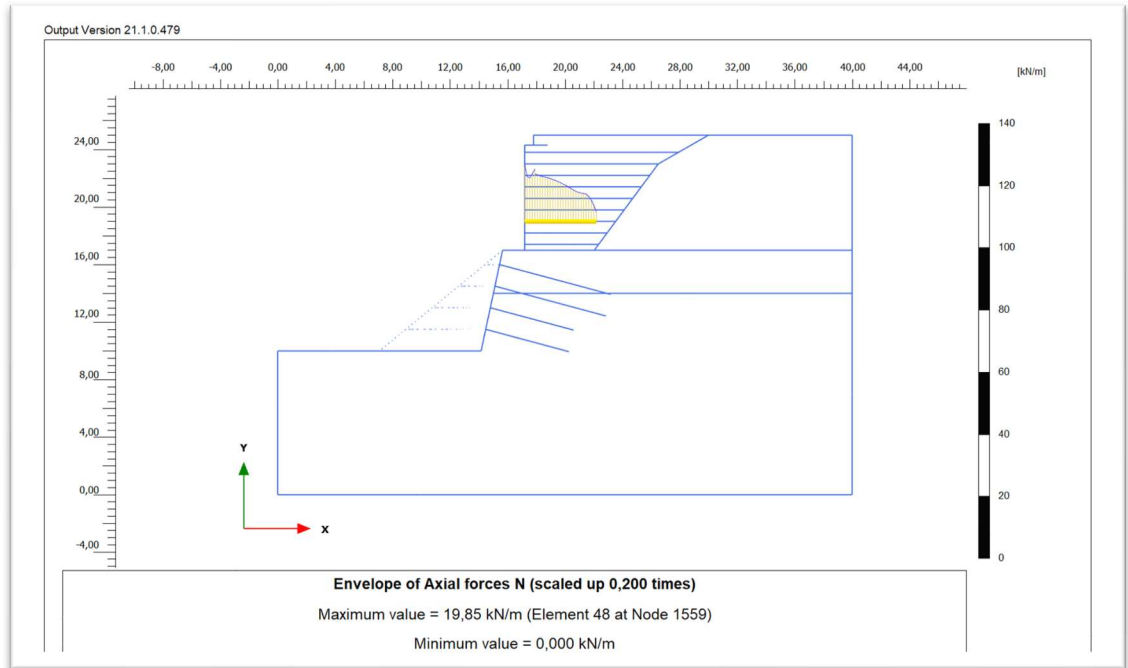
Şekil 4.9. Statik durumda 6.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler.



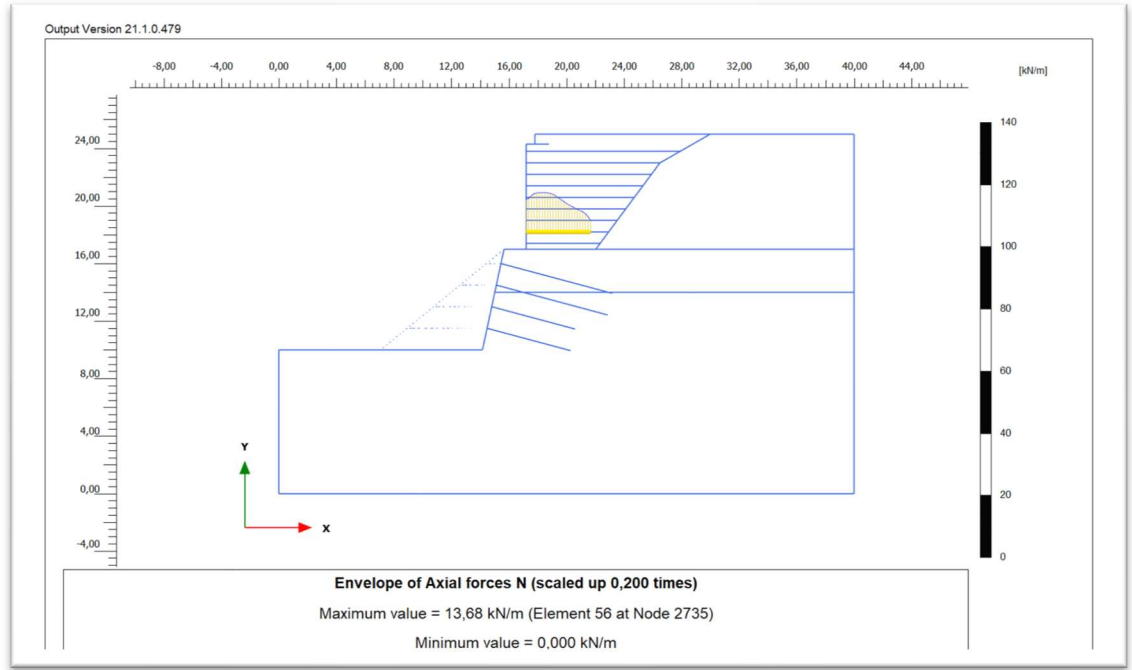
Şekil 4.10. Statik durumda 5.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler.



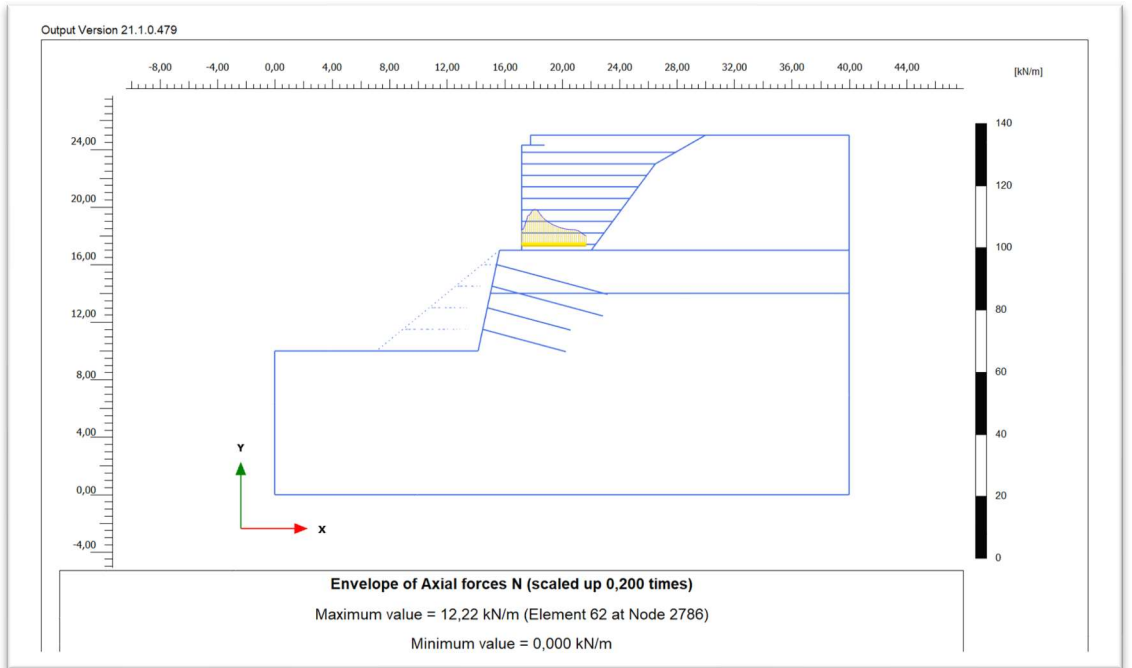
Şekil 4.11. Statik durumda 4.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler.



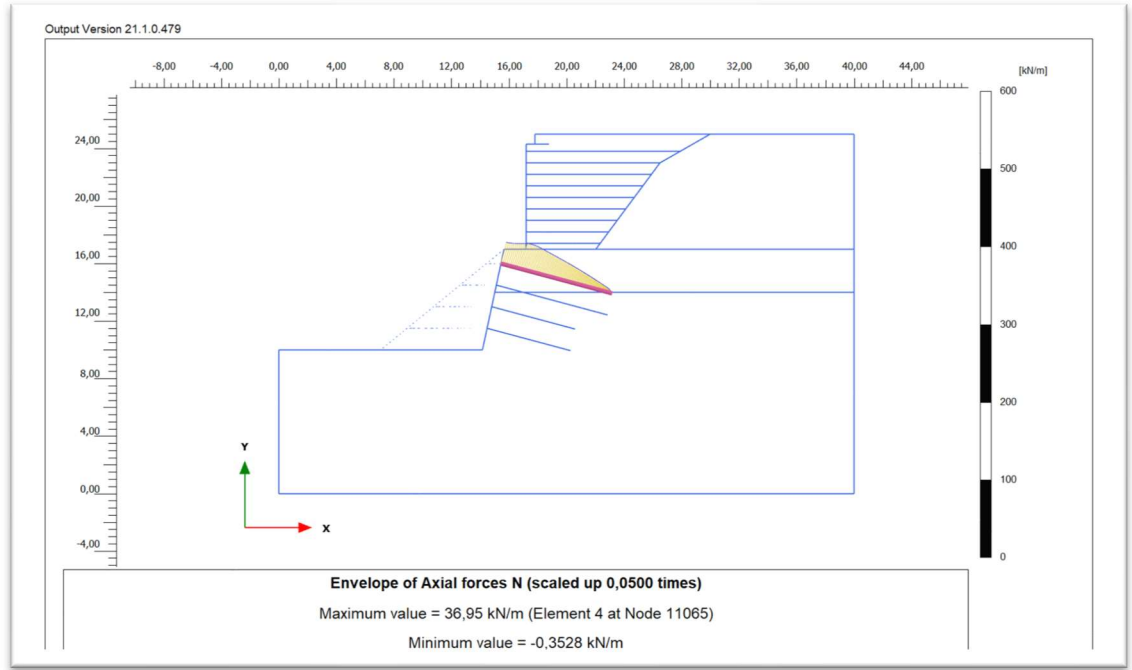
Şekil 4.12. Statik durumda 3.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler.



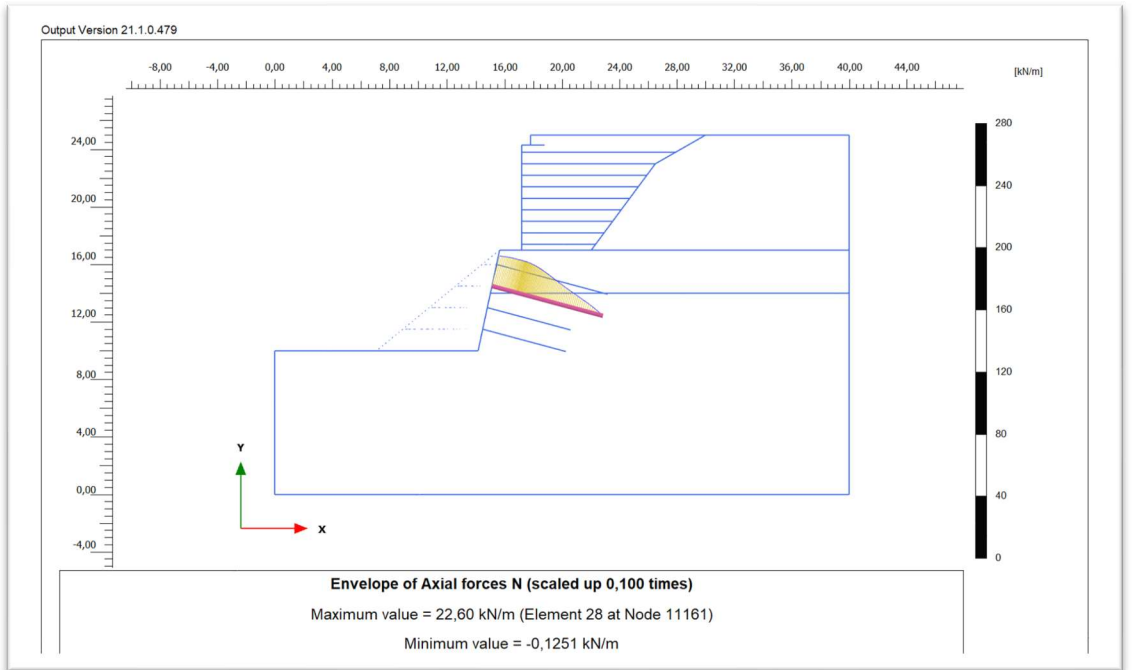
Şekil 4.13. Statik durumda 2.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler.



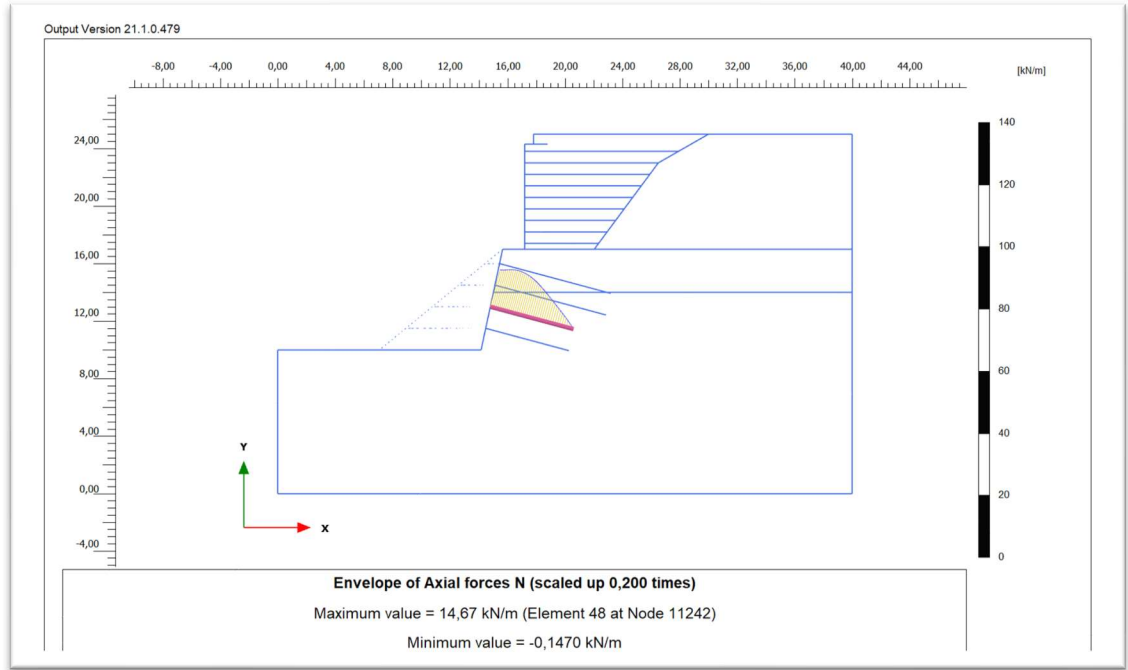
Şekil 4.14. Statik durumda 1.sıra geogrid donatıda etkili olacak eksenel kuvvetler.



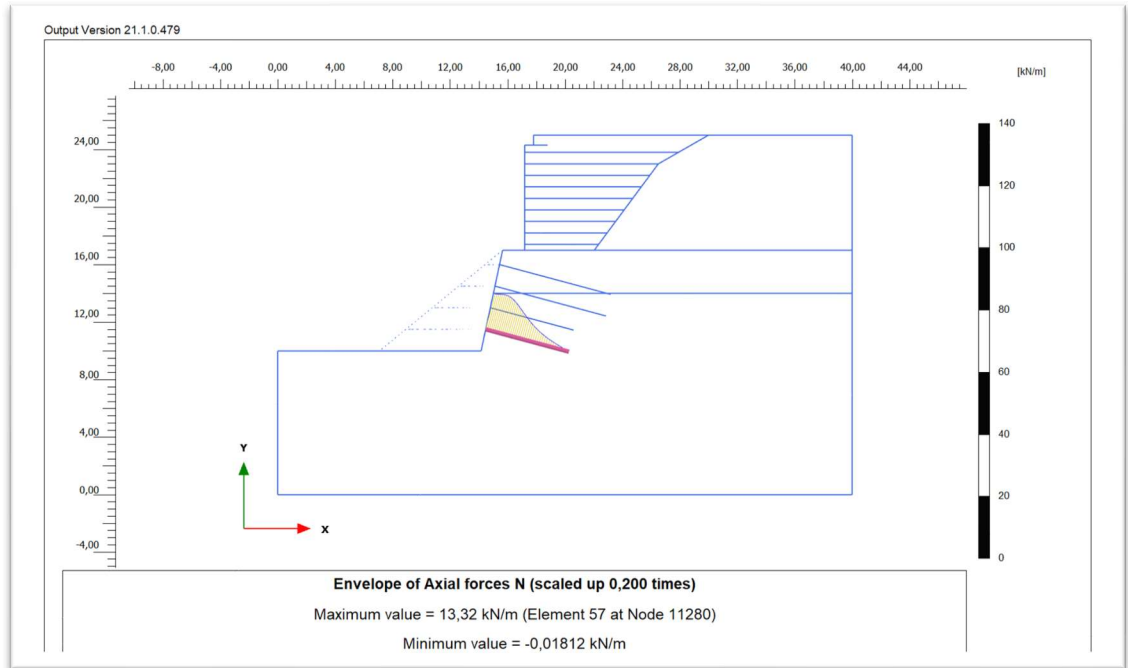
Şekil 4.15. Statik durumda 1.sıra zemin çivisinde etkili olacak eksenel kuvvetler.



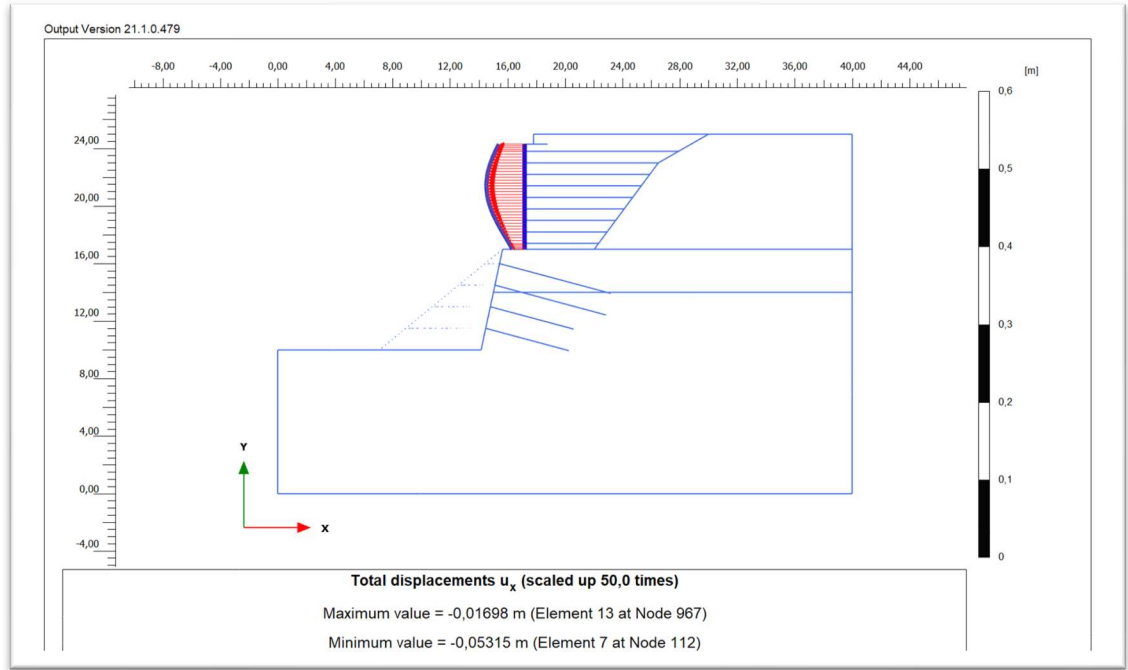
Şekil 4.16. Statik durumda 2.sıra zemin çivisinde etkili olacak eksenel kuvvetler.



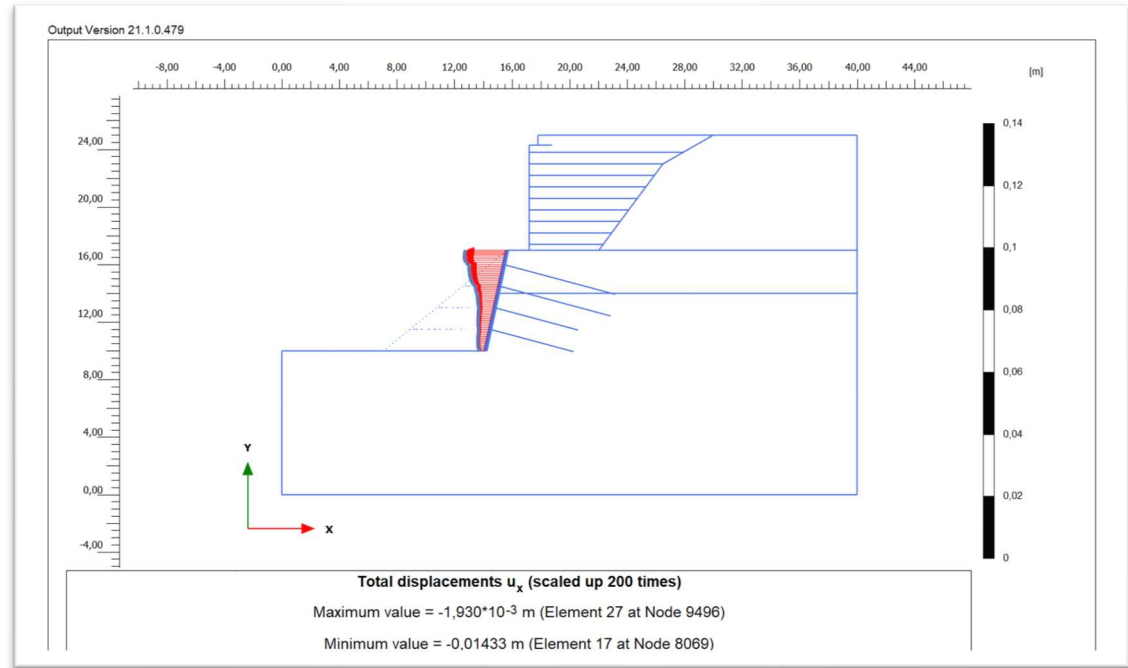
Şekil 4.17. Statik durumda 3.sıra zemin çivisinde etkili olacak eksenel kuvvetler.



Şekil 4.18. Statik durumda 4.sıra zemin çivisinde etkili olacak eksenel kuvvetler.



**Şekil 4.19.** İmalat sonrası toprakarme duvar panellerinde yatay deplasmanlar.



**Şekil 4.20.** İmalat sonrası püskürtme beton duvarda yatay deplasmanlar.

Sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre püskürtme beton duvar ve toprakarme duvar panellerindeki statik durumda yatay deplasmanlar ile zemin çivileri ve geogrid donatılardaki aksenal kuvvet değerleri aşağıdaki Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de verilmektedir.

**Çizelge 4.2.** İksa kazısı ve toprakarme duvar analiz sonuçları.

|                                                 | Yatay Deplasman (mm) |
|-------------------------------------------------|----------------------|
|                                                 | Statik durum         |
| Püskürtme Beton Duvar ( $d_{min}=20\text{cm}$ ) | 14.0                 |
| Toprakarme Duvar Panelleri                      | 53.0                 |

**Çizelge 4.3.** Zemin çivilerinde oluşan aksenal kuvvetler.

|                                     | Eksenal Kuvvetler (kN/m) |
|-------------------------------------|--------------------------|
|                                     | Statik durum             |
| Zemin Çivisi 1 (L=8m) (en üst çivi) | 36.95                    |
| Zemin Çivisi 2 (L=8m)               | 22.60                    |
| Zemin Çivisi 3 (L=6m)               | 14.67                    |
| Zemin Çivisi 4 (L=6m) (en alt çivi) | 13.32                    |

**Çizelge 4.4.** Geogridler üzerinde oluşan aksenal kuvvetler.

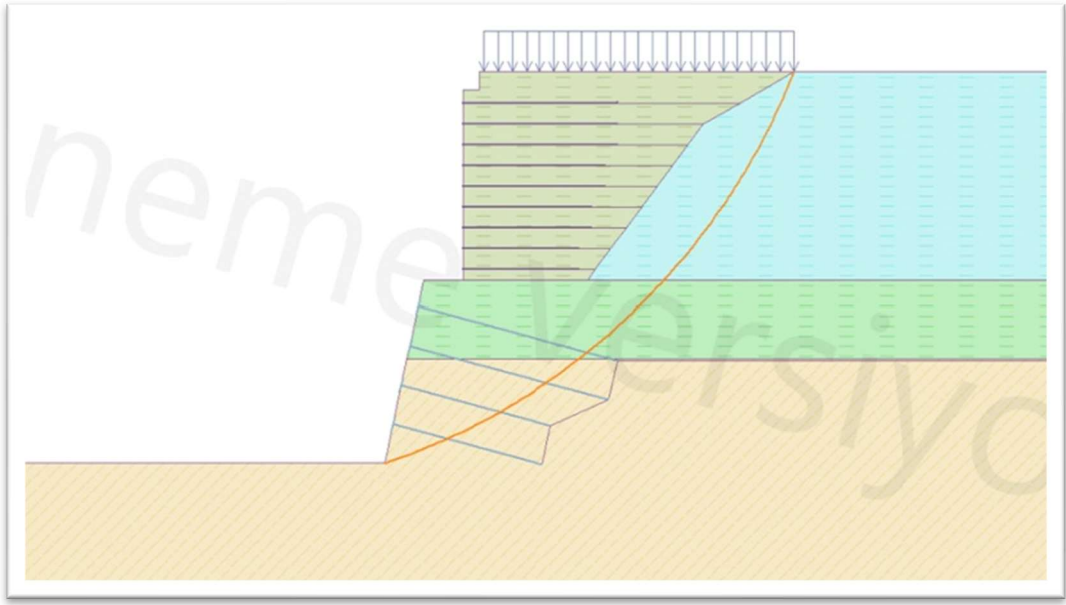
|                                   | Eksenal Kuvvetler (kN/m) |
|-----------------------------------|--------------------------|
|                                   | Statik durum             |
| Geogrid Donatı 9 (en üst) (TİP-1) | 17.49                    |
| Geogrid Donatı 8 (TİP-1)          | 19.22                    |
| Geogrid Donatı 7 (TİP-1)          | 19.06                    |
| Geogrid Donatı 6 (TİP-1)          | 19.39                    |
| Geogrid Donatı 5 (TİP-1)          | 18.68                    |
| Geogrid Donatı 4 (TİP-2)          | 20.39                    |
| Geogrid Donatı 3 (TİP-2)          | 19.85                    |
| Geogrid Donatı 2 (TİP-2)          | 13.68                    |
| Geogrid Donatı 1 (en alt) (TİP-2) | 12.22                    |

Çizelge 4.2’de verilen sonuçlara göre püskürtme beton duvarda maksimum 14.0 mm, toprakarme duvar panellerinde maksimum 53.0 mm yatay deplasman meydana gelmesi öngörülmüştür.

$\phi 32\text{mm}$  donatının kullanılacağı zemin çivilerinde maksimum eksenel kuvvet  $36.95 \text{ kN/m}$  olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de görüldüğü üzere analizlerde TİP-1 olarak kullanılan geogrid donatılarda maksimum eksenel kuvvet  $19.39 \text{ kN/m}$ , TİP-2 olarak kullanılan geogrid donatılarda maksimum eksenel kuvvet ise  $20.39 \text{ kN/m}$  olarak elde edilmiştir.

#### 4.1.3 GEO5 şev stabilite tahkikleri ve sonuç



**Şekil 4.21.** Geo5 Şev Stabilite Analiz Modeli.

Şekil 4.21’de gösterilen analizlerde, Geo5 programı kullanılarak gerçekleştirilen modellemelerde kullanılan parametreler, Çizelge 3.6’da sunulan zemin parametreleri ve yapısal eleman özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin seçimi, geoteknik mühendisliği prensipleri çerçevesinde, zemin koşullarını ve yapısal davranışları doğru bir şekilde temsil etmek amacıyla yapılmıştır. Modelleme sürecinde, iksa sistemi üzerine  $20 \text{ kN/m}^2$  büyüklüğünde bir sürşarj yükü uygulanmış ve bu yük etkisi altında sistemin davranışları incelenmiştir.

Yapılan analizler, Plaxis yazılımında gerçekleştirilen güvenlik analizleri (Safety Analysis) ile karşılaştırılarak kritik göçme düzlemi belirlenmiştir. Kritik göçme düzleminin belirlenmesi, yapının stabilitesini etkileyen en olumsuz senaryoların tespit edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kritik göçme düzlemi üzerinden,

Geo5 yazılımında yapılan analizlerle elde edilen güvenlik katsayısı hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar, limit denge analizleri çerçevesinde değerlendirilmiştir.

Şekil 4.22’de gösterildiği üzere, Bishop yöntemi kullanılarak yapılan stabilite analizleri sonucunda, güvenlik katsayısının 1.60 olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu güvenlik katsayısı değeri, tasarım şartnamesinde belirtilen ve genel stabilite açısından yeterli kabul edilen 1.50 değerinin üzerinde olduğundan, analiz edilen iksa sisteminin stabilite koşullarını sağladığı ortaya konulmuştur. Bu sonuç, iksa sisteminin tasarım yükleri altında güvenli bir performans sergilediğini ve potansiyel göçme risklerinin minimize edildiğini göstermektedir. Ayrıca, elde edilen güvenlik katsayısı değerinin, tasarımda öngörülen güvenlik limitlerinin üzerinde olması, iksa sisteminin maruz kalabileceği beklenmeyen yük artışları ve zemin koşullarındaki olası değişimlere karşı yeterli güvenliği sağlayabileceğini de göstermektedir.

Sonuç olarak, yapılan analizlerde, iksa sisteminin stabilitesi açısından gerek Geo5 gerekse Plaxis programlarıyla elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, tutarlı bir güvenlik seviyesi sağlandığı ve tasarım kriterlerinin karşılandığı görülmüştür.

#### Şev stabilite tahkiki (tüm yöntemler)

|                         |                  |       |
|-------------------------|------------------|-------|
| Bishop :                | FS = 1.60 > 1.50 | UYGUN |
| Fellenius / Petterson : | FS = 1.57 > 1.50 | UYGUN |
| Spencer :               | FS = 1.63 > 1.50 | UYGUN |
| Janbu :                 | FS = 1.65 > 1.50 | UYGUN |
| Morgenstern-Price :     | FS = 1.65 > 1.50 | UYGUN |

Şekil 4.22. Geo5 Şev Stabilite Analiz Sonuçları.

#### 4.1.4 Püskürtme beton ve zemin çivileri için güvenlik tahkikleri

Püskürtme beton ve zemin çivilerinden oluşan iksa sistemi için zemin çivisi sıyrılması, donatı kopması ve püskürtme beton kaplamada zımbalama tahkikleri “FHWA (2015): Soil Nail Walls Reference Manual” kılavuzuna göre aşağıdaki şekilde kontrol edilmiştir.

#### 4.1.4.1 Çivinin zeminden sıyrılmasına karşı güvenlik tahkiki

Zemin çivisinin zemin içinden sıyrılmasına karşı güvelliği için FHWA’da iki matematiksel orana bakılması önerilmiştir. Bu eşitliklerden ilki geleneksel güvenlik sayısıdır aşağıdaki Eşitlik (4.1) ve Eşitlik (4.2) ile hesaplanmaktadır.

$$FS = \frac{R_{PO}}{T_{max} * s} \quad (4.1)$$

Burada,

RPO: Zemin çivisinin (grout + donatı) çevre zeminden sıyrılma direnci (kN)

Tmax: Çiviye gelen maksimum eksenel kuvvet(kN)

$$R_{PO} = \pi * D * L * q_u \quad (4.2)$$

$q_u$  : Zemin türüne göre çiviye aktarılan kök dayanımı (kN/m<sup>2</sup>)

D : Delgi çapı (12 cm)

L : Zemin çivisi uzunluğu (m)

s : İki çivi arası yatay mesafe (s: 2m)

Yukarıda verilen  $q_u$  değeri FHWA tarafından yayınlanan “Soil Nail Walls Reference Manual” isimli kitabın 4.Bölüm’de yer alan Tablo 4.5’te verilen ayrışmış grovak için 30 psi (207 kN) olarak belirlenmiştir. Buna ilave olarak, PLAXIS yazılımı ile yapılan analiz sonucunda zemin çivileri tarafından karşılanan maksimum kuvvet L= 8m’lik çivide (s=2m), Tmax, 36.95 kN/m olarak bulunmuştur. Buna göre;

$$FS = \frac{\pi * 0.12 * 8 * 207}{36.95 * 2} = \frac{624.30}{73.9} = 8.44 \geq 1.5$$

Bu kontrole ek olarak ayrıca kaynak kılavuzda kapasite-talep oranı olarak tanımlanan parametrenin Eşitlik (4.3) 1.0’dan büyük olması istenmiştir.

$$CDR = \frac{\phi_{PO} * R_{PO}}{\gamma * T_{max} * s} \quad (4.3)$$

Burada

$\phi_{PO}$  : Dayanım azaltma faktörü (0.65)

$\gamma$  : Yük artırım faktörü (1.35)

$$CDR = \frac{0.65 * 624.30}{1.35 * 36.95 * 2} = 4.06 > 1.0$$

Olduğundan tahkik sağlanmıştır.

#### 4.1.4.2 Donatı kopmasına karşı güvenlik tahkiki

Donatı kopmasına karşı tasarımın güvenliğini belirleyebilmek için tıpkı sıyrılmaya karşı güvenlik tahkiklerinde olduğu gibi iki faktörün tahkik edilmesi beklenmektedir. Bunlardan birincisi yine donatı üzerine gelen çekme kuvveti ( $T_{max}$ ) ile projede kullanılan  $\phi 32$  mm'lik donatı çubuğunun güvenle taşıyabileceği maksimum çekme kuvveti aşağıdaki gibi Eşitlik (4.4) ile hesaplanmaktadır.

$$FS = \frac{R_t}{T_{max} * s} \quad (4.4)$$

$R_t$  : Donatı kopmasına karşı dayanım, Eşitlik (4.5) ve Eşitlik (4.6) ile hesaplanır.

$$R_t = A_t * f_{yd} \quad (4.5)$$

$A_t$ : Donatı çubuğu alanı

$f_{yd}$  : 365 MPa (projede kullanılan S420 çeliği için)

$$R_t = 0,25 * \pi * D^2 * f_{yd} \quad (4.6)$$

$$R_t = 0,25 * \pi * 0.032^2 * 365000 = 293.40 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{293.40}{73.90} = 3.97$$

#### 4.1.4.3 Püskürtme beton duvar için zımbalamaya karşı güvenlik tahkiki

Zemin çivisi plakası ile duvar yüzeyi stabilitesini sağlayan hasır donatılı püskürtme beton arasındaki etkileşim sonucu oluşacak zımbalama güvenliği FHWA tarafından yayınlanan “Soil Nail Walls Reference Manual” isimli yönetmeliğe göre aşağıdaki şekilde tahkik edilmektedir.

Zımbalamaya karşı statik durum için güvenlik sayısı  $FS_{statik}=1,5$  olarak Eşitlik (4.7) ile elde edilmelidir. Bu eşitlik değerleri Eşitlik (4.8) ve Eşitlik (4.9) ile bulunur.

Zımbalamaya karşı güvenliğin elde edilebilmesi kapasite talep oranına bakıldığında aşağıdaki ifadenin 1.0 olmasına dikkat edilmelidir.

$$FS = CDR = \frac{\phi_{FP} * R_{FP}}{\gamma * T_0} \quad (4.7)$$

$$R_{FP} = C_P * V_F \quad (4.8)$$

$$V_F = 0.58 * \sqrt{f'c} * \pi * D'c * hc \quad (4.9)$$

$\phi_{FP}$  : Zımbalama dayanımı azaltma faktörü (0.9)

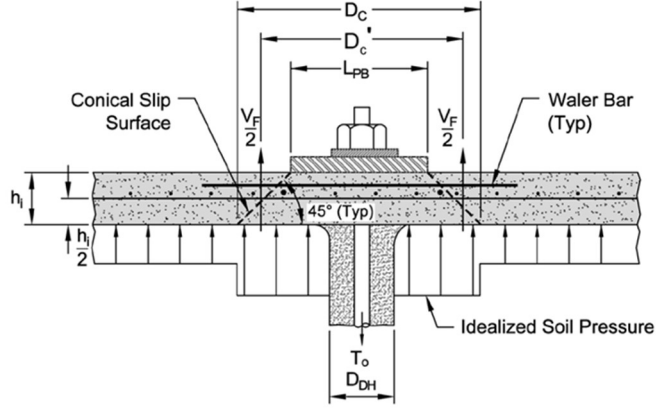
$\gamma$  : Yük artırım faktörü (1.35 statik durumda)

$T_0$  : Çivideki maksimum çekme kuvveti

$R_{FP}$  : Püskürtme beton duvar kesitinin zımbalama direnci

$C_P$  : Püskürtme beton duvar dayanım faktörü (1.00 – 1.15)

$V_F$  : Beton duvarın zımbalama direnci



(a) Bearing Plate Connection

Şekil 4.23. Plaka bağlantı kesiti.

Zemin çivilerinin ucunda 25cm x 25cm plakaların kullanılması durumunda:

$$D'c = 25 + 20 = 45 \text{ cm}$$

$$h_c = 20 \text{ cm}$$

Zemin çivilerindeki maksimum eksenel kuvvetler:

$$\text{Statik durumda} : T_{0(\text{statik})} = 73.90 \text{ kN}$$

$$V_F = 0.58 * \sqrt{25} * \pi * 0.45 * 0.20 = 820 \text{ kN}$$

$$FS = CDR = \frac{\phi_{FP} * R_{FP}}{\gamma * T_0} = \frac{0.9 * 1.0 * 820}{1.35 * 73.90} = 7.3 > 1.5$$

Zemin çivileri için 25cm x 25cm başlık plakası kullanılması durumunda 20 cm püskürtme beton duvarın zımbalamaya karşı güvenli olduğu hesaplanmıştır.

#### 4.1.4.4 Püskürtme beton ve zemin çivili iksa için değerlendirmeler

Zemin çivili püskürtme beton duvar için aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Zemin çivilerinin, andezit kaya birimi içinden sıyrılmaya karşı yeterli güvenlidir.
- Çivilerde kullanılacak  $\phi 32\text{mm}$ 'lik donatıların, etki edecek eksenel kuvvetler için kopmaya karşı yeterli güvenliği sağlamaktadır.

- 20 cm kalınlığında püskürtme betonu, çivilere etki edecek aksenal kuvvetler göz önünde bulundurulduğunda ve 25cm x 25cm başlık plakası kullanılması durumunda zımbalamaya karşı yeterli güvenlidir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ankara Organize Sanayi Bölgesi, sınırları içerisinde inşa edilecek Lojistik Deposu inşaatı kapsamında, A parsel komşu olan ve düşük kotta bulunan B-C parsellerinin kullanım alanlarını genişletmek ve parsel sınırlarına mümkün olduğu kadar yaklaşabilmek amacıyla alt kotta bulunan parsellerde zemin çivili ve püskürtme beton ile iksa kazısı yapılması, üst kotlarda bulunan parsellerde ise geogrid donatılı toprakarme duvar imalatı ile dolgu yapılması planlanmıştır.

A parsel ile B-C parseller arasında imal edilecek zemin çivileri, püskürtme beton duvar ve geogrid donatılı toprakarme duvar tasarımı sonuçları:

- Lojistik deponun inşa edileceği A parselin arazi kotu +877m’de bulunurken düşük kottaki komşu B-C parsellerin arazi kotu +862m’de bulunmaktadır ve aralarında 15 metrelik kot farkı vardır.
- A parsel ile komşu B-C parseller arasındaki 15 metrelik kot farkı göz önünde bulundurulduğunda parsel sınırlarına kadar maksimum yakınlığa ulaşabilmek için, 1-2 parsellerde sınıra 1.5 metre yaklaşacak şekilde eğimli kazı yapılması, ve kazının desteklenmesi için  $\phi 32$ mm’lik donatıların kullanıldığı zemin çivilerinin düşeyde 4 sıra olmak üzere yatayda aralıkları 2 metre olacak şekilde imal edilmiştir. Zemin çivileri için 25cm x 25cm başlık plakaları kullanılacaktır. Üst iki sıra zemin çivisinin boyu 8 metre, alt iki sıra çivinin boyu ise 6 metredir. Kazı yüzeyinde Q295 x Q295 çift sıra hasır donatı kullanılacak olup en az 20 cm püskürtme beton duvar imalatı yapılmıştır.
- Püskürtme beton duvar ve zemin çivili iksa sistemi için yapılan hesaplarda ve tahkiklerde:
  - ✓ Zemin çivilerinin, andezit kaya birimi içinden sıyrılmaya karşı yeterli güvenliği sağladığı
  - ✓ Çivilerde kullanılacak  $\phi 32$ mm’lik donatıların, etki edecek eksenel kuvvetler için kopmaya karşı yeterli güvenliği sağladığı
  - ✓ 20 cm kalınlığında püskürtme betonun, çivilere etki edecek eksenel kuvvetler göz önünde bulundurulduğunda zımbalamaya karşı yeterli güvenlikte olduğu sonuçlarına varılmıştır.

- A parselin kullanım alanını komşu B-C parsellere doğru parsel sınırına kadar genişletmek amacıyla yüzeyde bulunan dolgu birimin kazılmasına ve +869m kotundan parsel üst kotu olan +877m'ye kadar (8 metre toprakarme duvar ve üzerine üst dolgu) geosentetik donatılı toprakarme duvar imal edilmesine karar verilmiştir. Geogrid donatılı toprakarme duvarın projelendirilmesinde, 1.6m x 1.6m boyutlarında betonarme panellerin kullanılacağı kabul edilmiş ve duvar arkası toprakarme dolgusunun 10 kademedede olması ve 9 sıra geogrid donatı kullanılması uygun görülmüştür. Bu durumda en üst donatının kotu +875.8m, toprakarme duvar geri dolgusunun üst kotu ise +877m olmaktadır.
- Toprakarme duvar projesinde en alttan itibaren 1.-2.sıra donatıların 4,5 metre, 3.-4.sıra donatıların 5,0 metre, 5.-6.sıra donatıların 5,5 metre, 6.-7.-8.sıra donatıların ise 6,0 metre olması planlanmıştır. Donatı malzemelerinin seçiminde uzun süreli dayanımlar dikkate alınmış ve buna göre donatı belirlenmiştir. Toprakarme duvar tabanından itibaren ilk dört sıra donatı için uzun süreli tasarım dayanımı olarak  $R_t=38 \text{ kN/m}$  (analizlerde TİP-2 olarak kullanılmıştır), ve üstteki beş sıra donatı için ise uzun süreli tasarım dayanımı olarak  $R_t=27 \text{ kN/m}$  (analizlerde TİP-1 olarak kullanılmıştır) kullanılması uygun görülmüştür.
- Yapılan analizler sonucunda donatılarda etkili olacak eksenel kuvvetlerin, belirlenen donatılar tarafından taşınabildiği hesaplanmıştır.
- Tasarlanan sistemin statik durumu için yapılan hesaplamalarda iksa duvarında ve toprakarme duvar panellerinde meydana gelmesi öngörülen yatay deplasmanların kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı görülmektedir.

Literatürde yeni bir kavram olarak tanıtılan bileşik istinat yapıları, "hibrit sistemler" olarak adlandırılmaktadır. Kavramın yeni olması nedeniyle bu çalışma kapsamında doğrudan kullanılmamış olsa da hibrit sistemlere dair yapılan güncel araştırmalar, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında benzer sonuçlar sunmuştur. Özellikle hibrit sistemler, duvar deformasyonlarını azaltmada geleneksel yöntemlere kıyasla daha etkili bir performans sergilemektedir. Bu sistemlerde Mekanik Stabilize Edilmiş Zemin (MSE) ve zemin çivili duvarların bir arada kullanılması, çoğunlukla ekonomik ve maliyet etkin çözümler sunmaları nedeniyle tercih edilmektedir.

Ancak, hibrit MSE/zemin çivili sistemler, tek tip sistemlere kıyasla genel güvenlik faktörünü önemli ölçüde artırmamaktadır. Buna karşın, hibrit MSE/ankrajlı palplanş duvarlar veya konsol/ankrajlı palplanş duvarlar, tam yükseklikte kullanılan tek tip sistemlere göre daha yüksek güvenlik faktörü sağlamaktadır. Bu sistemlerin dikkat çekici bir diğer özelliği, üst duvarlardan gelen ek yükler altında, tek tip sistemlere göre daha yüksek eksenel ve ankraj kuvvetleri üretmeleridir (Eldiasty, Altahrany ve Elmeligy, 2023). Ekonomik verimlilikleri nedeniyle, zemin çivili ve MSE duvarlar, maliyet optimizasyonu sağlarken mühendislik gereksinimlerini karşılamaktadır.



## KAYNAKLAR

- Akçay, K., 2014. Granüler zeminlerde model zemin çivilerinin sıyrılma kapasitelerinin deneysel olarak araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Aksoy, İ. M., 1993. Modern yol inşaatında geotekstil ve geogrid uygulaması konularında araştırma, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aslan, V., 2017. Derin kazıların sayısal analizi için parametrik bir çalışma, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Benz, T., 2007. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences, Doktora Tezi, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany.
- Bonazzi, D. ve Colombet, G., 1961. Reajustement et entretien des ouvrages de talus, Proc Colloque Renforcement En Place Des Sols Et Des Roches, Paris, France.
- Brinkgreve, R. B., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., Zampich, L. ve Ragi, M., 2018. Plaxis 2D Reference Manual, Plaxis BV, Hollanda.
- Bruce, D., A. ve Jewell, R., A., 1986. Soil Nailing: Application and practice - part 1, Ground Engineering, 19, 10-15.
- Büyükgökçe, F., 2018. Derin kazılarda yanal yüke maruz iksa sistemlerinin parametrik analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- CIRIA C623, 2005. Standarts for the repair of buildings following flooding. Construction Industry Research and Information Association, London, UK.
- Das, B. M., 2011. Principle of foundation engineering. Cengage Learning, Stamford, USA
- Demirkoç, A., 2007. Derin kazılarda zemin çivisi ile ankrajlı destek sistemlerinin karşılaştırmalı analizi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Eldiasty, W. A., Altahrany, A. I., ve Elmeligy, M. M. 2023. Comparison between monotype and hybrid earth retaining structures. Journal of Construction Engineering and Management, 149, 3.
- Elias, V., Christopher B. R. ve Berg, R. R., (2001). Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes design and construction guidelines. Department of Transportation Federal Highway Administration, 4, 1-84.
- Elias, V., Juran, I., 1991. Soil Nailing for stabilization of highway slopes and excavations, Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA, FHWA-RD-89-198

- FHWA, (1998). Manual for design and construction monitoring of soil nail walls, US Department of Transportation, Washington, D.C., USA.
- FHWA, (2003). Soil Nail Walls, Geotechnical Circular No: 7, US Department of Transportation, Washington, D.C., USA.
- FHWA-NHI-10-024 (2009). Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes, Washington, D.C., USA.
- Finno, R., J. ve Calvello, M., 2005. Supported excavations: The observational method and inverse modeling, *Journal of Geotechnical Engineering*, 131, 7, 826-836.
- Gaba, A. R., Simpson, B., Powrie, W., ve Beadman, D. R., 2003., Geotechnical Design to Eurocode Design, CIRIA C580.
- Gässler, G. ve Gudehus, G., 1981. Soil nailing – some aspects of a new technique, *Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, 3, 469-476.
- Geotechnical Engineering Circular No:7, Federal Highway Administration, Report no: FHWA-NHI-14-007.
- Geotechnical Engineering Manual GEM-21, (2015). Design & Construction Guidelines for a Soil Nail Wall System, Revision 4, State of New York Department of Transportation, Geotechnical Engineering Bureau.
- Giroud, J. P., 1986. From geotextiles to geosynthetics: A revolution in geotechnical engineering, *3rd International Conference on Geotextiles*, Vienna, Austria, 1, 1-16.
- Gouw, T. L., 2014. Common mistakes on the application of plaxis 2d in analyzing excavation problems, *International Journal of Applied Engineering Research*, 9, 21, 8291-8311.
- Güler, E. 2006. Geosentetik donatılı istinat duvarı bir şartname taslağı. İkinci Ulusal Geosentetik Sempozyumu, İstanbul, 221-227.
- Güler, E. ve Demirkan, M. 2002. Geosentetik donatılı istinat duvarlarının dinamik yükler altında davranışı, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi*, Eskişehir, 302-311.
- Hoek, E. ve Brown, E. T., 1980a. Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, London, 106, 9, 1013-1035.
- Hoek, E. ve Brown, E. T., 1980b. *Underground excavations in rock. institution of mining and metallurgy*. Stephen Austin and Sons, London.
- Ingold, T. S. and Miller, K. S., 1998. *Geotextiles handbook*, Thomas Telford Publishing, London, UK.

- Kabakçı, İ., 2017. Zemin çivili duvarların tasarım ilkeleri ve snap-2 snailz plaxis slide programları ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Karakoç, S., 2010. Derin kazıların sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal çözümü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Kaymakçı, S., Gündoğdu, D. ve Özçelik, H. 2017. Geogrid ile güçlendirilmiş zemin üzerine inşa edilmiş bir hibrid duvar sistemi vaka analizi. Yedinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, 1-12.
- Koerner R. M., 1998. Designing with geosynthetics, Prentice-Hall Inc, New Jersey, USA.
- Koerner, R. B. 2005. Desing with geosynthetics. Prentice Hall: Englewood Cliffs
- Lazarte, C. A., Elias, V., Espinoza, R. D., ve Sabatini, P. J., 2003. Geotechnical Engineering Circular No:7, Federal Highway Administration, Report No: FHWA0-IF-03-017.
- Lazarte, C. A., Robinson, H., Gómez, J. E., Baxter, A., Cadden, A., ve Berg, R., 2015. Geotechnical Engineering Circular No. 7: Soil Nail Walls (Report No. FHWA-NHI-14-007). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA.
- Özkol, O., 2006. Design of geosyntheticly reinforced retaining structures, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Plaxis, 2019. Material Models Manual. Delft, Netherlands.
- Porterfield, J. A., Cotton, D. M., ve Byrne, R. J. 1994. Soil nailing field inspectors manual. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
- Rabecjac, S. ve Toudic, P., 1974. Construction of a retaining wall between versailles chantiers, revue generale des chemins de fer, 232-237.
- Schlosser, F. ve Unterreiner, P., 1991. Soil nailing in france: Research and practice, proceedings of the transportation research board, Annual Meeting, Washington, D.C., USA.
- Shukla, S. K., 2002. Geosynthetics and their applications, Thomas Telford Publishing, London, UK.
- Şahin, G., 2019. Sonlu elemanlar yöntemi ile kazık zemin çivisi ankraj modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, Şeyh Edebalı Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- Töremiş, E. İ, 2003. Geotekstilller ve plaxis sonlu elemanlar programı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Üstündağ, Ö., 2003. Zemin çivisi ile şev stabilitesi ve derin kazıların desteklenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

URL-1 <<https://www.izofen.com/gt-orgulu-geotekstil/>>, Erişim tarihi: 01.03.2024.

URL-2 <<https://www.istanbulteknik.com/tr/urunler/29/orgusuz-geotekstiller>>, Erişim tarihi: 01.03.2024.

URL-3 <<https://www.gtmgeo.com/tr/urunler/geogridler>>, Erişim tarihi: 01.03.2024.

URL-4 <<https://www.geobera.com/geomembran-nedir>>, Erişim tarihi: 01.03.2024.



## ÖZGEÇMİŞ

**Adı ve Soyadı** : Oğuzhan TIRAŞÇI

### EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

**Lisans** : Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2014-2018

**Yüksek Lisans:** Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2022-2024

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Serbest İnşaat Mühendisi/ 2018- Halen

### TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

#### Kongrelerde Sunulan Makaleler

1. Tıraşçı, O. ve Terzi N. U., 2024. Toprakarme ve zemin çivili bir derin kazı uygulamasının örnek bir proje üzerinde numerik analizlerinin yapılması, 3. Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi, İstanbul, Bildiri Kitabı, 305.