Heyelanlarda Stabilite Yöntemleri ve Geogrid Donatılı Duvar Kullanılarak Bir Heyelanın Stabilizasyonu

Enes Kaba

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2017

Stabilization Methods in Landslide and a Landslide Stabilization Using a Geogrid Reinforced Wall

Enes Kaba

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

July 2017

Heyelanlarda Stabilite Yöntemleri ve Geogrid Donatılı Duvar Kullanılarak Bir Heyelanın Stabilizasyonu

Enes Kaba

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Murat Türköz

Temmuz 2017

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Enes Kaba'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Heyelanlarda Stabilite Yöntemleri ve Geogrid Donatılı Duvar Kullanılarak bir Heyelanın Stabilizasyonu" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

Danışman **:** Doç. Dr. Murat TÜRKÖZ

İkinci Danışman :

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç. Dr. Murat TÜRKÖZ

Üye : Doç Dr. Volkan OKUR

Üye : Doç. Dr. Hasan SAVAŞ

Üye : Yrd. Doç Dr. Kamil Bekir AFACAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Evren SEYREK

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Murat Türköz danışmanlığında hazırlamış olduğum "Heyelanlarda Stabilite Yöntemleri ve Geogrid Donatılı Duvar Kullanılarak Bir Heyelanın Stabilizasyonu" başlıklı tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 21/07/2017

Enes KABA

ÖZET

Günümüzde insan nüfusunun hızla artmasıyla eğimli yamaçlarda yerleşim alanları oluşmaktadır. Buna bağlı olarak kontrolsüz yapılaşma ve ulaşım için açılan yollar; arazinin duraylılığını bozmasıyla heyelan afetinin oluşma tehlikesi artış göstermektedir. Heyelanların oluşmasını engellemek veya hareketin oluştuğu heyelanları iyileştirmek için yapılacak yöntemlerin doğruluğu ve uygulanabilirliği tartışılmaktadır. Heyelanların duraylılığını artırmak için yapılacak olan tüm işlemlerin, teknik açıdan en iyi şekilde arazide uygulanması ve analizlerinin en doğru şekilde yapılması gereklidir.

Bu kapsamda, Geoteknik mühendisliği uygulamalarında heyelanların iyileştirilmesi için son dönemlerde uygulama kolaylığı ve ekonomik açıdan çoğu uygulamalara göre avantajlı olan geosentetiklerin kullanımı oldukça artmıştır. Bu amaçla Düzce ili Çilimli ilçesi Karaçörtlen köyünde meydana gelen heyelanın iyileştirilmesi için yapılan arazi çalışmaları ve raporlar doğrultusunda söz konusu alanın bilgisayar ortamında, geosentetiklerin bir çeşidi olan geogrid donatılı duvar ile analizleri yapılmıştır. Bu analizler, limit denge ve sonlu elemanlar yöntemlerinin her ikisi ile yapılmış olup, çalışma alanının kayma düzlemi, güvenlik sayısı ve şekil değiştirme davranışları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Landslide, Heyelan, Heyelan Stabilite Yöntemleri, Geosentetikler.

SUMMARY

Today, with the rapid increase of the human population, residential areas are formed on dig slopes. As a result, the risk of landslide disaster to happen is increasing as the uncontrolled structuring and the roads opened in an increasing rate for transportation disrupt the stability of the lands. The correctness and applicability of methods to prevent landslides from occurring or to correct landslides where they occur are discussed. In order to increase the stability of the landslides, it is necessary to apply all the operations in the field from the technical point of view and to make the analyzes in the most accurate way.

In this context, geotechnical engineering applications have recently increased the use of geosynthetics, which is advantageous in terms of ease of application and economic reasons over most applications in recent years in order to correct landslides. For this purpose, in the direction of the field studies and reports made for the correction of the landslide that took place in the Karaçörtlen village of Çilimli district of Düzce province, the area was analyzed in the computer environment with geogrid reinforced wall which is a kind of geosynthetics. These analyzes were made with both limit equilibrium and finite element methods and shear plane, number of safety and deforming behaviors of the working area were analyzed.

Key Words: Landslide, Landslide Stability Methods, Geosynthetics

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında kıymetli bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, yardımlarını esirgemeyen ve büyük bir sabır gösteren değerli danışman hocam Doç. Dr. Murat TÜRKÖZ'e, ilgisini ve önerilerini göstermekten kaçınmayan Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim elemanlarından sayın Doç. Dr. Hasan SAVAŞ hocama sonsuz şükran, teşekkür ve en derin saygılarımı sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında maddi manevi destekleriyle göstermiş oldukları anlayış ve sabırdan dolayı sevgili eşim Tuğçe KABA'ya ve canım aileme sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca yardımını hiç esirgemeyen değerli çalışma arkadaşım Emrah DİNÇ'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca yüksek lisans tez çalışmamın tamamlanabilmesi için çalışma hayatımda beni destekleyen ve idare eden başta değerli müdürüm Mustafa EREZ'e Abdüsselam KILIÇ'a, Hikmet ALOĞLU'na, Okan Özay ÖZMEN'e ve Osman YEL'e teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **vi**
SUMMARY ..... **vii**
TEŞEKKÜR ..... **viii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xii**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xvii**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xviii**
1. GİRİŞ VE AMAÇ **1**
1.1. Genel 1
1.2. Amaç 2
1.3. Kapsam 2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **3**
2.1. Türkiye'de Afet Tehlikelerinin Değerlendirilmesi ve Heyelanların İstatiksel Dağılımları 4
2.2. Heyelanların Oluşturduğu Etkiler ve Türkiye'de Oluşmuş Heyelan Örneği 8
2.3. Heyelanların Sınıflandırılması 13
2.3.1. Heyelanlarda suyun değerlendirilmesi 18
2.3.2. Heyelanların geometrik tanımı 18
2.4. Heyelanları (kütle hareketleri, şev yenilmesi) Tetikleyen Faktörler 20
2.5. Heyelanları Önleme ve Zarar Azaltma Yöntemleri 26
2.5.1. Şev geometrisinin düzenlenmesi 27
2.5.2. Drenaj yapılması 28
2.5.3. Yapısal Güçlendirme Yöntemleri 29
2.5.4. Geosentetiklerin mühendislik şevleriyle ilgili zarar azaltma ve iyileştirme yöntemlerinde kullanılması 32
2.5.4.1. Geosentetiklerin özellikleri ve işlevleri 33
2.5.4.2. Geosentetiklerin işlevleri 34
2.5.4.3. Geosentetik çeşitleri 36

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.5.4.4. Şevlerde geosentetiklerin kullanımı ve avantajları 37
3. ŞEV STABİLİTE ANALİZ YÖNTEMLERİ 45
3.1. Limit Denge Yöntemi 46
3.1.1. Bishop'un sadeleştirilmiş yöntemi 50
3.1.2. Janbu'nun basitleştirilmiş yöntemi 53
3.1.3. Spencer Metodu 54
3.1.4. Morgenstern-price metodu 57
3.1.5. Sarma yöntemi 58
3.1.6. Janbu'nun genelleştirilmiş yöntemi 59
3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi 60
3.3. Uygun Yöntemin Seçimi 64
4. MATERYAL VE YÖNTEM 67
4.1. Materyal 67
4.1.2. Bölgenin ve inceleme alanının genel jeolojisi 70
4.1.3. İnceleme alanının geoteknik olarak değerlendirilmesi 73
4.1.4. Depremsellik 84
4.2. Yöntem 84
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 87
5.1. Limit Denge Yöntemi Kullanılarak Analizin Yapılması 87
5.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Analizin Yapılması 89
5.3. Destek Sistemi Tasarım Analizleri 91
5.3.1. Limit denge yöntemi kullanılarak tanımlanan rijit cisme göre analizlerin yapılması 92
5.3.2. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tanımlanan rijit cisme göre analizlerin yapılması 95
5.3.3. Geogrid donatıların tanımlanması ve geogrid donatılı duvarın tahkiki 98

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.3.4. Limit denge yöntemi kullanılarak tanımlanan geogrid donatılı duvara göre analizlerin yapılması 99
5.3.5. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tanımlanan geogrid donatılı duvara göre analizlerin yapılması 102
5.3.6. Geogrid donatılı duvarın uygulanması ile ilgili öneriler 105
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 107
KAYNAKLAR DİZİNİ 109

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Karadeniz bölgesinde bir alanın maruz kaldığı heyelanlar. 4
Şekil 2.2. Afet türlerinin dağılımı afet olay sayısı bazında. 5
Şekil 2.3. Heyelan olay sayısı bazında heyelanlardan etkilenen illerin dağılımı. 6
Şekil 2.4. Türkiye'de heyelanlı yerleşim alanlarının mekânsal dağılımı. 7
Şekil 2.5. Heyelanlı Yerleşim Birimleri'nden elde edilmiş "Heyelan Noktasal Yoğunluk Haritası"..... 7
Şekil 2.6. Aktif faylar ve heyelan noktasal yoğunluk haritası arasındaki ilişki. 8
Şekil 2.7. Heyelan nedeniyle etkilenen ulaşım (Düzce depremi sonrası Bakacak Mevkii, Bolu Dağı yolu), (Ankara- İstanbul Yolu)..... 9
Şekil 2.8. Düzce İli Çınardüzü Köyü'nde heyelan nedeniyle tahrip olan orman. 10
Şekil 2.9. Devrek Heyelanı..... 11
Şekil 2.10. Devrek Heyelanı ve meydana getirdiği tahrip..... 12
Şekil 2.11. Devrek Heyelanının hareketini durdurmak için yapılan çalışmalar. 12
Şekil 2.12. Heyelan Hareketlerinin Genel Görünümü, (Heyelan Tanımlama Klavuzu, Karayolları Genel Müdürlüğü, 2015). 14
Şekil 2.13. Heyelan Türlerinin Görünümü, (Varnes 1978). 15
Şekil 2.14. Düşme yenilmeleri. 16
Şekil 2.15. Devrilme türü yenilmeler 16
Şekil 2.16. Çoklu dairesel kaymalar.(Meksika otoyol ve ABD örneği)..... 17
Şekil 2.17. Kaymalar (a) dairesel kayma, (b) Düzlemsel kayma, (c) Kama tipi kayma, (d) Çok yüzeyli kayma. 17
Şekil 2.18. Dairesel olarak oluşan heyelanın bölümlendirilmesi, (Heyelan Tanımlama Klavuzu, Karayolları Genel Müdürlüğü, 2015). 20
Şekil 2.19. Heyelana neden olan faktörler (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001). 21
Şekil 2.20. Kütle hareketini tetikleyen faktörlerden biri olan suyun sızması. 23
Şekil 2.21. Boşluk suyu basıncının artmasıyla normal gerilmenin azalması ve kesme kuvvetinin de buna bağlı olarak azalması, (Terzaghi, 1936)..... 23
Şekil 2.22. Akarsuyun topuğu aşındırması, şev açısını artırarak şevin tabanını kaldırması ve şev yenilmesine yol açması..... 24

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.23. Eğimli arazide açılan yol yarmasının şev yenilmesine yol açması. 24
Şekil 2.24. Yanlış arazi kullanımıyla oluşabilecek heyelan. 25
Şekil 2.25. Şev geometrisinin değiştirilerek yamacın duraylılığını artırmak. 28
Şekil 2.26. Şevin açısının düşürülmesi ve şevde ilave yükün kaldırılarak topuk bölgesine destek olması. 28
Şekil 2.27. Drenaj 29
Şekil 2.28. Yeraltı drenaj uygulama kesiti 29
Şekil 2.29. Şev içerisine dirençli yapısal elemanlar yerleştirilerek dayanımın artırılması. 30
Şekil 2.30. Duvar yada diğer istinat bileşenlerinin yapımı ile topuğun desteklenerek kaymaya karşı koyan kuvvetlerin artırılması. 30
Şekil 2.31. İstinat duvarı veya taş duvar yaparak topuğun desteklenmesi. 31
Şekil 2.32. Ankrajlı fore kazık ile şevin desteklenmesi. 31
Şekil 2.33. Tel kafes ve blok tutma hendeği. 32
Şekil 2.34. Polimer yapının oluşum işlemi. 34
Şekil 2.35. Geosentetiklerin işlevleri (Aksoy, 1993; Yılmaz ve Eskişar, 2008). 36
Şekil 2.36. geogrid ve geotekstil ürünleri 37
Şekil 2.37. Geotekstil kullanılarak güçlendirilen şev (Roven-Fransa, 1971). 38
Şekil 2.38. Geogridle güçlendirme 38
Şekil 2.39. Çok katmanlı geosentetik kullanımı ve yol zemininin geogridle güçlendirilmesi. 39
Şekil 2.40. Geosentetiklerin şev yapılarında kullanımı, (a) Donatılı İstinat Duvarı, (b) Donatılı Şev, (c) Donatılı Dolgu, (d) Donatılı Şev, (Kotan, 2008). 40
Şekil 2.41. İnşaat şeması, (a) Standart güçlendirme, (b) Saran güçlendirme, (c) Karışık güçlendirme, (d) Cephe blokları ve standart güçlendirme. 41
Şekil 2.42. Asansör istasyonunda meydana gelen heyelan. 43
Şekil 2.43. 20 yıl geçmesine rağmen geogrid ile onarılan şevin hala duraylı durumda olması. 43
Şekil 2.44. Şevin geogrid ile stabil hale getirilmesi. 44
Şekil 2.45. Yapılmış olan geogrid uygulamasının şematik hali. 44

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Yarım sinüs fonksiyonu. 47
Şekil 3.3. Bishop'un Basitleştirilmiş yöntemi için serbest gövde diyagramıve kuvvet poligonu, örnek gösterim. 52
Şekil 3.4. Bishop'un basitleştirilmiş güvenlik faktörü 52
Şekil 3.5. Janbu metodu için serbest gövde diyagramı ve kuvvet poligonu, örnek gösterim. 53
Şekil 3.6. Bishop'un güvenlik faktörü 54
Şekil 3.7. Tipik şev stabilitesi durumu (Krahn, 2004) 55
Şekil 3.8. Spencer'ın güvenlik faktörü 56
Fonksiyon; SpecifiedFn: Tanımlanmış Fonksiyon) 56
Şekil 3.10.Yarım sinüs fonksiyonlu Morgenstern-Price güvenlik faktörleri 57
Şekil 3.11. Lineer elastik ve elastik-plastik gerilmeler için güvenlik faktörü 64
Şekil 3.12. Limit denge yönteminde serbest gövde diyagramı ve kuvvet poligonu. 65
Şekil 4.1. Düzce İli Çilimli İlçesinin yer bulduru haritası, (Google Maps). 67
Şekil 4.2. Heyelan bölgesinden görünüm. 68
Şekil 4.3. Heyelan olan alanın yer bulduru haritası. 69
Şekil 4.4. Düzce ili aylık ortalama yağış ve sıcaklıklar. (Meteoroji Genel Müdürlüğü) 70
Şekil 4.5. İnceleme alanının ve çevresinin Genel Jeoloji Haritası ve harita birimlerinin açıklamaları, (MTA 2002, Adapazarı – G 26 Paftası), (Acar Jeofizik, il özel idaresi rapor.) 71
Şekil 4.6. İnceleme alanının jeolojik birimiyle ilgili yaklaşım için çekilen fotoğraf görüntüsü. 72
Şekil 4.7. İnceleme alanı ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafisi. 73
Şekil 4.8. Sondaj logu, (Akkurt Mühendislik, Düzce İl Özel İdaresi heyelan raporu, 2013) 75
Şekil 4.9. Yamaçta oluşan şev duraysızlığının tahmin edilen alanı ve düşey elektrik sondaj yöntemi noktaları. 76
Şekil 4.10. 1 no'lu alan heyelan olmuş bölgeyi, 2 no'lu alan ise bu bölgeyi tutan sağlam kayacı göstermektedir. 77

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.11. Heyelan oluşmuş bölgenin google earth görüntüsü. 78
..... 78
Şekil 4.12. Zemin profili. 78
Şekil 4.13. Masw yöntemi, Düşey elektrik sondaj yöntemi ve sismik yöntemleri uygulama noktaları M; Masw yöntemi, D; Düşey elektrik sondaj yöntemi, S; Sismik yöntem. 79
Şekil 4.14. M1 noktasında yapılan kuzey-güney yönlü(yanal) ölçüm sonuçları..... 80
Şekil 4.15. M2 noktasında yapılan kuzey-güney yönlü(yanal) ölçüm sonuçları..... 80
Şekil 4.16. M3 noktasında yapılan kuzey-güney yönlü(yanal) ölçüm sonuçları..... 81
Şekil 4.17. Düzce İli Deprem Bölgeleri Haritası..... 84
Şekil 4.18. Heyelan bölgesinin plankotesi. 85
Şekil 5.1. 0+170 kesitinde analiz öncesi yapılan çalışma. 87
Şekil 5.2. 0+0170,00 kesitine uygulanan depremli stabilite analizi. 88
Şekil 5.3. Deprem kuvveti dikkate alınmadan yapılan stabilite analizi..... 89
Şekil 5.4. Kesitte oluşturulan sonlu elemanlar ağı ve düğüm noktaları. 90
Şekil 5.5. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analiz sonucu yanal yönde gözlenen deformasyon. 90
Şekil 5.6. Zamana bağlı olarak oluşabilecek deformasyon gösterimi. 91
Şekil 5.7. programda kullanılan ara yüzlerin konumu..... 92
Şekil 5.8. Rijit cisimli şevin depremsiz duruma göre stabilite analizi. 93
Şekil 5.9. Rijit cisimli şevin depremli duruma göre stabilite analizi..... 94
Şekil 5.10. Geri dolguda oluşan kayma yüzeyinin depremsiz duruma göre stabilite analizi. 94
Şekil 5.11. Rijit bir cisim ile şevde oluşturulan sonlu elemanlar ağı. 95
Şekil 5.12. Rijit cisimli şevde sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analiz. 96
Şekil 5.13. Rijit cisimli şevde yatay yönde oluşabilecek deplasman değerleri. 96
Şekil 5.14. Rijit cisimli şevde düşey yönde oluşabilecek deplasman değerleri. 97
Şekil 5.15. Rijit cisimli şevde stabilite yöntemi kullanılarak yatay yönde oluşabilecek deplasman değerleri. 97

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.16. Rijit cisimli şevde stabilite yöntemi kullanılarak düşey yönde oluşabilecek deplasman değerleri. 98
Şekil 5.17. Geogrid donatılı duvarın analizi. 99
Şekil 5.18. Geogrid donatılı duvar ile limit denge esaslı stabilite analizi. 100
Şekil 5.19. Geogrid donatılı duvar ile limit denge esaslı ve deprem kuvveti uygulanmış stabilite analizi. 101
Şekil 5.20. Geogrid donatılı duvar ile limit denge esaslı deprem kuvveti uygulanmadan yapılan yerel stabilite analizi 101
Şekil 5.21. Geogrid donatılı duvar ile limit denge esaslı deprem kuvveti uygulanmadan yapılan yerel stabilite analizi 102
Şekil 5.22. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan donatılı şevin gerilme analizi. 102
Şekil 5.23. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan stabilite analizi ile donatılı şevde gözlemlenen maksimum düşey deplasman. 103
Şekil 5.24. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan stabilite analizi ile donatılı şevde gözlemlenen maksimum yatay deplasman. 103
Şekil 5.25. Uygulama projesi örneği. 106

ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge **Sayfa**

2.1. Afet türüne göre, afet olay sayısı ve afetzede sayılarının genel dağılımı. 5

2.2. Hareketin Tipi ve Malzemenin Cinsine Göre Heyelanların Sınıflandırılması Varnes (1978) 13

2.3. Heyelanların boyutsal sınıflandırılması, (Heyelan tanımlama klavuzu). 18

3.1. Limit denge analizlerinde kullanılan yöntemler 66

4.1. Deney sonuçları formu. 76

4.2. Zeminin jeofiziksel özelliklerin belirlenmesi için sınıflandırmalar. 82

4.3. Zeminin fiziksel özellikleri, (Düzce İl Özel İdaresi Karaçörtlen Heyelan raporu). 83

4.4. Analizlerde kullanılan parametreler. 86

5.1. Geogridli duvarın tahkiki sonucunda çıkan güvenlik sayıları……...99

5.2. Analizlerin donatılı ve donatışız şevlerle karşılaştırılması……..104

5.3. Geogridlerin uygulamada kullanılabilecek çekme mukavemetleri……105

5.4. Geogrid donatılı duvarda kullanılması gereken malzeme gradasyonu……...105

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
AASTHO	Amerika Karayolları Zemin Sınıflama Sistemi
CR	Karot
FS	Güvenlik Sayısı
M-P	Morgenstern-Price
MTA	Maden Tetkik Arama
SPT	Standart Penetrasyon Deneyi
UNESCO	Birleşmiş Milletler Eğitim Bilim ve Kültür Örgütü
USCS	Birleşik Zemin Sınıflaması

1. GİRİŞ VE AMAÇ

1.1. Genel

Günümüzde insan nüfusu giderek hızlı bir şekilde artmaktadır. Buna bağlı olarak eğimli yamaçlarda yerleşim alanları oluşmaktadır. Doğal bitki örtüsünün tahrip edilip arazinin yapısına uygun olmayan bir şekilde konut, fabrika vb. yapılar ve bu yapılara ulaşım için yol ağının artması, jeolojik çevreyi önemli ölçüde değiştirmiş ve etkilemiştir. Yamaçlardaki bu gelişmelerin sonucu olarak heyelan oluşma tehlikesi artış göstermiştir. Eğimli arazilerdeki yerleşim alanlarında; doğal drenajın bozulması, topuk bölgesinde yapılan dikkatsiz kazılar ve çalışmalar, tarım amaçlı mevcut ve doğal ağaçların kesilip yerlerine toprağı derinlemesine sarmayan bitkilerin dikilmesi, atık suların yamacı oluşturan malzemeye doğru akması, üzerine yük oluşturan malzemenin yığılması, sanat yapıları inşası, yeni yol açılması ve yol güzergahında yapılan genişletme çalışmaları, yeterli drenaj sağlanmaması sonucunda yüzey ve yağmur sularının neden olduğu boşluk suyu basınçlarındaki artışlar, deprem, şiddetli yağışlar, volkanik olaylar, ani sıcaklık değişimleri, gibi etkiler bu arazilerin yapısını bozarak duyarsızlık oluşturan en önemli faktörlerdir.

Heyelan; kaya, toprak veya benzeri katı materyallerin belirli derinlikte kayma düzlemi bulunan kısımlarında, düzlemin üstünde kalan kitlenin yer çekimi etkisiyle eğim aşağı kayma hareketiyle oluşur. Uzun süreli ve yoğun yağışın etkili olduğu, nemli iklimle beraber dik eğimli topoğrafyaya sahip bölgelerde oldukça sık görülür.

Heyelan; depremden sonra gelen en tahrip edici afet olup aynı zamanda sel ve taşkınların oluşmasına da katkı sağladığı için can ve mal kayıplarının yüksek olmasına yol açmaktadır.

İnsanlar günümüzde; ekonomik baskıyla kaygı duyarak, yeterli inceleme yapmadan heyelanlı veya heyelan oluşabilecek alanlara yerleşmeleri, heyelan afetinin artmasında önemli rol oynamaktadır. Ülkemizde ve dünyada bu afetin zararlarını azaltmak için güncel ve ekonomik teknikler kullanmalı ve bu konuya daha fazla önem verilmelidir.

1.2. Amaç

Bu tez kapsamında, Türkiye'de ve dünyada oldukça sık yaşanan ve doğal afet türü olan heyelanla ilgili ve bunun sonucunda heyelan önleme yöntemlerinden ekonomik ve güncel bir uygulama olan geosentetikler hakkında genel bilgi verilerek, Türkiye'nin Karadeniz bölgesindeki Düzce İlinin Çilimli İlçesi Karaçörtlen köyünde yer alan heyelanın GEO5 programıyla limit denge ve sonlu elemanlar yöntemleri (gerilme-deformasyon) kullanılarak şev stabilite analizi yapılmıştır. Bu analizlerde, geosentetiklerin bir çeşidi olan geogrid kullanılarak heyelanın duraylı hale gelmesi amaçlanmıştır.

1.3. Kapsam

Araştırma, Düzce ilinin Çilimli ilçesi Karaçörtlen köyünde yer alan heyelanın analizi ve önleme yöntemi çalışmalarını içermektedir. İnceleme alanına ait saha çalışmaları ve jeolojik veriler ışığında zemin profili belirlenerek şev duraylılığını tetkik etmek için sayısal modelleme yöntemlerini kullanan GEO-5 programıyla ilgili şevin kritik kesitleri üzerinde stabilite analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda ortaya çıkan bu hareketi engellemek ve uzun süre duraylı kalmasını sağlamak amacıyla geogrid uygulamasıyla geoteknik model ortaya konmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Heyelan genel anlamı ile yerel jeolojik, jeomorfolojik, hidrojeolojik, klimatolojik ve meteorolojik etkenlerin ürünü olarak; insanların çeşitli aktiviteleri, arazi kullanımı, bitki örtüsü durumlarından etkilenen; yağış ve sismik olayların sıklığı ve şiddeti tarafından kontrol edilen, yapay ve doğal şev duraysızlıklarıdır, (Soetersand Van Westen, 1996). Dünyada heyelanlardan kaynaklanan ekonomik kayıplar 4 milyar US dolara ulaşmış durumda ve yılda yaklaşık 1000 insan hayatını kaybetmektedir, (Alexander, 1995; Singhroy, 2005').

Dünyada hiçbir ülke doğal afetler açısından tam olarak güvenli olmadığı gibi, afetlerin etkilerinin sınırlandırılmasına yönelik çalışmalar yetersiz kalmaktadır. Her yıl doğal afetler nedeni ile ölümlerin % 97'si gelişmemiş ve gelişmekte olan ülkelerde meydana gelmektedir. Dünyada diğer doğal afetlere göre heyelan kaynaklı ölüm oranı % 1,5 olarak bilinmektedir (EMDAT, 2003; Nadim et al.,2006'). Türkiye'de ise dünya için verilerin değerlere göre 10 katı fazlasına ulaşmaktadır.

Heyelanlar Türkiye'yi çok yakından ilgilendiren depremler, su baskınları gibi doğal afetler içerisinde yer alırlar. Bu da bu afetin kütle hareketinden çok bir afet olduğunu göstermektedir. Kütle hareketinin esas nedeni yer çekimidir. Kütle hareketinin hızını azaltan ve artıran pek çok etken ve birbirini takip eden olaylar zinciri söz konusudur.

Ülkemizde sahip olduğumuz iklim özellikleri ve jeolojik yapı nedeniyle büyük can ve mal kayıplarına yol açan doğal afetler sıkça görülmektedir. Ülke topraklarımızın % 66'sı 1. ve 2. derece deprem bölgesinde bulunmaktadır. Nüfusu milyonları bulan büyük kentlerimizde dahil olmak üzere, ülke nüfusunun büyük çoğunluğunun yaşadığı ve büyük sanayi tesislerinin olduğu bu bölgelerde, her an deprem ve dolayısıyla kütle hareketi olma olasılığı yüksektir (Afet İşleri Genel Müdürlüğü, 2008).

Yanlış arazi kullanımı, kentsel planlama ve yapılaşmadaki düzensizlikler, nüfusun tehlikeli bölgelerde giderek yoğunlaşması, mevzuat eksikliği ve denetim yetersizliği, toplumsal yoksulluk ve ekonomik kaygı, hazırlıksız toplum ve kurumlar, kaynakların

uygun olmayan biçimde kullanılması, iklim değişikliğinin etkileri, ormanların tahrip edilmesi ve çölleşme gibi faktörler Şekil 2.1.' de gösterildiği gibi birbiriyle ilişkili olup doğal afetlerin olma olasılığını artıran bir eğim oluşmaktadır.



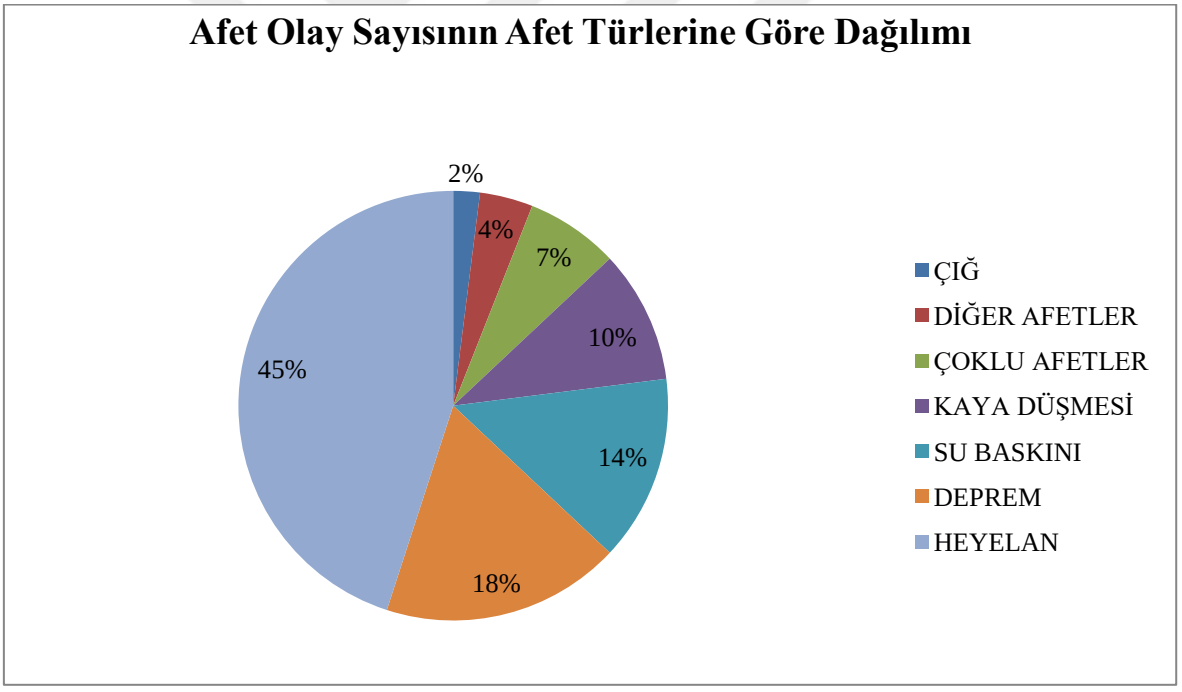
Şekil 2.1. Karadeniz bölgesinde bir alanın maruz kaldığı heyelanlar.

2.1. Türkiye'de Afet Tehlikelerinin Değerlendirilmesi ve Heyelanların İstatiksel Dağılımları

Ülkemizde meydana gelen afetlerde heyelanlar; afet olay sayısına göre en çok rastlanan afet türüdür. Çizelge 2.1. ve Şekil 2.2.'de gösterildiği gibi depremlerden etkilenen toplam afetzede sayısı 158.241 olup, afet türlerine göre % 55'lik bir paya sahip olup heyelanlardan etkilenen toplam afetzede sayısı ise 59.345 olup % 21'lik payla 2. sırada yer almaktadır (Afet İşleri Genel Müdürlüğü, 2008).

Çizelge 2.1. Afet türüne göre, afet olay sayısı ve afetzede sayılarının genel dağılımı.

AFETLER	AFET OLAY SAYISI	AFETZEDE				ETKİLENEN TOPLAM AFETZEDE SAYISI	ETKİLENEN AFETZEDE SAYISI (%)
		ETKİLİ NAKİL	İLAVE NAKİL	ETKİSİZ NAKİL	NAKİL İPTALİ		
HEYELAN	13494	65759	2622	3998	13034	59345	21
KAYA DÜŞMESİ	2956	19699	935	2442	3654	19422	7
SU BASKINI	4067	29020	506	1197	8566	22157	8
DEPREM	5318	157794	45	637	235	158241	56
DİĞER AFETLER	1175	11309	8	85	2165	9237	3
ÇIĞ	731	4409	181	336	542	4384	2
ÇOKLU AFETLER	2024	17221	629	838	6478	12210	4
TASNİF EDİLMEMİŞLER	42	0	0	0	0	0	0
TOPLAM	29807	305211	4926	9533	34674	284996	100,00

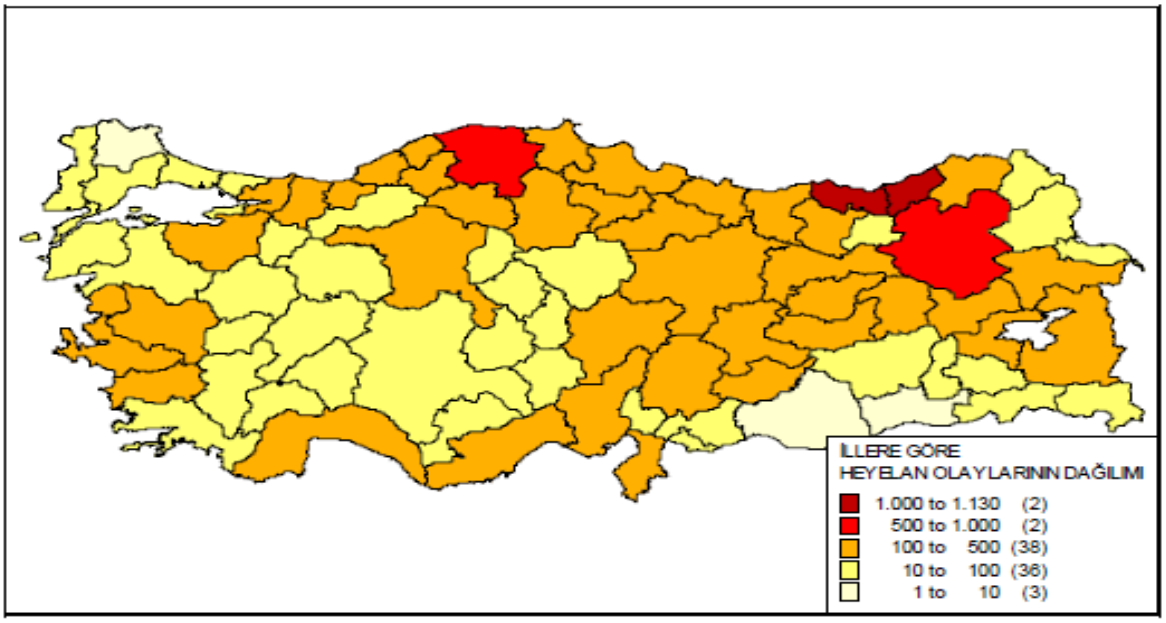


Şekil 2.2. Afet türlerinin dağılımı afet olay sayısı bazında.

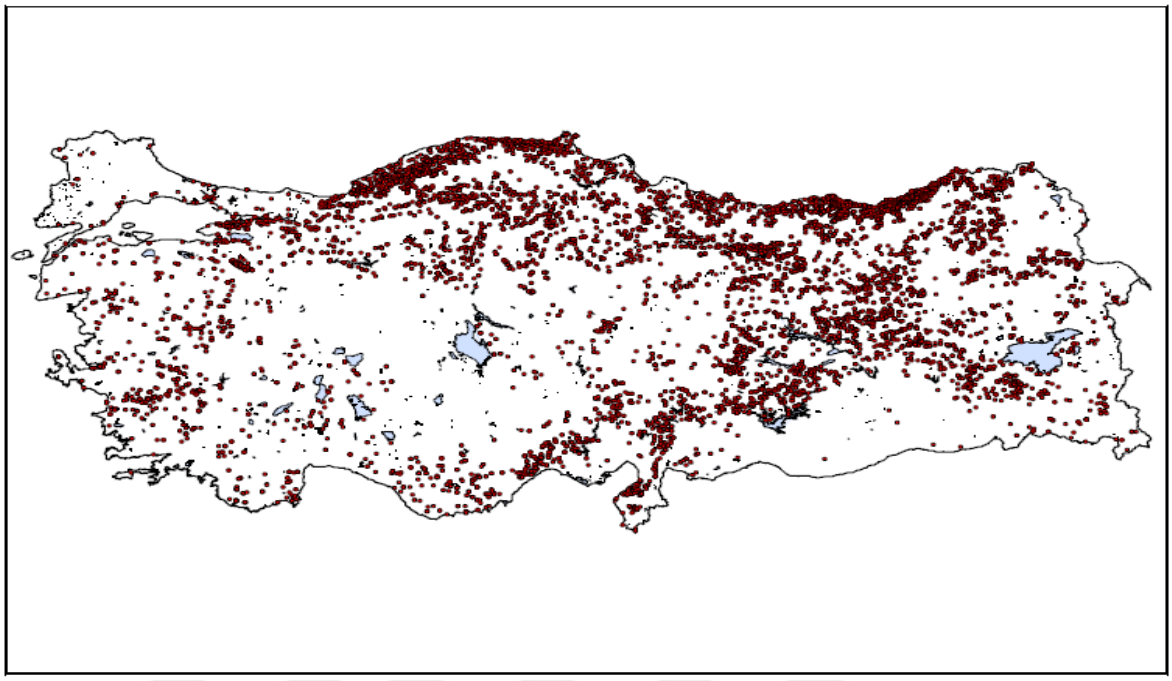
Türkiye' de heyelanlı yerleşim alanları özellikle Karadeniz Bölgesinde (Trabzon, Rize, Karabük, Bartın, Zonguldak ve Kastamonu civarlarında) aktif fay ve fay zonları boyunca yoğunlaşmaktadır.

Orta ve Batı Karadeniz'de, litolojik olarak özellikle Kratese ve Eosen flişlerinin, Doğu Karadeniz'de ise Kratese ve Eosen Volkaniklerinin; heyelanların oluşumuna pozitif yönde etki etmekte olduğu bilinmektedir. Heyelanlar Orta ve Batı Karadeniz' de kayma şeklinde Doğu Karadeniz' de ise akma şeklinde gözlenmektedir.

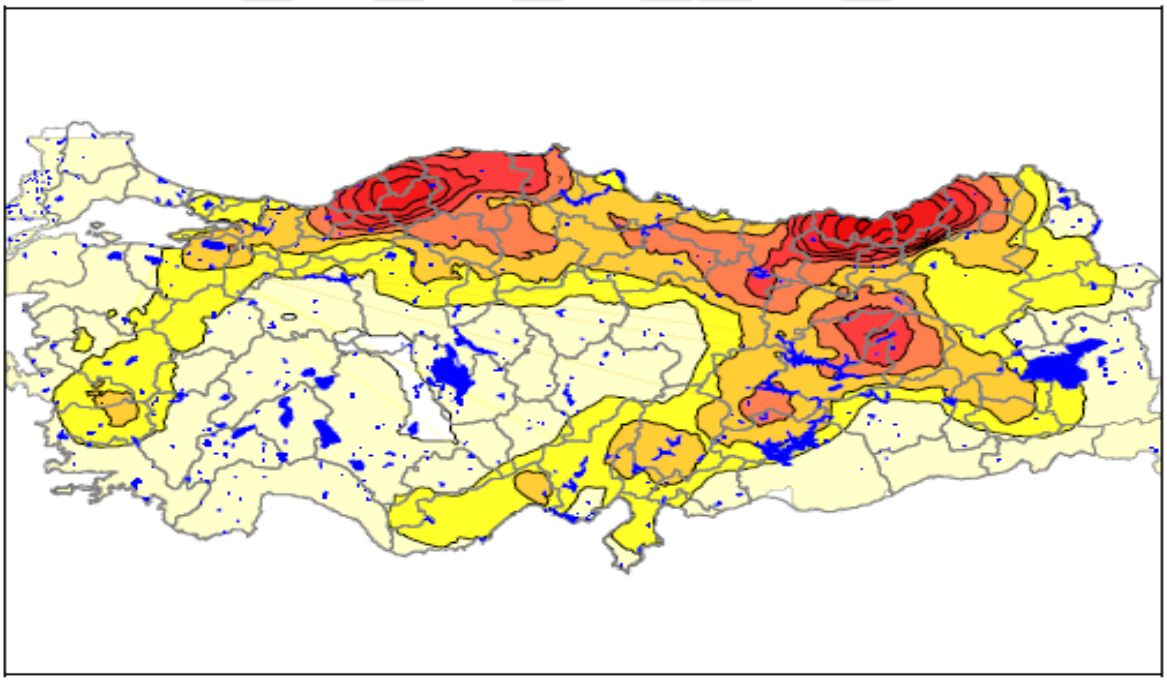
Türkiye' de Afet İşleri Genel Müdürlüğünden (2008) alınan verilere göre heyelanlı yerleşimlerin; olay sayısı bakımından illere göre dağılımı (Şekil 2.3.) mekânsal dağılımları (Şekil 2.4.) ve heyelan yoğunluk haritası Şekil 2.5.'de sunulmaktadır. Bu şekiller bize ülkemizdeki heyelanların hangi bölgelerimizde ve nasıl bir topoğrafyada daha çok görüldüğünü açıkça göstermektedir.



Şekil 2.3. Heyelan olay sayısı bazında heyelanlardan etkilenen illerin dağılımı.



Şekil 2.4. Türkiye'de heyelanlı yerleşim alanlarının mekânsal dağılımı.

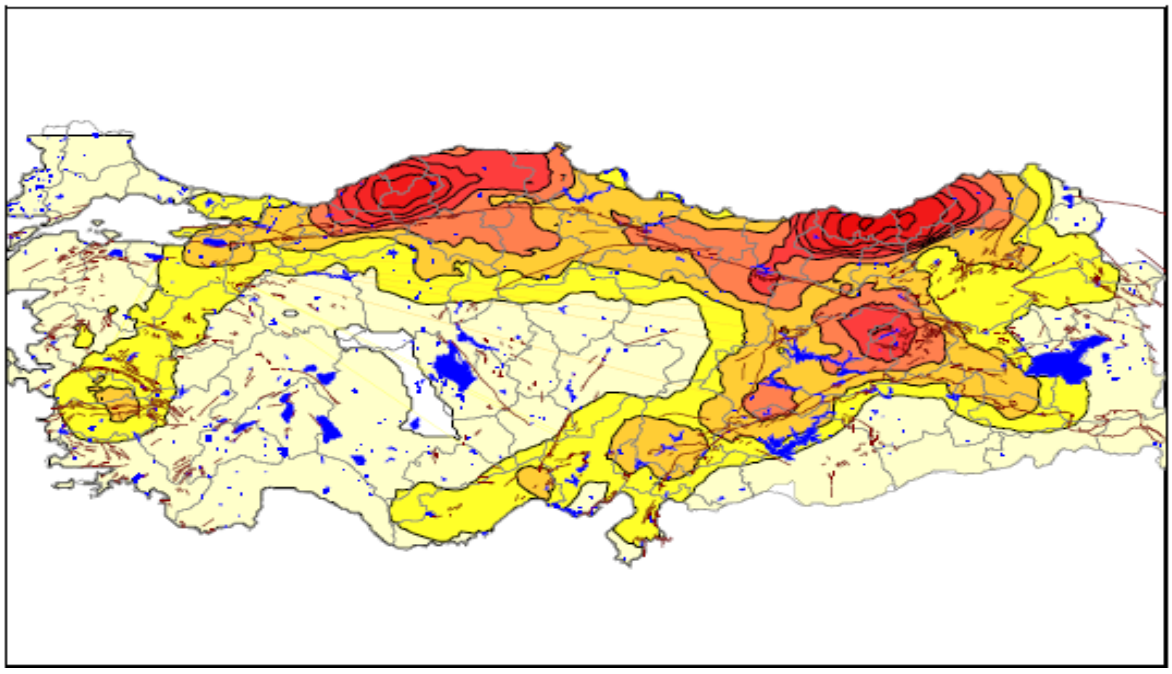


Şekil 2.5. Heyelanlı Yerleşim Birimleri'nden elde edilmiş "Heyelan Noktasal Yoğunluk Haritası"

Heyelanların oluşma tehlikesini artıran önemli sebeplerden biri de depremlerdir. Heyelan afetine maruz kalmış yerleşim birimleri ile faylar ve fay kuşakları

karşılaştırıldığında anlamlı bir ilişki olduğu görülmektedir Şekil 2.6'da Türkiye heyelan yoğunluk haritasının, Türkiye Aktif Fay Haritası'nda görülen faylar ile uyumlu olduğunu göstermektedir (Afet İşleri Genel Müdürlüğü 2008).

Afet İşleri Genel Müdürlüğü veri tabanında kayıtlı bulunan 35741 yerleşim biriminden 5472'sinde yani % 15,31 inde heyelan gözlenmektedir. Faylar ve fay kuşakları çevresinde yarıçapı 20 kilometrelik tampon oluşturulduğunda toplam 2379 yerleşim biriminde heyelan olayı gözlenmektedir. Bu sayı heyelan olayı gözlenen yerleşim birimlerinin faylar ve fay kuşaklarına en fazla 20 km mesafede olduğunu göstermektedir. Yani faylar ve fay zonlarının oluşturduğu deformasyonlar heyelanları tetiklemektedir.



Şekil 2.6. Aktif faylar ve heyelan noktasal yoğunluk haritası arasındaki ilişki.

2.2. Heyelanların Oluşturduğu Etkiler ve Türkiye'de Oluşmuş Heyelan Örneği

Heyelanlar can ve mal kayıplarına yol açmaktadır. Can kayıpları doğrudan zararlı olup bunların dışındakiler ise dolaylı zararlardır. Dolaylı zararlar doğrudan zararlardan daha fazla olabilmektedir. Dolaylı zararlar;

1. Heyelanlar nedeniyle tarım, ormancılık, sanayi ve madencilik sektörlerindeki

üretim kayıpları (Şekil 2.8.).

2. Heyelan nedeniyle ulaşım yollarının servislere kapanmasıyla etkilenen taşımacılık (Şekil 2.7.).

3. Heyelan oluşan bölgenin değer azalması ve insanların göçe mecbur bırakılması.

4. Heyelan oluşan bölgelerde akarsuyu, sulama kanalı ve içme sularındaki dengesizlikler.

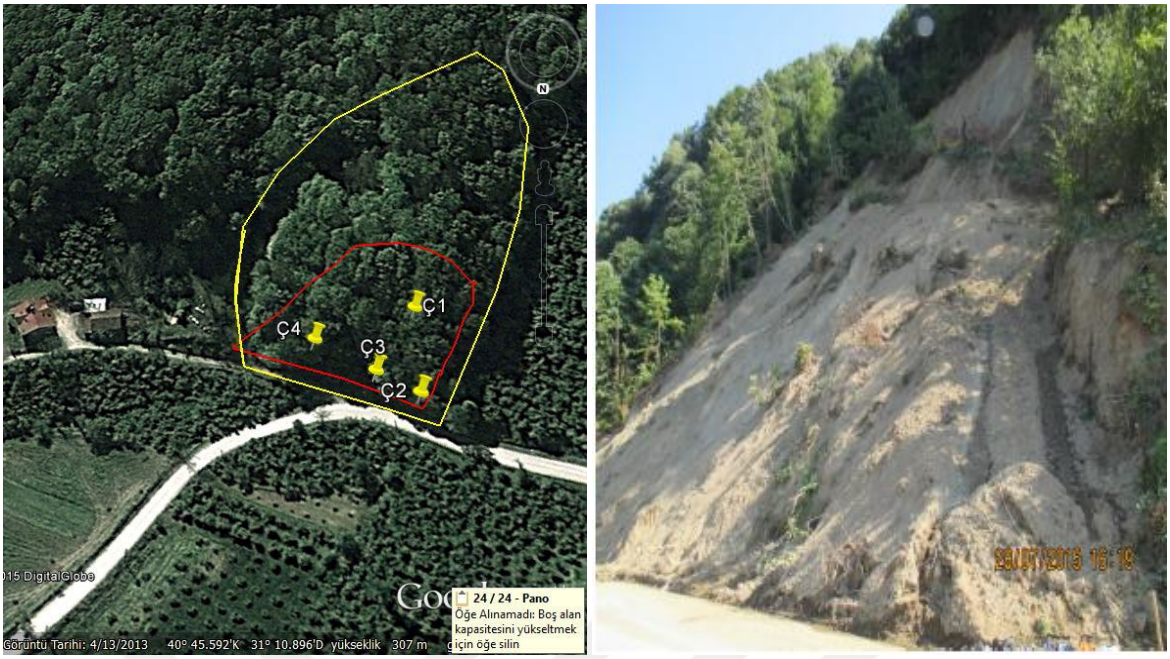
5. Heyelanlı bölgelerde önlem amacıyla yapılacak iyileştirme ve koruma amaçlı mühendislik yapılarının maliyetlerinin yüksek olması.

6. Ölüm, yaralanma ve psikolojik travmalar nedeniyle iş gücü ve potansiyel büyümelerin heyelanlı bölgelerde azalması.

7. Heyelanların etkisiyle oluşacak su baskınları, kaya düşmeleri gibi diğer afetler (Schuster, 1996).



Şekil 2.7. Heyelan nedeniyle etkilenen ulaşım (Düzce depremi sonrası Bakacak Mevkii, Bolu Dağı yolu), (Ankara- İstanbul Yolu).



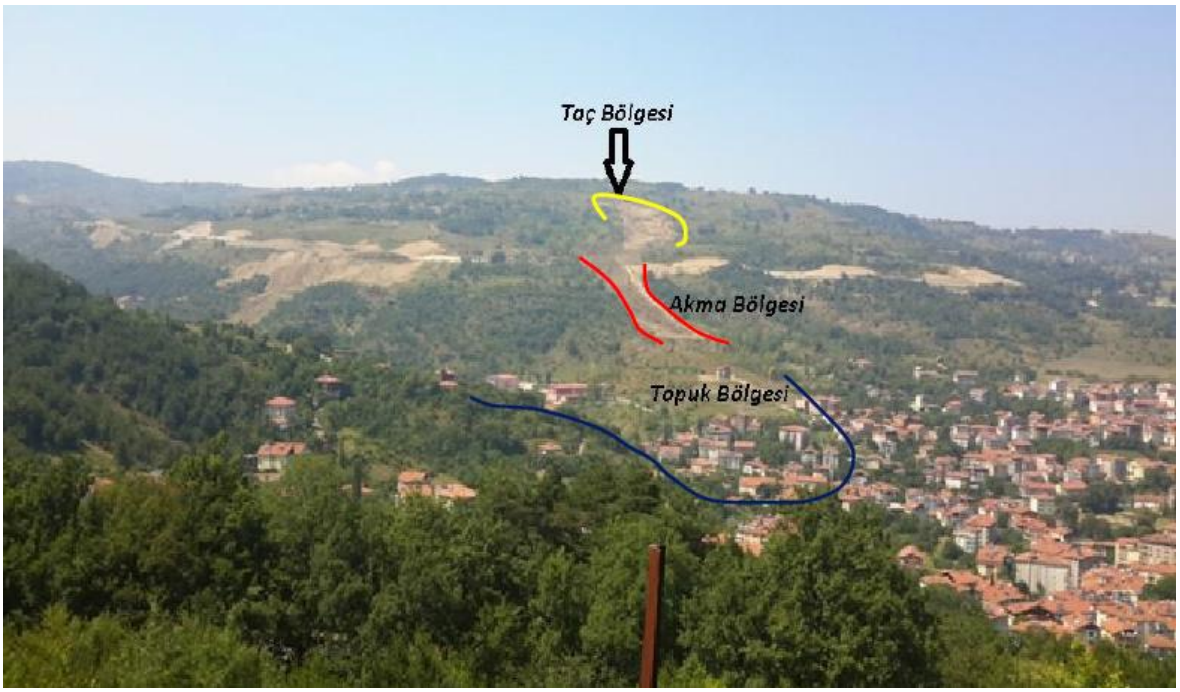
Şekil 2.8. Düzce İli Çınardüzü Köyü'nde heyelan nedeniyle tahrip olan orman.

Daha öncede ifade edildiği gibi ülkemizde heyelanların sıkça yaşandığı bölgelerin başında Karadeniz Bölgesi gelmektedir. Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Zonguldak iline bağlı Devrek ilçesinde 20 Nisan 2015'te başlayarak 27 Temmuz 2015 tarihine kadar hareketine devam eden heyelan, oradaki yerleşim birimlerini oldukça etkilemiştir. Meydana gelen heyelan Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesini içine alarak Devrek çayına bağlanan Çomaklar deresine doğru hareket etmiştir. Heyelan 3 ana kütle ve kanal yapısına sahip olup yerleşim alanlarının etkilendiği 700 metre uzunluğunda, genişliği yaklaşık 300 metre ve derinliği 53 metrelere varan bir kayma hareketi oluşmuştur, (Şekil 2.9.).

Bölgenin genel jeolojisine bakıldığında Paleosen–Eosen yaşlı Çaycuma formasyonu yer almaktadır ve birim kumtaşı, kiltaşı, silttaşı ve kısım kısım marnlarla temsil etmektedir. Heyelan bölgesinin özellikle topoğrafik eğim yönünde akma yapan kısmı yer yer suya doygun olduğu gözlenmiştir. Heyelan; biri okul binası olmak üzere 20'nin üzerinde yapıları kullanılamaz hale getirmiş ve aynı zamanda çomaklar deresinin kapanma tehlikesiyle karşı karşıya getirmiştir. (Şekil 2.10.).

Heyelan yapısı incelendiğinde, zeminde su miktarının artmasıyla birlikte topoğrafik eğim nedeniyle birimler içindeki boşluk suyu basıncının artması ve kütlenin kohezyonu (iç direnci) için gerekli su miktarının likit limit aşması sebebiyle meydana geldiği

düşünülmektedir. Devlet Su İşleri tarafından heyelan hareketini durdurmak amacıyla; yük hafifletme çalışmaları ve heyelan üzerindeki su birikintilerinin kurutulması, Çomaklar deresinin kapanmaması için geçiş borular koyulması, tehlikeli binaların boşaltılması ve kamulaştırma, topuk bölgesine kaya bloklardan oluşan yük takviyesi, yapılan sondajlardan alınan verilere göre alüvyon kalınlığının 25 metre olduğu gözlenmiş ve binalarında zarar görmemesi için fore kazık çalışmaları (Şekil 2.11.) ve Çomaklar deresinde taşkın kontrolü amacıyla 2 adet tersip bendleri yapılması uygun görülmüştür. (Ulusal Heyelan Sempozyumu- Tebliğler, 27-29 Nisan - Ankara).



Şekil 2.9. Devrek Heyelanı



Şekil 2.10. Devrek Heyelanı ve meydana getirdiği tahrip



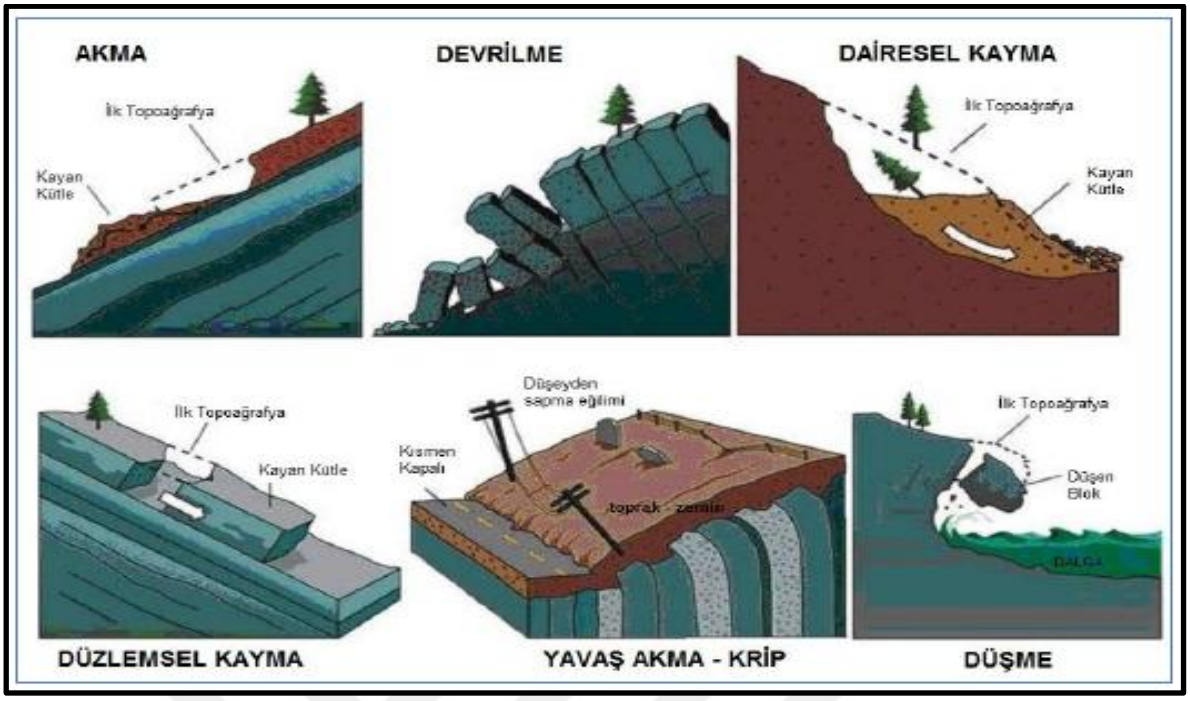
Şekil 2.11. Devrek Heyelanının hareketini durdurmak için yapılan çalışmalar.

2.3. Heyelanların Sınıflandırılması

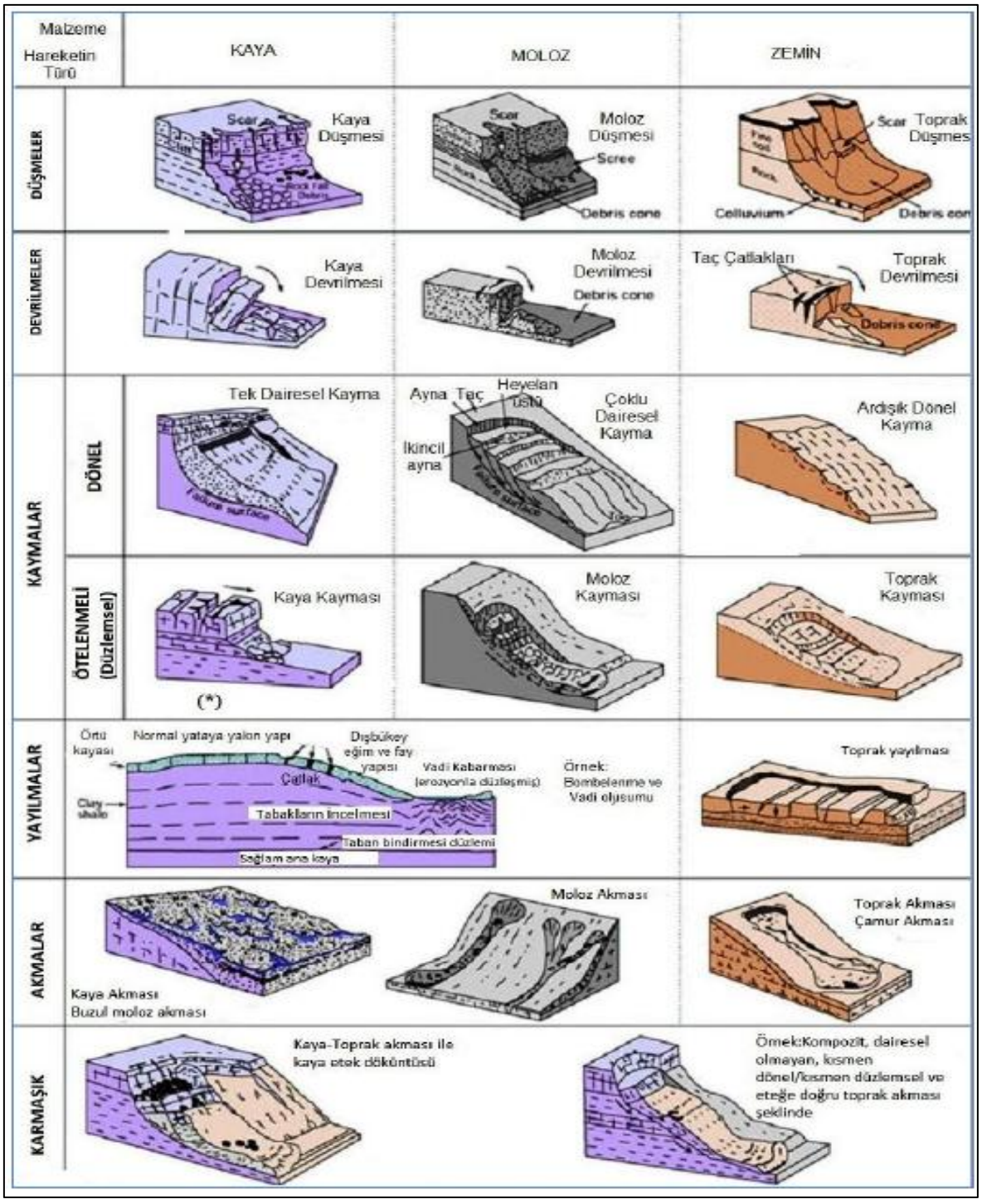
Heyelanlar için bir çok sınıflama yöntemleri bulunmakta olup bu duraysızlıkların sınıflandırılması ve önlenmesi amacıyla hareketin mekanizması ve kayma yüzeyi şekli, şevi oluşturan malzemelerin genel özellikleri, duraysızlıkların hızı ve yaşı gibi konuları dikkate alması açısından Varnes (1978) mühendislik sınıflaması günümüzde en yaygın kullanılan sistemdir. Varnes (1978), heyelan yerine yamaç hareketi terimini kullanmıştır. (Çizelge 2.2.). Şekil 2.12. ve Şekil 2.13'de bu sınıflamaların görsel ve açıklamalı örnekleri bulunmaktadır.

Çizelge 2.2. Hareketin Tipi ve Malzemenin Cinsine Göre Heyelanların Sınıflandırılması Varnes (1978)

<table>
<tr><td colspan="3" rowspan="3">HAREKETİN TİPİ</td><td colspan="3">MALZEMENİN TÜRÜ</td></tr>
<tr><td colspan="2">ZEMİNLER</td><td rowspan="2">ANA KAYA</td></tr>
<tr><td>İNCE TANELİ</td><td>İRİ TANELİ</td></tr>
<tr><td colspan="3">DÜŞME</td><td>Zemin Düşmesi</td><td>Moloz Düşmesi</td><td>Kaya Düşmesi</td></tr>
<tr><td colspan="3">DEVRİLME</td><td>Zemin Devrilmesi</td><td>Moloz Devrilmesi</td><td>Kaya Devrilmesi</td></tr>
<tr><td rowspan="2">KAYMA</td><td>Dairesel</td><td>Sınırlı Sayıda Birim</td><td>Zeminde Dairesel Kayma</td><td>Molozda Dairesel Kayma</td><td>Kayada Dairesel Kayma</td></tr>
<tr><td>Yanal</td><td>Çok Sayıda Birim</td><td>Blok Türü Zemin Kayması</td><td>Blok Türü Zemin Kayması</td><td>Kaya Ötelenmesi</td></tr>
<tr><td colspan="3">YAYILMA</td><td>Zemin Yayılması</td><td>Moloz Yayılması</td><td>Kaya Yayılması</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="2">AKMA</td><td>Zemin Akması</td><td>Moloz Akması</td><td rowspan="2">Kaya Akması (Derin Krip)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Zeminde Krip</td></tr>
<tr><td colspan="3">KARMAŞIK KAYMALAR</td><td colspan="3">İki veya daha fazla oluşan hareket türü</td></tr>
</table>



Şekil 2.12. Heyelan Hareketlerinin Genel Görünümü, (Heyelan Tanımlama Klavuzu, Karayolları Genel Müdürlüğü, 2015).



Şekil 2.13. Heyelan Türlerinin Görünümü, (Varnes 1978).

Düşme: Jeolojik formasyon cinsine göre kaya düşmesi, toprak düşmesi ve moloz düşmesi olarak adlandırılmaktadır. Kaya kütlelerinde süreksizlikler, toprak zeminlerde ise münferit blokların dik eğimli yamaçlardan, herhangi bir makaslama dayanımı yenilmesi olmaksızın, yer çekimi etkisi altında topuk oyulmaları ve donma çözülme etkilerine bağlı

olarak kendi ağırlığı ile düşmesiyle gerçekleşen harekettir, (Şekil 2.14.).



Şekil 2.14. Düşme yenilmeleri.

Devrilme: Kaya formasyonlarının yapısal özelliklerine bağlı olarak şevin tersi yönde eğimli ve devamlılığı yüksek süreksizliklerin neden olduğu yapısal özelliğin ekseninden dönerek domino etkisiyle kazı boşluğuna devrilmesi şeklinde gelişen harekettir.

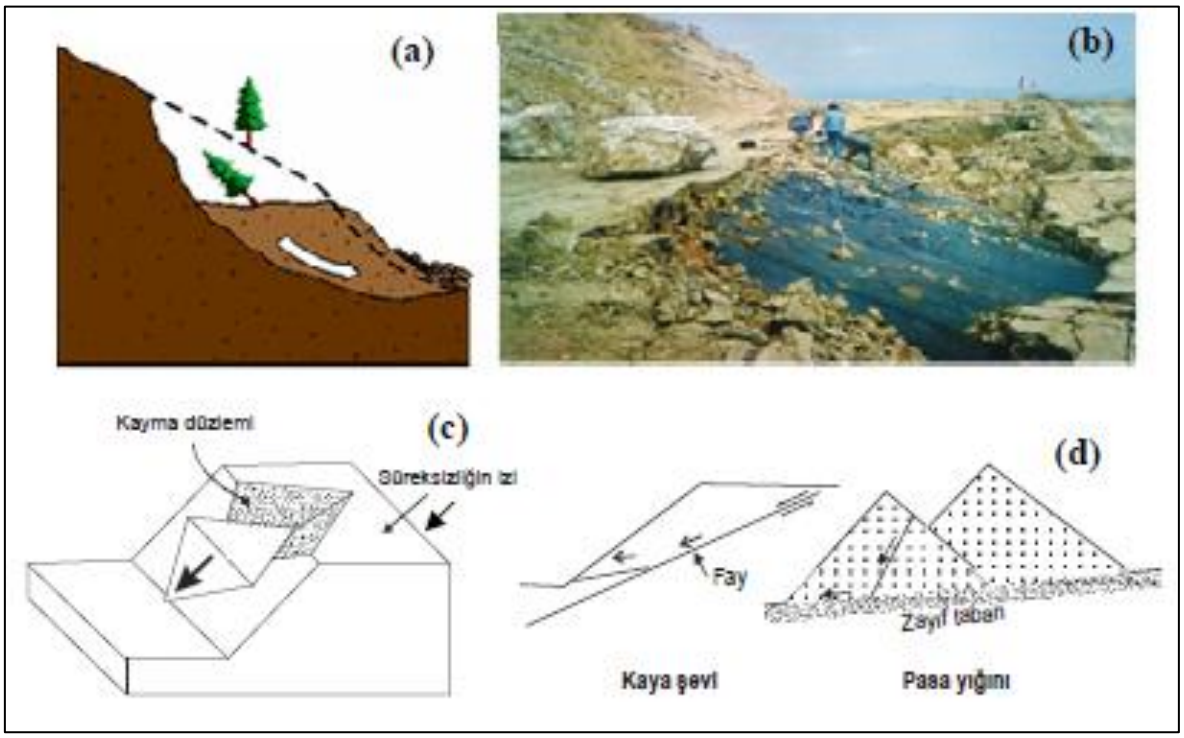


Şekil 2.15. Devrilme türü yenilmeler

Kayma: Kaymalar bir veya birden çok yüzey üzerinde makaslama yenilmesi sonucu meydana gelen şev hareketleri olup genel olarak dairesel kaymalar ve ötelenmeli düzlemsel kaymalar şeklinde ikiye ayrılır, (Şekil 2.16., Şekil 2.17.).



Şekil 2.16. Çoklu dairesel kaymalar.(Meksika otoyol ve ABD örneği)



Şekil 2.17. Kaymalar (a) dairesel kayma, (b) Düzlemsel kayma, (c) Kama tipi kayma, (d) Çok yüzeyli kayma.

Akma: Akmalar genel olarak parçalı kaya ve moloz birimlerinin tabandaki sağlam kaya formasyonunun geometrisine bağlı olarak moloz akması şeklinde meydana gelir ve toprak akması ise konsolide olmamış malzemelerin doygun veya kuru halde ve belirli bir hızda viskoz bir sıvı gibi yamaç boyunca dengeye ulaşıncaya kadar akmasıyla meydana gelen harekettir. Çizelge 2.3'de heyelanların boyutsal sınıflandırılması verilmiştir.

Çizelge 2.3. Heyelanların boyutsal sınıflandırılması, (Heyelan tanımlama klavuzu).

D/L (%)	**TANIM**
5--10	Kayma(Ötelenme)
0,5-3	Akma
15-30	Dönel Göçme

2.3.1. Heyelanlarda suyun değerlendirilmesi

Hareket etmiş malzemede ki basit gözlemlerle su içeriğini tanımlamak için Varnes (1978) ilk defa Radbruch-Hall (1978) tarafından önerilen tanımlamalar üzerinde bazı değişiklikler önermiştir;

1. Kuru; gözle görülür bir nem yok.

2. Nemli; biraz su içeriyor fakat serbest su akışı olmamakla birlikte malzeme akma göstermez ve katı yüksek plastik özellik gösterir.

3. Islak; Yeterli seviyede su içermekte, içerisinde su akışı var.

4. Çok ıslak; düşük eğimler altında sıvı şekilde akacak kadar su içerir.

5. Varnes (1978)' den farklı olarak akıcı ve sürekli akış olarak sel durumlarında her türlü eğimde yüksek hızda hareket eden malzeme.

2.3.2. Heyelanların geometrik tanımı

Unesco Working Partyfor World Landslide Inventory (WP/WLI) (1990), heyelanlarla ilgili bilgi transferini gerçekleştirmek ve ayrıca "Dünya Heyelan Envanteri" oluşturulması amacıyla önemli ve büyük heyelanların durumu, tipi, geometrisi, tarihi ve hacmi gibi bilgilerin bir araya getirilmesine ilişkin veri tutanağı önermiştir.

Aşağıda verilen Şekil 2.18.'e göre IAEG Commission on Landslides (1990), tipik bir heyelan plan ve kesit görünümünde isimlendirilmiş ve açıklanmıştır.

1. Taç; heyelanın en üst (2) ve hareket etmemiş kısmıdır.

2. Ana ayna; heyelanın üst ucunda, heyelandan etkilenmemiş bölgeden hareket eden kütlenin (13) ayrılmasıyla oluşan kayma yüzeyinin görünen kısmıdır (10).

3. Heyelanın tepesi; ana ayna(2) ile heyelan kütlesi (13) arasındaki en yüksek nokta.

4. Heyelan gövdesi; kayma yüzeyi üzerinde ana ayna ile kayma yüzeyi burnu (11) arasında kalan kısımdır.

5. Heyelan eteği; heyelanın topuğu (11) ötesine hareket ederek doğal arazi (20) üzerine oturmuş bölümdür.

6. Topuk; hareket eden kütlenin en alt ucu, hareket eden kütlenin toplandığı yer.

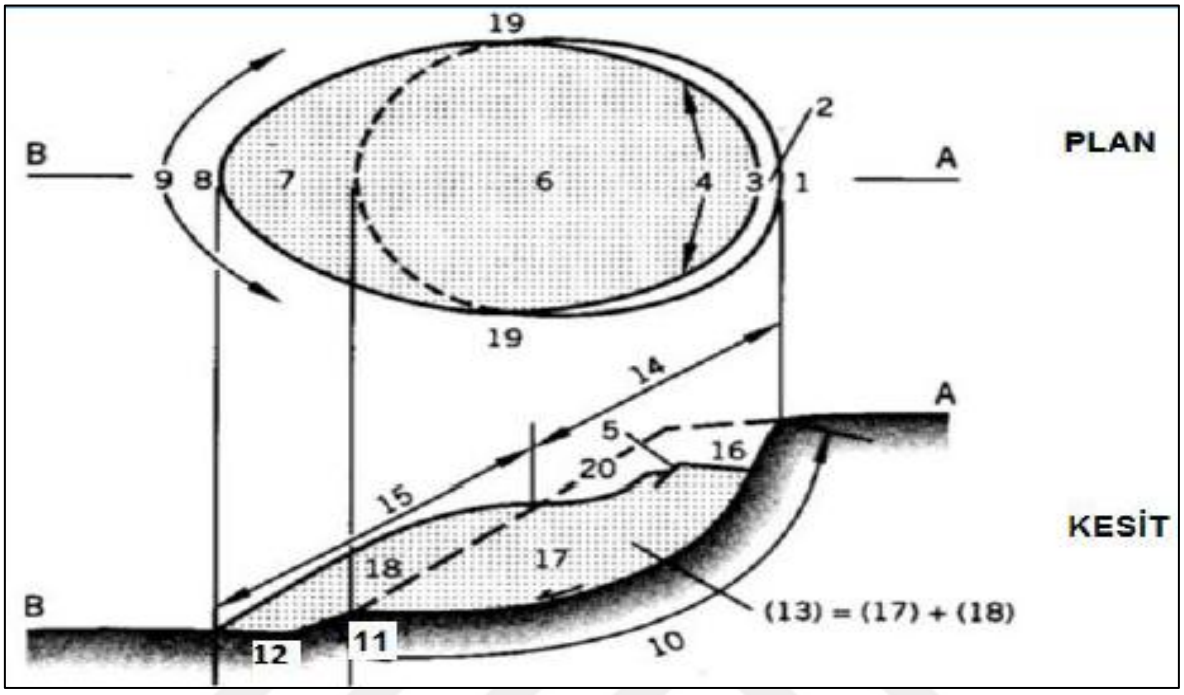
7. Kayma yüzeyi; heyelan olmuş kütlenin (13) alt sınırını oluşturan ve doğal zemin yüzeyinin (20) altında kalmış yüzeydir.

8. Heyelan kütlesi; şevde heyelan sonucu yerinden ayrılmış, kayıp (17) ve kabarma (18) kütlelerini içeren malzemedir.

9. Kayıp bölgesi; heyelan kütlesinin doğal arazi yüzeyi (20) seviyesi altında kalan kısımdır.

10. Birikim bölgesi; heyelan kütlesinin başlangıçtaki doğal arazi yüzeyi (20) üstünde kalan alandır.
11. Kabarma; başlangıçtaki doğal arazi yüzeyi (20) üzerine yükselen yer değiştirmiş kütlenin hacmi.

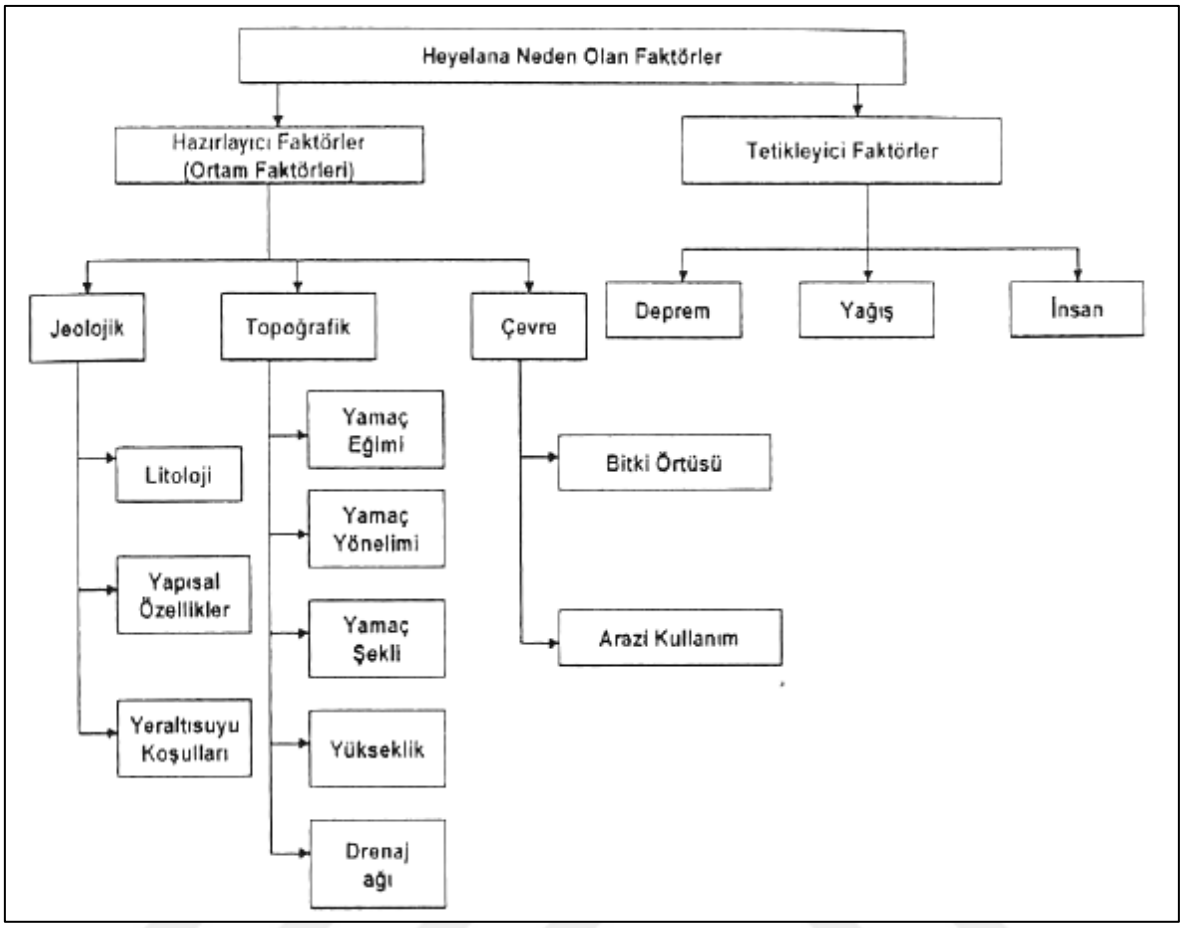
12. Doğal arazi yüzeyi; kütle hareketi oluşmadan önce arazinin kesitte görülen yüzeyidir.



Şekil 2.18. Dairesel olarak oluşan heyelanın bölümlendirilmesi, (Heyelan Tanımlama Klavuzu, Karayolları Genel Müdürlüğü, 2015).

2.4. Heyelanları (kütle hareketleri, şev yenilmesi) Tetikleyen Faktörler

Şev üzerine etki eden yerçekimi kuvvetiyle birlikte hazırlayıcı ve tetikleyici kuvvetler, şevin dayanma kuvvetini (makaslama kuvveti) aşmasıyla kütle hareketleri oluşur. Şekil 2.19. ‘da Heyelanlara neden olan hazırlayıcı ve tetikleyici faktörler (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001) gösterilmektedir. Bu faktörler;



Şekil 2.19. Heyelana neden olan faktörler (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001).

1. Jeolojik nedenler

- Zayıf malzeme,
- Hassas malzeme,
- Makaslamaya uğramış malzeme,
- Eklemli ve fissürlü malzeme,
- Tersine uzanan yapının kırılması,

2. Morfolojik nedenler

- Tektonik ve volkanik yükselme,
- Buzul erimesi,
- Yamaç topuğunun akarsu tarafında aşındırılması,
- Yamaç topuğundaki dalga aşındırılması,
- Yamaç topuğundaki buzul aşındırması,

- Yeraltı aşındırması,
- Yamaç üzerine veya yamacın tepesine yük konması,
- Bitki örtüsünün ortadan kaldırılması,

3. Fiziksel nedenler

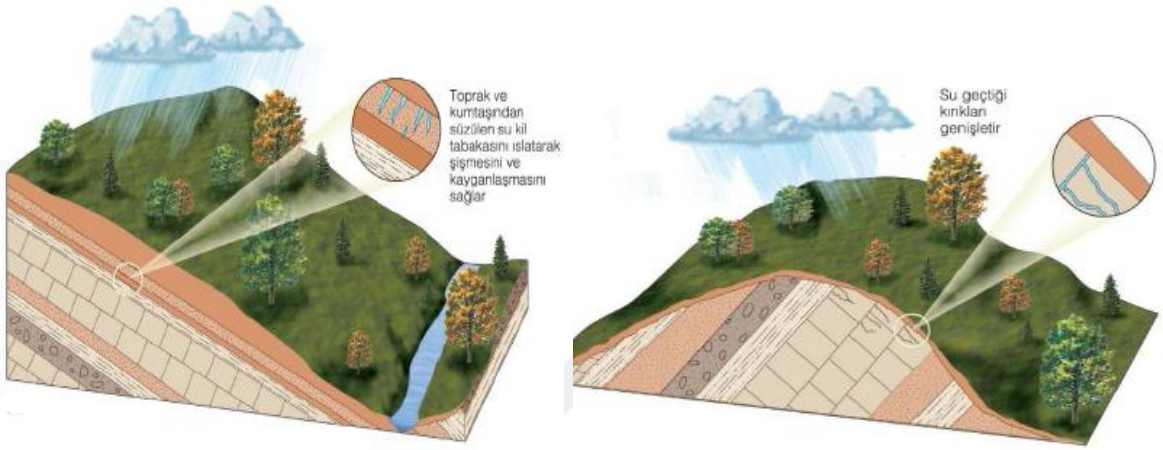
- Şiddetli yağmurlar,
- Karın hızlı erimesi,
- Taşkın ve gel-git olayında suların hızlı çekilmesi,
- Deprem,
- Volkanik püskürme,
- Çözülme,
- Donma ve çözülme yoluyla ayrışma,
- Şişme ve büzülme yoluyla ayrışma,
- Olağanüstü yağışların devam etmesi,

4. İnsan nedenleri ve yanlış arazi kullanımı

- Yamacın veya topuğun kazılması,
- Yamaca veya tepesine yük konulması,
- Göl suyu seviyesinin aşağı doğru çekilmesi,
- Ormansızlaştırma,
- Yanlış tarımsal faaliyetler,
- Toprağı sulama,
- Maden kazıları,
- Yapay titreşimler,
- Kullanımdan kaynaklanan su kaçakları.

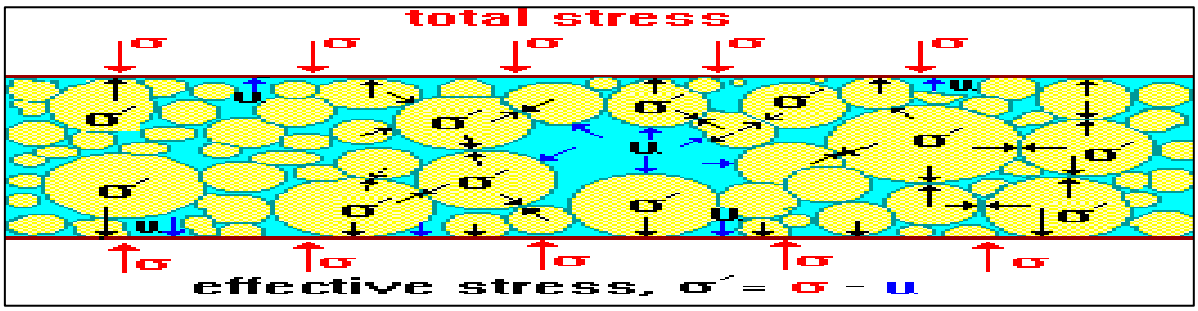
Jeolojik yapı şev duraylılığında önemli bir parametredir. Şevin altında uzanan kayaçlar şevle aynı yönde eğime sahip ise kütle hareketinin olma olasılığı daha da artar. Jeolojik birimler şevle aynı önde olduğunda çeşitli düzlemler boyunca süzülen su, komşu tabakalar arasına girer. Bu süzülen su birimler ve taneler arasındaki kohezyonu ve sürtünmeyi azaltır. Özellikle bu süzülen su kil tabakalarını ıslatarak şişmesini ve kayganlaşmasını sağlar. Eklemler boyunca süzülen su, kayayı ayrıştırarak ve üstteki

kayacın ağırlığı onu düşürene kadar çatlakları genişletir. Yamaçtaki malzeme zayıf birimlerden (şeyl, şist vb.) oluşmuş ise bu yamacın potansiyel heyelan bölgesi olma olasılığı çok yüksektir. Her malzemenin gerilme-birim deformasyon davranışı farklılık gösterir, (Şekil 2.20).



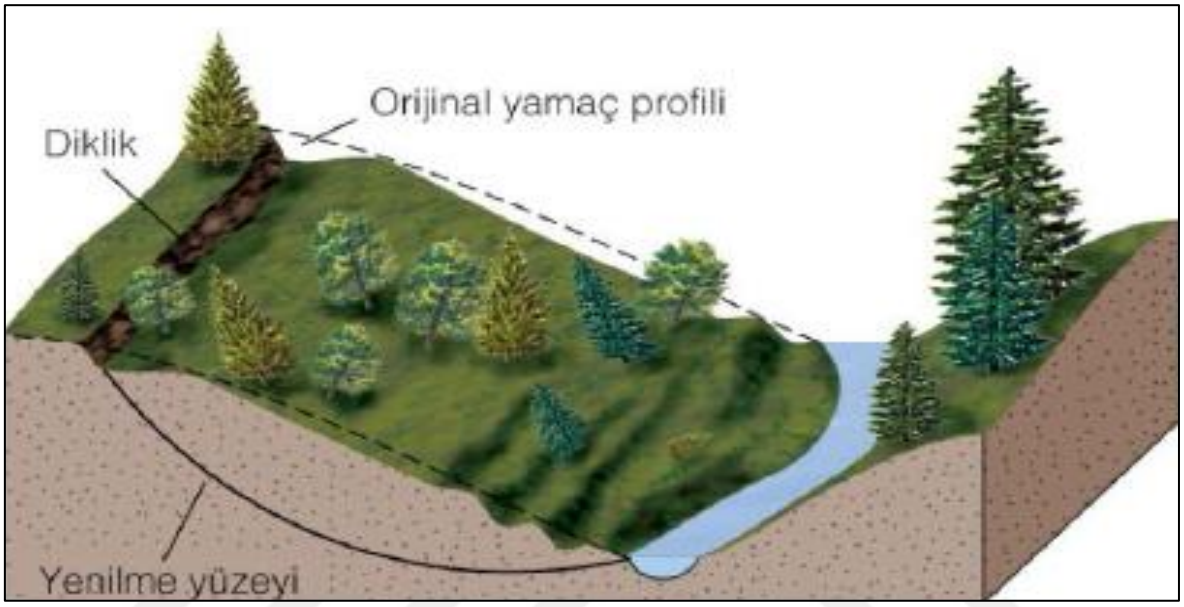
Şekil 2.20. Kütle hareketini tetikleyen faktörlerden biri olan suyun sızması.

Yer altı suyunun ani yükselmesi, yüzey suları ve şiddetli yağış, boşluk suyu basınçlarını artırmakta (normal gerilmenin azalmasıyla kesme dayanımında azalma, çekme çatlaklarında artan basınç nedeniyle eğim yönünde kesme kuvvetindeki artış ve doygunluktan dolayı malzemenin ağırlaşması) ve zemindeki dayanımı azaltıp duraysızlığı teşvik eden kuvvetleri artırmaktadır (Şekil 2.21). Bu faktörler kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerini düşürerek yamaçtaki malzemenin kaymasını kolaylaştırır ve yamaç topuğunu aşındırır (akarsu aşındırması). Aynı zamanda şev de açılan yol yarmaları da yamaçları duraysızlaştıran önemli etkendir.



Şekil 2.21. Boşluk suyu basıncının artmasıyla normal gerilmenin azalması ve kesme kuvvetinin de buna bağlı olarak azalması, (Terzaghi, 1936).

Şev açısı; bir şevin yatayla yaptığı açıdır. Genellikle şev açısı ne kadar yüksekse o kadar duraysızdır. Kritik şev açısı ise; bir şevin stabilitesi bozulmadan yatayla yaptığı en yüksek açı olarak tanımlanır. Şekil 2.22., ve Şekil 2.23'de yamaçta yapılan çalışmaların şev açısını değiştirerek yamacı duraysız hale getirmesiyle ilgili örnekler sunulmuştur, (Karayolları Genel Müdürlüğü, Heyelan Tanımlama Klavuzu, 2015).

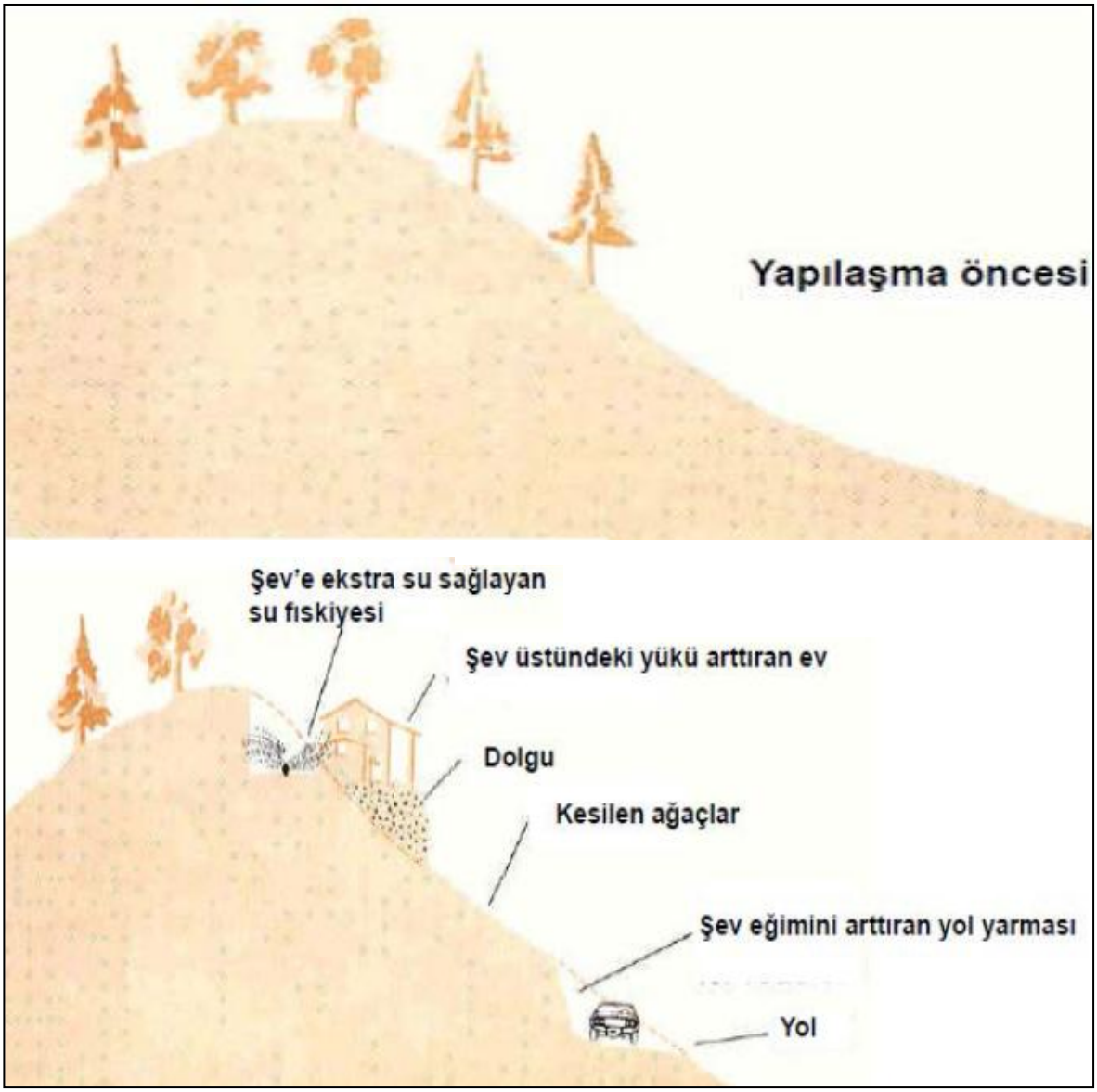


Şekil 2.22. Akarsuyun topuğu aşındırması, şev açısını artırarak şevin tabanını kaldırması ve şev yenilmesine yol açması.



Şekil 2.23. Eğimli arazide açılan yol yarmasının şev yenilmesine yol açması.

Arazinin jeolojik özellikleri dikkate alınmadan yapılan her türlü kullanım şekli yanlış arazi kullanımıdır. Bir yamaçta; malzemenin boşaltılması, yığılması ya da yük bindirilmesi şev yenilmelerine sebep olur (Şekil 2.24.).Tarım arazilerinin tarım amacı dışında kullanılmaları, orman alanlarının tahrip edilmesi, kurak ve yarı kurak arazilerde aşırı sulama yapılması eğimli arazilerde toprakların yukarıdan aşağıya doğru sürülmesi yanlış arazi kullanımıdır.



Şekil 2.24. Yanlış arazi kullanımıyla oluşabilecek heyelan.

2.5. Heyelanları Önleme ve Zarar Azaltma Yöntemleri

Yerleşim alanlarında oluşan heyelanlarla ilgili bazı yaklaşımlar bulunmaktadır (Shuster ve Highland, 2007). Bunlardan en önemli ve günümüzde kullanılması gereken yaklaşım; ciddi hasarlar (can ve mal kaybına yol açan veya açabilecek) gelmeden önce heyelanlı bölgeden uzaklaşılması ve iyileştirici önlemler alınması.

Heyelan etkilerinin önlenmesi için yapılacak olan işlem bu afeti meydana getiren sebepleri yok etmek, kaymaya neden olan kuvvetleri azaltıp, kaymaya karşı koyan kuvvetleri artırmakla olabilecektir. Bu kapsamda heyelan etkilerini yok etmek veya azaltmak için aşağıdaki önlemleri sıralayabiliriz;

1. Şev geometrisinin düzenlenmesi;
- Şev açısının düşürülmesi
- Yamacın tepesinden yük kaldırılması
- Şev topuğunun desteklenmesi, ağırlık konulması veya artırılması
- Palye (basamak) yapılması

2. Drenaj yapılması;
- Yüzeysel drenajlar ve Derin drenajlar

3. Şev içine çeşitli yapısal bileşenler koyarak zemin taşıma gücünün ve kaymaya karşı koyan kuvvetlerin artırılması;
- Kazık veya mikro kazıkların yapılması (makaslama kuvvetine karşı kuvvet oluşturmak için)
- Ankraj gibi sürtünme kuvvetlerini artırıcı bileşenler
- Geosentetik ürün kullanarak zemin taşıma gücünü, sürtünmeyi ve kaymaya karşı koyan kuvvetleri artırmak.

4. Taş duvar veya istinat duvarı gibi dayanma yapıları

5. Yüzey koruma yöntemleri

Heyelanlardan kaynaklanan zararların azaltılması için en ekonomik ve kolay

yöntem heyelana duyarlı yerleşim alanlarından kaçınmaktır. Heyelanlı veya heyelana duyarlı bölgelerde ve yeni yerleşimlerin olması durumunda heyelan duyarlılık haritalarından yararlanılmalıdır. Heyelan envanter haritaları, Türkiye'de MTA Genel Müdürlüğü tarafından bölgesel ve ulusal ölçekte oluşturulmakta olup verilerin sayısallaştırılarak Coğrafi Bilgi Sistemleri ortamında arşivlenmektedir. Arazi kullanımıyla ilgili esaslar;

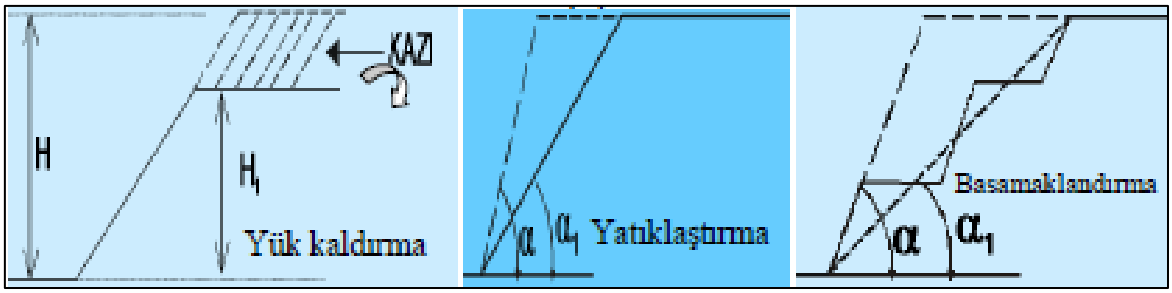
1. Heyelana duyarlı yamaçlar üzerindeki yerleşimler konusunda toplumun eğitilmesi, kurallar konarak yerleşimlere izin verilmemesi

2. Heyelana duyarlı yerleşim alanlarında yaşayan insanların duraylı alanlara nakli (Shuster ve Highland, 2007).

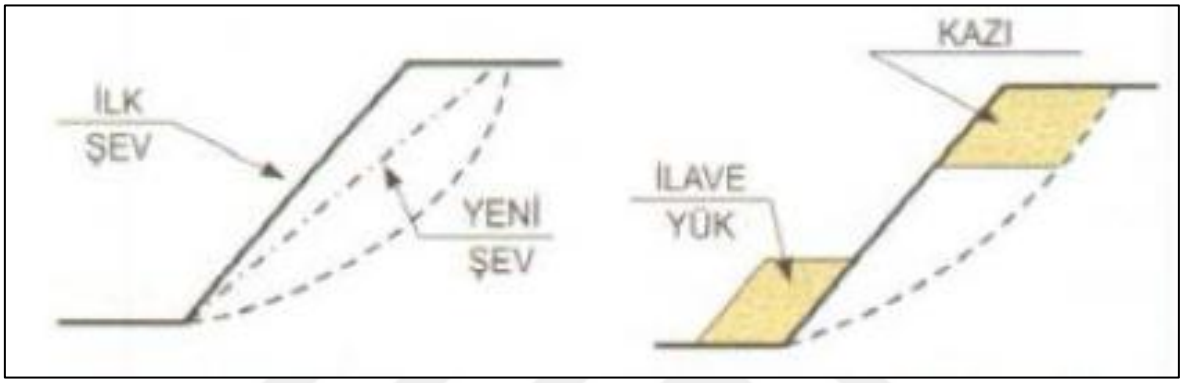
Heyelan etkilerinin azaltılmasına yönelik tekniklerin hepsi, doğal yamaçlarda yerleşim yapılmış alanlarda heyelanların etkisinden kurtulmak için ve karayolu, maden işletmeleri, dolgu ve barajlar gibi mühendislik şevlerinde duraylılığın sağlanması ve artırılması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadırlar. İyileştirme tekniklerinin başlıca amaçları; şevin duraylı hale gelmesini sağlamak veya şevdeki malzemenin içsel dayanımını artırarak kaymaya karşı koyucu kuvvetlerin kaymaya sebep olan kuvvetlere göre daha yüksek olmasını sağlamaktır.

2.5.1. Şev geometrisinin düzenlenmesi

Dengeyi bozacak ek yüklerin kaldırılması, topuk kısmına yük konularak destek sağlanması, şev yüzeylerine şekil vererek şev açısının küçültülmesi ve şevde basamaklandırma yapılarak kaymaya neden olan yükün hafifletilmesi gibi işlemlerin yapılması veya diğer bir değişle; şev duraysızlığıyla karşılaşabilecek yerlerde, şevin doğrultusunun değiştirilerek süreksizliklerin kayma üzerindeki etkisinin giderilmesi işleri şev iyileştirme (şevin geometrisinin düzenlenmesi) yöntemleridir (Şekil 2.25. ve 2.26.).



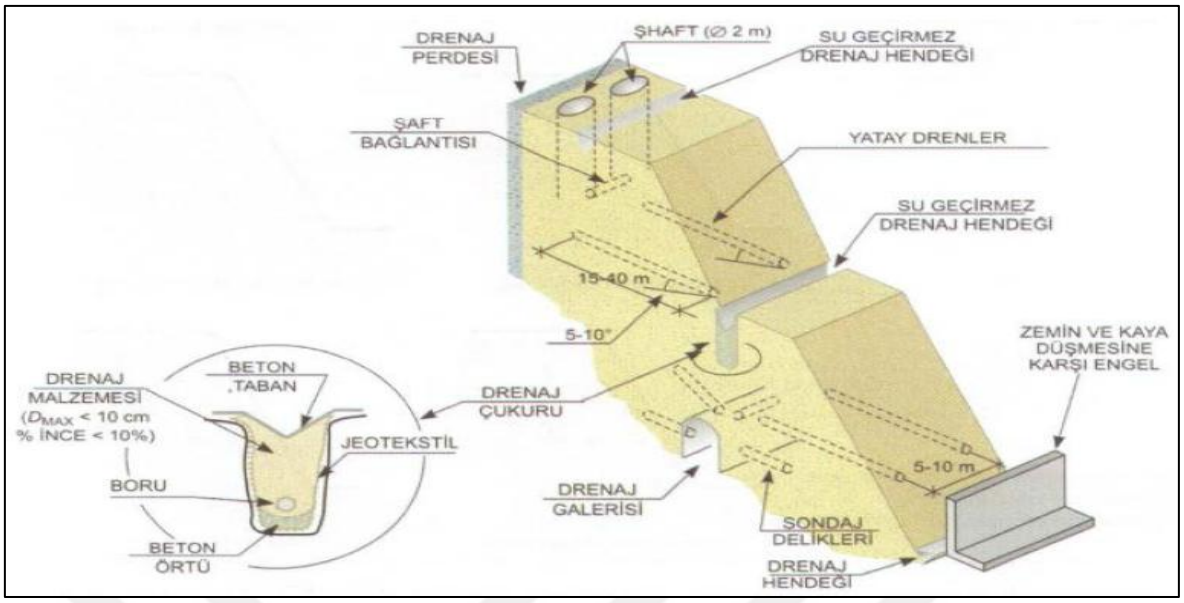
Şekil 2.25. Şev geometrisinin değiştirilerek yamacın duraylılığını artırmak.



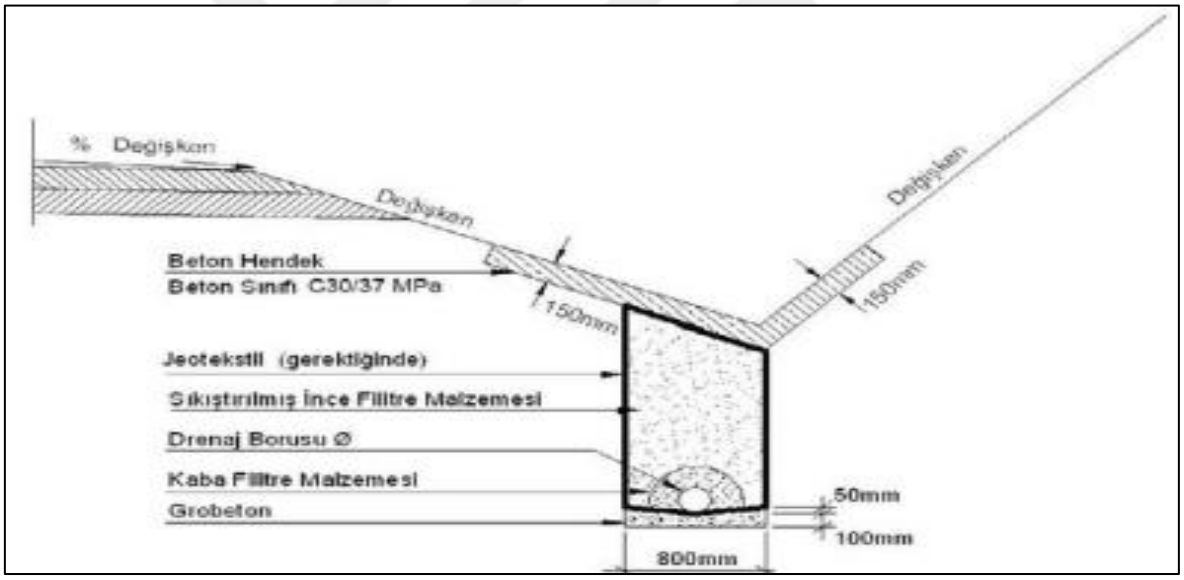
Şekil 2.26. Şevin açısının düşürülmesi ve şevde ilave yükün kaldırılarak topuk bölgesine destek olması.

2.5.2. Drenaj yapılması

Su çevirme ve toplama hendekleri, yüzey drenleri, yüzey çatlaklarının geçirimsiz malzeme ile kapatılması, yeraltı drenleri, yeraltı drenaj galerileri gibi işlemler drenaj teknikleridir. Heyelanlı bölgelerde çevirme ve kafa hendekleri yapılarak suyun dışarı atılması sağlanır. Dolayısıyla boşluk suyu basıncı azaltılarak kohezyon artırılır ve kaydırıcı kuvvetler azaltılmış olur, (Şekil 2.27. ve Şekil 2.28.).



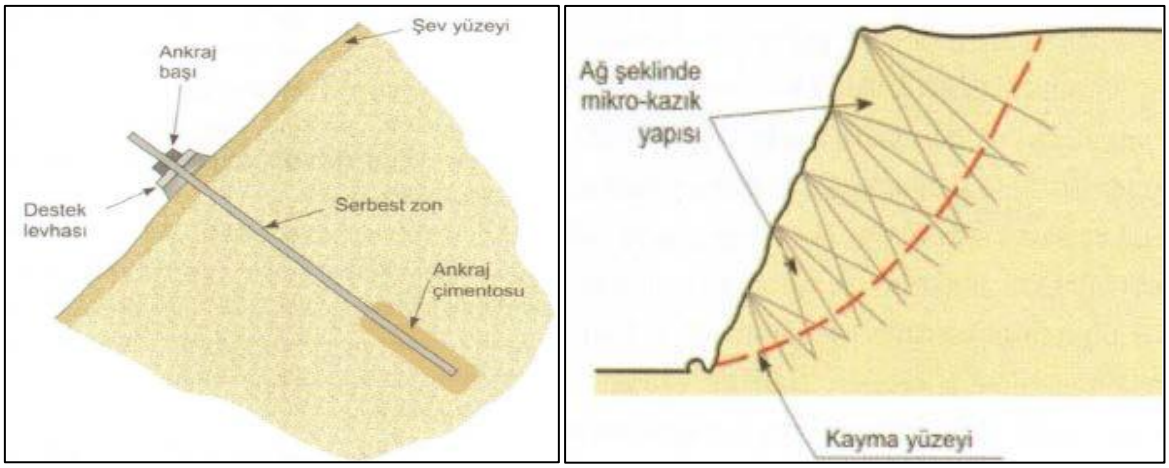
Şekil 2.27. Drenaj



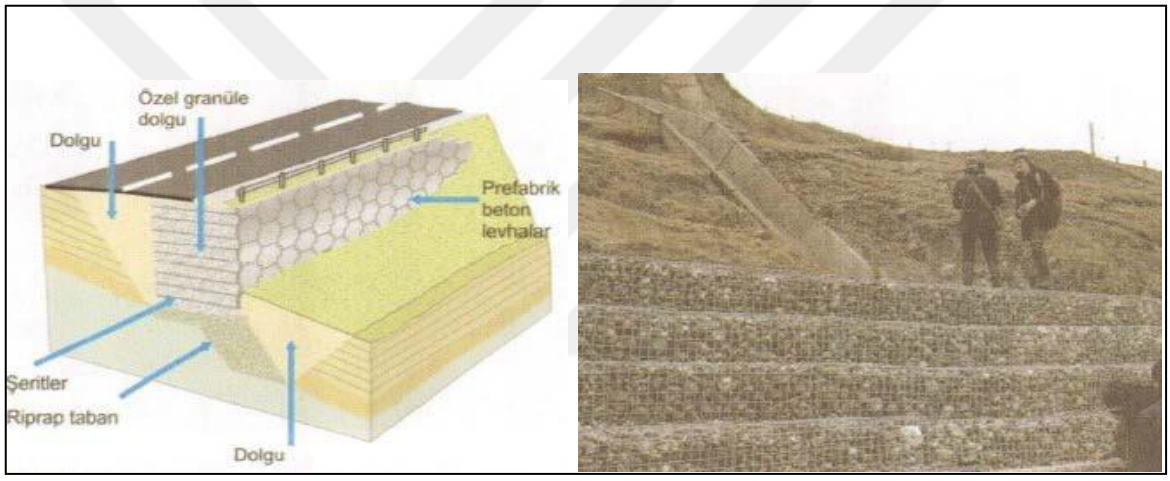
Şekil 2.28. Yeraltı drenaj uygulama kesiti

2.5.3. Yapısal Güçlendirme Yöntemleri

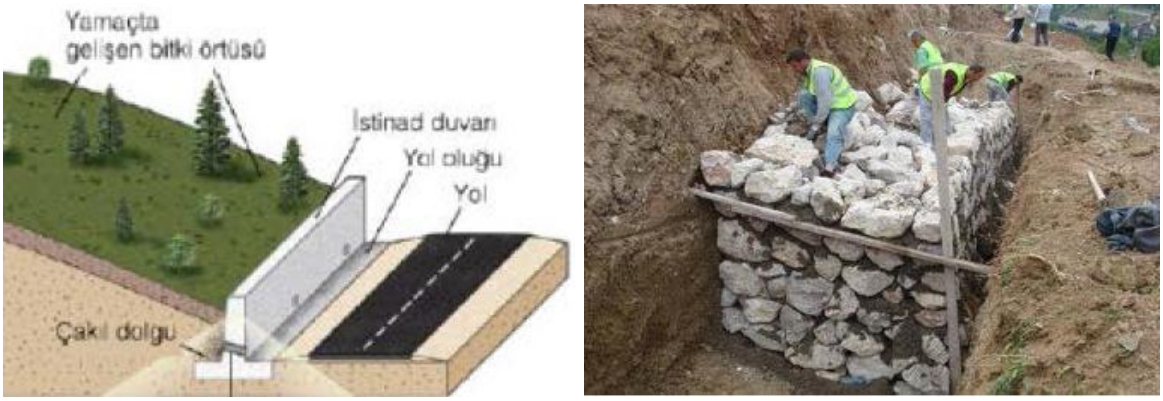
İstinat duvarları, taş duvarlar, kazık sistemleri, geotekstiller gibi teknikler olup genellikle drenaj ve şev geometrisinin değiştirilmesi yöntemleriyle birlikte kullanılırlar. Bu yöntemler; yerleşim birimlerinde büyük hacimli olmayan duraysızlıklarda kullanım alanı geniştir basamaklandırma ve şev geometrisinin değiştirilmesinin zor olduğu afet olaylarında çok daha fazla kullanılır, (Şekil 2.29., Şekil 2.30., Şekil 2.31., ve Şekil 2.32.).



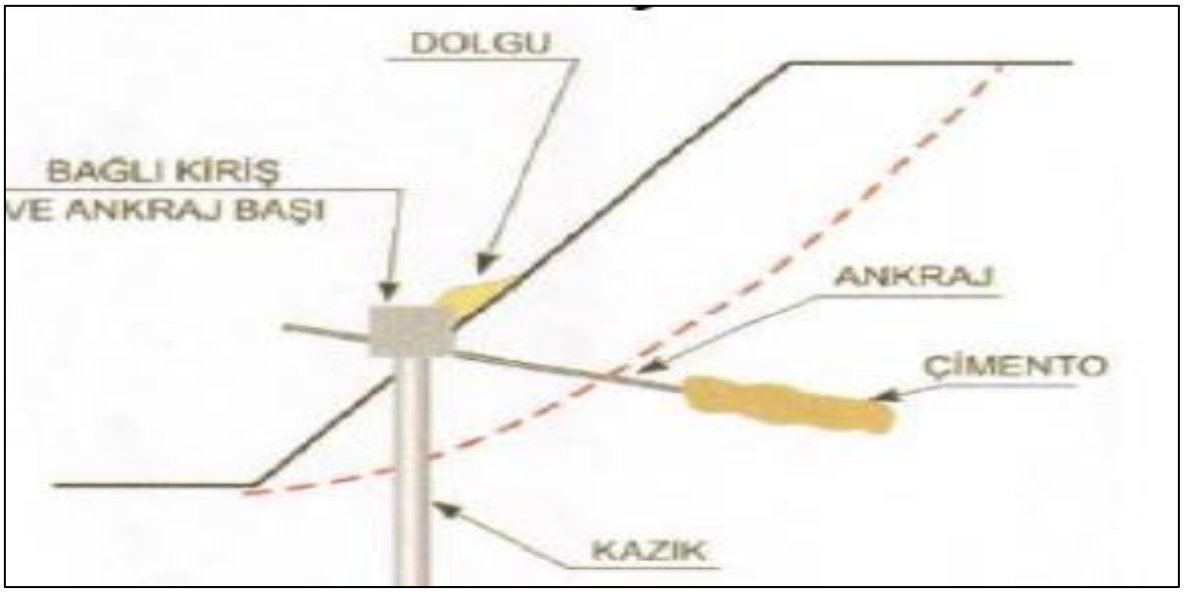
Şekil 2.29. Şev içerisine dirençli yapısal elemanlar yerleştirilerek dayanımın artırılması



Şekil 2.30. Duvar yada diğer istinat bileşenlerinin yapımı ile topuğun desteklenerek kaymaya karşı koyan kuvvetlerin artırılması.

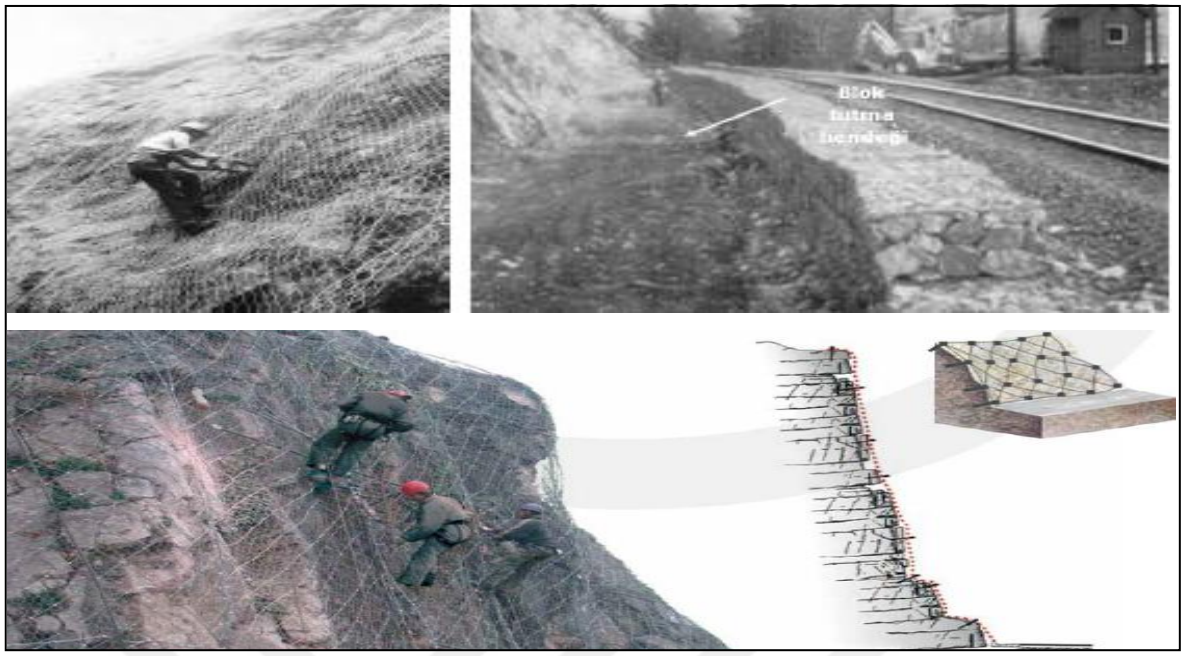


Şekil 2.31. İstinat duvarı veya taş duvar yaparak topuğun desteklenmesi.



Şekil 2.32. Ankrajlı fore kazık ile şevin desteklenmesi.

Heyelan türlerinden ani ve hızlı gelişen; kaya düşmesi, moloz akması gibi kütle hareketlerinde yüzey korunma teknikleri uygulanarak güvenlik katsayısı artırılmaktadır. Bu teknikler; gerdirilmiş tel kafes, blok tutma hendekleri, beton püskürtme, yüzey çimleme, çelik levhalarla kaplama ve saptırma duvarları gibi uygulamalardır, (Şekil 2.33.).



Şekil 2.33. Tel kafes ve blok tutma hendeği.

2.5.4. Geosentetiklerin mühendislik şevleriyle ilgili zarar azaltma ve iyileştirme yöntemlerinde kullanılması

Günümüzde geoteknik mühendisliğinde oldukça sık kullanılmaya başlayan geo (yer) sentetik (yapay) kelimelerinin bir araya getirilmesiyle türetilmiştir (ShuklaandYin, 2006).

Geosentetikler çok farklı form ve yapılarda üretilerek; yol, demir yolu, istinat duvarları, drenaj, heyelan önleme uygulamaları, kanallar, havaalanı, madencilik faaliyetleri gibi bir çok alanda daha ekonomik ve daha üstün mühendislik uygulamalarında kullanılırlar.

Geosentetiklerin; yer kazanma, maliyetteki kazanımlar, teknik üstünlük, basit ve kolay uygulama, malzemede tedarik kolaylığı, çevresel duyarlılık gibi bir çok faktörün getirdiği kazanımlar adına uygulanması son zamanlarda artmıştır.

Şev duraysızlıklarında karşılaşılan en büyük iki sorun şevlerde oluşan yüksek deformasyonlar ve şevle birlikte kullanılan güçlendirme sisteminin ilgili şeve entegre olabilmesindeki zorluklardır. Bu zorluklar; duraylılığın sağlanması için ekonomik olarak

yüksek miktarlara karşılık gelmektedir. Örneğin, yeraltı su seviyesi yüksek olan, yüksek deformasyona maruz kalabilecek bir şevin stabilizasyonunun sağlanmasında kullanılacak istinat duvarı, hem şevde bulunan su ile hem de yüksek deformasyonlar ile karışılacak ve bu etkilerin nihai sonucu olarak büyük ölçülerde ve suya karşı dayanımı yüksek olacaktır. Bu nedenlerle maliyet yükselecek, uzun dönemli de formasyonların artmasında ise rijit bir yapı olan istinat duvarının desteklenmesi ihtiyacı doğabilecektir. Bu aşamada geosentetikler, gerek uzun süreli duraylılıkları gerekse su gibi etkiler karşısında gösterdikleri yüksek dayanımları olsun geoteknik mühendisliği uygulamalarında ve şev stabilizasyonunun sağlanmasında kullanılan önemli malzemeler olarak üretilmektedirler.

2.5.4.1. Geosentetiklerin özellikleri ve işlevleri

1. Genel

- Tip ve imalat yönetimi
- Polimer
- Ağırlık, kalınlık
- Rulo boyutları

2. Mühendislik özellikleri

A. Mekanik özellikleri

- Çekme dayanımı
- Gerilme deformasyon özellikleri
- Sünme
- Delinme dayanımı
- Patlama dayanımı

B. Hidrolik özellikleri

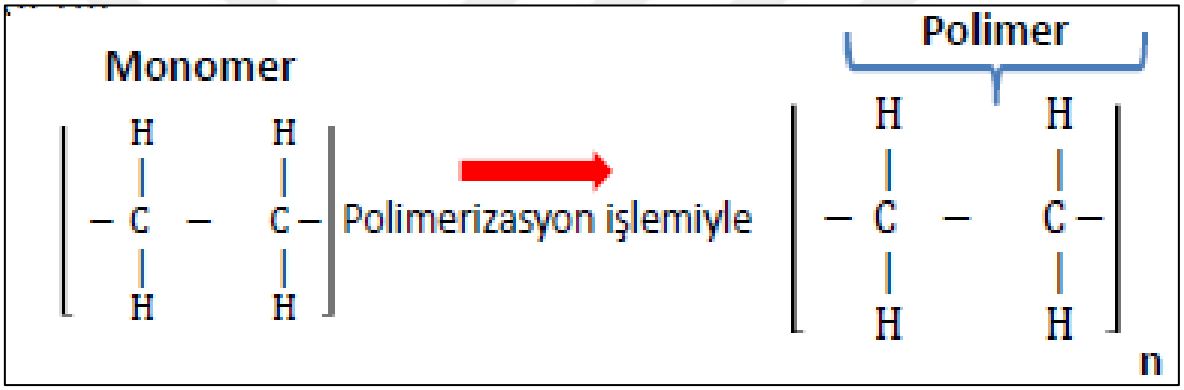
- Geçirgenlik (permeabilite)
- Gözenek boyutları

3. Çevre şartlarına dayanım

- U.V. ışığı

- Isı
- Su
- Kimyasal madde
- Mikro organizma (Wasti, 2007)

Sentetikler polimerlerden oluşan malzemelerdir. Polimer; bir tek yapı taşının kendinin bir zincir içinde tekrarlamasıdır. Şekil 2.34.' de gösterilen n; polimerizasyon derecesidir. Böylece polimerin molekül ağırlığı artar ve bununla birlikte malzemenin; dayanımı, uzayabilme kabiliyeti, darbe dayanımı, gerilme çatlağı dayanımı, ısıya karşı direnci artar.



Şekil 2.34. Polimer yapının oluşum işlemi.

2.5.4.2. Geosentetiklerin işlevleri

Geosentetikler, zemine doğal olarak sahip olmadığı yeni özellikler katarak mühendislik özelliklerini geliştirir. Geosentetiklerin temel özellikleri göze alındığında 6 farklı çok önemli işlevleri vardır (Güler, 2006). Bu fonksiyonlar;

1. **Ayırma;** geotekstillerin farklı zemin özellikleri gösteren tanelerin ara yüzeylerine yerleştirilmesiyle oluşur. Üst yapıdan gelen kuvvetlerle malzemelerde oluşabilecek karışımlara karşı koyar.

2. **Güçlendirme;** geoteknik mühendisliği çalışmalarında maliyet, alan kısıtlaması ve uygulanabilirlik gibi kriterler çok büyük öneme sahiptir. Herhangi bir yolda

meydana gelen şev duraysızlıkları karşısında mühendisin yapması gereken iyileştirme yöntemleri geleneksel çözümler olan; şev geometrisinin değiştirilmesi veya istinat duvarı gibi uygulamalar olmaktaydı. Tasarım açısından basit olan bu yöntemler çoğu zaman hem ekonomik anlamda maliyeti yüksek hem de alan kısıtlaması açısından sıkıntılıdır. Dolayısıyla geosentetiklerin son zamanlarda kullanımı hem ekonomik bakımdan hem de pratik bir çözüm olarak kullanımı avantaj sağlayabilmektedir. Geosentetiklerin çekme dayanımı yüksek malzemeler olduğundan zemin kütlelerinin stabilitesini artırarak güçlendirmektedir. Zemine gelen noktasal yükleri eşit olarak geniş bir alana yaymaktadır.

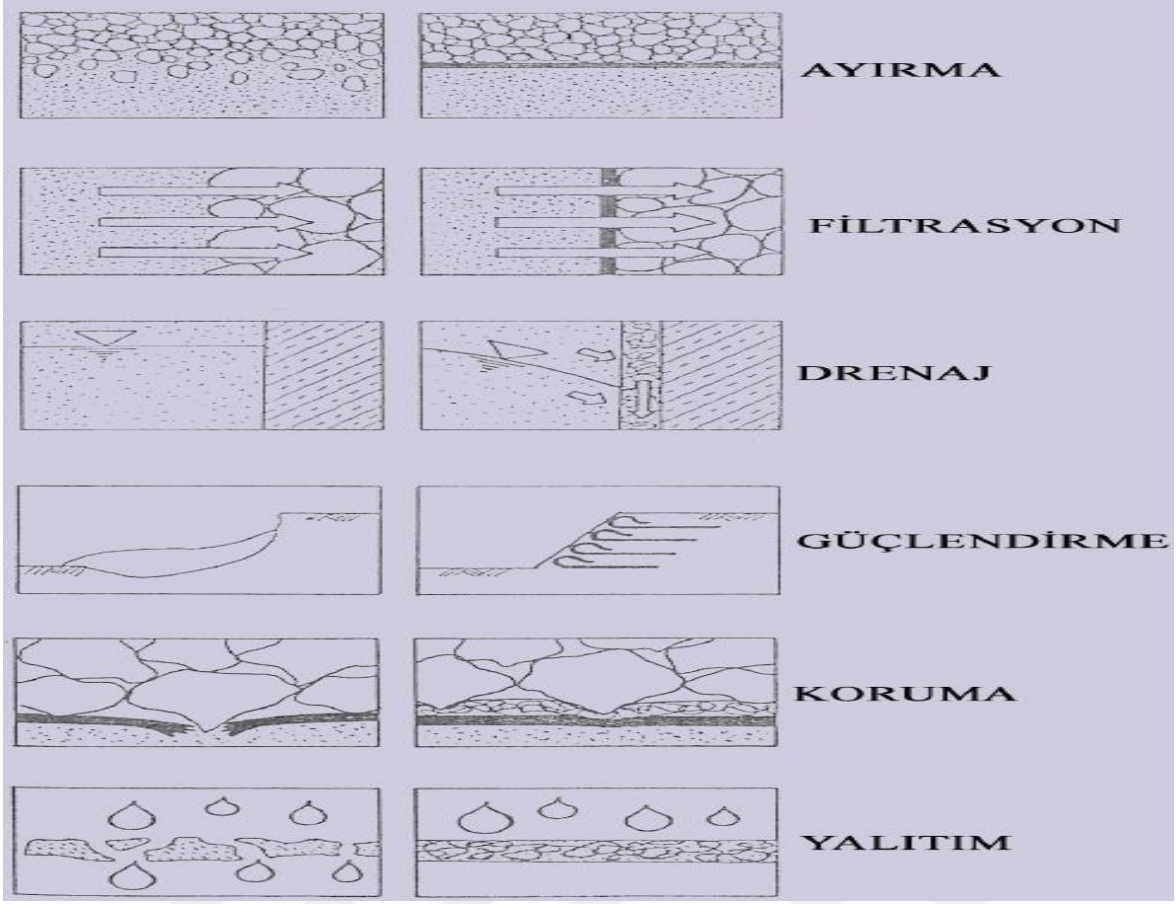
3. **Filtrasyon;** geosentetik malzeme suyun geçişine izin verir fakat belirli büyüklükteki malzemenin geçişine izin vermez.

4. **Drenaj;** geotekstil uygun eğimde suyun ve havanın akışını kontrollü bir şekilde sağlar. Yeterli eğim altında; istinad duvarları arkasında, tünel ve dren uygulamaları gibi suyun drene edilmesi gereken yerlerde kullanılır. Yüksek geçirgenlik, basınca karşı dayanıklı ve iyi filtre olma özelliği göstermesi beklenir. (Öztekin, 1992; Aksoy, 1993; Yılmaz ve Eskişar, 2008).

5. **Koruma;** geotekstil, zemine gelen gerilmeyi ve deformasyonları azaltarak zemini korur. Geosentetik malzeme bir başka geosentetik malzemeyi koruması amacıyla kullanılabilir.Örneğin; geomembran ile geotekstiller arasına geosentetik malzeme koyularak geomembranın delinmesi önlenebilir (IGS, 2009).

6. **Yalıtım;** Tabakalar arasında geçirimsiz özellik oluşturur. Sıvı ve gazlara karşı geçirimsiz tabaka oluşturmak için kullanılır, (Şekil 2.35.).

Birçok uygulamada geosentetikler amaca uygun çeşitli formlarda olmasıyla birlikte bu ürünler bir arada da kullanılmaktadır. Örneğin; hemen hemen tüm uygulamalarda geosentetiklerin ayırma görevi vardır. (Wasti, 2007).



Şekil 2.35. Geosentetiklerin işlevleri (Aksoy, 1993; Yılmaz ve Eskişar, 2008).

2.5.4.3. Geosentetik çeşitleri

Yaygın olarak kullanılan bazı geosentetik çeşitleri;

1. **Geotekstiller;** geoteknik mühendisliğiyle ilgili bir malzeme ile kullanılan geçirimli tekstil ürünleridir. Daha çok filtrasyon ve drenaj uygulamalarında kullanılır, (Şekil 2.36.).

2. **Geogridler;** yüksek çekme dayanımına sahip iplikçiklerin dörtgen oluşturacak şekilde birleştirilmesidir. Yüksek deformasyon modüllü polimer malzemelerin üretime başlamasıyla birlikte özellikle soğuk işleme çalışmalarındaki gelişmeler sayesinde bu malzemeler donatı olarak kullanılmaktadır, (Şekil 2.36.).

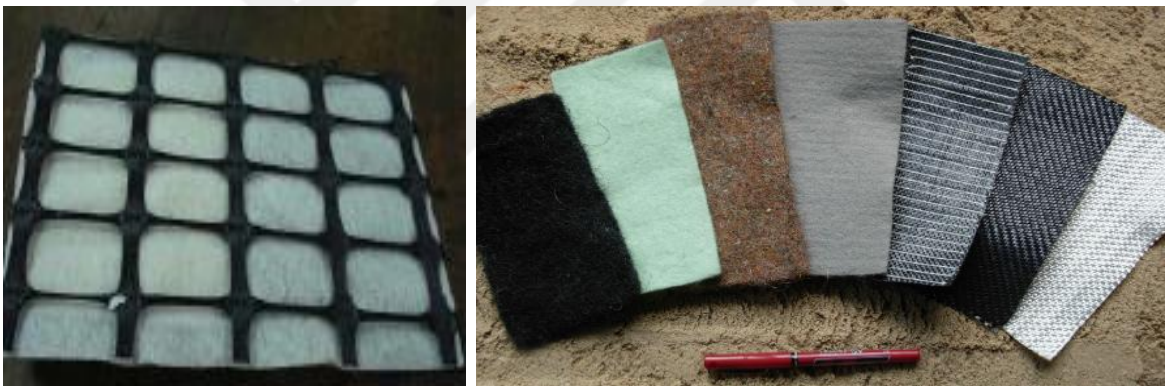
3. **Geomembranlar;** sıvı akışını kontrol edebilecek kadar düşük geçirgenlik

gösteren malzemelerdir.

4. **Geoağlar;** genellikle drenaj amacıyla kullanılmasıyla birlikte belirli bir dayanıma da sahiplerdir. Geomembran ve geotekstillerle birlikte veya malzemenin alt ve üst yüzeylerinde kullanılarak malzeme geçişini engeller ve dolayısıyla drenaj özelliğini korur.

5. **Geosentetikkil kaplamalar;** düşey deformasyonları tolere eder, ekonomik , taşıması ve serilmesi kolaydır.

6. **Geohücre;** içi zemin, kaya veya betonla doldurulmuş petek şeklindeki ürünlerdir. Kayan zeminlere destek sağlar ve yükü çok geniş alana yayabilir. Tekrarlı yükler altında bile çok iyi destek sağlar.



Şekil 2.36. Geogrid ve geotekstil ürünleri

2.5.4.4. Şevlerde geosentetiklerin kullanımı ve avantajları

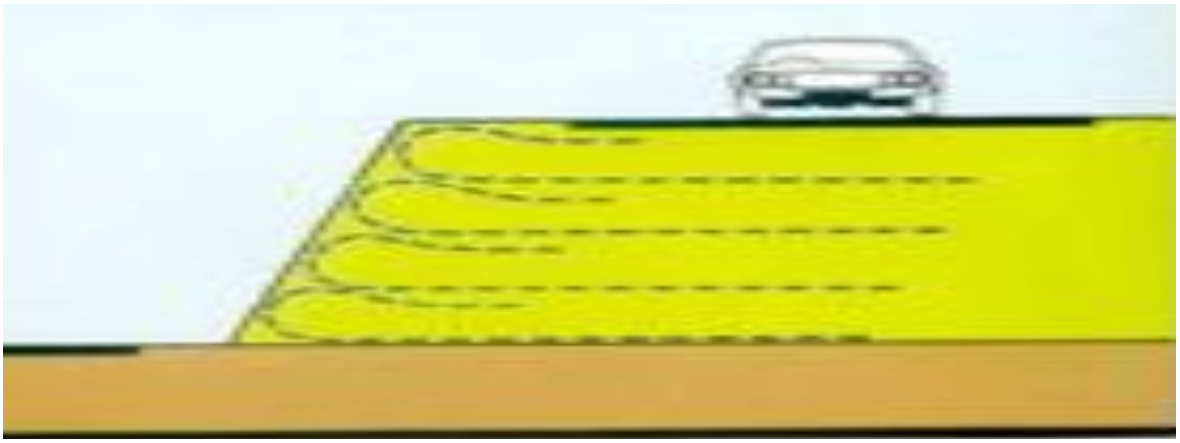
Yıkılmış veya inşası yapılan şevlerde, geosentetikler kullanılarak zeminin güçlenmesi sağlanılarak şevin duraylılığı artırılır. Şev duraylılığında ilk kez geosentetikler (Şekil 2.37.), göçmüş bir şevin tekrar duraylı hale getirilmesinde kullanılmıştır. Geosentetiklerin şevlerde kullanılması, kompaksiyona da katkı yapmaktadır. Bu uygulamada, dar geosentetik şeritleri (1 veya 2 m eninde) doldurulmuş şevin sırtına şev yüzündeki yanal baskıyı arttırmak amacıyla yerleştirilirler ve böylece kompaksiyonda istenen yoğunluk elde edilebilmektedir.



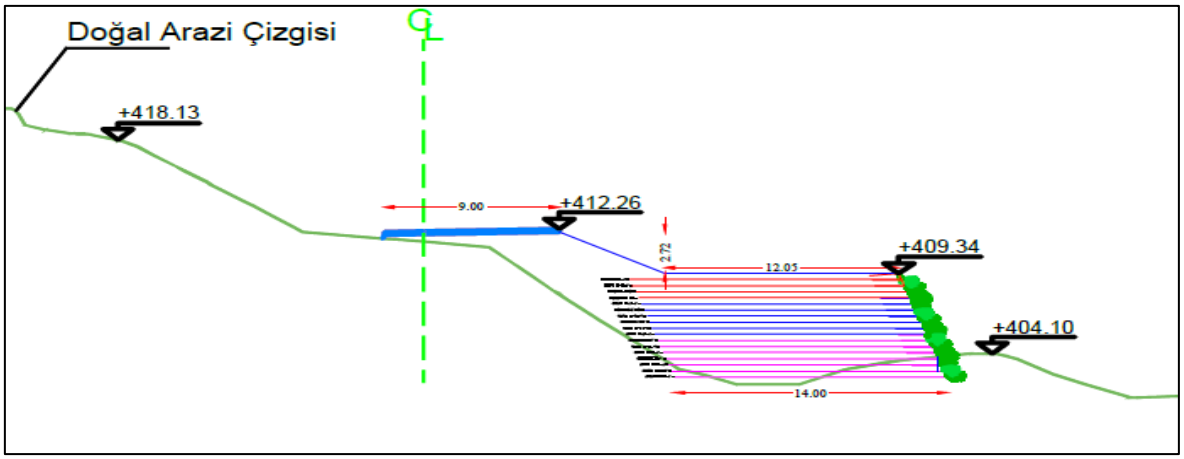
Şekil 2.37. Geotekstil kullanılarak güçlendirilen şev (Roven-Fransa, 1971).

Şevlerin güçlendirilmesi için en çok kullanılan geosentetik malzemeler; geokstiller, geogridler, çelik hasır ve şeritlerdir. Geosentetiklerin kullanıldığı şevlerde kayma yüzeyinin emniyet katsayısı farklı katmanlar kullanılarak artırılmakta ve bunun sonucunda donatışız şevlere nazaran daha dik ve uzun süreli duraylı bir şev oluşturulmaktadır, (Şekil 2.38. ve Şekil 2.39.).

Geosentetikler şev duraylılığında kullanıldığında; donatılı şev prensipleriyle şevi tanımladığımız bazı öğelerin kritik durumlarına yakın değerlere kadar tasarım ve uygulama yapılarak ekonomik çözümler sağlanmaktadır.



Şekil 2.38. Geogridle güçlendirme



Şekil 2.39. Çok katmanlı geosentetik kullanımı ve yol zemininin geogridle güçlendirilmesi. (Geodizayn Karaçörtlen Heyelan Raporu)

Geogridler; yüksek mukavemetli ve zemin iyileştirmesi için kullanılan ve moleküler ağırlığı yüksek olan malzemelerdir. Bu malzemelerin en önemli kullanım alanı güçlendirmedir. Zemin güçlendirme tekniklerinde çok farklı yaklaşımlar mevcuttur. Geogridler de bu yaklaşımlara ek olarak hızla kullanımı artan önemli geosentetiklerdendir. Geogridlerin fiziksel yapısı, enine ve boyuna şeritlerden oluşmaktadır. Bu şeritlerin açıklıkları arasından zemin malzemesi kolaylıkla geçebilmektedir. Bu şeritlerin dayanımları geogridin dayanımınıda etkilemektedir. Geogridler üzerine uygulanan yükü taşıyan boyuna şeritleri dik kesen diğer şeritlerde, geogrid zeminin içinden geçmesine izin verdiği için pasif bir dayanım ve kohezyon oluşur. Geogridi zemine bağlayan da bu şeritlerdir. Bu anlamda Geogridler şev yenilmelerinde birincil malzeme olarak tercih edilmektedir.

Şev duraylılıklarında kullanılan geosentetiklerin sağladığı faydalar (Yılmaz ve Eskişar, 2008) aşağıda sıralanmıştır;

- Şev tepesinde ve topukta daha fazla alan kullanımı.
- Dolguda kullanılacak hacmin azalması baraj dolgularda daha dik açı oluşturulması.
- Daha düşük özellikteki malzemelerin dolgularda kullanımının sağlanması.
- Maliyeti yüksek mühendislik yapılarının (istinad duvarı vb.) kullanımının gerek duyulmaması.

- Karayolu seddelerinin genişletilebilmesi.
- Duraylılığı bozulmuş şevlerin güçlendirilerek duraylı hale gelmesi.
- Estetik ve doğanın tekrar eski görünümüne kavuşması.
- Üretimindeki gelişmeler sayesinde, dayanım parametreleri artırılan geosentetik ürünlerin yüksek kohezyon oluşturulması sayesinde şevlerin daha yüksek ve dik açılarda oluşturulması.
- Kaya şevlerde yüzeylerde kullanılan geosentetikler sayesinde moloz ve toprak akmalarından korunması.
- Maliyetinin ucuz olması (%20 ile %50 arasında tasarruf sağlar).
- Şevlerin çok daha iyi sıkıştırılması sayesinde oturmaların ve yüzeysel oynamaların minimum seviyelere inmesi.

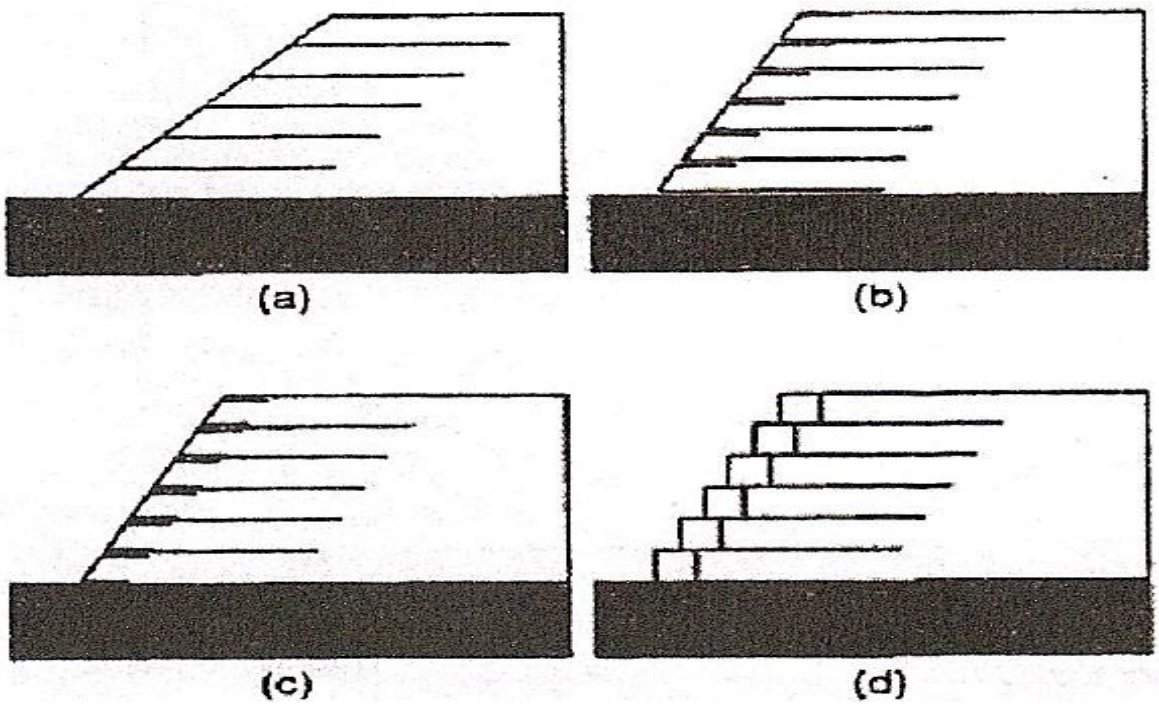
Ayrıca kullanıma uygun olmayan bataklık zeminlerde kullanılan geosentetikler sayesinde araç geçişinin kısa zaman içinde sağlanması gibi faydalar bize bu yöntemlerin ne kadar önemli ve teknolojik elemanlar olduklarını göstermektedir (Şekil 2.40.).



Şekil 2.40. Geosentetiklerin şev yapılarında kullanımı, (a) Donatılı İstinat Duvarı, (b) Donatılı Şev, (c) Donatılı Dolgu, (d) Donatılı Şev, (Kotan, 2008).

Geosentetik güçlendirilmiş şevlerin inşaatıyla şevlerin stabilizasyonu hakkında bir

çok proje ele alınmıştır. Birçok duraylılık projesinde, göçmüş zemin geri dolgu malzemesi olarak ekonomik olması açısından kullanılmıştır. Burada anlatılmak istenen çeşitli projeler üretilirken çeşitli yaklaşımlarda ortaya çıkmaktadır. Rimoldi ve Jaecklin (1996) yeşillendirilmiş, güçlendirilmiş zemin duvarları ve şevler için 4 ana inşaat metodu şeması özetlemişlerdir (Şekil 2.41.).



Şekil 2.41. İnşaat şeması, (a) Standart güçlendirme, (b) Saran güçlendirme, (c) Karışık güçlendirme, (d) Cephe blokları ve standart güçlendirme.

Standart (Düz) Güçlendirme; Şekil 2.41a, bu çeşit güçlendirme, sadece geosentetikler ile yapılır ve başlıca sığ şevler için kullanılır ($\beta < 50^{\circ}$). Genel olarak, cephe açık bırakılır veya erozyon kontrolü için geomat veya biomat ile kaplanır. Bundan dolayı, güçlendirme geosentetiği herhangi bir sargılama olmadan sadece cephe üstüne yerleştirilir. Yerleştirme kolaydır. Güçlendirme yatay ve düz olarak yapılır, daha sonra zemin gerekli yükseklik boyunca yayılarak sıkıştırılır, cepheyi yumuşatma titreşim tablası ile yapılır.

Cephe sargısı yaparak güçlendirme; Şekil 2.41b, geosentetik, zemini sararak hem dolgunun güçlendirilmesi için hem de cephenin yıkanma ve erozyon koruması için kullanılır. Bu teknik Avrupa'da en fazla kullanılan tekniktir. Sarma işlemi kalıpla veya kalıpsız olarak yapılabilir. Kalıp kullanılması gerekli olduğunda ya da daha düzgün cephe

istenildiğinde tavsiye edilir. Kalıp kullanılmadan yapılan sargılama tekniği çok basit inşa edilebilir. Geogrid tabakaları serilir, zemin malzemesi üzerine yayılır ve sıkıştırılır, istenen yumuşal cephe ve şev açısı sağlanır, daha sonra geogrid tabakası zemin malzemesine cepheden tutulu olduğu yere kadar sarılarak U şekli verilir. Bu yöntem hızlı inşa ve pürüzsüz yüzeylerin önemli olmadığı durumlarda güzel sonuçlar sağlar. Kamburlaşma ve kabarma, cephe yüzünde en fazla görülen durumdur. Sargılama taşınabilir kalıplarla yapılmalıdır.

Karışık güçlendirme (standart ve sargılı güçlendirme); Şekil 2.41c, cephe koruma ve güçlendirme olarak iki farklı fonksiyon iki farklı geosentetik ile sağlanır. Güçlendirme için kullanılan geosentetik, yüksek çekme dayanımı ve çekme modülüne, cephe koruması olarak kullanılacak olan ise daha yumuşak olmalı ve yeşillendirmeye(bitkilendirme), erozyon kontrolüne ve zemini korumaya izin vermelidir.

Cephe blokları ve standart güçlendirme; Şekil 2.41d, Bloklar, hem inşaat boyunca cephe güçlendirmesi için hem de son cephe görünümü için kullanılırlar. Bloklar, genelde sıkıştırılmış zeminden malzemesinin gabion sepet veya geosentetik sarılmış kalıp içerisine konulması ile yapılır. Bloklar standart(düz) güçlendirme geosentetiğine mekanik olarak bağlanır. Bu cephe bloklama yönteminin hava durumuna bağlı olmayan avantajları vardır. Birleştirme(prefabrik inşaat) ne trafik durumuna ne de çevreye rahatsızlık verir. Standart bir ekskavatör(kazıcı) hem blokları yerleştirir hem de geril dolgu için kullanılır. İçeriğinde çimlenmek için tohumlar bulunduğundan su ile tohumlama gerekmez.

Avusturya'nın Alplerinde Lech yakınlarında bulunan kayak merkezinde, 1994 yılının ilkbaharında meydana gelen 25 metre yükseklikli heyelan (Şekil 2.42.), asansör istasyonunun hasar görmesine sebep olmuştur. Sezona yetiştirilmesi adına dik eğimli şevin, stabilitesini artırmak için hızlı ve uygulaması kolay bir çözüm bulmak gereklidir. Sonunda; teknik incelemeler ve veriler dönemin şartlarında kısıtlı olmasına rağmen geogrid uygulamasıyla dik eğimli ve yoğun kar yükü alan şev; güçlendirilerek stabil hale getirilmiştir. Bu uygulama 2 aydan daha az sürede tamamlanmış olup 20 yıl sonra 2014 yılında yapılan incelemeler sonucunda şevin hala duraylı konumda olduğu gözlenmiştir (Dimiter Alexiew vd., AntonPlankel vd., GrahamThomson, 2014).



Şekil 2.42. Asansör istasyonunda meydana gelen heyelan.

Sonuç olarak; 1994 yılında geosentetikler hakkında veri ve bilgi eksiklikleriyle beraber analiz yapma sınırlılıklarına rağmen geogrid uygulaması yapılmış ve şev 20 yıl geçse de hala stabil durumdadır, (Şekil 2.43.). Bu da bize geosentetiklerin çeşidi olan geogrid malzemelerinin heyelan uygulamalarında kullanılarak zeminin güçlendirilmesini, ekonomik ve pratik bir şekilde sağlar.



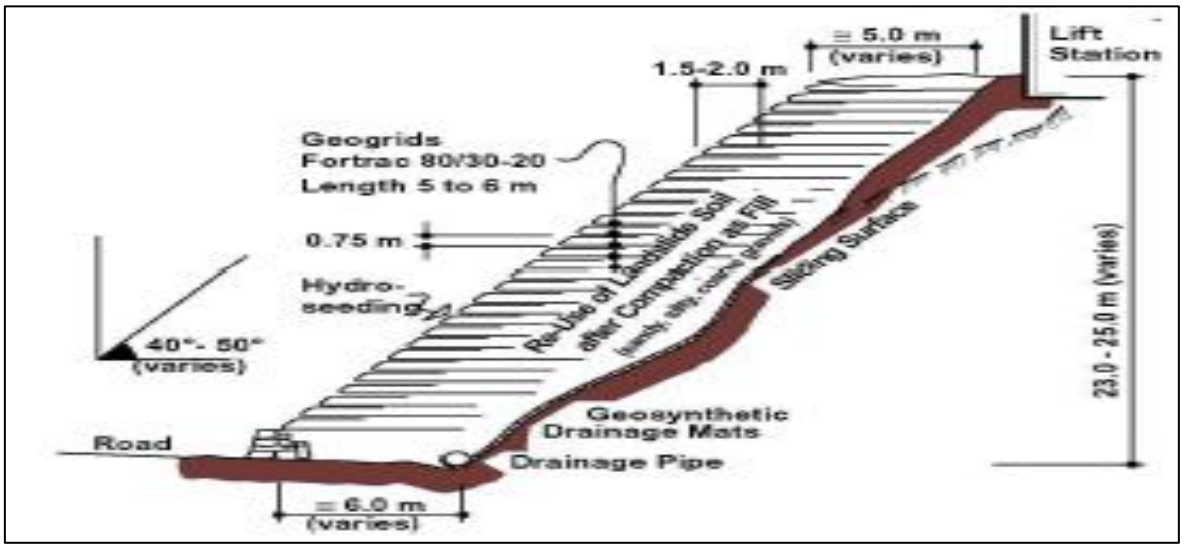
Şekil 2.43. 20 yıl geçmesine rağmen geogrid ile onarılan şevin hala duraylı durumda olması.

Geogrid uygulaması; şevin, kademe kademe belirli yüksekliklerde kaldırılıp aralarına geogrid malzemesinin bohçalanarak serilmesi şeklinde şev oluşturulması işlemidir, (Şekil 2.44.).



Şekil 2.44. Şevin geogrid ile stabil hale getirilmesi.

Geogrid uygulamasıyla birlikte kar suları ve yağmur sularının tahliyesi için drenaj uygulaması da yapılmıştır, (Şekil 2.45.).



Şekil 2.45. Yapılmış olan geogrid uygulamasının şematik hali. (Dimiter Alexiew vd., AntonPlankel vd., GrahamThomson, 2014).

3. ŞEV STABİLİTE ANALİZ YÖNTEMLERİ

Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş şevlerin tasarım analizleri, birbirleriyle benzerlik göstermektedir. Analizler, oluşabilecek en kötü duruma göre yapılmalı ve buna göre güvenlik faktörü belirlenmelidir.

Doğal ortamında insan eli değmeden kendiliğinden oluşan ve arazi yüzeyi ile belirli bir açı yapan eğimli toprak parçalarına yamaç, insan yapımı olanlarına şev denir. Kaya, zemin veya benzeri malzemelerin insan eliyle ya da doğal olarak eğimli olduğu yönde hareketine ise heyelan denilmektedir.

Doğal afetler, gerek insan hayatına etkileri gerekse mali hayata olan etkileri yüzünden inşaat sektörünün aslında en çok karşılaşılan problemleri arasında ilk sırada yer almaktadırlar. Doğal afetlerden olan heyelanlar, toprak kaymaları Türkiye'nin de içinde bulunduğu en önemli inşaat sorunlarındandır. Toprak Kaymaları ve heyelanlar, depremler gibi ortalama 5-6 yılda bir değil, aksine daha sık olarak yaşanmaktadır. Bu yüzden bunlar, hem bilimsel olarak hem de bilimin mühendisliğe aktarılması, yani uygulama olarak dikkatle ve özenle üzerinde durulması gereken doğal afetlerdendir.

Şevlerin inşaat koşullarına uygun olarak düşünülmesi ve uygulamaların bu bağlamda yapılabilmesi için arazi ve laboratuvar araştırmalarının özenli yapılması, bu çalışmalarının sonuçlarının özenli değerlendirilmesi, tecrübelerden yararlanılması ve en önemlisi ise teknolojik gelişmelerin iyi bilinmesi ve çözüme bu yollarla yaklaşılması gerekmektedir. Her türlü bilimsel uygulamanın bağlı olduğu ekonomik durumların da bu çözümlere bir şekilde yansıtılması mühendisin karşılaştığı bir diğer temel problemdir.

Yıllar boyunca güvenlik faktörlerini hesaplamak için birçok farklı yöntem geliştirildi. Tüm yöntemler (sonlu elemanlar yöntemi hariç) limit denge formülasyonlarına dayanmaktadır.

3.1. Limit Denge Yöntemi

1970'lerde Saskatchewan Üniversitesi'nden Fredlund tarafından genel bir limit denge (GLE) formülasyonu geliştirildi (Fredlund ve Krahn 1977, Fredlund ve diğerleri 1981). Limit denge yöntemi, diğer tüm yöntemleri tartışmak, açıklamak ve anlamak için bir çerçeve sağlar.

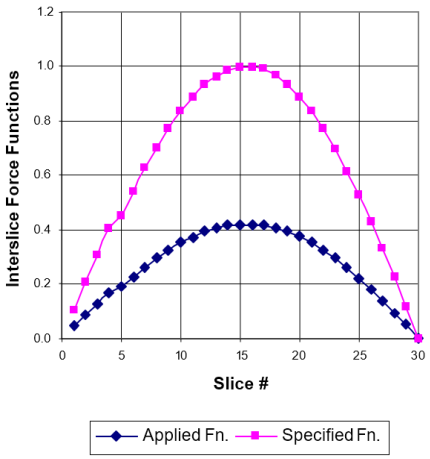
Bu yöntem geosentetik donatılı şevlerin tasarlamasında en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. En küçük kayma dayanım değerine karşılık gelen güvenlik sayısı şevin güvenlik sayısı olarak değerlendirilir. Bu değerin 1,3'den büyük olması gerekmektedir, (Shukla, 2002; Duncan, Wright, 2005). Birçok çalışma bu yöntemden türemiştir. Bu yöntemde göçmenin belirli bir yüzeyde gerçekleştiği varsayılır.

Limit Denge yöntemi formülasyonu iki güvenlik denklemi faktörüne dayanır ve bir dizi dilim içi kesme-normal kuvvet (intersliceshear-normal force) varsayımına izin verir. Bir denklem, moment dengesine (Fm) göre güvenlik faktörünü verirken diğer denklem yatay kuvvet dengesine (Ff) göre güvenlik faktörünü verir. Güvenlik denklemlerinin iki faktörünü kullanma fikri, Spencer'ın (1967) çalışmalarından gelmektedir.

Bu yöntem kesme kuvvetleri, Morgenstern ve Price (1965) tarafından önerilen bir denklem ile ele alınır. Denklem şöyledir;

$$X = E \lambda f(x) \qquad \textbf{(3.1)}$$

Burada, f (x) bir fonksiyon, λ; kullanılan fonksiyonun yüzdesi (ondalık formda), E; kesit normal kuvvet ve X; kesme kuvveti (intersliceshearforce). Şekil 3.1., tipik bir yarım sinüs fonksiyonunu göstermektedir. Bu şekildeki üst eğri, belirlenen gerçek işlevdir; düşük eğri çözümde kullanılan işlevdir. İki eğri arasındaki oran lamda (λ) olarak adlandırılır.



Slice : Dilim (Katman)

AppliedFn. : Uygulanmış Fonksiyon

SpecifiedFn. : Belirtilen Fonksiyon

Şekil 3.1. Yarım sinüs fonksiyonu. (Krahn, J., 2004, "Stability Modeling with Slope/W)

Güvenlik denkleminin moment dengesine göre Limit denge yöntemi şöyledir:

$$Fm = \frac{\sum(c' = \beta R + (N - u\beta) R \tan\phi'}{\sum Wx - \sum Nf \pm \sum Dd} \quad \textbf{(3.2)}$$

Yatay kuvvet dengesine göre güvenlik denklemi faktörü şöyledir:

$$Ff = \frac{\sum(c'\beta\cos\alpha + (N - u\beta)\tan\phi' \cos\alpha)}{\sum N \sin\alpha - \sum D\cos\omega} \quad \textbf{(3.3)}$$

Denklemlerin terimleri ise;

C ' :Efektif kohezyon

φ' :Efektif sürtünme açısı

U : Gözenekli su basıncı

N : Dilim taban normal kuvveti

W :Dilim ağırlığı

D : Hat yükü

β, R, x, f, d, ω : Geometrik parametreler

α : Dilim taban eğimi

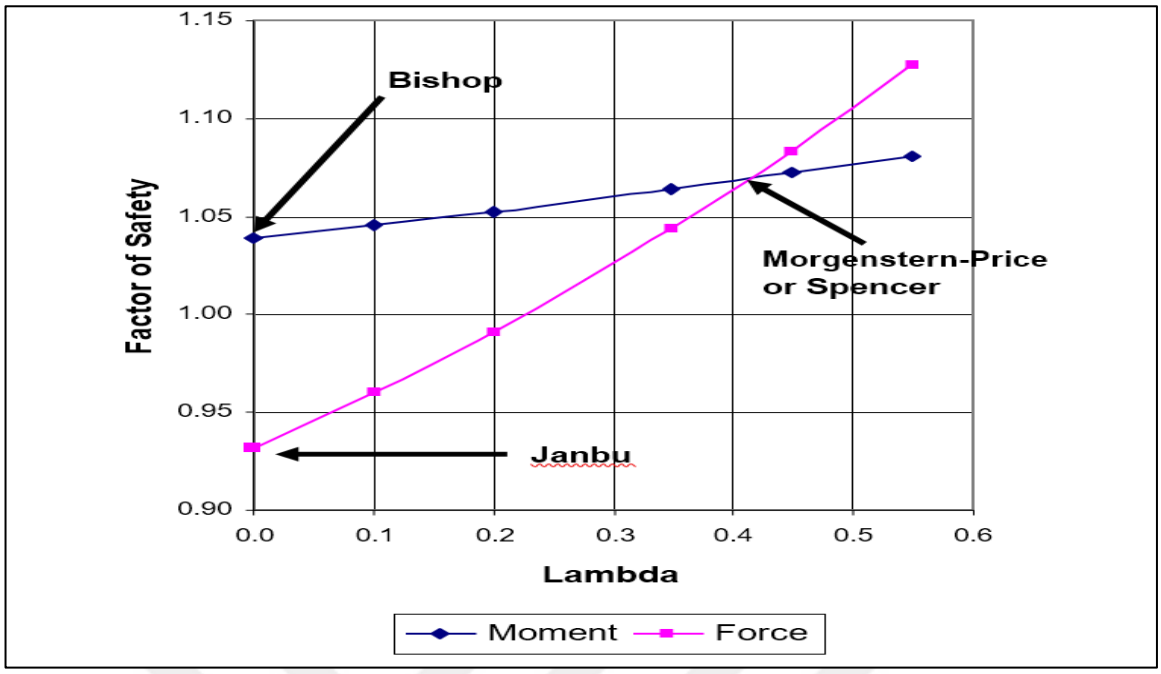
Her iki denklemdeki anahtar değişkenlerden biri, her dilim tabanında standart olan N'dir. Bu denklem dikey kuvvetlerin toplamı ile elde edilir. Dolayısıyla dikey kuvvet dengesi oluşur. Eşitlik formunda temel standart şu şekilde tanımlanır;

$$N = \frac{W+(XR-XL)-\frac{c'\beta\sin\alpha+u\beta\sin\alpha\tan\phi'}{F}}{\cos\alpha+\frac{\sin\alpha\tan\phi'}{F}} \quad \textbf{(3.4)}$$

N, güvenlik denkleminin moment faktörüne ikame edildiğinde F,Fm'dir ve N, güvenlik denkleminin kuvvet faktörüne ikame edildiğinde F, Ff'dir. Eğim stabilite analizi ile ilgili literatür genellikle payda mα olarak geçer.

Burada dikkat edilmesi gereken önemli nokta, dilim tabanı normalinin bir dilimin iki tarafındaki XR ve XL dilimler arası kesme kuvvetlerine (intersliceshearforce) bağımlı olmasıdır. Sonuç olarak, dilim tabanı normali, her yöntemin dilimler arası kesme kuvvetleri ile nasıl işlediğine bağlı olarak çeşitli yöntemler için farklı alınır.

Limit denge yöntemi, bir dizi lamda (λ) değeri için Fm ve Ff'yi hesaplar. Bu hesaplanan değerlerle, Fm ve Ff'nin lamda (λ) ile nasıl değiştiğini gösteren Şekil 3.2'deki gibi bir grafik çizilebilir. Bu tür bir grafik oluşturulabilmesi, limit denge yönteminin kullanışlı bir özelliğidir. Böyle bir grafik çeşitli yöntemlerden güvenlik faktörleri arasındaki farkları anlamayı ve seçilen kesişim kuvveti fonksiyonunun etkisini anlamayı mümkün kılar.



Şekil 3.2. Güvenlik sayısının dilimler arası fonksiyon yüzdesine (λ) göre değişimi. (Krahn, J., 2004, "Stability Modeling with Slope/W)

Bishop Basitleştirilmiş Yönteminin temel varsayımlarından ikisi, dilimler arası kesme kuvvetlerini dikkate almaması ve sadece moment dengesini sağlamasıdır. Limit denge terminolojisinde, kesme kuvvetleri dikkate alınmadığında, λ sıfır demektir.

Sonuç olarak, Bishop'un Basitleştirilmiş güvenlik faktörü, lamda'nın sıfır olduğu Şekil 3.2'deki moment eğrisine denk düşer. Janbu'nun Basitleştirilmiş yöntemi, dilimler arası kesme kuvvetlerini de yok sayar ve yalnızca kuvvet dengesini sağlar. Janbu'nun Basitleştirilmiş güvenlik faktörü, sonuç olarak Şekil 3.2'deki λ sıfır olan kuvvet eğrisine denk düşmektedir. Spencer ve Morgenstern-Price (M-P) faktörleri ise moment ve kuvvet dengeleri sağladıkları için bu eğrilerinin kesiştiği noktaya düşer.

Limit denge yöntemi her türlü kinematik olarak kabul edilebilir bir kayma düzlemine uygulanabilir. Burada tartışılan yöntemlerin tümü, kayma yüzeyinin biçiminden daha çok statik denklemlerinin uygulanması ile ve kesme kuvvetleriyle nasıl bir tutumla başa çıkıldığıyla ilgilidir. Kesme kuvveti işlevinin önemi, kayma yüzey şekli ile ilgilidir ancak hiçbir yöntem belirli bir kayma yüzey şekli ile sınırlandırılmamıştır. Yani kayma yüzeyi dairesel olduğunda, güvenlik moment faktörü, varsayılan kesişim kuvveti

fonksiyonuna duyarlı değildir. Sonuç olarak, dairesel bir kayma yüzeyi için Bishop'un Basitleştirilmiş güvenlik faktörü genellikle Spencer veya Morgenstern-Price faktörüne yakındır. Bu anlamda Bishop Basitleştirilmiş yöntemi dairesel kayma yüzey analizi için uygundur. Bununla birlikte, Bishop Basitleştirilmiş yönteminde bulunan varsayımlar dairesel olmayan kayma yüzeylerine eşit derecede uygulanabilir. Böylelikle limit denge yöntemi, kayma yüzeyi biçimine bakılmaksızın diğer tüm yöntemleri kapsar.

Limit denge yöntemi, çok çeşitli kesme kuvvetleri barındırabilir. Aşağıda özet bir liste bulunmaktadır.

- Sabit
- Yarı-sinüs
- Kırpılmış sinüs
- Yamuk
- Tam olarak belirtilmiş veri noktası

Limit denge yöntemi, Fm ve Ff eğrilerinin çapraz noktasını bularak moment ve kuvvet dengesini karşılar. Bu, tüm kuvvetleri doğru yönde tutmak için gereklidir. Örneğin, büyük yanal kuvvetler uygulandığında, lamda değerleri bazen ters işaretler (negatif değerler) alabilir.

3.1.1. Bishop'un sadeleştirilmiş yöntemi

1950'lerde Londra'daki İmparatorluk Koleji'ndeki Profesör Bishop, normal kuvvetler içeren bir yöntem geliştirdi ancak kayma yüzeyi gerilmesini gözardı etti. Bishop, dilim kuvvetlerini dikey yönde toplamak suretiyle dilim tabanında normal kuvvet için bir denklem geliştirdi. Bunun sonucunda, 'taban normal' (base normal) güvenlik unsurunun bir fonksiyonu haline geldi. Bu da güvenlik denklemini (yani, FS denklemin her iki yanında da görünür) doğrusal hale getirir ve dolayısıyla güvenlik faktörünü hesaplamak için tekrar eden bir prosedür gereklidir.

Bishop'un Basitleştirilmiş güvenlik faktörünün denklemi herhangi bir gözenek suyu basıncının yokluğunda şöyledir;

$$FS = \frac{\sum\left[(c\beta + W\tan\phi)(\cos\alpha + \frac{\sin\alpha \tan\phi}{FS})\right]}{\sum W\sin\alpha} \quad \textbf{(3.5)}$$

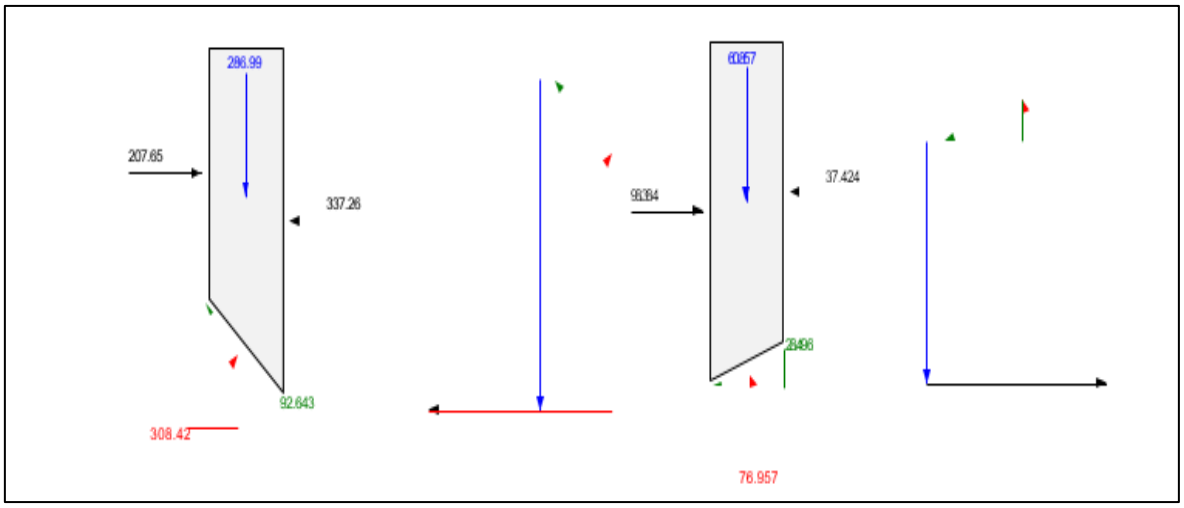
FS, yukarıda belirtildiği gibi, denklemin her iki tarafındadır. Denklem, aşağıdaki gibi tanımlanan mα terimi haricinde, sıradan güvenlik denklemi faktöründen farklı değildir.

$$m\alpha = \cos\alpha + \frac{\sin\alpha \tan\phi}{FS} \quad \textbf{(3.6)}$$

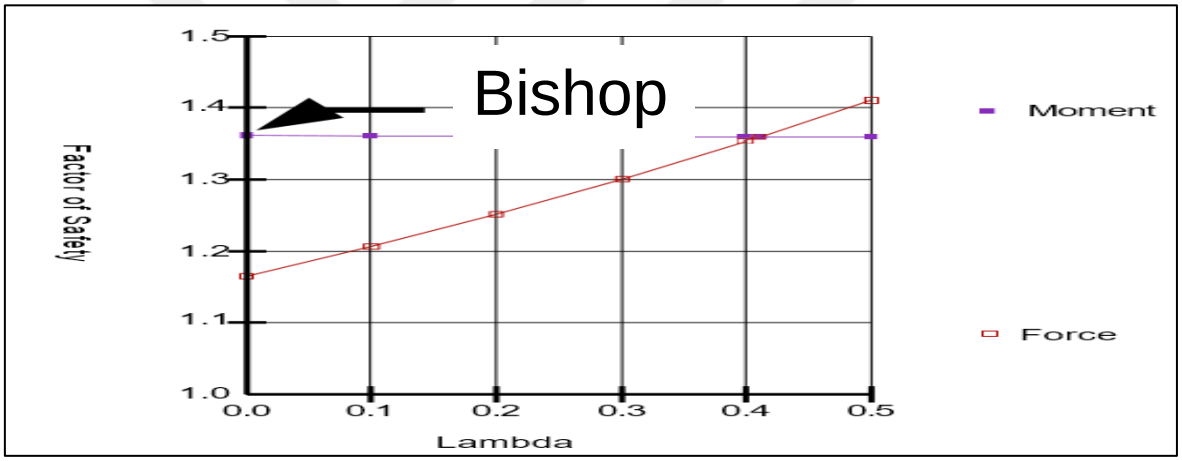
Bishop'un Basitleştirilmiş güvenlik faktörünü çözmek için bir tahminde bulunmak gerekir. FS için ilk tahmin, mα'yı hesaplamak için kullanılır ve daha sonra yeni bir FS hesaplanır. Daha sonra yeni FS, mα hesaplamak için kullanılır ve daha sonra başka bir yeni FS hesaplanır. Prosedür, son hesaplanan FS, bir önceki FS'nin belirtilen bir toleransına gelene kadar tekrarlanır. Neyse ki, genellikle tutarlı bir çözüme ulaşmak için yalnızca bir kaç yineleme gerekir.

Serbest cisim diyagramlarını ve kuvvet poligonlarını aynı kesitler altında sıradan yönteme göre incelersek, belirgin bir farklılık görürüz, (Şekil 3.3.). Kuvvet poligon kapanması (theforcepolygonclosure), kesme normal kuvvetlerinin (interslice normal force) eklenmesiyle oldukça iyi durmasıyla birlikte Bishop'un varsaydığı gibi kayma yüzeyi gerilmesi bulunmamaktadır, fakat kesme normal kuvvetleri (interslice normal forces) dahil edilmiştir.

Şekil 3.4.'deki gibi, güvenlik faktörü vs. lamda grafiğinde Bishop'un Basitleştirilmiş güvenlik faktörü, lamda'nın sıfır olduğu yerde moment denge eğrisine (FS = 1.36) denk düşer.



Şekil 3.3. Bishop'un Basitleştirilmiş yöntemi için serbest gövde diyagramıve kuvvet poligonu, örnek gösterim.



Şekil 3.4. Bishop'un basitleştirilmiş güvenlik faktörü. (Krahn, J., 2004, "Stability Modeling with Slope/W)

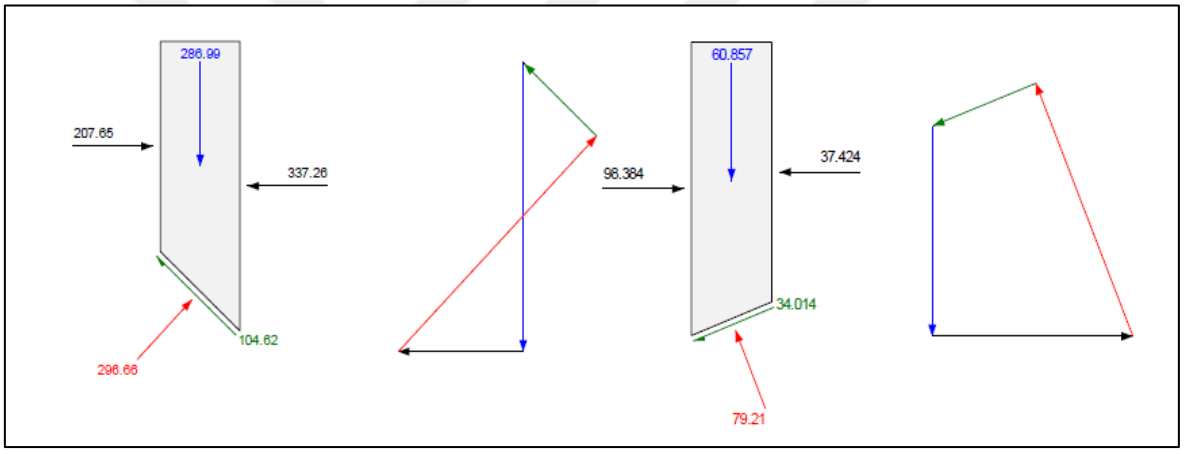
Bu durumda, güvenlik moment faktörünün (Fm), kesme kuvvetlerinden etkilenmediğine dikkat edin. Bunun nedeni, kayan kütlenin dönmesi için dilimler arasında kayma olmaması gerekir. Bu, kuvvet dengesi için doğru değildir ve dolayısıyla güvenlik kuvvet faktörü (Ff), yüzey gerilmesinden etkilenir.

Özetle, Bishop'un Basitleştirilmiş yöntemi, kesme normal kuvvetlerini (normal intersliceforces) dikkate alır, ancak kayma yüzeyi gerilmesini göz ardı eder ve tüm moment dengesinin sağlar, ancak toplam yatay kuvvet dengesini karşılamaz.

3.1.2. Janbu'nun basitleştirilmiş yöntemi

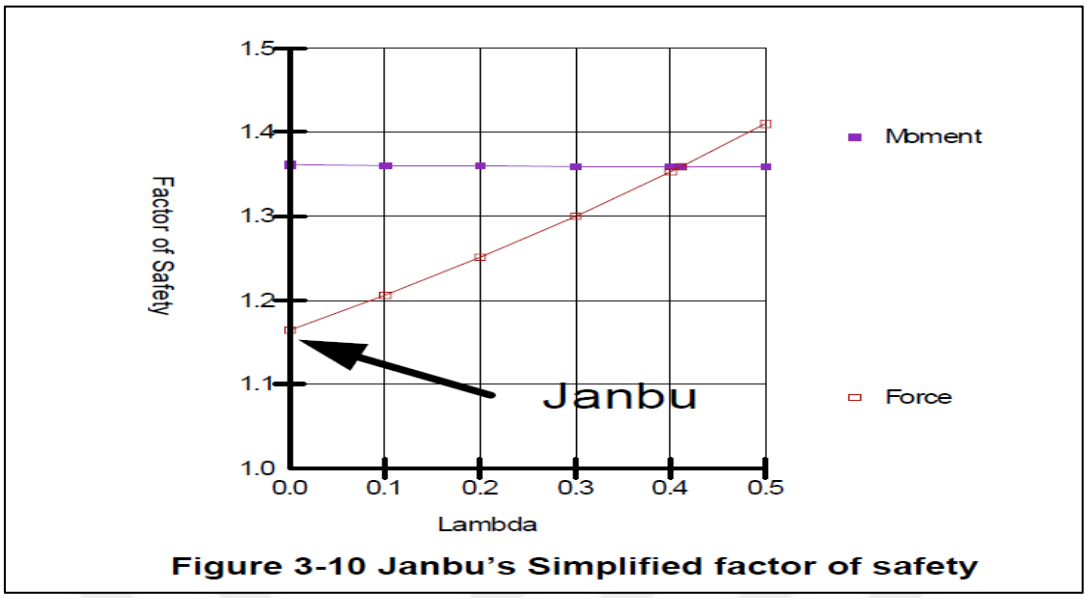
Janbu'nun Basitleştirilmiş yöntemi, Bishop'un Basitleştirilmiş yöntemine benzemektedir, ancak Janbu'nun Basitleştirilmiş yöntemi, genel moment dengesini değil sadece toplam yatay kuvvet dengesini sağlar.

Şekil 3.5, Janbu'nun Basitleştirilmiş yönteminin serbest cisim diyagramlarını ve kuvvet poligonlarını göstermektedir. Dilim kuvvetini poligon kapanışı aslında Bishop'un Basitleştirilmiş yönteminden daha iyidir. Bununla birlikte, güvenlik faktörü, Bishop'un Basitleştirilmiş yöntemi ile 1.36'ya karşı 1.16'dır. Bu önemli bir farktır. Dilimlerin dengede olmasına rağmen, Janbu'nun Basitleştirilmiş güvenlik faktörü aslında çok düşüktür.



Şekil 3.5. Janbu metodu için serbest cisim diyagramı ve kuvvet poligonu, örnek gösterim.

Bishop'un yönteminde olduğu gibi lambda (λ); Janbu'nun yönteminde de sıfırdır, çünkü kesme kuvvetleri dikkate alınmaz. Bu nedenle, Janbu'nun Basitleştirilmiş güvenlik faktörü lamda'nın sıfır olduğu yerde kuvvet denge eğrisine düşer, (Şekil 3.6.). Güç dengesi, kabul edilen zemin kayma kuvvetine duyarlı olduğu için Janbu'nun Basitleştirilmiş yönteminde olduğu gibi kesme kuvveti kayganlığını dikkate almadan dairesel kayma yüzeyleri için güvenlik faktörünü çok düşük bir seviyeye getirir.



Şekil 3.6. Bishop'un güvenlik faktörü. (Krahn, J., 2004, "Stability Modeling with Slope/W)

Sonuç olarak, Janbu'nun Basitleştirilmiş yöntemi; normal kesme kuvvetlerini dikkate alır,zemin kayma kuvvetlerini dikkate almaz ve tüm yatay kuvvet dengesini karşılar, ancak tüm moment dengesinde geçerli değildir.

3.1.3. Spencer Metodu

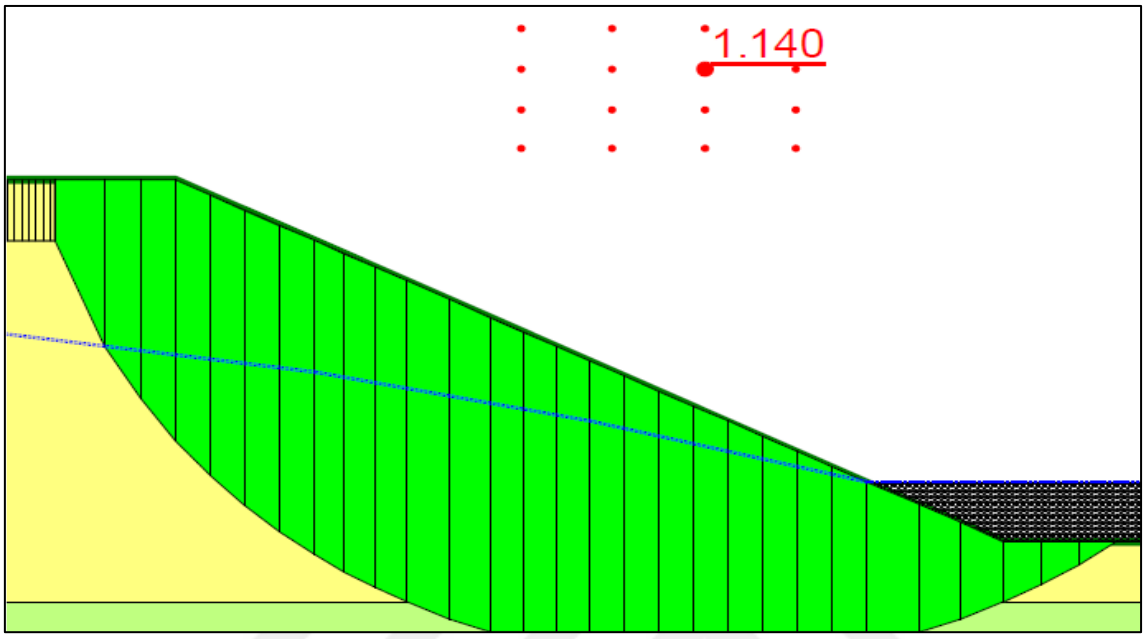
Spencer (1967) iki güvenlik faktörü denklemi geliştirmiştir; Biri moment dengesine göre diğeri yatay kuvvet dengesine göre. Kesitler arası kesme kuvveti ile normal kuvvetler arasında sabit bir ilişki kurmuş ve iki güvenlik faktörü de aynı olana dek yinelenen bir prosedürle kesme kuvveti oranını normal oranla değiştirmiştir. Güvenliğin iki faktörünü aynı kılan normal kesme oranını bulmak, hem moment hem de kuvvet dengesinin sağlandığı anlamına gelir.

Kesme kuvveti (X) ve normal (E) kuvvetleri ilişkilendirmek için aşağıdaki denklemi kullanır.

$$X = E \lambda f(x) \quad \textbf{(3.7)}$$

Spencer yönteminde, f (x) fonksiyonu sabittir; yani dilimler arası kesme kuvveti -

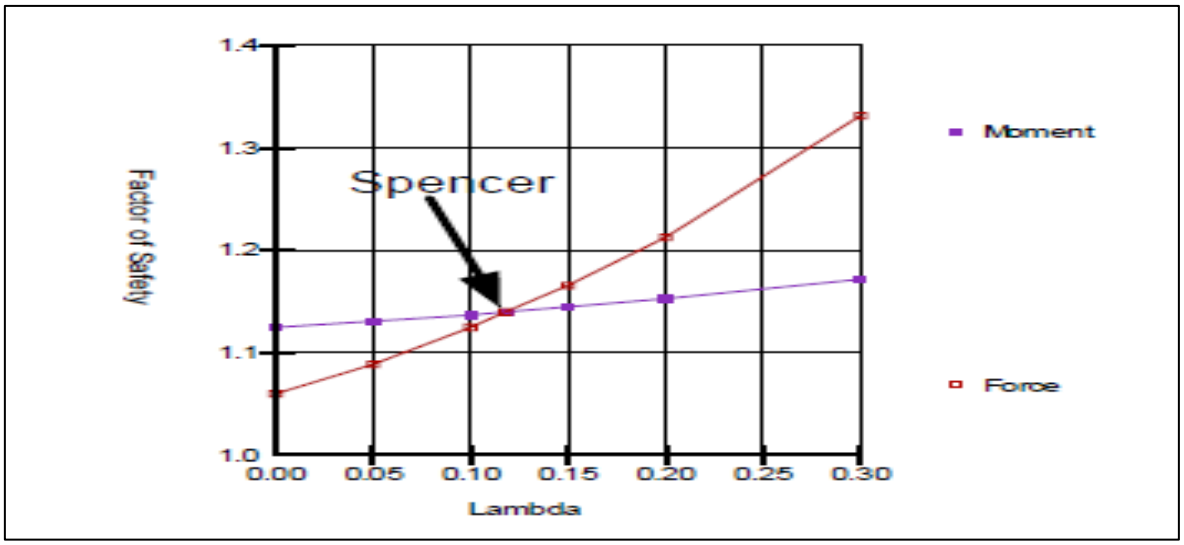
normal kuvvet oranı tüm dilimler arasında aynıdır. Şekil 3.7'de tipik bir eğim stabilitesi durumunu göstermektedir. Spencer Güvenlik Faktörü 1,140'tır.



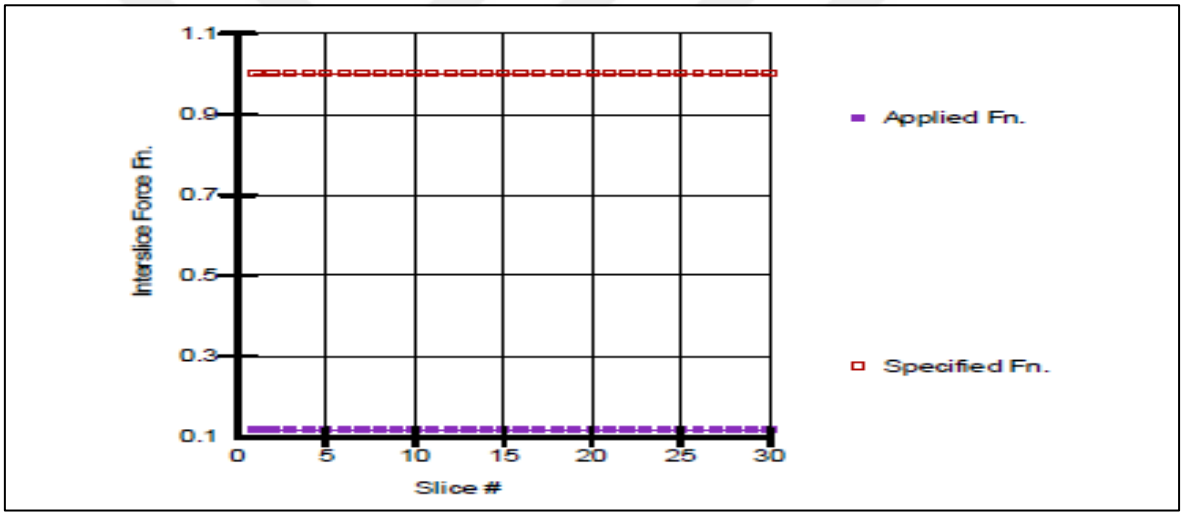
Şekil 3.7. Tipik şev stabilitesi durumu. (Krahn, J., 2004, "Stability Modeling with Slope/W)

Şekil 3.8'de Lamda vs. Güvenlik Faktörü grafiğinde Spencer güvenlik faktörü; momentin ve kuvvet denge eğrisinin kesiştiği yerdir. Kesişimdeki Lambda 0.12'dir. Spencer yöntemi için f (x) fonksiyonu 1.0'dır.

Belirtilen fonksiyonun ve uygulanan kesit fonksiyonunun bir grafiği Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Uygulanan fonksiyonun 0.12'de sabit (değişmez) olduğu unutulmamalıdır.



Şekil 3.8. Spencer'ın güvenlik faktörü. (Krahn, J., 2004)



Şekil 3.9. Spencer Metodu için Kesitlerarası Fonksiyonlar (AppliedFn: Uygulanan Fonksiyon; SpecifiedFn: Tanımlanmış Fonksiyon) (Krahn, J., 2004)

Kesme kuvveti ile normal kuvvetler arasındaki ilişkinin teyit edilmesi dilim kuvvetlerinde daha da belirgindir.

Spencer yöntemi:

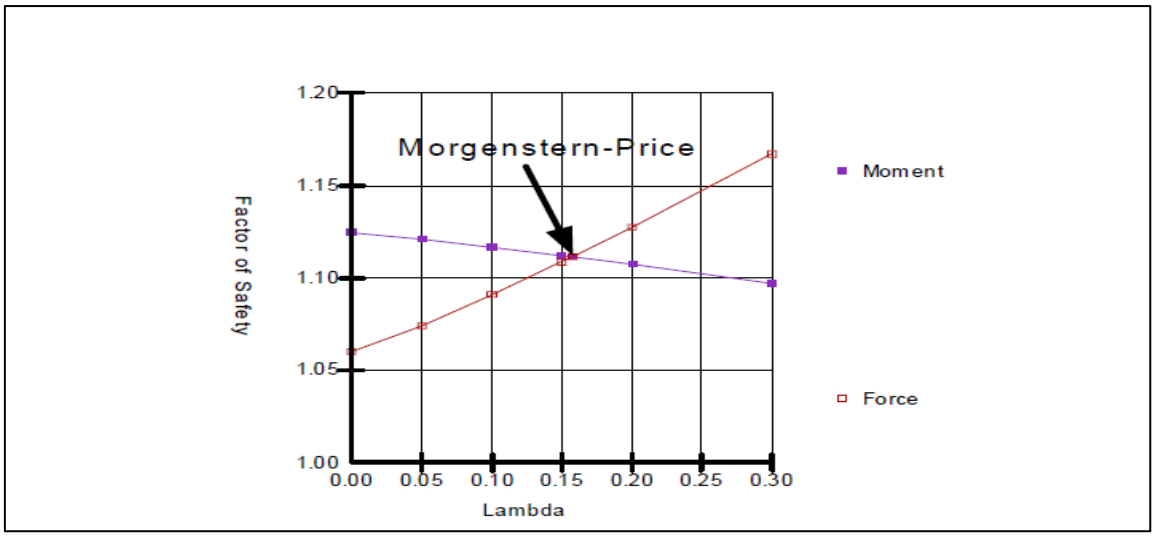
- Hem kesme hem de normal kayma kuvvetlerini dikkate alır,
- Hem moment hem de kuvvet dengesini sağlar,
- Sabit bir kayma kuvveti fonksiyonu varsayar.

3.1.4. Morgenstern-price metodu

Morgenstern ve Price(1965), Spencer yöntemine benzer bir yöntem geliştirdiler, ancak çeşitli kullanıcı tarafından belirlenen kesme kuvveti işlevlerine izin verdiler. Morgenstern-Price (M-P), yöntemiyle birlikte kullanılmak üzere kesit fonksiyonları şunlardır:

- Sabit
- Yarı-sinüs
- Kırpılmış sinüs
- Yamuk
- Veri noktası ayarlanabilir

Sabit fonksiyonunun seçilmesi, M-P metodunu Spencer metoduyla özdeş yapar. Şekil 3.10'da güvenlik momenti ve kuvvet faktörlerinin lamda ile nasıl değiştiğini göstermektedir. M-P Güvenlik Faktörü, iki eğrinin çaprazlama olduğu yerde meydana gelir.



Şekil 3.10.Yarım sinüs fonksiyonlu Morgenstern-Price güvenlik faktörleri. (Krahn, J., 2004)

Spencer yönteminde olduğu gibi, kuvvet poligonu kapanması M-P yönteminde de çok iyidir, çünkü hem kesme kuvveti hem de normal kesme kuvvetleri dahil edilmiştir.

M-P Güvenlik Faktörünün (kesişim noktası) Bishop'un Basitleştirilmiş Güvenlik Faktörü'nden (sıfır lamdadaki moment dengesi) daha düşük olabilmektedir. Bunun nedeni moment denge eğrisinin negatif bir eğimde olmasıdır. Yani, kesme kuvvetlerini dikkate almayan Bishop'ın Basitleştirilmiş yöntemi gibi daha basit bir yöntem,güvenlikli kısımda kalabilmektedir. M-P yöntemi gibi hem kesme kuvvetini hem de normal kuvvetleri dikkate alan daha titiz bir yöntem, bu durumda daha düşük güvenlik faktörüne neden olabilir.

Morgenstern-Price yöntemi:

- Hem kesme kuvvetlerini hem de normal kesit kuvvetlerini dikkate alır,
- Hem moment hem de kuvvet dengesini sağlar ve
- Kullanıcıların seçebileceği çeşitli kesit kuvveti işlevine izin verir.

3.1.5. Sarma yöntemi

Sarma (1973), dikey olmayan kesit veya genel bloklar için bir stabilize analizi yöntemi geliştirdi. Sarma tarafından bloklar arası kesme kuvveti ve normal kuvvetleri ilişkilendirmek için kullanılan yaklaşım, kesişim arasındaki kesme kuvvetleri ile normal kuvvetler arasındaki ilişkiyi tanımlamak için de kullanılabilir.

Sarma, kesişim kuvveti ve normal kuvvetleri ilişkilendirmek için Mohr-Coulomb kesme kuvveti denklemine benzer bir denklik benimsedi. Eşitlik;

$$X = c*h+E\tan\phi \qquad \textbf{(3.8)}$$

C; bir kohezyon mukavemeti, h; kesit kenarı yüksekliği ve ϕ; madde sürtünme açısıdır. Madde özellikleri kullanıcı tarafından belirlenen değerlerdir.

Bu yaklaşımın cazibesi, kesişim kuvvetlerinin, sezgisel olarak belirli bir işleve göre kavramsallaştırılması ve daha kolay olan malzeme özellikleri ile ilişkili olmasıdır ancak sonuçta o kesişim noktası işlevini belirlemek başka bir mekanizmadır.

Bu yaklaşım, bütünlük sıfır olduğunda veya en azından çok küçük olduğunda en iyi sonucu alır. Uyum sıfır olduğunda, kesişim kayması diğer tüm yöntemlerde olduğu gibi normal ile doğru orantılıdır. Uyum değeri belirtildiğinde, kesişim kayması, kesişim

normalinden bağımsız hale gelir ve yakınsama güçlüklerine yol açabilir.

Sarma kesişim gücü yaklaşımını kullanırken, sıfır olan kohezyon ile başlamalıdır. Daha sonra kohesyona küçük bir miktar ekleyebilir ve bu bileşen eklemenin etkisini araştırabilirsiniz, ancak bu özen ve dikkat ile yapılmalıdır. Elde edilen güvenlik faktörünün kesişme kuvvetlerine karşı ne kadar duyarsız olduğunu göz önüne alarak, kohezyonu daima sıfır bırakmak en iyisidir.

Kesişim kuvvetlerinin ilişkilendirilmesinin dışında, Sarma yöntemi Spencer ve Morgenstern-Price yöntemleriyle aynıdır. Hesaplanan kesişim kayma kuvveti, genel kuvvet ve moment dengesi sağlanıncaya kadar küresel bir faktörle (Lamda'ya benzer şekilde) ayarlanır.

3.1.6. Janbu’nun genelleştirilmiş yöntemi

Janbu’nun genelleştirilmiş yöntemi, yukarıda tartışılan diğer tüm limit denge yöntemlerinden biraz farklıdır. Bu yöntem, bir itme hattı tanımlayarak potansiyel kayma kütlesine bir gerilme dağılımı uygular. Kesitler arası kesme-normal sonucu, itme hattının, hidrostatik bir gerilme dağılımını temsil etmek için dilimlerin kenarları boyunca tipik olarak alt 1/3 noktasında kesitleri kesiştiği yerde hareket ettiği varsayılmaktadır. Sonuçtaki konumun, dilim taban merkezi etrafında momentler alarak kesişim kesme kuvvetlerini hesaplamasını mümkün kıldığı varsayıldığında, kesişim normalleri daha önce tartışılan Janbu Basitleştirilmiş yöntemi kullanılarak hesaplanır. Daha sonra dilimler arası kesme kuvvetleri, dilim tabanındaki momentleri alarak belirlenir.

Janbu'nun genelleştirilmiş yöntemi yalnızca Janbu'nun basitleştirilmişiyle aynı olan toplam kuvvet dengelerini karşılar. Moment dengesini yalnızca dilim seviyesinde tahmin eder. Janbu'nun Genelleştirilmiş yöntemi yalnızca kuvvet denge faktörünü (Ff) hesaplar. Güvenlik momentinin toplam denge faktörü (Fm) hesaplanmaz.

Limit denge formülasyonları mutlaka gerçekçi gerilme dağılımlarına neden olmaz. Limit Dengesi formülasyonları, her dilimin kuvvet dengelerini sağlayan ve her dilim için sabit bir emniyet faktörü sağlayan dilim kuvvetlerini bulur. Bu doğal özellikler gerçek dışı

gerilmeler ile sonuçlanabilir ve gerilmeler gerçekçi değilse, dilimin kendisi moment dengesini karşılamayabilir. Sayısal olarak, bu sonuç, kesişimin sonuç noktasının uygulama noktası dilimin dışında olabilir demektir. Bunun tersine, her dilimin moment dengesini sağlayan dilim kuvvetlerini bulursak, güvenlik faktörü her dilim için aynı olduğu varsayıldığında her dilimin kuvvet dengesini sağlamak mümkün olmayabilir. Bir anlamda, sabit bir güvenlik faktörü varsayarsak, problem bazı seviyelerde aşırı zorlanır. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, yerel bir güvenlik faktörüne sahip olmak gereklidir. Bir limit denge formülasyonunda, bu mümkün değildir.

Parçalı doğrusal kayma yüzeyindeki keskin köşelerden veya yoğunlaşmayı temsil eden konsantre kuvvetlerden kaynaklanan gerilme konsantrasyonları, Janbu'nun Genelleştirilmiş yönteminde yakınsama güçlükleri oluşturabilir. Ayrıca, yöntem zayıf kuvvet poligonu kilidi ortaya koyabilir. Kesit momenti dengesini zorlamak, dilim kuvveti dengesini elde etmenin her zaman mümkün olmadığı anlamına gelir.

Özetle, Janbu'nun genelleştirilmiş yöntemi limit denge formülasyonuna bir başka yaklaşımdır. Diğer yöntemlerin tümü gibi onun da sınırlılıkları olduğundan, diğer yöntemlerden daha iyi veya daha kötü değildir. Janbu'nun genelleştirilmiş yöntem faktörleri, özellikle kayma yüzeyinde keskin köşeler veya gerilme yoğunlaşmalarına neden olan yüksek konsantrasyonlu yükler olmazsa kesme ve normal kesişim kuvvetlerini dikkate alan yöntemlere benzer olacaktır.

3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Limit Dengesi Esasları hakkındaki bölüm, limit denge formülasyonlarından elde edilen gerilme dağılımlarını tartışır ve bu gerilme dağılımlarının gerçek alan gerilmelerini temsil etmesi gerekmediğini gösterir. Tekrarlamak için, limit denge formülasyonları şu gerilmeleri ve güçleri verir.

- Her dilimin kuvvet dengesini sağlamayı amaçlamak
- Güvenlik faktörünü her dilim için aynı yapmak

Bu doğal kavramlar ve varsayımlar, kayma yüzeyi boyunca veya kayma kütlesi içinde gerçekçi gerilme dağılımlarının elde edilmesinin her zaman mümkün olmadığını

ifade eder. Bu sınırlamaları aşmak için stabilite analizine başka bir fizik parçası eklenmelidir. Eksik fizik parçası bir gerilme-deformasyon ilişkisidir. Böyle bir ilişki dahil edilerek, yer değiştirme uyumluluğu oluşur ve bu da daha gerçekçi gerilme dağılımlarına yol açar.

Bir stabilize analizine bir gerilme-deformasyon ilişkisini eklemenin bir yolu, önce bir sonlu elemanlar analizi kullanarak zemindeki gerilme dağılımını oluşturmak ve daha sonra bu gerilmeleri bir stabilize analizinde kullanmaktır.

Bir sonlu elemanlar gerilme analizinden elde edilen temel bilgiler, her bir eleman içinde normal gerilmeler ve kayma dayanımı olan σx, σy ve τxy'dir.

Sonlu elemanlar tarafından hesaplanan gerilmeler klasik bir limit denge analizine aktarılabilir. Gerilmeler σx, σy, τxy her bir eleman içerisinde bilinmektedir ve bu bilgiden normal ve mobilize kayma gerilmeleri her dilimin taban orta noktasında hesaplanabilir.

Harekete geçirilmiş ve dirençli kesme kuvvetleri her dilim için mevcut olduğunda, kuvvetler, bir denge faktörü belirlemek için kayma yüzeyinin uzunluğu boyunca entegre edilebilir. Stabilize faktörü şu şekilde tanımlanır;

$$\mathrm{FS} = \frac{\sum Sr}{\sum Sm} \qquad \textbf{(3.9)}$$

olduğu yerde, Sr; mevcut toplam kayma direncidir ve Sm; kayma yüzeyinin tüm uzunluğu boyunca toplam harekete geçirilmiş kesmedir (Kulhawy 1969; Naylor, 1982).

Sonlu elemanlar gerilme temelli yaklaşımın ek bir avantajı, her dilim için yerel güvenlik faktörlerine bakma imkânı yaratmasıdır.

Derin kayma yüzeyi için iki küresel güvenlik faktörü hemen hemen aynıdır. Bununla birlikte, bölgesel olarak, güvenlik faktörleri, güvenlik sabit limit denge faktörü tarafından bu şekilde gösterilen genel değerden daha küçük veya daha büyüktür. Toplam kayma direnci ve kayma yüzeyi boyunca toplam harekete geçirilmiş kesme entegrasyonu, varyasyonun ortalamasını alır ve iki güvenlik faktörünü aynı hale getirir.

Sonlu elemanlar gerilme temelli yaklaşımı bazı kısıtlamaların üstesinden gelir. Yakınsama, limit denge oluşumunda, özellikle de kritik kayma yüzeyi dik olduğunda, bağlantı duvarının arkasında olduğu gibi sorunludur. Sonlu elemanlar gerilmelerini kullanmak, duvarlar ve dik yamaçları takviye ile analiz etme; zorluklarının üstesinden gelir. Ayrıca, sonlu elemanlar gerilmelerini kullanmak, zemin yapısı problemleriyle ilgili pek çok zorluğun üstesinden de gelir. Sonlu elemanların hesaplanan gerilmelerine dayanarak bir stabilize analizi yapmanın en çekici özelliklerinden biri, zemin-yapı etkileşiminin doğrudan bir şekilde ele alınabilmesidir. Bir limit denge analizinde kayma kütlesi dışındaki kuvvetlerle uğraşmanın zorluğu vardır.

Limit denge çerçevesi içinde sonlu elemanlar hesaplanmış gerilmelerinin kullanılması birçok avantaja sahiptir. Bazıları şöyledir;

- Kesişim kuvvetleri hakkında varsayımlarda bulunmaya gerek yoktur.
- Kararlık faktörü, gerilme bir kez hesaplandıktan sonra belirleyicidir ve sonuç olarak, yinelemeli yakınsama problemi yoktur.
- Yer değiştirme uyumluluğu sorunu tatmin edicidir.
- Hesaplanan zemin gerilmeleri gerçeğe çok daha yakındır.
- Gerilme konsantrasyonları, stabilize analizinde dolaylı olarak düşünülür.
- Toprak-yapı etkileşim etkileri, stabilize analizinde kolayca ele alınır.Deprem sarsıntısından kaynaklanan dinamik gerilmeler bir stabilize analizinde doğrudan düşünülebilir.

Sonlu eleman temelli yaklaşım, bir limit denge analizinde bulunan sınırlamaların çoğunun üstesinden gelir. Aynı zamanda, bazı yeni konular ortaya çıkarır.

İlk olarak, önerilen yaklaşımla bir sonlu elemanlar gerilme analizi yapmak gerekir. Neyse ki, gerekli yazılım araçları artık hazır ve nispeten kullanımı kolaydır. Fakat bu analistin sonlu elemanlar analiz tekniklerine aşina olması gerektiği anlamına gelir.

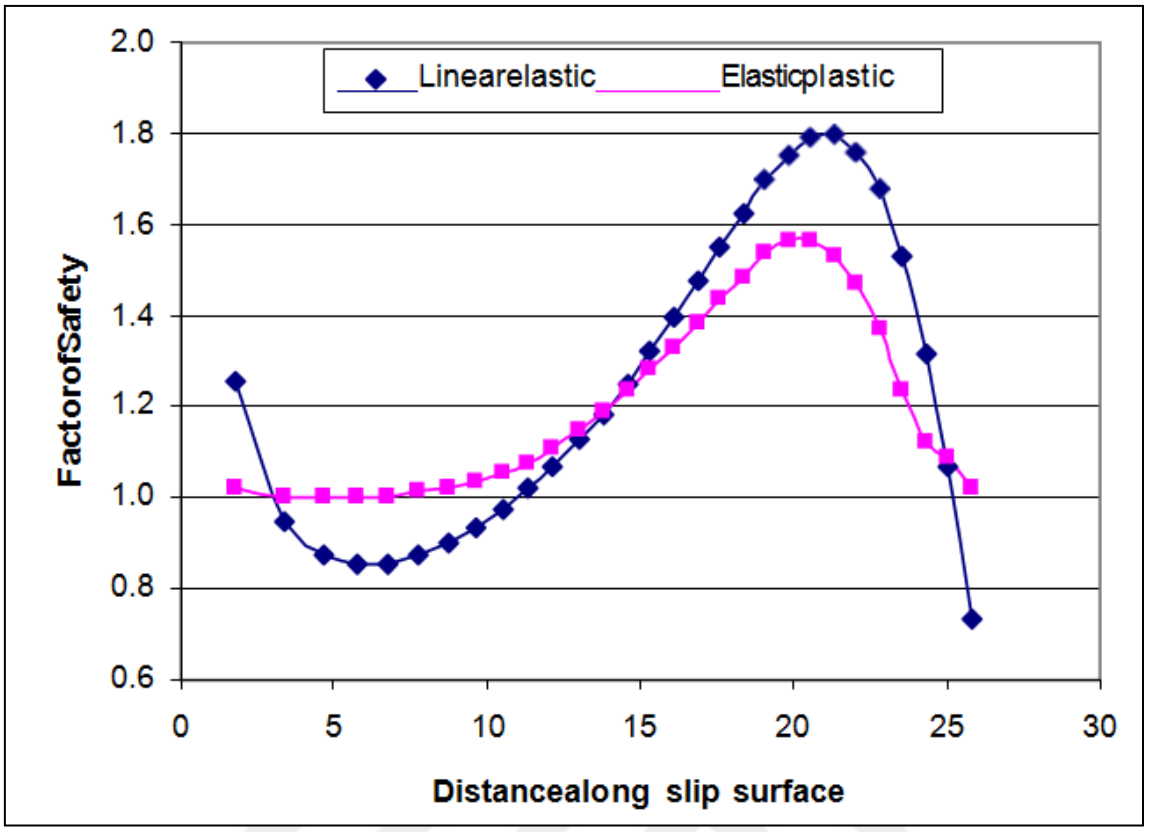
Malzeme özellikleri basit doğrusal elastik davranışla sınırlandırılmışsa, bir sonlu elemanlar gerilme analizi oldukça basittir. Nispeten basit olmakla birlikte, lineer olmayan yapısal modellerde bir problem olabilecek yakınsama güçlükleri olmadığı için sadece

doğrusal elastik zemin modellerini kullanmak daima bir çözüm sağlamaktadır. Birçok durumda gerilme koşullarının makul bir resmini elde etmek için bir doğrusal elastik analizi yeterlidir. Kesinlikle, bir limit denge analizinden elde edilenlerden daha iyi bir gerilme dağılımı resmi verir. Temel çıkarım, deformasyon olması durumunda doğrusal olmayan yapısal bağlantı, eğer ana ilgi bir gerilme dağılımı değilse, çoğunlukla şarttır. Dahası, makul bir gerilme dağılımı elde etmek için ortalama doğrusal-elastik özellikleri bile yeterlidir ve dolayısıyla doğrusal elastik parametrelerin tanımlanması için büyük çaba harcanması gerekmez.

Basit bir doğrusal elastik analizin sonuçları, bazı bölgelerdeki hesaplanan gerilmelerin mevcut toprak kuvvetinden daha yüksek olduğu anlamına gelebilir. Bu, kendisi fiziksel olarak mümkün olmayan bazı dilimlerde 1.0'dan daha düşük bir güvenlik faktörü olarak kendini gösterir. İdeal olarak, doğrusal olmayan yapısal modeller gerilmeleri yeniden dağıtmak için kullanılmalıdır ki uygulanan gerilmeler mukavemeti aşamaz. Bununla birlikte, doğrusal olmayan yapısal bağlantılar kullanmak, öncelikle ilgili sayısal yakınsaklık sorunları nedeniyle, analizi zorlaştırmaktadır.

Şekil 3.11’de gerilmeler bir doğrusal elastik analiz ve elastik-plastik analiz kullanılarak belirlendiğinde; lineer elastik gerilmeler bölgesel güvenlik faktörlerinin 1,0’dan daha düşük olmasına neden olur. Elastik-plastik analizi ise gerilmeleri yeniden dağıtır ve yerel güvenlik faktörlerinin hiçbiri 1,0’dan daha düşük değildir.

Sonlu elemanlarla hesaplanmış gerilmelerini kullanmak, stabilite hesaplamalarının artık yatay gerilmeleri ve dikey gerilmeleri içerdiği anlamına gelir. Bu hem iyi hem de kötüdür. İyi olan kısmı, bir stabilize analizinde çeşitli Ko (σx / σy oranı) koşullarının dikkate alınabilmesidir. Kötü olan kısmı ise Ko'nun tanımlanması gerektiğidir. Lineer elastik gravite dönüşümü analizinde σx / σy oranı Poisson oranı (ν) ile yansıtılır. Yer seviyesi için, Ko, ν / (1- ν) 'e eşittir. Farklı Ko koşulları farklı güvenlik faktörleri verecektir. Fredlund ve ark. (1999), değişen Poisson oranının güvenlik faktörü üzerindeki etkisini incelemiştir. Neyse ki uygun Ko koşullarını tanımlamak imkânsız değildir. Kararlılığı değerlendirirken sonlu elemanlar gerilmelerinin kullanılmasını önlemek kesinlikle zor değildir.



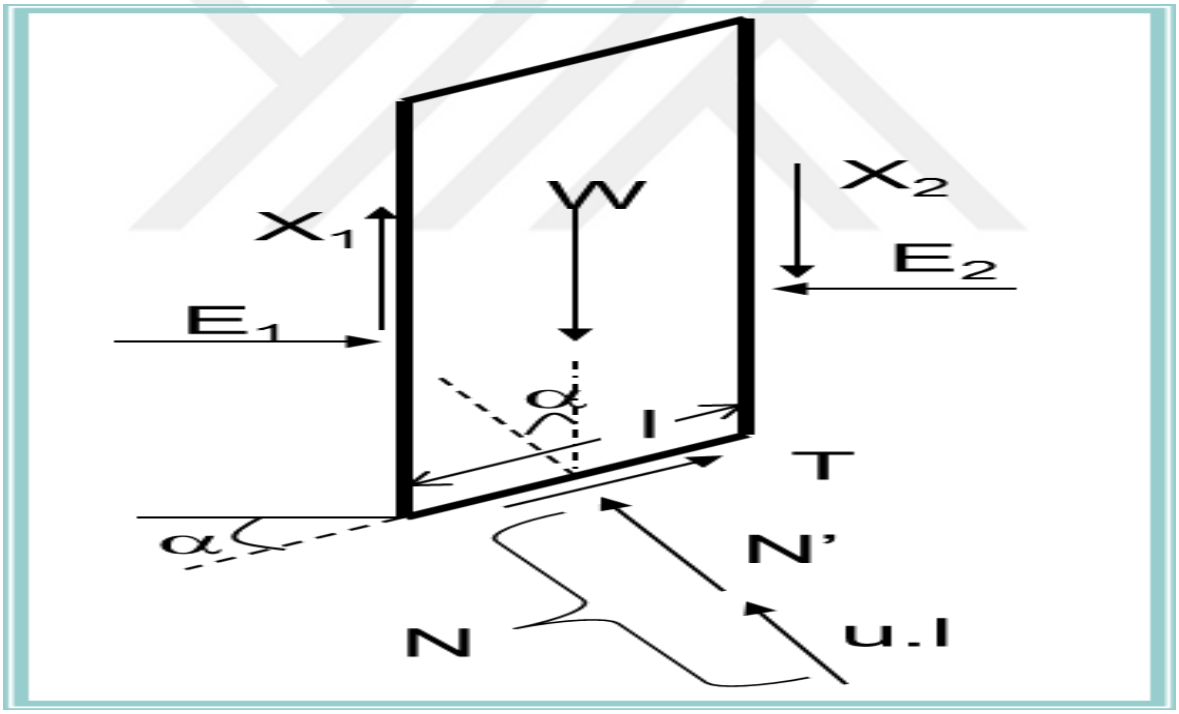
Şekil 3.11. Lineer elastik ve elastik-plastik gerilmeler için güvenlik faktörü. (Krahn, J., 2004)

3.3. Uygun Yöntemin Seçimi

Yer kabuğunun stabilitesini analiz etmek için limit denge yöntemi, içerdiği sınırlamalara rağmen pratikte faydalı bir araç olarak kalmaya devam etmektedir. Bununla birlikte, yöntemi kötüye kullanmamaya özen gösterilmesi ve sınırları aşan durumlarda uygulanması gerekir. Limit denge türlerini etkili bir şekilde kullanmak için yöntemin, yeteneklerinin ve sınırlarının anlaşılması ve yöntemin sağlayamayacağı sonuçları beklememesi hayati önemdedir. Yöntem tamamen statik ilkelere dayandığından ve yer değiştirme hakkında hiçbir şey söylemediğinden gerçekçi gerilme dağılımları elde etmek her zaman mümkün değildir. Bu yöntemin sağlayamayacağı bir şeydir ve sonuç olarak beklenmemelidir. Neyse ki, bazı dilimlerdeki bazı gerçek dışı gerilmelerin görünmesi, genel güvenlik faktörünün kabul edilemez olduğu anlamına gelmez. Kayma yüzeyi şekli veya zemin-yapı etkileşimi nedeniyle potansiyel kayma kütlesi gerilme konsantrasyonları ortaya çıktığında dikkat ve özen gerekir.

Yöntemin ve sınırlarının detaylı bir şekilde anlaşılması, sonuçların yorumlanmasında ve kullanımında daha büyük bir güven yaratmaktadır. Bu konuma geçmek, sadece güvenlik faktörlerinden daha fazlasını görmek zorunda olduğunuz anlamına gelir. Limit denge yöntemini etkili bir şekilde kullanmak için, en azından bir proje süresince, kayma yüzeyi boyunca detaylı kesme kuvvetleri ve geoteknik parametrelerin değişimini incelemek de önemlidir. Örneğin, bir FS'ye karşılık lamda değişimlerine bakmak, bir kesişim kuvveti fonksiyonunu tanımlama konusunda birinin ne kadar ilgili olması gerektiğine karar vermede büyük bir yardımcıdır.

Limit denge analizinde kullanılan yöntemlerin şematik hali Çizelge 3.1.'de gösterilmiştir. Aynı zamanda limit denge yönteminde kullanılan serbest cisim diyagramı ve kuvvet poligonu Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Limit denge yönteminde serbest gövde diyagramı ve kuvvet poligonu.

Çizelge 3.1. Limit denge analizlerinde kullanılan yöntemlerin özeti.

METOD	Yatay ve Düşey Kuvvetler	Düşey Denge	Yatay Denge	Moment Dengesi
Fellenuis	Dikkate alınmaz	Hayır	Hayır	Evet
Bishop	Yatay	Evet	Hayır	Evet
Janbu	Yatay	Evet	Evet	Hayır
Spencer	Sabit	Evet	Evet	Evet
Morgenstern-price	Değişken $X = E\,\lambda\, f(x)$	Evet	Evet	Evet
Sarma	$X = c*h+E\tan\phi$	Evet	Evet	Evet

Ayrıca, pratikte uygulanan limit denge analizleri, minimum olarak Morgenstern-Price veya Spencer yöntemleri gibi kuvvet ve moment dengesini de sağlayan bir yöntem kullanmalıdır. Artık mevcut yazılım araçları ile yalnızca statik denklemlerin bazılarını karşılayan basit yöntemleri kullanmaktan çok, matematiksel açıdan daha sıkı yöntemlerden birini kullanmak kadar kolaydır.

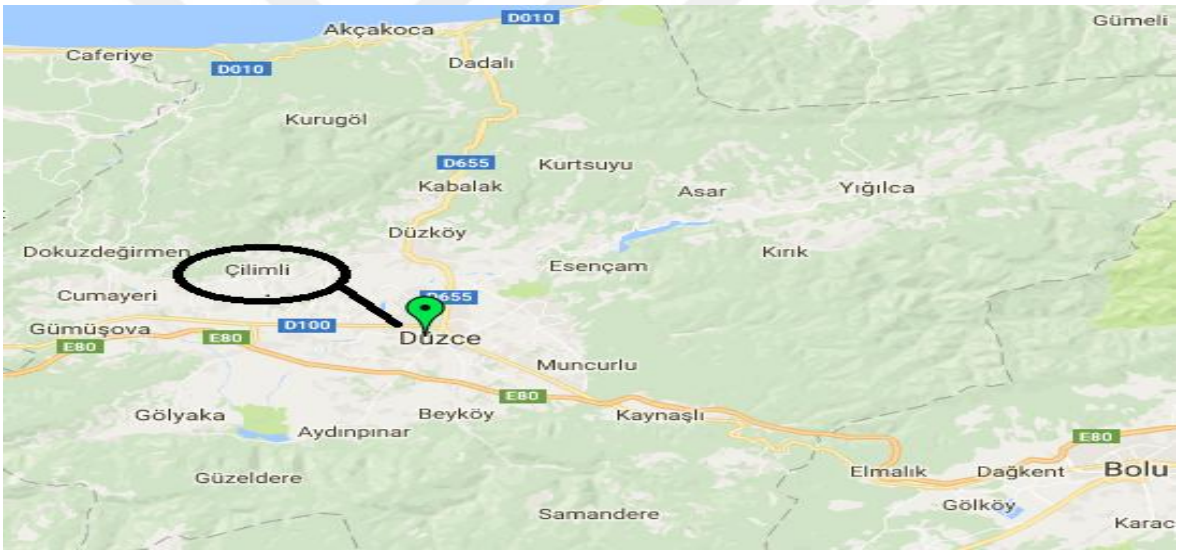
Sonlu elemanlar yöntemi gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin hesaplandığı yarı-elastik bir bütün yaklaşımla uygulanmaktadır. Sonlu elemanlar hesaplanmış gerilmelerine dayanan geoteknik stabilite analizlerini gerçekleştirmek için gerekli olan araçlar bugün hali hazırda mevcuttur. Araçların uygulanması artık yalnızca uygulanabilir değil aynı zamanda pratiktir. Gelecekte öngörülemeyen meseleler ortaya çıkacaktır, ancak geoteknik mühendislik uygulamasında yöntemin gittikçe daha fazla kullanılması nedeniyle bu gibi detaylar zamanla çözülecektir.

Geoteknik yapıların kararlılığını analiz etmek için bir limit denge çerçevesi içinde sonlu elemanlar hesaplanmış gerilmeleri kullanmak, geleneksel limit denge yöntemlerinin sınırlamalarını çoğunun üstesinden geldiği ve uygulamada oldukça rutin olarak kullanılan limit denge yöntemlerinin bilgisine aşinalık kazandırdığı için önemli bir adımdır.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal

Düzce İlinin Çilimli İlçesi Karaçörtlen köyünde meydana gelen heyelanla ilgili; bölgenin coğrafi özellikleri, morfolojisi, genel jeolojisi, depremsellik durumu incelenmiş aynı zamanda heyelan alanında yapılan gözlem, arazi çalışmaları ve bunların neticesinde oluşturulan raporlardan çıkan sonuçlarla geoteknik olarak değerlendirilerek şev stabilite analizleri yapılmıştır. Şekil 4.1'de arazinin bulunduğu bölgenin yer bulduru haritası verilmiştir.



Şekil 4.1. Düzce İli Çilimli İlçesinin yer bulduru haritası, (Google Maps).

İnceleme alanının jeolojisi; kumtaşı ara seviyeli silisli çamur taşından oluşan formasyon Erken Ordovisiyen yaşlıdır. Uygulama alanında jeolojik birim Kocatöngel formasyonu ile temsil edilir.



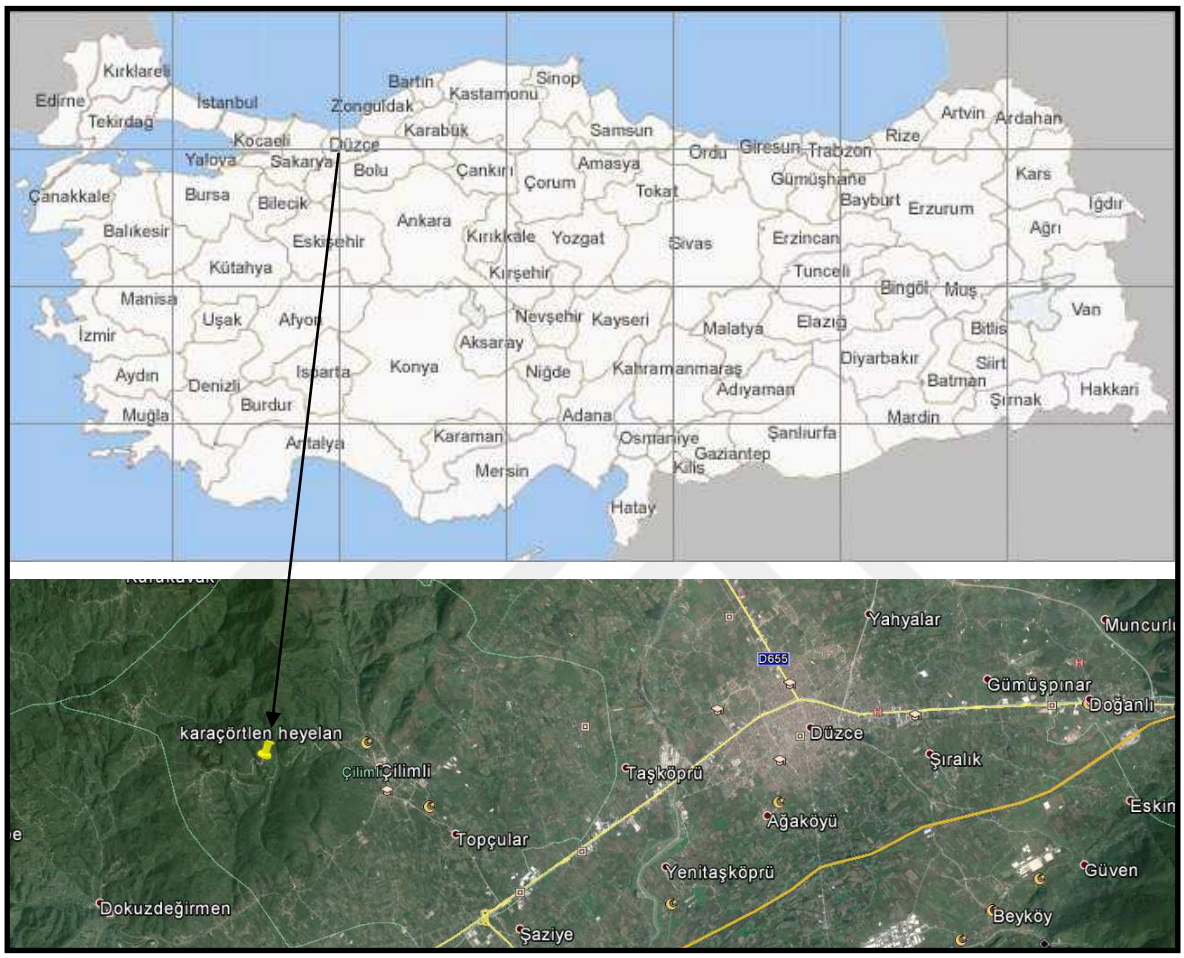
Şekil 4.2. Heyelan bölgesinden görünüm.

Arazi öncesi keşifler, etüt çalışmaları ve büro çalışmaları kapsamında heyelan; 2017 yılına kadar incelenmiş olup, kesin çözüm yapılana kadar, yol hattının kapanmaması için geçici çözüm olarak yolun bir kısmı boşaltılarak belirli zamanlarda taş tahkimi, İl Özel İdaresi ekiplerince yapılmıştır.

İlk olarak arazi sahasında oluşan heyelanla ilgili yerinde gözlem yapılmıştır. Daha sonrasında ise topoğrafik haritalar ve heyelan envanter haritası incelenerek bölgenin jeolojik bilgileri toparlanmıştır. Daha sonrasında ise bölgede yapılan arazi çalışmaları (heyelanın kayma yüzeyi derinliği, yer altı suyu seviyesi, tabaka kalınlıkları, mühendislik yapılarına teşkil edecek sağlam kayanın tespiti ve geoteknik parametrelerinin belirlenmesi) detaylıca incelenmiş olup heyelan duraylılığını sağlamak amacıyla; güvenlik faktörü yöntemleriyle analiz çalışmaları yapılmıştır.

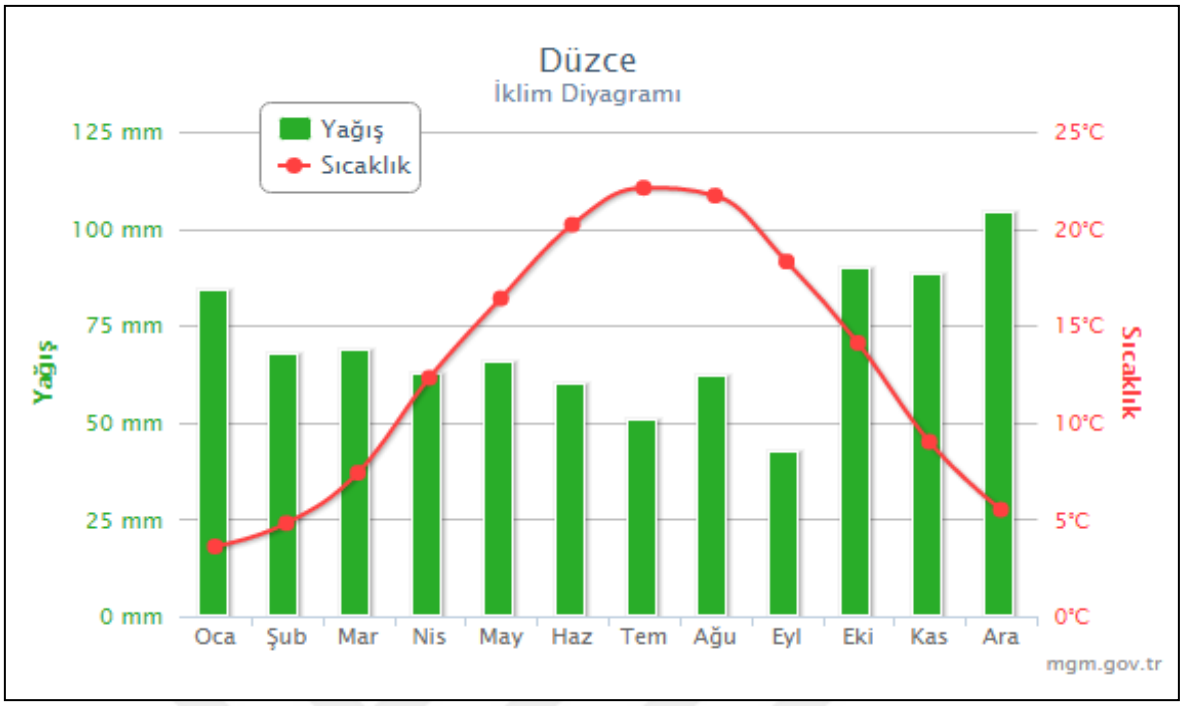
4.1.1. Bölgenin coğrafi özellikleri ve morfolojisi

İnceleme alanı Türkiye'nin Batı Karadeniz bölgesinde, Düzce İlinin Çilimli ilçesi (9.100 hektar) sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 4.3.).



Şekil 4.3. Heyelan olan alanın yer bulduru haritası.

Çalışma bölgesi Karadeniz bölgesinde yer aldığı için genellikle Karadeniz ikliminin etkileri görülse de Akdeniz ve Karasal iklimleri arası geçişte görülmektedir. Zaman zaman şiddetli yağışlar meydana gelmektedir ve iklim özelliklerinden dolayı da fazla yağış alan bir bölgedir, (Şekil 4.4.). Bitki örtüsü zenginliğiyle bilinen Düzce ili Eurosibirian bitki örtüsünün yanı sıra Submediterranean bitki örtüsüne de rastlanmaktadır. Verimli tarım toprakları bulunan bu bölgede fındık ve tütün başta olmak üzere bir çok ürün yetiştirilmektedir. Çevresinde zengin orman örtüsü (Köknar, Kayın, Meşe, Kestane, Ihlamur vb.) yer almaktadır.

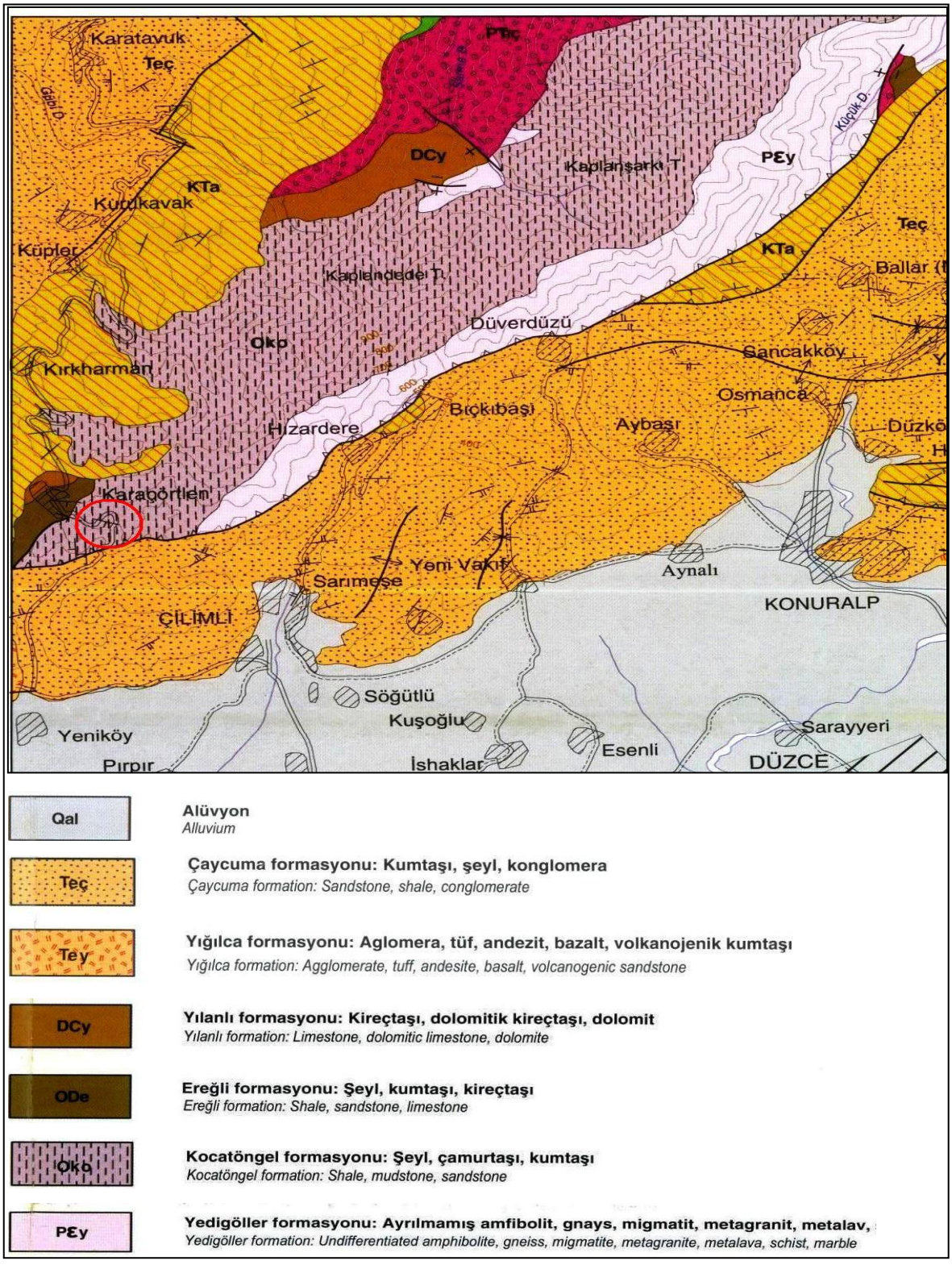


Şekil 4.4. Düzce ili aylık ortalama yağış ve sıcaklıklar. (Meteoroji Genel Müdürlüğü)

Morfolojik açıdan bölgenin güney ve kuzeyindeki yükseltiler arasında Doğu-Batı uzanımlı topoğrafik olarak düşük eğimlere sahip düzlükler bulunmaktadır. İl topraklarının yaklaşık % 60'ını kaplayan dağlar kuzeyden güneye ve batıdan doğuya doğru uzanmaktadır. Dağlar birçok yerde derin vadilerle sınırlanmıştır. Düzce ili genel olarak etrafı dağlarla çevrili bir ova görünümdedir ve turizm açısından da çok önemli değerlere sahiptir.

4.1.2. Bölgenin ve inceleme alanının genel jeolojisi

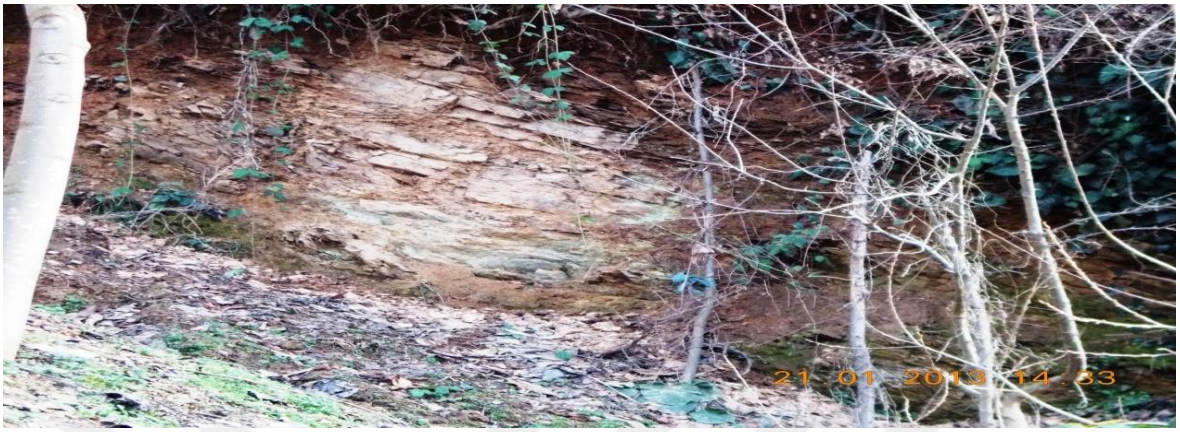
Düzce ili ve yakın çevresindeki en yaşlı birim Prekambriyen yaşlı birim olup farklı bölgelerde mostra verirler. Genel olarak fazlaca altere olmuş ve yer yer şistosite gösteren granit, granodiyorit karakteristiğindedir ve bu birim Yedigöller Formasyonu adı ile anılmaktadır. Şekil 4.5'de Düzce havzasıyla ilgili jeolojik harita ve açıklamaları yer almaktadır.



Şekil 4.5. İnceleme alanının ve çevresinin Genel Jeoloji Haritası ve harita birimlerinin açıklamaları, (MTA 2002, Adapazarı – G 26 Paftası), (Acar Jeofizik, il özel idaresi rapor.)

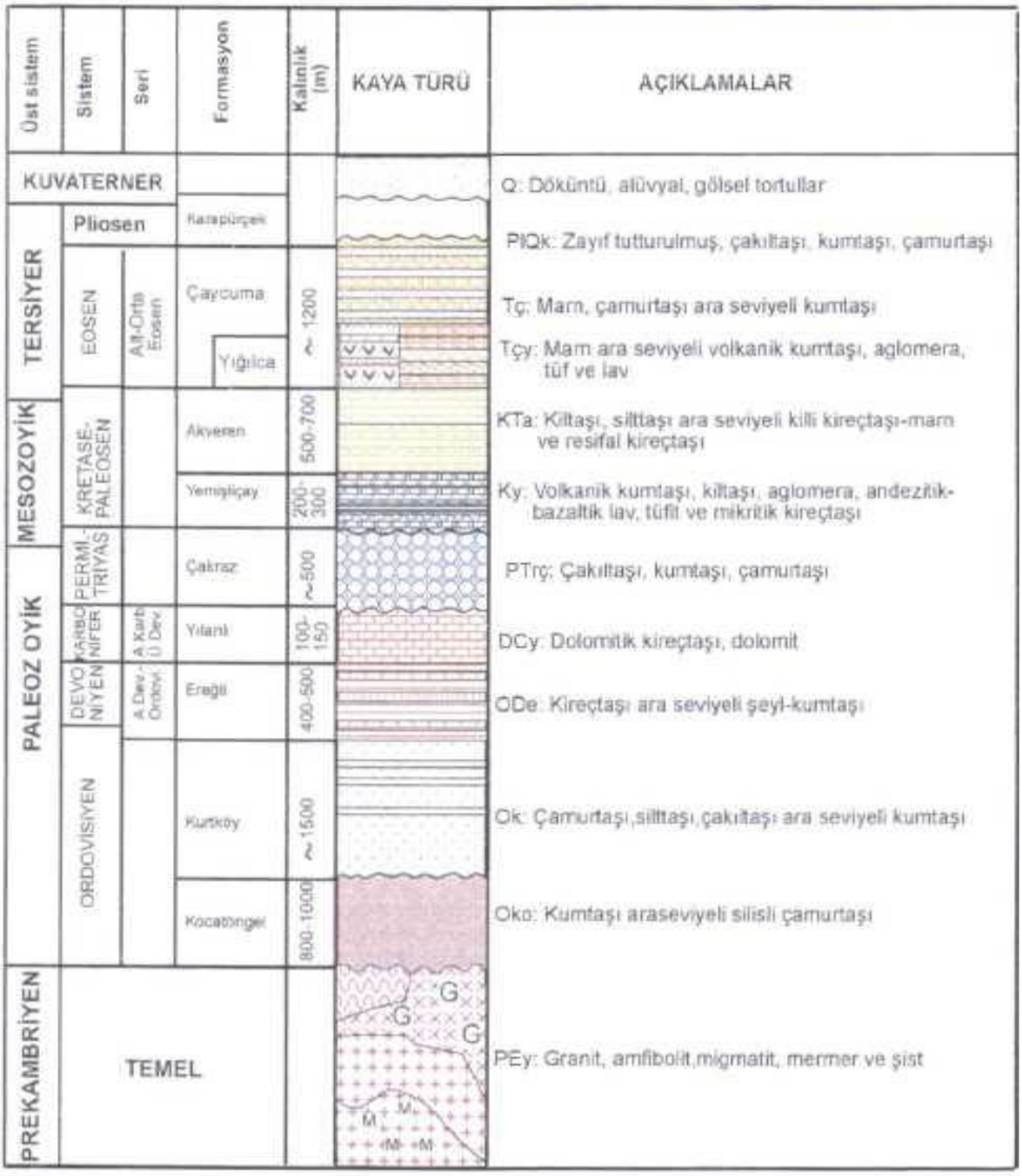
İnceleme alanı; Kocatöngel Formasyonu içerisinde yer almaktadır ve kumtaşı ara seviyeli silisli çamur taşından oluşan Erken Ordovisiyen yaşlıdır (Şekil 4.6.). İnceleme

alanının tabaka eğimi %15-25 derece, arazi eğimi ise %40-50 derece aralığında değişmektedir.



Şekil 4.6. İnceleme alanının jeolojik birimiyle ilgili yaklaşım için çekilen fotoğraf görüntüsü.

İnceleme alanı ve çevresinin formasyonunun Kocatöngel formasyonu olduğu ve bu formasyonla birlikte inceleme alanının çevresiyle ilgili bilgi sahibi olmak için Şekil 4.7'de bölgenin stratigrafisi gösterilmiştir.



Şekil 4.7. İnceleme alanı ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafisi.

4.1.3. İnceleme alanının geoteknik olarak değerlendirilmesi

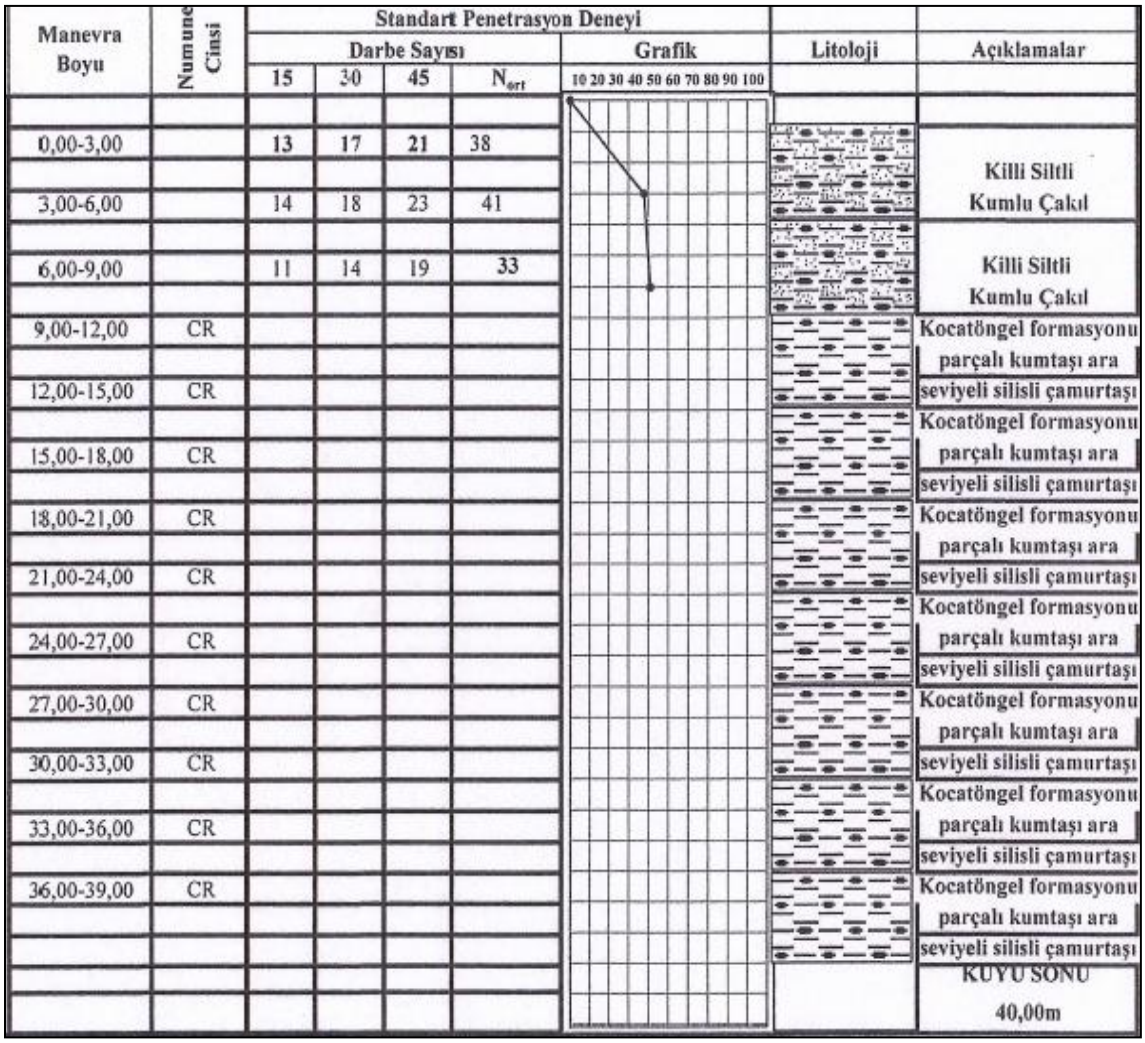
Bu çalışma kapsamında Düzce ili Çilimli İlçesi İl Özel İdaresi envanterinde bulunan, ÇLM-G-1-61 kontrol kesim numaralı (5. Km'de) Karaçörtlen köyü grup yolunun hattında 2012 yılında meydana gelen heyelanla ilgili yapılan arazi çalışmaları incelenmiştir, (A1; 40° 54.756'K enlemi ve 31° 1.066'E boylamı, A2; ° 54.660'K - 31°

1.052'E noktaları arasında kalan 180 metrelik kısım). Bu çalışmalarla heyelanın kayma yüzeyi derinliliği, yer altı suyu seviyesi, tabaka kalınlıkları, mühendislik yapılarına teşkil edecek sağlam kayanın tespiti ve geoteknik parametrelerinin belirlenerek ilgili yamacın duraysızlığını engellemek için analizinin yapılması amaçlanmıştır. Bu arazi çalışmaları 2013 yılının başında Düzce İl Özel idaresi tarafından ACAR Jeofizik firmasına yaptırılmıştır.

İnceleme alanında Düzce İl Özel İdaresi tarafından yapılan arazi çalışmaları (1 adet sondaj ve inklometre ölçümleri, 6 adet düşey elektrik sondaj yöntemi ve 3 adet sismik kırılma ölçümleri) neticesinde sonuçlar değerlendirilmiş olup ilgili alanın; yer altı suyu derinliği, kayma yüzeyi jeofizik ve geoteknik parametrelerinin bulunmasında yardımcı olmuştur.

Bu alanda yapılan 40 metrelik sondaj çalışması ve inklometre ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerle zeminde oluşan hareket ve deplasmanların miktarı, yönü ve derinliği tespit edilmeye çalışılmış olup;

- Yer altı suyu seviyesi -12. metrede (yol kotu sıfır alınırsa) tespit edilmiştir. Bu seviye mevsimsel yağışlara bağlı olarak değişmektedir.
- İnklonometre borusu -18. metrede boru kestiği için kayma yüzeyinin 18 metre derinlikte olduğu düşünülmüştür.
- Sondaj çalışmalarından elde edilen verilerle ilgili yapılan laboratuar sonuçlarıyla zeminin; genel olarak -9. metreye kadar killi siltli kumlu çakıl dolgu sınıflarından oluştuğu ve -9. metreden sonra kumtaşı ara seviyeli siltliçamurtaşından oluştuğu değerlendirilmiştir, (Şekil 4.8.).
- Heyelan alanı yine sondaj verilerinden çıkarılan sonuçla yol kotu sıfır alınırsa;-9. metreden -12. metreye kadar çakıl, -12. metreden -15. metreye kadar siltli çakıl, -18. metre ile -26. metre arası siltli kum ve -26. metre ile –40. metrearası düşük plastisitelisilt olarak değerlendirilmiştir, (Çizelge 4.1.). Bunun sonucunda 15 metre derinliğe kadar iri malzeme olan çakılın yoğun olduğu ve 15 ile 30 metre derinlik arasında siltli kumun, 30. metre ile 40. metre arası ise ince malzemenin yoğunlaştığı bir tabakalanma gözlenmektedir.



Şekil 4.8. Sondaj logu, (Akkurt Mühendislik, Düzce İl Özel İdaresi heyelan raporu, 2013)

Çizelge 4.1. Karot(CR) numunelerine ait tanımlama deney sonuçları.

Sondaj Kuyusu Adı	Tipi	Derinlik	Doğal su muhtevası (%)		Elek Analizi		Atterberg Limitleri			USCS
					# 4 Kalan (%)	#200 Geçen (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	
SK-1	CR	9,00-12,00	0,82	-	98,16	1,02	-	-	NP	GW? GP?
SK-1	CR	12,00-15,00	6,92	-	61,35	20,38	-	-	NP	GM
SK-1	CR	18,00-21,00	16,75	-	0	37,82	-	-	NP	SM
SK-1	CR	21,00-26,00	14,21	-	0	36,32	-	-	NP	SM
SK-1	CR	30,00-34,00	23,93	-	0	82,82	36	27	9	ML
SK-1	CR	34,00-37,00	25,29	-	0	82,35	38	26	12	ML
SK-1	CR	37,00-40,00	24,6	-	0	81,82	37	25	12	ML

İnceleme alanında yapılan sismik çalışmalar neticesinde ise zeminle ilgili bazı parametreler ve zemin profili belirlenmiştir. Şekil 4.9'da Düzce İl Özel idaresi tarafından yapılan düşey elektrik sondaj yöntemi uygulama noktaları gösterilmiştir.



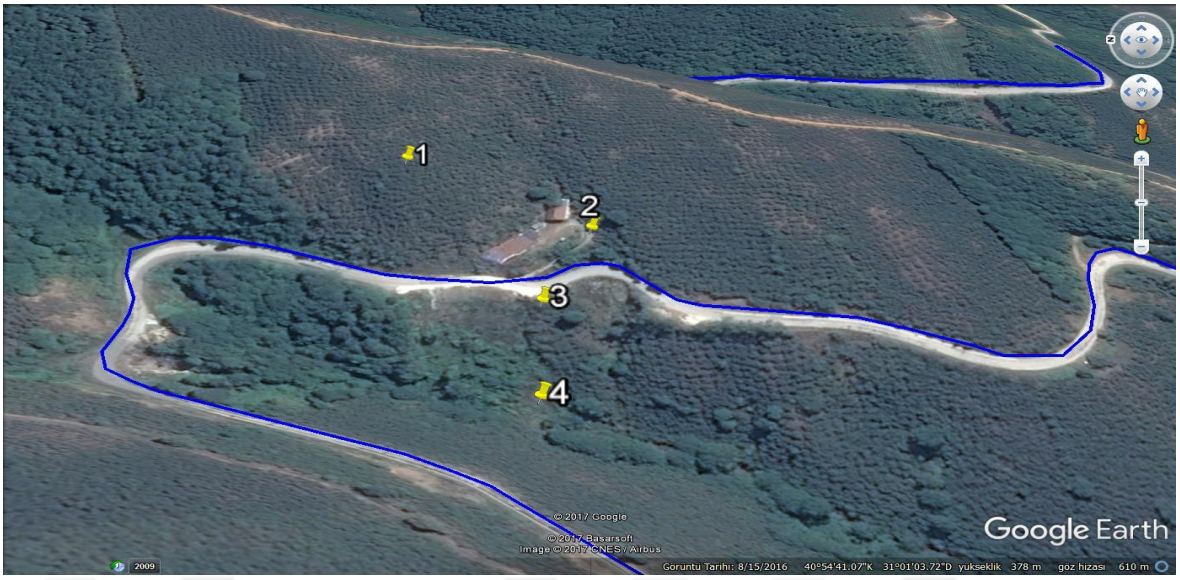
Şekil 4.9. Yamaçta oluşan şev duraysızlığının tahmin edilen alanı ve düşey elektrik sondaj yöntemi noktaları.

Heyelanla ilgili yapılan bu çalışmalarla ilgili bölgeye hakim olma açısından genel bir analiz ve yapılan çalışmaların sonuçları değerlendirilerek, heyelan olmuş bölgenin gözlemsel analizi (Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.) ve zemin profilinin mühendislik yapılarına temel teşkil edecek derinlik (Şekil 4.12.), belirlenmeye çalışılmıştır.

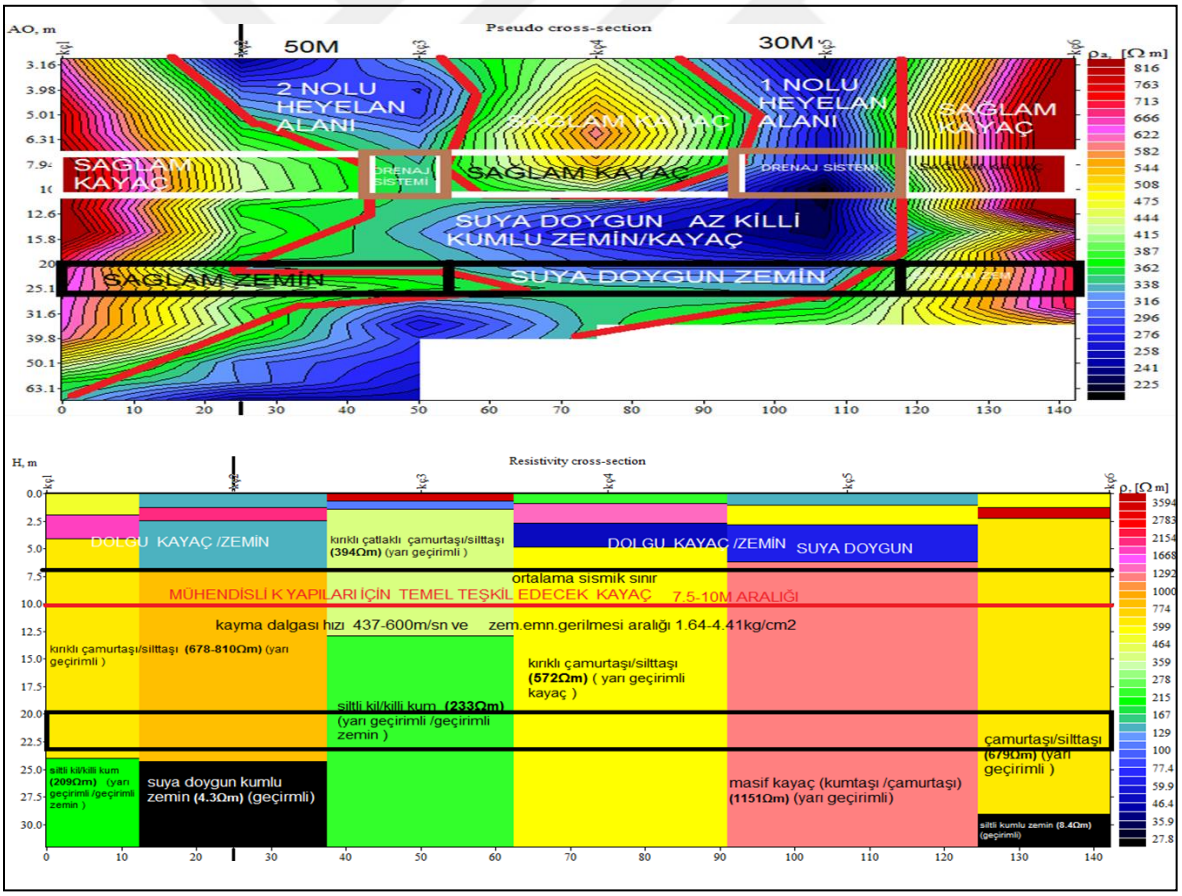


Şekil 4.10. 1 no'lu alan heyelan olmuş bölgeyi, 2 no'lu alan ise bu bölgeyi tutan sağlam kayacı göstermektedir.

Şekil 4.10'da gösterildiği gibi heyelanın yolu daralttığı, tarım arazisine zarar verdiği ve 1 no'lu heyelanın solunda kalan kısımda eski bir heyelanın oluşup zamana bağlı olarak duraylı hale geldiği görülmektedir. Bu heyelanın üstündeki yamaçtan ise yüzey sularının heyelan bölgesine doğru geldiği bu suların yola yakın kısmında akışının dolguyla engellendiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.11'de ise 1 no'lu ve 3 no'lu noktalarda sağlam kayaç olduğu tespit edilmiştir. 2 no'lu noktada ise yukarıdaki tarla yolunda yağmur sularının tahliyesi için geçen derenin drenajını engellendiği ve 4 no'lu noktada da vadiden geçen suların yamacın topuğunu oyduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.11. Heyelan oluşmuş bölgenin google earth görüntüsü.



Şekil 4.12. Zemin profili.

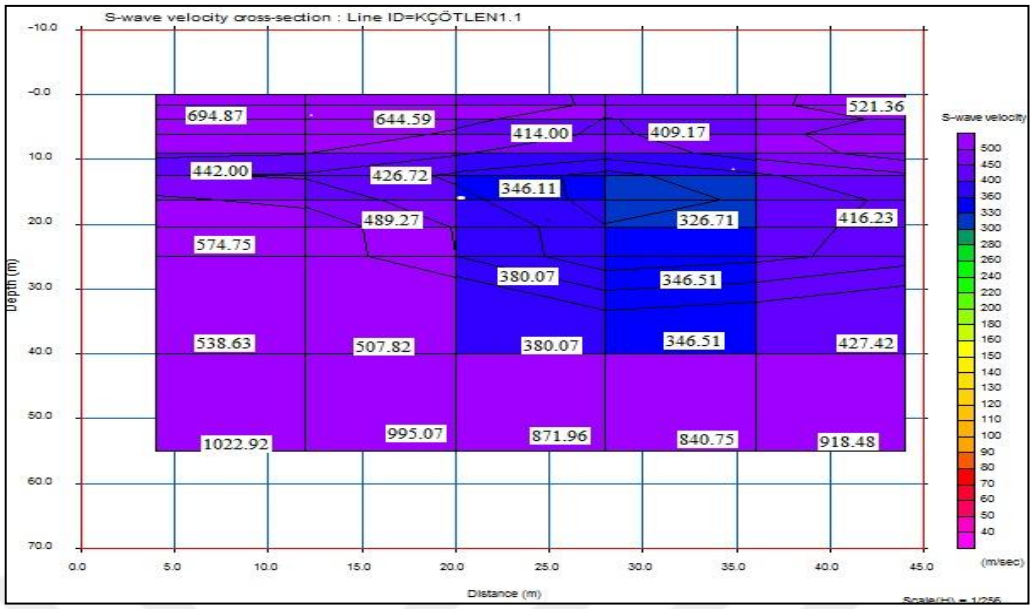
Şekil 4.11'den anlaşılacağı gibi düşey elektrik sondaj yöntemleri ortalamasına göre mühendislik yapılarına temel teşkil edecek derinlik 7.5 metre ile 10 metre aralığında gözlemlenmiştir. 5,91. metreye kadar zemin profili siltli kumlu çakıllı dolgu olarak belirlenerek 1. tabaka olarak adlandırılmıştır. 2. tabaka ise 5,91. metreden 30. metreye kadar çamur taşı birimi olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda heyelan bölgesini ayıran sağlam kayaç olduğu ve heyelanın toplamda 80 metrede oluştuğu gözlenmiştir.

Çalışma alanında; 3 noktada; M1, M2, M3 (Şekil 4.13.), aktif kaynaklı yüzey dalgası yöntemi ile yine yer altı ortamının fiziksel özelliği tespit edilmek istenmiştir, (2013). Masw yöntemi olarak da bilinen bu yöntemle bir nokta kaynaktan geçici olarak yaratılan dalgaların belirli sayıda jeofon tarafından kayıt edilerek ve yüzey dalgaların seçilerek zeminde ki dispersiyon özelliklerinin (makaslama, elastisite, sıkışmazlık modülleri ve poisson oranı gibi) belirlenmesi amaçlanır. Bu yöntem sismik çalışmaların yanında son yıllarda oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır.



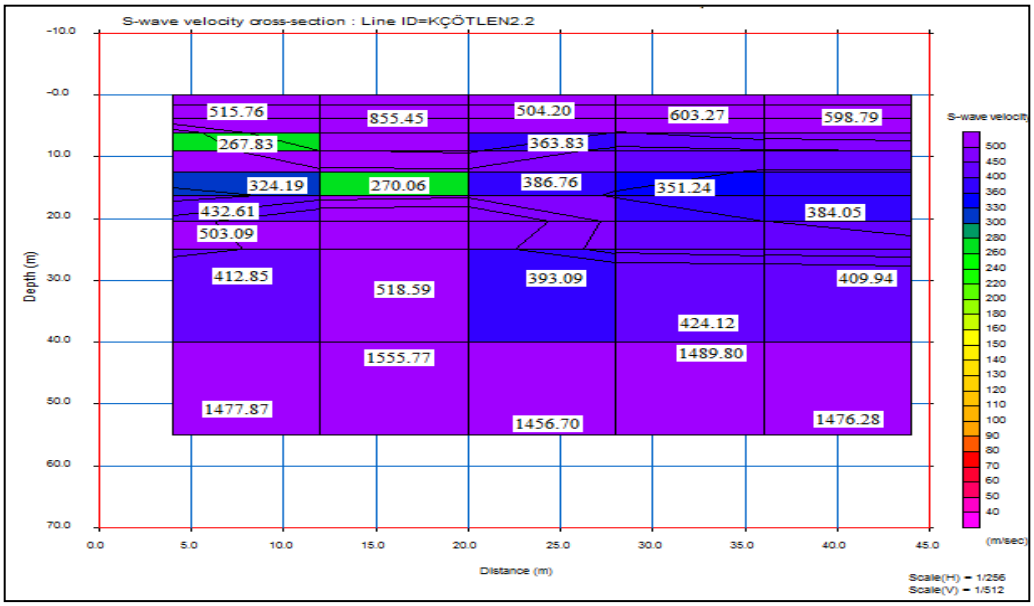
Şekil 4.13. Masw yöntemi, Düşey elektrik sondaj yöntemi ve sismik yöntemleri uygulama noktaları M; Masw yöntemi, D; Düşey elektrik sondaj yöntemi, S; Sismik yöntem.

Yapılan MASW ölçümleriyle 3 noktada alınan veriler ışığında makaslama(kesme-dalga) hızı olan Vs hızının derinlikle ilişkileri belirlenmiştir. Ölçümlerin alındığı bölgede Vs hızı ne kadar yüksekse zemin o kadar masiftir. Şekil 4.14., Şekil 4.15., ve Şekil 4.16'da M1 noktasından M3 noktasına kadar Kesme-dalga hızı(Vs) değerleri kesit olarak verilmiştir, (Düzce İl Özel İdaresi heyelan raporu).

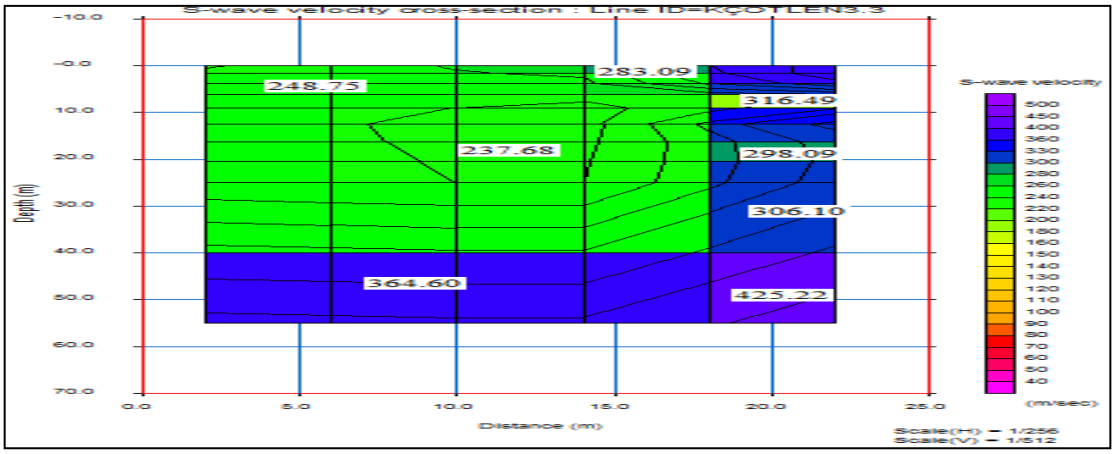


Şekil 4.14. M1 noktasında yapılan kuzey-güney yönlü(yanal) ölçüm sonuçları.

Bu veriler sonucunda yol hattının tamamının heyelana müsait olduğu anlaşılmakta olup M2 ve M3 bölgesinde gözlenen akmaların kayma hızını etkilediği görülmüştür. Şekil 4.15. ve Şekil 4.16'da kayma hızlarının bazı derinliklerde 300 m/sn'nin altına düştüğü gözlenmiştir.



Şekil 4.15. M2 noktasında yapılan kuzey-güney yönlü(yanal) ölçüm sonuçları.



Şekil 4.16. M3 noktasında yapılan kuzey-güney yönlü(yanal) ölçüm sonuçları.

Bir diğer zemin araştırma yöntemi olarak da sismik kırılma yöntemi, Masw yöntemiyle birlikte kullanılmıştır (Düzce İl Özel İdaresi, heyelan raporu). Bu yöntemde 12 adet P ve S atışları için 12 adet P ve S jeofonu kullanılmıştır ve yöntem bize zeminin elastik parametrelerini bulmakta yardımcı olur. Etüt aplikasyonunda Şekil 4.13'te gösterildiği gibi 120 metre açılım yapılarak S1, S2 ve S3 olmak üzere 3 noktada yapılmıştır. Jeofon aralıkları 2 ve 4 metre olarak seçilmiştir. P dalgaları, boyuna dalgalar olarak adlandırılır ve malzemenin sıkışma ve genleşme zorlamasına karşı direnci varsa bu direncin yüksekliğine göre hızlanırlar. S dalgaları ise enine dalgalar olarak adlandırılır ve şekil bozunmaya ve burulmaya karşı direnci varsa oluşur.

Enine ve boyuna dalga hızları ile 30 metre derinlik baz alınarak elde edilen veriler bize zeminin 2 tabakadan oluştuğunu belirtmiştik. 1. Tabaka kalınlığı ortalama 5,91 metre, zemin tipi "killi siltli kumlu çakıl" dolgu malzeme ve Vs1 hızı ortalaması 274 m/sn olarak bulunmuştur, 2. tabaka da ise zemin sınıfı kumtaşı ara tabakalı Çamurtaşı olarak değerlendirilerek Vs2 hızı ortalaması 600 m/sn olarak bulunmuştur. Dalga hızları kullanılarak zeminle ilgili bazı sınıflandırmalar yapılabilir. Çizelge 4.2'de bu sınıflandırmalar verilmiştir.

Çizelge 4.2. Zeminin jeofiziksel özelliklerin belirlenmesi için sınıflandırmalar.

ORTA GÜÇTEKİ ARAÇLAR İÇİN SÖKÜLEBİLİRLİK SINIFLANDIRILMASI (Bailey, 1975)	
P Dalga Hızı (m/sn)	**SÖKÜLEBİLİRLİK**
457-915	KOLAY
915-1372	ORTA DERECE
1372-1829	GÜÇ
AĞIR GÜÇTEKİ ARAÇLAR İÇİN SÖKÜLEBİLİRLİK SINIFLANDIRILMASI (Bailey, 1975)	
P Dalga Hızı (m/sn)	**SÖKÜLEBİLİRLİK**
305-610	ÇOK KOLAY
610-915	KOLAY
915-1525	ORTA DERECE
1525-2135	ZOR
2135-2440	ÇOK ZOR
2440-1743	SON DERECE ZOR
KAZINABİLİRLİK SINIFLANDIRILMASI (Church, 1981)	
P Dalga Hızı (m/sn)	**KAZINABİLİRLİK**
<458	RAHATÇA KAZINABİLİR
458-1220	KOLAY
1220-1525	ORTA-ZOR
1525-1830	ZOR
1830-2135	ÇOK ZOR
>2135	PATLAYICIYLA KAZINABİLİR
Vp/Vs ORANINA GÖRE ZEMİN/KAYA ORTAMLARININ SIKLIĞI (Ercan, 2001)	
Vp/Vs Oranı	**ZEMİN/KAYA SIKLIĞI**
Sonsuz	CIVIK-SIVI
Sonsuz-2.49	ÇOK GEVŞEK
2,49-1,87	GEVŞEK
1,87-1,71	SIKI-KATI
1,71-1,5	KATI
1,5-1,41	SAĞLAM
KOHEZYONLU ZEMİNLERİN Vs HIZLARINA GÖRE SINIFLANDIRILMASI (Özaydın, 1982)	
S Dalga Hızı (m/sn)	**ZEMİN DURUMU**
<200	YUMUŞAK-ORTA KATI
200-300	KATI
300-500	ÇOK KATI
500-750	SERT
KOHEZYONSUZ ZEMİNLERİN Vs HIZLARINA GÖRE SINIFLANDIRILMASI (Özaydın, 1982)	
S Dalga Hızı (m/sn)	**ZEMİN DURUMU**
<300	GEVŞEK
300-600	ORTA SIKI
600-800	SIKI
800-1000	ÇOK SIKI

Çizelge 4.2'den faydalanarak zeminin fiziksek özellikleri ve zemin özellikleri Çizelge 4.3'de gösterilmiştir. Bu çizelge bize zeminin iki tabakasında da heyelanın sağlam

zemin üzerinde bulunan dolgu zeminin kayması şeklinde belirtmek mümkündür. Sismik çalışmalardan bulunan dalga hızlarında yararlanılarak zeminin elastik parametreleri de Çizelge 4.3.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Zeminin fiziksel özellikleri.

Veriler	**1.Tabaka**	**2.Tabaka**
Vp Hızı (m/sn)	589	1810
Vs Hızı (m/sn)	274	600
Poison Oram	0,36	0,44
Elastisite Modülü (kg/cm2)	3762	24486
Maksimum Kayma Modülü	1438	8513
Vp/Vs Oranı	2,1	3
Zemin Özellikleri	**Zemin Durumu (1. Tabaka)**	**Zemin Durumu (2.Tabaka)**
Sökülebilirlik (orta)	KOLAY	GÜÇ
Sökülebilirlik (ağır)	ÇOK KOLAY	ZOR
Kazınabilirlik	KOLAY KAZINABİLİR	ÇOK ZOR KAZINABİLİR
	Zemin Durumu (1.Tabaka)	**Zemin Durumu (2.Tabaka)**
Poisson Oranına Göre	GEVŞEK	ÇOK GEVŞEK
Elastisite Modülüne Göre	ORTA	SAĞLAM
Kayma Modülüne Göre	ORTA	SAĞLAM
Vp /Vs Oranına Göre	GEVŞEK	ÇOK GEVŞEK
Suya Doygunluk Derecesi	KISMEN DOYGUN	SUYA DOYGUN
Vs Hızlarına Göre	**Zemin Durumu (1.Tabaka)**	**Zemin Durumu (2,Tabaka)**
Kohezyonsuz ise	GEVŞEK	SIKI
Kohezyonlu ise	KATI	SERT

4.1.4. Depremsellik

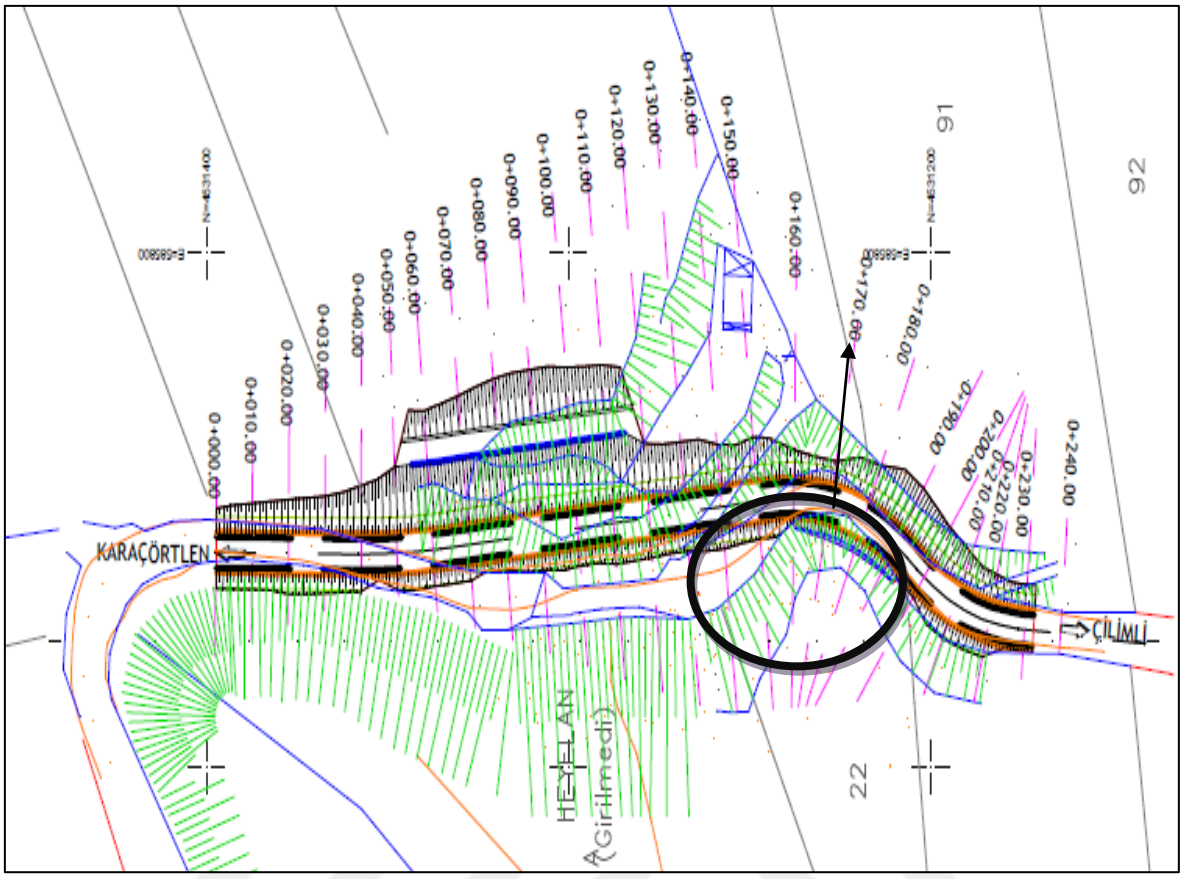
İnceleme alanı Türkiye'de Deprem Bölgesi Haritası'na göre (Şekil 4.17.) 1. Derece deprem bölgesinde olup Kuzey Anadolu Fay hattının yaklaşık 30 km güneyinde yer almaktadır. Şu ana kadar oluşmuş deprem merkezinde yer almaması nedeniyle heyelan alanında depremden dolayı duraysızlık oluşumlarının fazlaca etkisi bulunmamaktadır. Ancak inceleme alanının yakın çevresinde oluşabilecek büyük yer sarsıntılarında yamaçta kütle hareketleri olabileceği açıkça belirtilmelidir. Bölge 1. Dereceden deprem bölgesi olduğundan şev stabilitesi analizlerinde kullanılacak etkin yer ivme katsayısı A0= 0,4 ve yatay deprem katsayısı, kh=0,2 alınmalıdır (Karayolları Genel Müdürlüğü, Yatay Deprem Katsayıları, 2005).



Şekil 4.17. Düzce İli Deprem Bölgeleri Haritası

4.2. Yöntem

Çalışma alanının iyileştirilmesi ve yol güzergahının genişletilmesi amacıyla şev stabilite analizleri yapılmıştır. Bu analizler heyelan bölgesinde akan yerlerin ortasına yakın yerden geçen (km: 0+170.000) dikkate alınarak yapılmıştır. Bu kesitin geçtiği noktayı gösteren vaziyet planı (plankote) Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Heyelan bölgesinin plankotesi.

Çalışma alanında kilometre olarak 0+050.000'dan başlayarak 0+110.000'a kadar ve 0+130.000'dan 0+190'a kadar akmalar gözlenmiş olup arada 20 metrelik kısımda akmanın gerçekleşmediği gözlenmiştir.

Çalışma alanının mevcut durumunun stabilitesi ve iyileştirme sonrası stabilite tahkiklerinde Geo5 programı kullanılmıştır. Bu programda 3. Bölümde bahsedilen analiz yöntemlerinden limit denge esaslı yöntem ve sonlu elemanlar yöntemleri ile geogrid donatılı duvar uygulamasının analizleri yapılacak olup yöntemler arasındaki farklılıklar irdelenecektir. Analizlerde kullanılacak parametreler; Düzce İl Özel İdaresince yaptırılan projeden alınan parametreler kullanılmıştır. Bu parametreler sırasıyla; birim hacim ağırlık, kohezyon ve içsel sürtünme açısı, doygun birim hacim ağırlık ve elastisite modülü olarak verilmiş olup Çizelge 4.4'de gösterilmiş ve arazi çalışmalarından çıkan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Killi dolgu malzemesinin geoteknik parametreleri raporla ilişkilendirilmiş olup, ayrışmış çamurtaşı-silttaşı ve masif kaya olan çamurtaşı-silttaşı parametrelerinden kohezyon ve içsel sürtünme parametresi, kayma hızları bilgilerine göre yüksek tutulmuştur.

Çizelge 4.4. Analizlerde kullanılan parametreler.

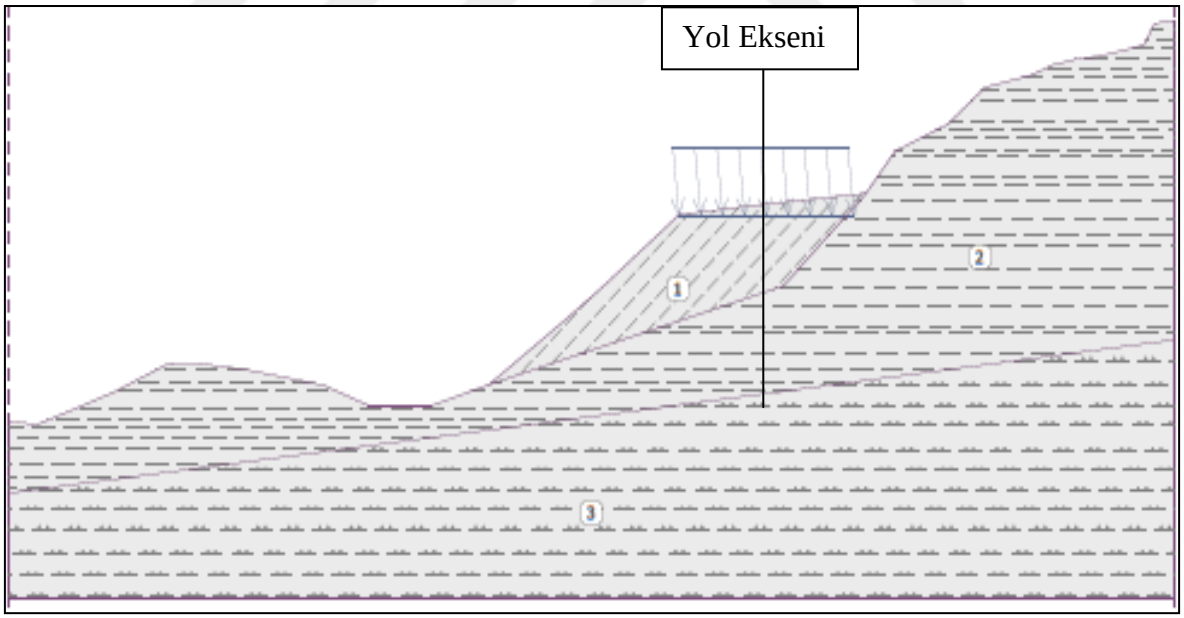
Malzeme Adı	ɣ birim hacim ağırlık(kN/m3)	C kohezyon (kPa)	φ içssel sürtünme açısı (°)	ɣ doygun birim hacim ağırlık(kN/m3)	E Elastisite Modulü (MPa)
Killi Dolgu Malzeme	19	4	25	20	5
Geri Dolgu malzemesi	22	5	35	23	15
Ayrışmış Çamurtaşı-Silttaşı	22	100	25	23	20
Çamutaşı-Silttaşı	22	300	28	23	30
Geogrid Donatılı Duvar	25	90	45	23	35

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez kapsamında Düzce İli Çilimli İlçesi Karaçörtlen Köyünde meydana gelen heyelanın şev stabilite yöntemlerinden limit denge yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak, Geo5 programı ile stabilizasyonu yapılmıştır. Bu programda kullanılan kesit, yolun en daralmış noktası olan 0+170,00 kesitidir.

5.1. Limit Denge Yöntemi Kullanılarak Analizin Yapılması

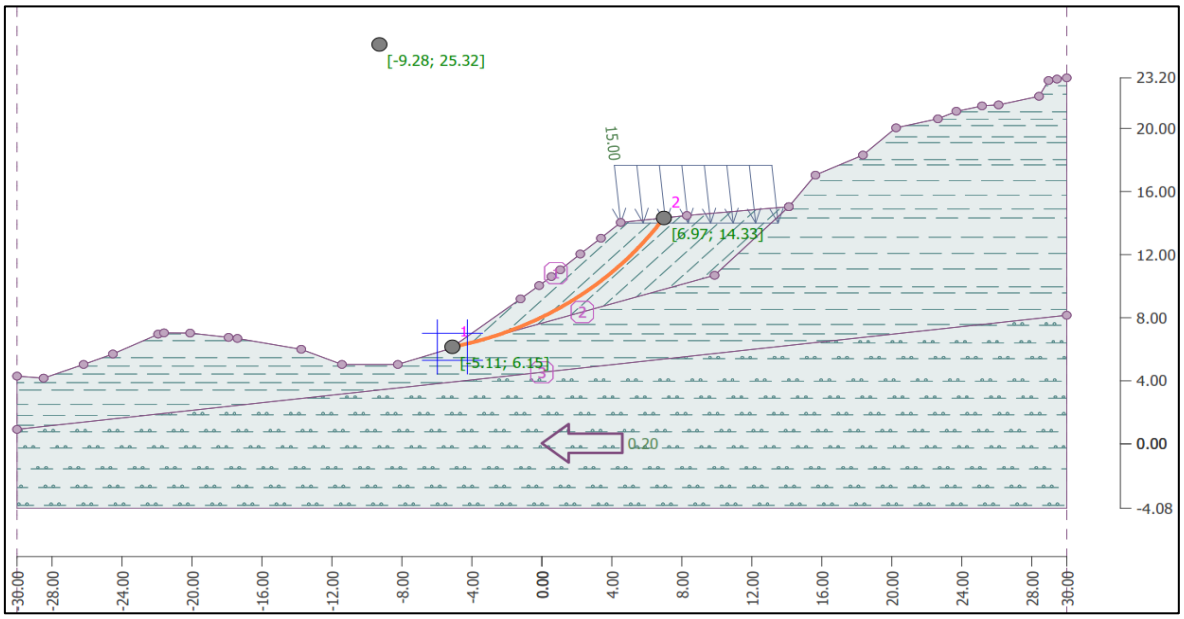
Öncelikle Geo5 programına; bu kesitin koordinatları (x ve z noktaları) girilmiştir ve kesitin derinlikle değişen üç ayrı zemin özelliklerinin veri girişleri sağlanmıştır (1 nolu alan; killi dolgu malzeme, 2 nolu alan; ayrışmış silttaşı-kumtaşı, 3 nolu alan ise silttaşı-kumtaşı). Analize başlamadan önce yol genişliği boyunca araç geçişleri olduğundan 15 kN/m2 sürşarj yükü tanımlanmıştır (Şekil 5.1.)



Şekil 5.1. 0+170 kesitinde analiz öncesi yapılan çalışma.

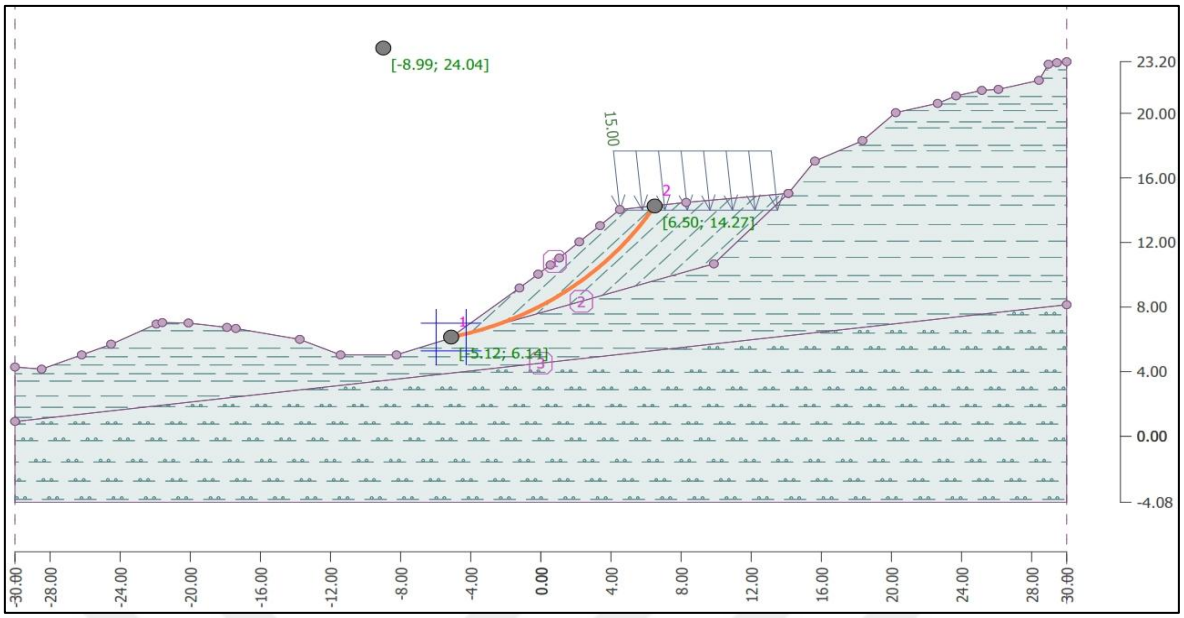
Programda kullanılan zemin profillerinin geoteknik parametreleri; 4. Bölümde verilmiştir. Bu parametrelerle birlikte heyelan bölgesi 1. derece deprem bölgesi olduğundan yatay deprem katsayısı kh; 0,2 olarak alınmış olup (yer altı suyu seviyesi de

yol kotundan 12 metre derinde olduğu için suyun etkisi göz önüne alınmamıştır) Morgenstern-Price yöntemi seçilerek kayma dairesinin yeri ve güvenlik sayısının bulunması için şev stabilite tahkiki yapılmıştır. Yapılan analiz ile güvenlik sayısı depremli durumda; 0,68 olarak bulunmuş olup bu değerin çok küçük (1'den küçük yani sınır değerden küçük) olduğu görülmüştür ve Şekil 5.2'de gösterildiği gibi kayma yüzeyinin killi dolgu malzeme üzerinde olduğu görülmüştür.



Şekil 5.2. 0+0170,00 kesitine uygulanan depremli stabilite analizi.

Aynı kesite yine deprem kuvveti uygulanmayarak yapılan stabilite tahkiki ile güvenlik sayısı 0,93 olarak bulunmuştur ve kayma yüzeyinin depremli durumla hemen hemen aynı noktada olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.3.).

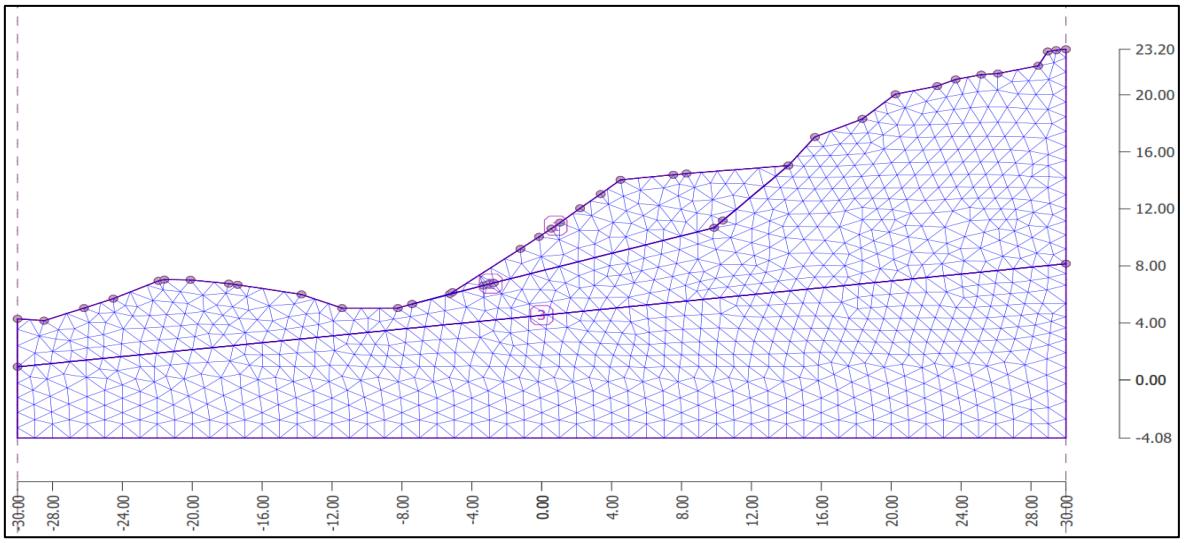


Şekil 5.3. Deprem kuvveti dikkate alınmadan yapılan stabilite analizi.

5.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Analizin Yapılması

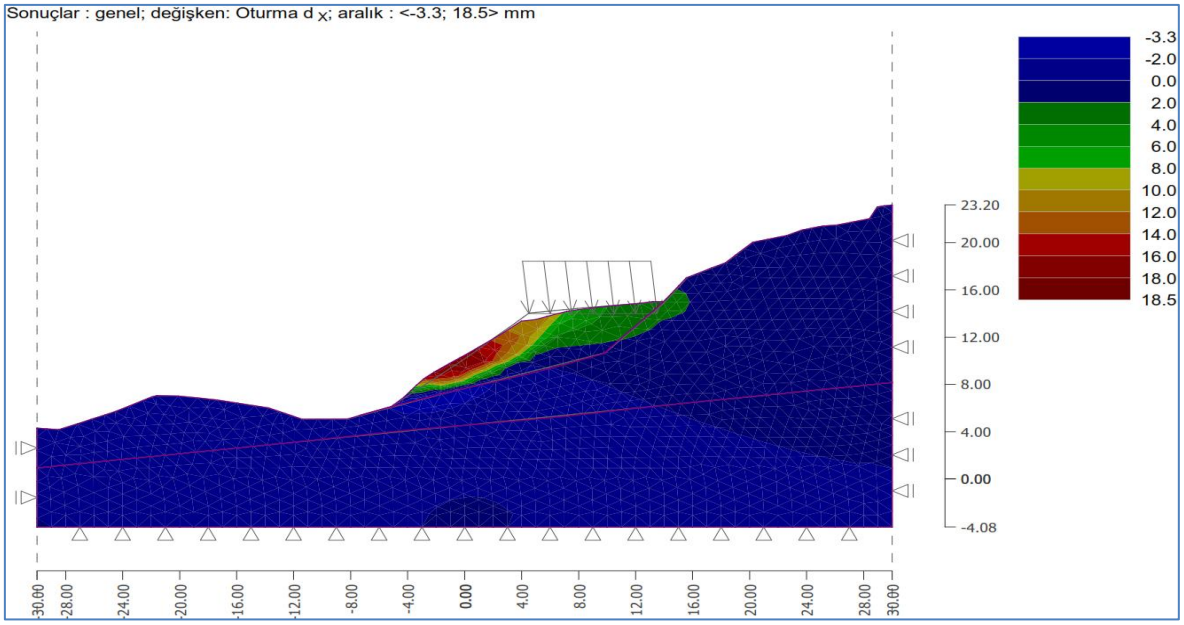
Sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılacak çalışma alanının gerilme ve şekil değiştirmelerini yarı elastik bir yaklaşımla hesaplamaktadır. Geosentetiklerin inşası sonrasında deformasyonlar ve şekil değiştirmeler oluşacağı için lineer olmayan bir zemin modeli kullanılması daha doğru olacaktır. Bu kapsamda Limit denge yönteminin uygulandığı kesite, sonlu elemanlar yöntemi (Mohr-Coulomb ölçütleri) de uygulanarak, kesitin düzlemsel gerilmeleri ve deformasyonları hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır.

Öncelikle Morgenstern-Price yönteminde kullanılan 0+170,00 kesitinin zemin özellikleri bire bir tanımlanmıştır, yine 15 kN/m^2 sürşarj yükü uygulanmıştır. Analizin ilk aşamasında tanımlanan bu parametrelerden sonra gerilme yani sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan bu ağlar zeminin birçok noktasında gerilme dağılımlarını hesapladığı için zeminle ilgili daha gerçekçi bilgi edinilir. 5407 düğüm ve 3079 eleman sayıları başarıyla oluşturulmuştur. Şekil 5.4'de sonlu elemanlar ağı gösterilmiştir.



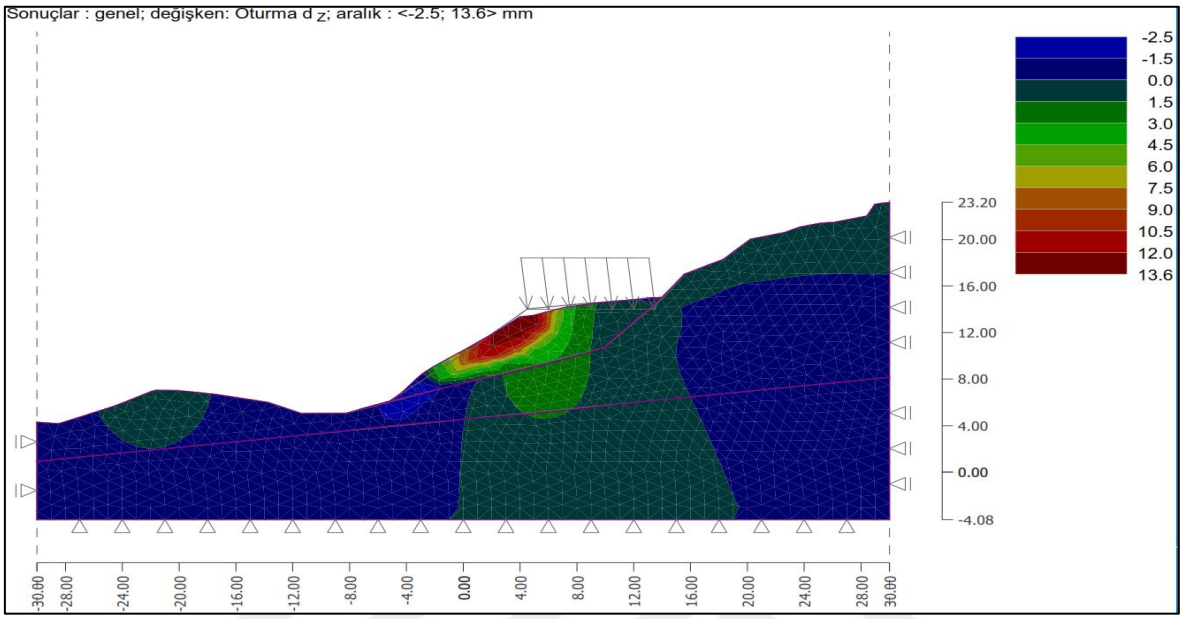
Şekil 5.4. Kesitte oluşturulan sonlu elemanlar ağı ve düğüm noktaları.

Yapılan analiz sonuçlarına göre yine killi dolgu malzemenin bulunduğu kısımda deformasyonların olduğu gözlenmiş olup güvenlik sayısı 0,90 bulunmuştur. Şevin stabil durumda olmadığı gözlenmiş ve gerilme değeri bulunamamıştır. Zamana bağlı olarak bu dolgu malzemesinin oturduğu ve kaydığı gözlenmiştir. Şekil 5.5'de yapılan analiz sonucuna göre yanal yönde ilk aşamada oluşabilecek deformasyon gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analiz sonucu yanal yönde gözlenen deformasyon.

Zamanla oluşacak deformasyonlara bakacak olursak eğer yol güzergahında bulunan dolgu zeminin deplasman değerlerinin yüksek olduğunu görebiliriz. Şekil 5.6'da zaman geçtikçe oluşabilecek deformasyon gösterimi sunulmuştur.

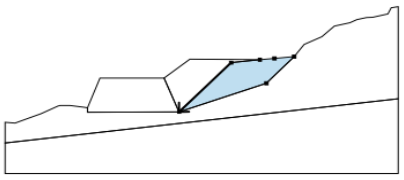
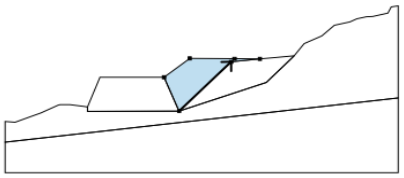
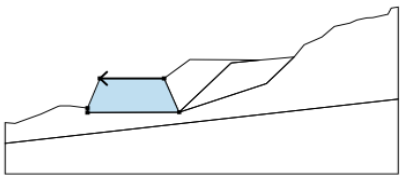
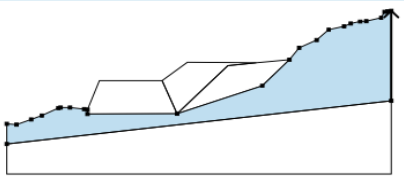
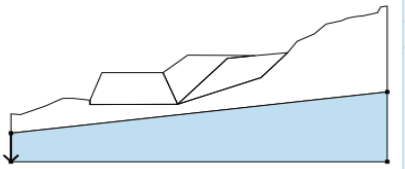


Şekil 5.6. Zamana bağlı olarak oluşabilecek deformasyon gösterimi.

5.3. Destek Sistemi Tasarım Analizleri

Heyelan olmuş alanın 0+170,00 kesitinde hareketi engellemek amacıyla önce rijit cisim ve sonra geogrid duvar sağlam kayaya temellendirilerek teşkil edilmeye çalışılmıştır. Geogrid duvar ve rijit cisim ile birlikte yol platformunun genişletilme çalışmaları yapılmak istenmiştir. Programa öncelikle rijit bir cisim tanımlanmış ve analizleri yapılmış sonrasında ise geogridli donatılı duvar tanımlamaları yapılarak yine analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda kesite c (kohezyon) değeri 25 kPa olan rijit cisim tanımlanmıştır.

Geo5 programıyla birlikte çalışılan kesitte geogrid duvar özelliklerini kapsayan rijit bir cisim tanımlanarak ve geri dolgu ara yüzleri de oluşturularak limit denge ve sonlu elemanlar yöntemleriyle stabilite analizleri yapılmıştır. Şekil 5.7'de ara yüzlerin hangi bölgede olduğu gösterilmiştir.

Sayı	Yüzey konumu	Yüzey noktaları koordinatları [m] x	z	x	z	Atanan zemin
1		4.51	14.05	-3.43	6.00	Killi dolgu
		9.87	10.68	14.12	15.04	
		11.12	14.75	8.89	14.53	
2		-3.43	6.00	4.51	14.05	Geri dolgu
		8.89	14.53	5.01	14.56	
		-1.82	14.61	-5.75	11.52	
3		-5.75	11.52	-15.52	11.52	Rijit cisim No. 1
		-17.41	6.68	-17.41	5.95	
		-3.43	6.00			
4		30.00	8.15	30.00	23.20	Ayrışmış çamurtaşı silttaşı
		29.44	23.13	28.96	23.04	
		28.42	22.04	26.10	21.49	
		25.16	21.42	23.69	21.08	
		22.63	20.61	20.24	20.04	
		18.35	18.31	15.63	17.04	
		14.12	15.04	9.87	10.68	
		-3.43	6.00	-17.41	5.95	
		-17.41	6.68	-17.91	6.75	
		-20.11	7.02	-21.60	7.04	
		-21.93	6.95	-24.52	5.70	
		-26.20	5.04	-28.48	4.16	
		-30.00	4.29	-30.00	0.92	
5		-30.00	0.92	-30.00	-4.08	Çamurtaşı silttaşı
		30.00	-4.08	30.00	8.15	

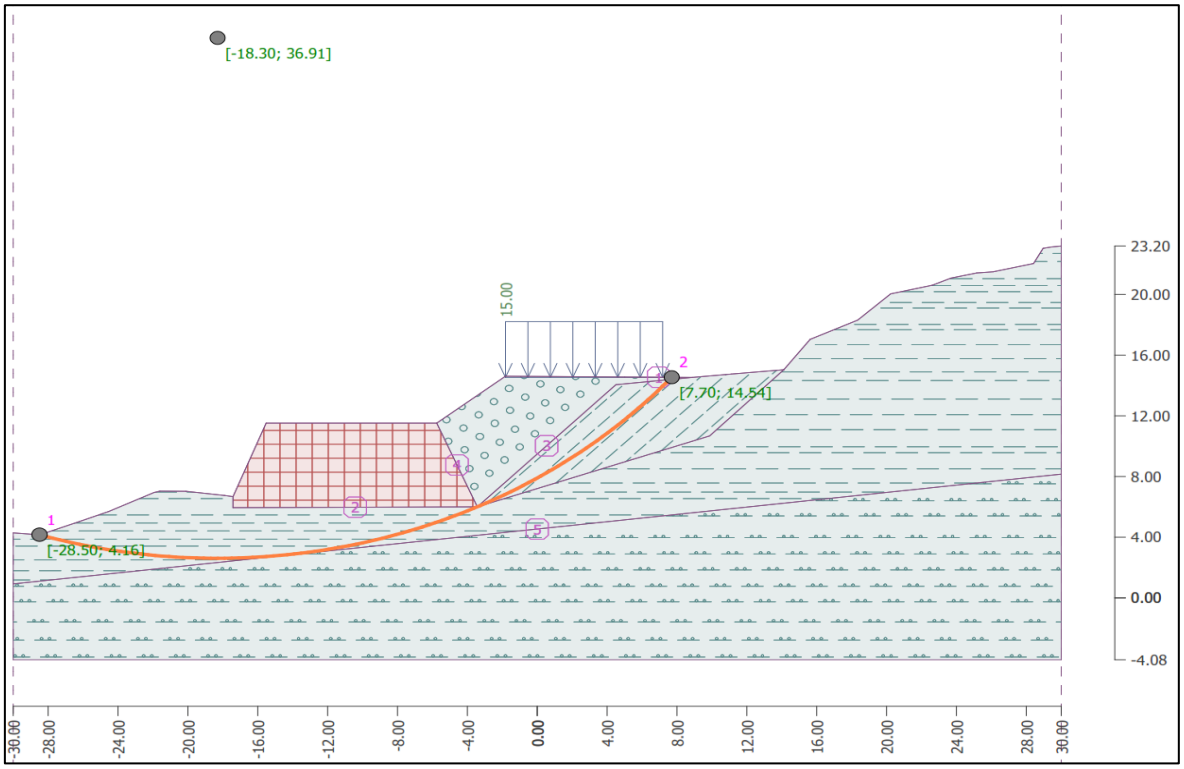
Şekil 5.7. Programda kullanılan ara yüzlerin konumu.

5.3.1. Limit denge yöntemi kullanılarak tanımlanan rijit cisme göre analizlerin yapılması

Limit denge yöntemi çeşitlerinden Morgenstern-Price yöntemi ile tasarıma teşkil edilen rijit cismin hareketi engellemesine ve şevin güçlendirilmiş olmasına yönelik analizler yapılmıştır. Analiz çalışmaları kayma dairesinin yerine göre; depremli, depremsiz, tüm topoğrafya ve sadece geri dolgu malzemesine yönelik yapılarak sistemin duraylılığı test edilmiştir.

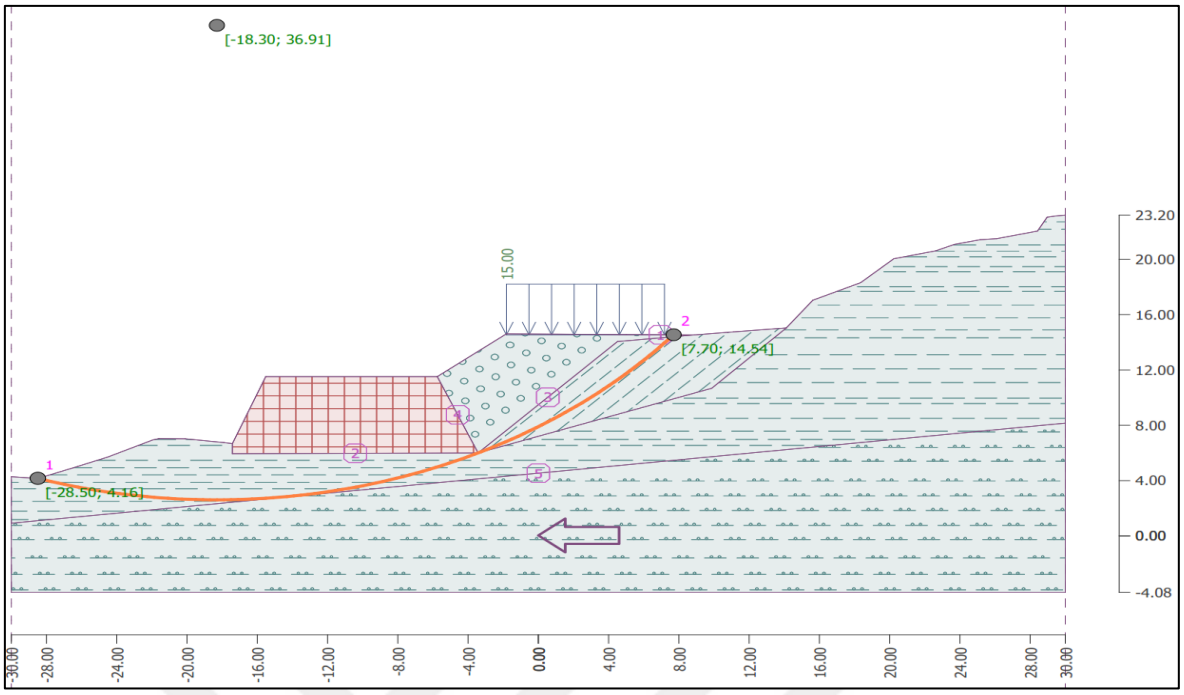
İlk olarak yatay deprem kuvveti uygulanmamış olup kayma dairesi geniş tutularak

sistemin tümünün stabilitesine bakılmıştır. Yol hattı boyunca sürşarj yükü ($15kN/m^2$) uygulanmıştır. Şekil 5.8'de gösterildiği gibi kayma dairesi killi dolgu malzemesi üzerinden geçmekte olduğu gözlenmiştir ve güvenlik sayısı 3,98 gibi büyük bir değer bulunmuştur. Bu değer bize; teşkil edilen rijit cismin hareketi engellediği ve şevin stabilitesinin uygun olduğunu göstermektedir.



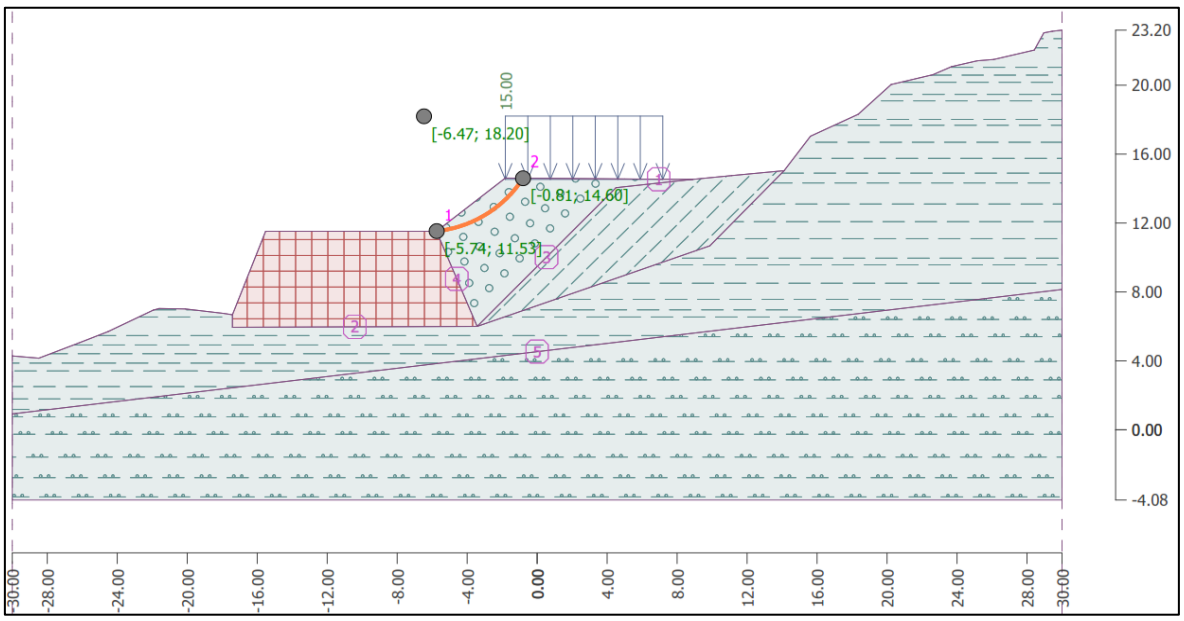
Şekil 5.8. Rijit cisimli şevin depremsiz duruma göre stabilite analizi.

Yatay deprem kuvveti uygulayarak ve yine kayma dairesi geniş tutulursa güvenlik sayısı 2,42 olarak bulunmuştur ve bu da bize Şekil 5.9'da gösterildiği gibi rijit cisimli şevin stabilitesinin uygun olduğunu gösterir.



Şekil 5.9. Rijit cisimli şevin depremli duruma göre stabilite analizi.

Bunlarla birlikte rijit cisim ile heyelanlı bölgeye teşkil edilecek geri dolgunun şevin duraylılığını sağlayıp sağlayamayacağının tespiti için kayma dairesi (Şekil 5.10.) geri dolgunun üzerinde olursa güvenlik sayısı yatay deprem kuvveti olmadan 1,62 olarak bulunmuştur ve şevin yamaca bakan kısmı, donatılı durumda stabil olduğu gözlenmiştir.

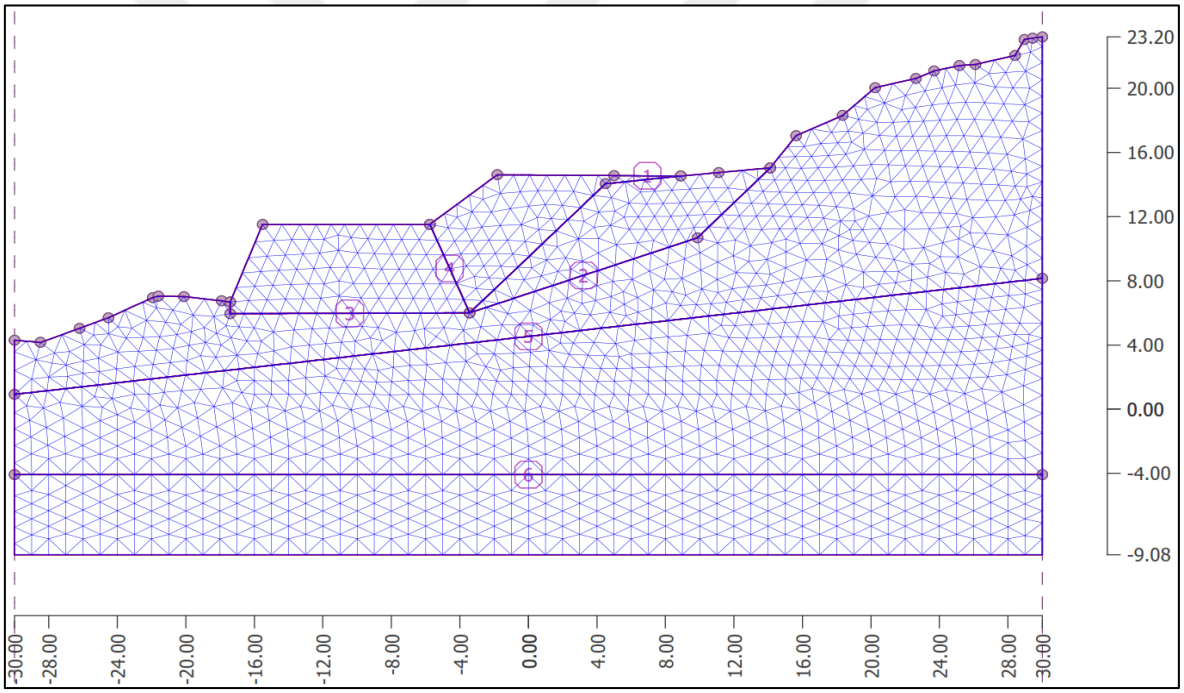


Şekil 5.10. Geri dolguda oluşan kayma yüzeyinin depremsiz duruma göre stabilite analizi.

Yine yolun yamaca bakan kısmında geri dolguda oluşabilecek kayma dairesinin yatay deprem kuvveti de uygulanarak stabilite analizi yapılmıştır. Şevin tanımlanan rijit cisimli durumda güvenlik sayısı 1,18 olarak bulunmuştur.

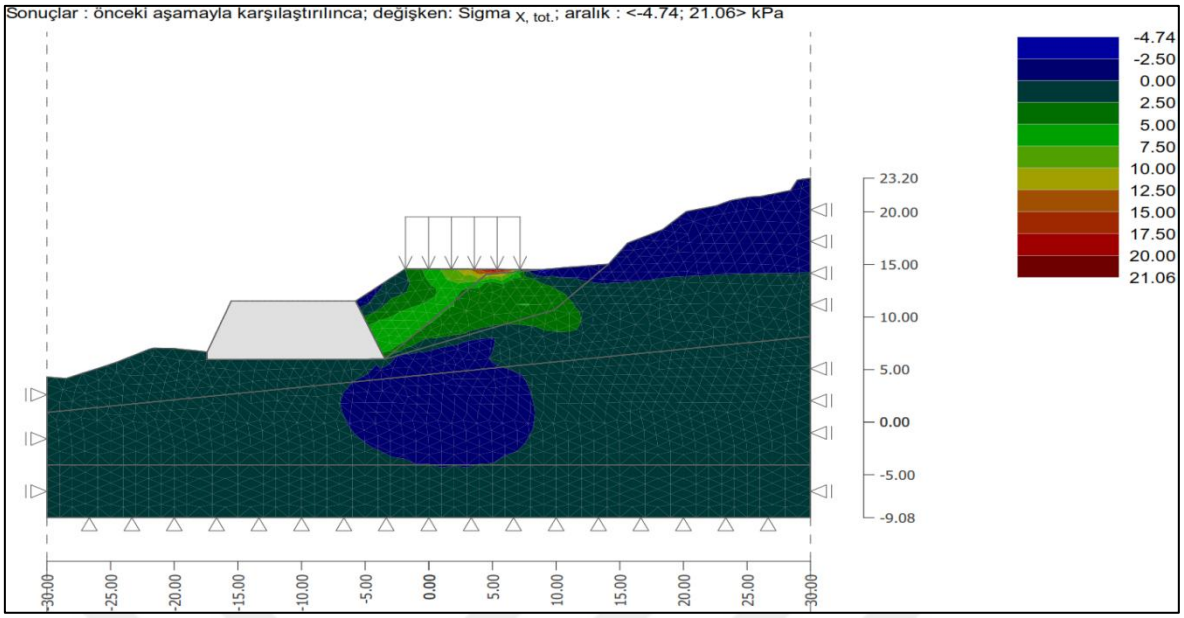
5.3.2. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tanımlanan rijit cisme göre analizlerin yapılması

Öncelikle sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak rijit bir cismin Mohr-Coulomb modeliyle düzlemsel gerilme değerlerine bakılmıştır. Tanımlanan rijit cisimli şevin önce sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Toplamda 7442 düğüm sayısı ve 4295 eleman sayısı gözlemlenmiştir. Şekil 5.11'da sonlu elemanlar ağı gösterilmiştir.



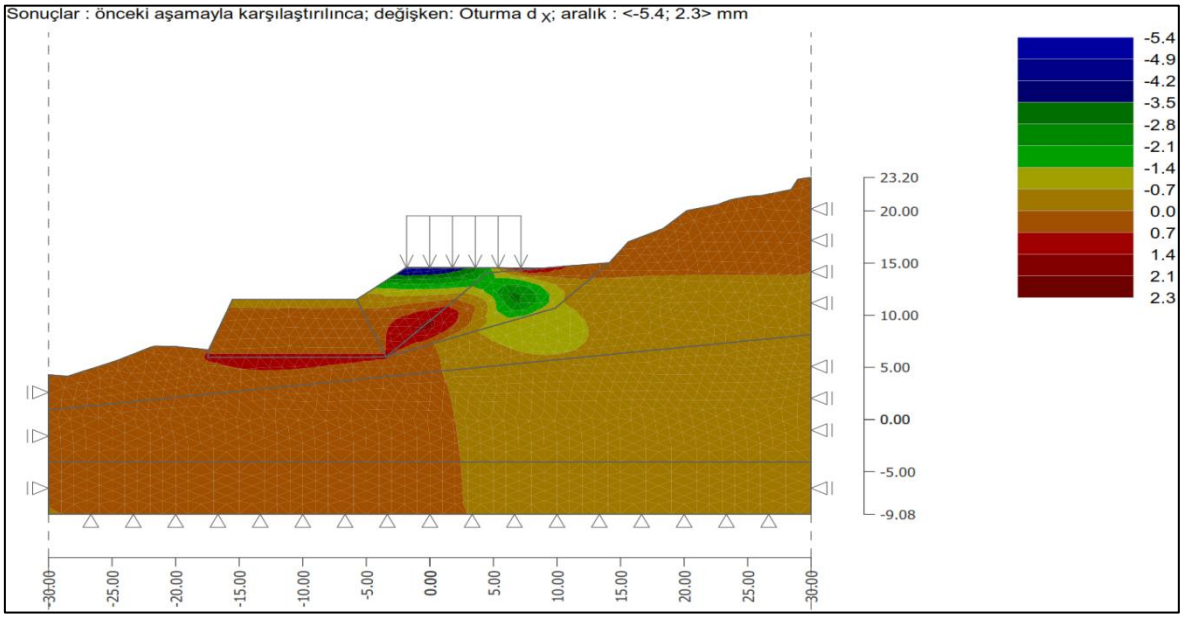
Şekil 5.11. Rijit bir cisim ile şevde oluşturulan sonlu elemanlar ağı.

Bu ağlar oluşturulduktan sonra ikinci aşama da yol platformuna sürşarj yükü de uygulanarak gerilme analizi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına bakıldığında ise yatay yönde gerilmenin 21 kPa olduğu tespit edilmiştir. Güçlendirilmemiş şevde gerilme değeri bulunamadığı göz önüne alınırsa donatılı şevin uygun olacağı düşünülmüştür. Şekil 5.12'de donatılı şevde sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan gerilme analizi gösterilmiştir.

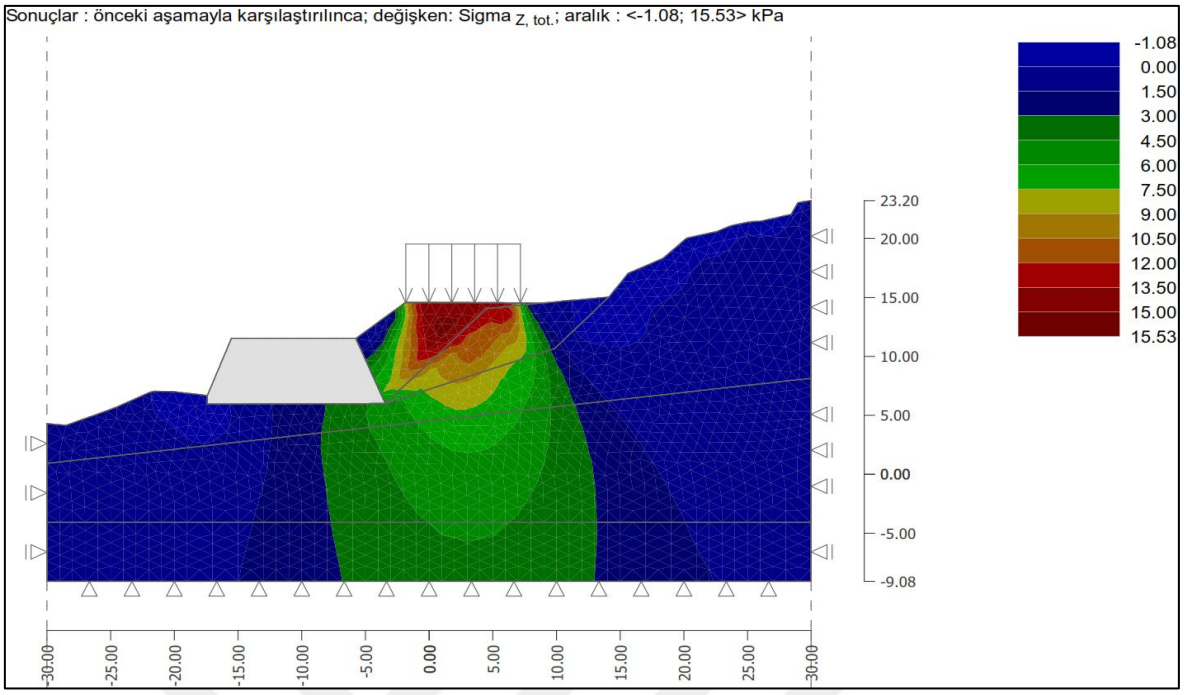


Şekil 5.12. Rijit cisimli şevde sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analiz.

Aanaliz sonuçlarına göre düşey ve yatay yönde oturma(deplasman) değerleri de göz önüne alınırsa düşey yönde oluşabilecek maksimum deplasman değeri 1,84 cm ve yatay yönde ise 1cm'in altında olduğu gözlenmiştir. Şekil 5.13'de donatılı şevde yatay yönde, Şekil 5.14'de ise düşey yönde oluşabilecek deplasman değerleri gösterilmiştir.

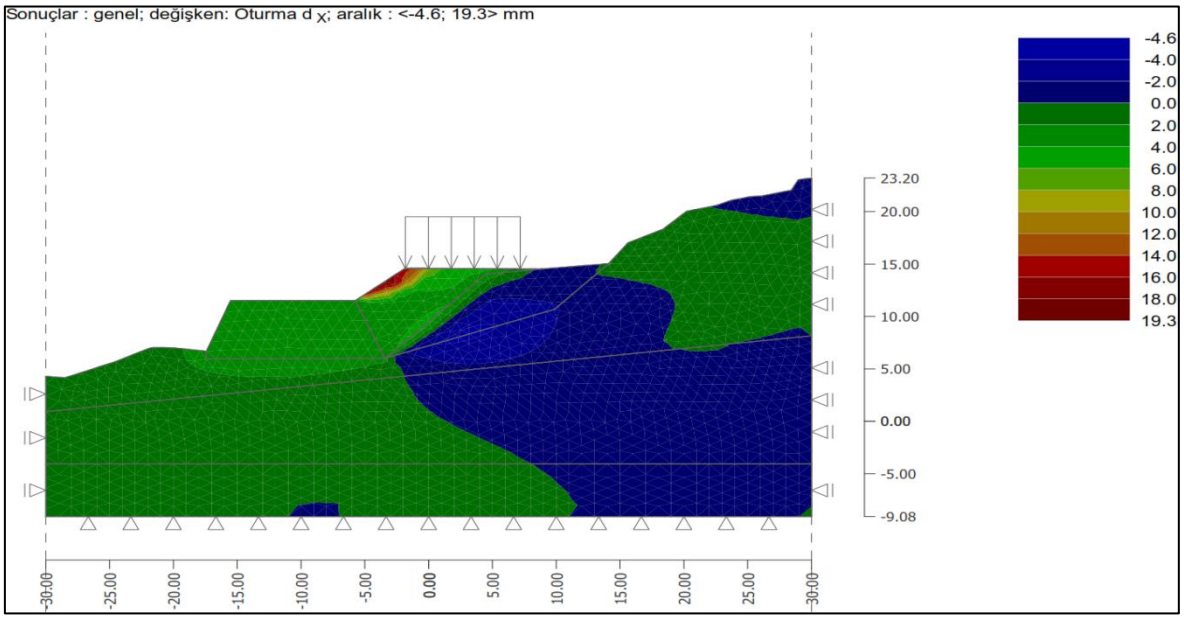


Şekil 5.13. Rijit cisimli şevde yatay yönde oluşabilecek deplasman değerleri.

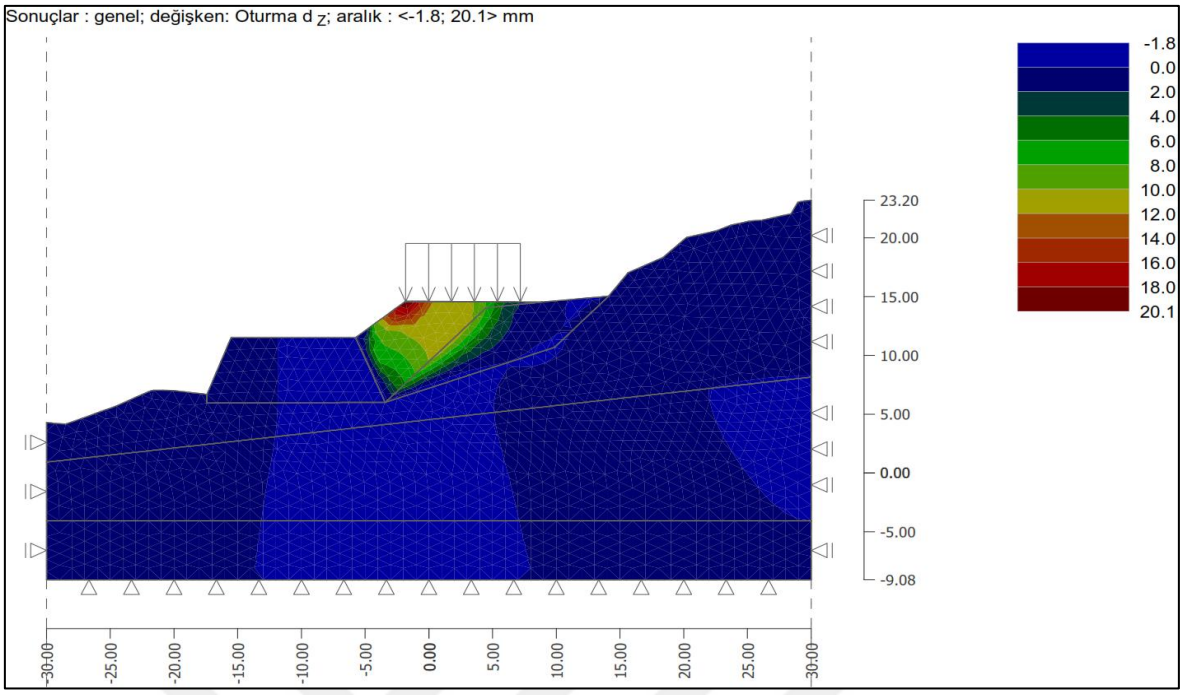


Şekil 5.14. Rijit cisimli şevde düşey yönde oluşabilecek deplasman değerleri.

Donatılı şevin sonlu elemanlar yöntemiyle stabilitesi de yapılmış olup güvenlik sayısı en düşük 1,69 olarak bulunmuştur. Yatay yönde en yüksek deplasman 1,93 cm olarak bulunmuşken (Şekil 5.15.) düşey yönde 2,01 cm (Şekil 5.16.) olarak bulunmuştur.



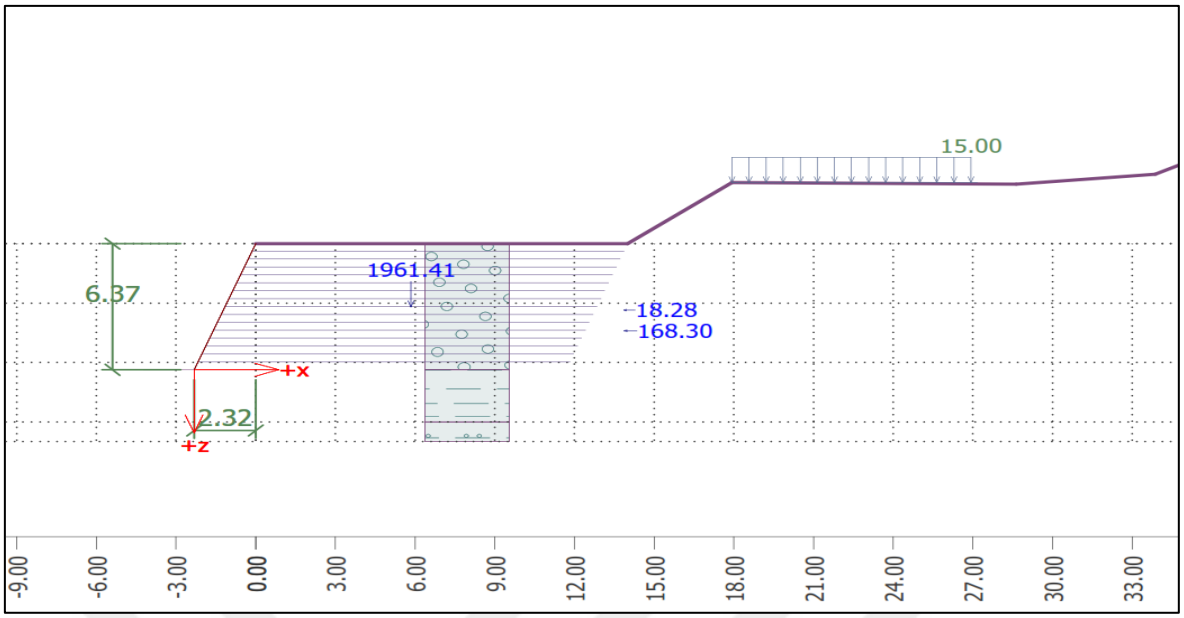
Şekil 5.15. Rijit cisimli şevde stabilite yöntemi kullanılarak yatay yönde oluşabilecek deplasman değerleri.



Şekil 5.16. Rijit cisimli şevde stabilite yöntemi kullanılarak düşey yönde oluşabilecek deplasman değerleri.

5.3.3. Geogrid donatıların tanımlanması ve geogrid donatılı duvarın tahkiki

Çalışma alanına uygulanabilecek donatı uzunlukları ve donatı sayıları Geo5 programına tanımlanarak bu duvarın iç stabilitesinin tahkiki yapılmak istenmiştir. Sürşarj yükü yine arazi üzerine tanımlanmıştır. Donatılar; farklı çekme dayanımı değerlerine göre ve derinliğe bağlı olarak 3 çeşit olarak değerlendirilmiştir. Geogridlerin uzun dönem çekme dayanımları derinden yüzeye çıktıkça; 80, 55 ve 35 kN/m2 değerleridir. Bu kapsamda Şekil 5.17'de gösterilen 0+0170,00 kesitinde donatıların yüksekliği ve genişliği görülmektedir. Donatılar kesite; 40 cm arayla toplamda 6,37 metre yükseklik ve 14 metre genişlik verilerek tanımlanmıştır. Donatılı duvarla verilen eğim %71 olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.17. Geogrid donatılı duvarın analizi.

Yapılan tahkikler sonucunda geogrid donatılı duvarın temel zemini taşıma kapasitesi, devrilmeye ve kaymaya karşı koyucu kuvvetlerinin aynı zamanda geogrid donatıların kendi içinde çekme dayanımlarının yeterli olduğu görülmüştür. Çizelge 5.16'da duvarın tahkiki sonucu çıkan güvenlik sayı değerleri verilmiştir.

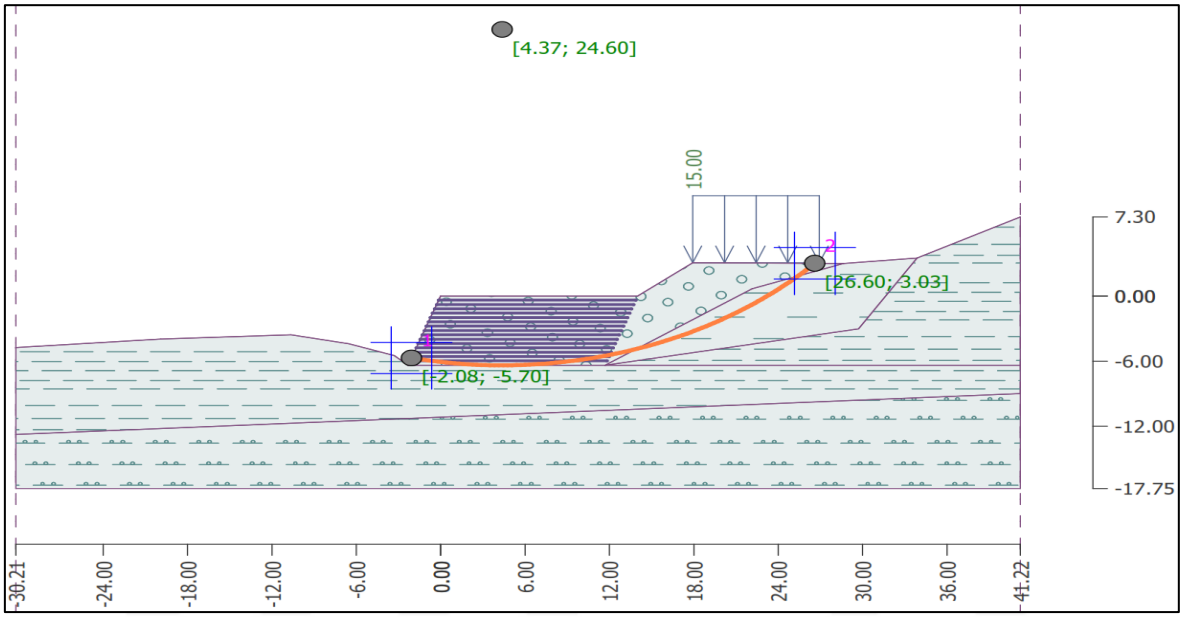
Çizelge 5.1. Geogridli duvarın tahkiki sonucunda çıkan güvenlik sayıları

	Güvenlik Sayıları
Duvarın Devrilme Dayanımı	41,27
Duvarın Kayma Dayanımı	7,74
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi	2,14
Donatı Çekme Dayanımı	4,69

5.3.4. Limit denge yöntemi kullanılarak tanımlanan geogrid donatılı duvara göre analizlerin yapılması

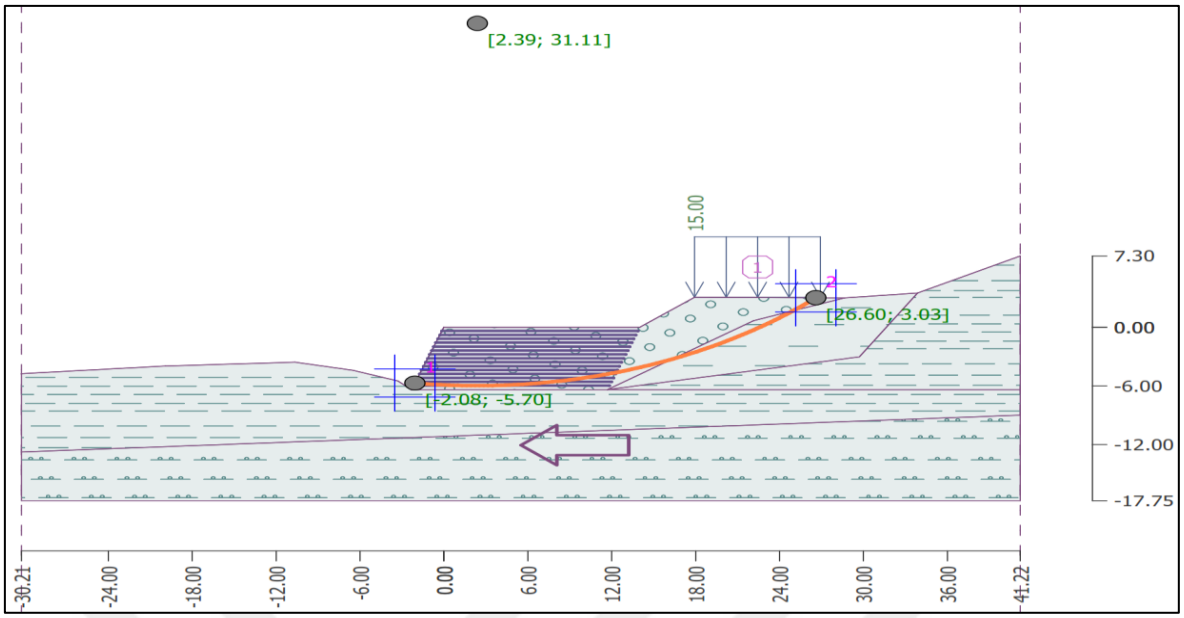
Limit denge yöntemi çeşitlerinden Morgenstern-Price yöntemi ile bu aşamada tasarıma teşkil edilen geogridli duvarın hareketi engellemesine ve şevin güçlendirilmiş olmasına yönelik analizleri yapılmıştır. Analiz çalışmaları kayma dairesinin yerine göre; depremli, depremsiz, tüm topoğrafya(global) ve sadece geri dolgu(yerel) alanlara yönelik yapılarak sistemin duraylılığı test edilmiştir.

İlk olarak yatay deprem kuvveti uygulanmayarak ve kayma dairesi çapı geniş tutularak (global) stabilite analizi yapılmış ve güvenlik sayısına bakılmıştır. Bu analiz sonucunda güvenlik sayısı 3,30 olarak bulunmuştur. Şekil 5.18'da bu analiz sonucunda ortaya çıkan kayma dairesinin yeri gösterilmiştir. Kayma dairesinin yine dolgu malzemesini kestiği görülmüştür.



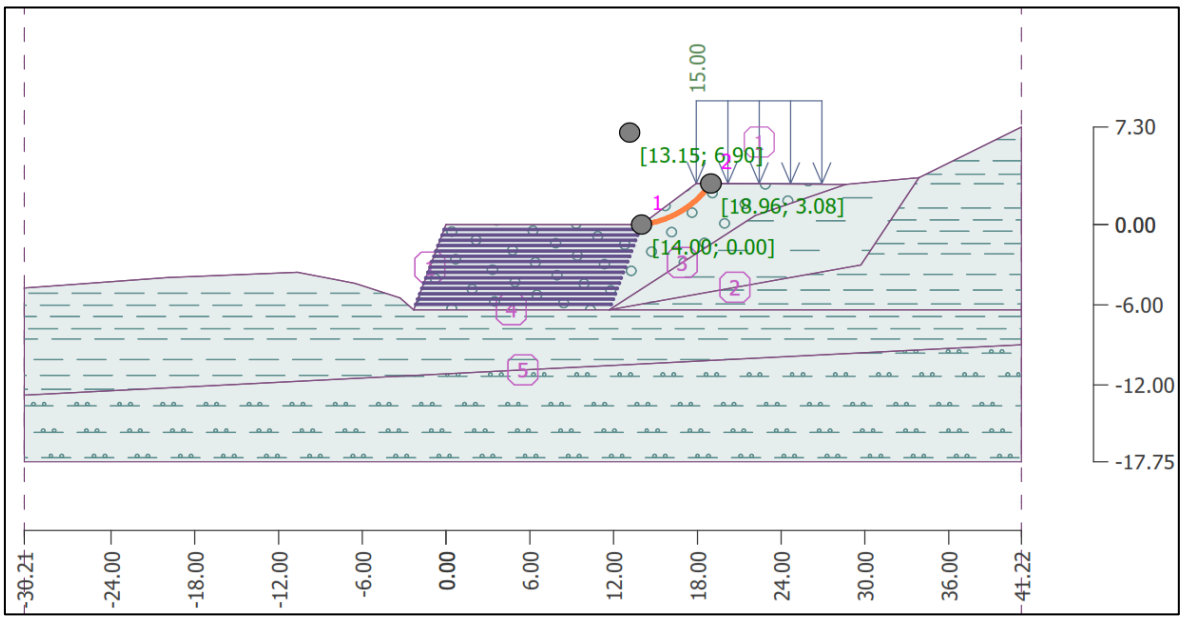
Şekil 5.18. Geogrid donatılı duvar ile limit denge esaslı stabilite analizi.

Sonraki aşamada ise depremli duruma bakılmıştır ve güvenlik sayısı 1,80 olarak bulunmuştur. Kayma dairesi yine geniş alanda sınırlandırılmıştır ve dairenin biraz daha şevin yamaca bakan kısmında geri dolgu malzemesini kestiği görülmüştür. Şekil 5.19'da bu analizde oluşan kayma dairesi gösterilmektedir.

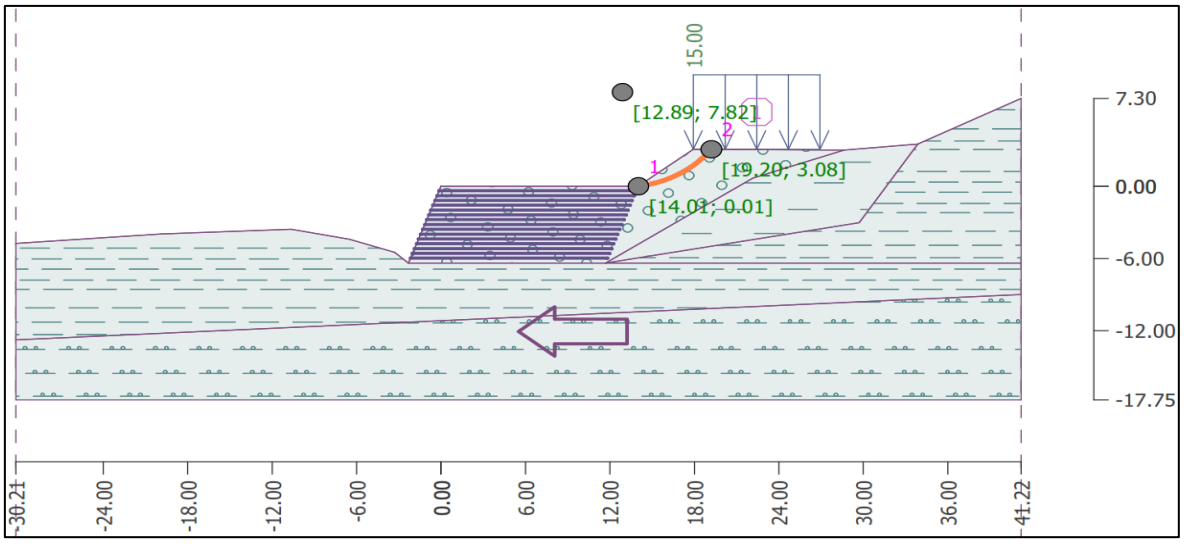


Şekil 5.19. Geogrid donatılı duvar ile limit denge esaslı ve deprem kuvveti uygulanmış stabilite analizi.

Bu çalışmalarla birlikte kayma dairesini sınırlandırarak(yerel) geri dolgu malzemesinin üzerinde oluşması durumunda ki tahkik yapılmıştır ve deprem kuvveti uygulanmaması durumunda (Şekil 5.20.) güvenlik sayısı 1,61 olarak, deprem kuvveti uygulandığında (Şekil 5.21.) ise güvenlik sayısı 1,18 olarak bulunduğu gözlemlenmiştir.



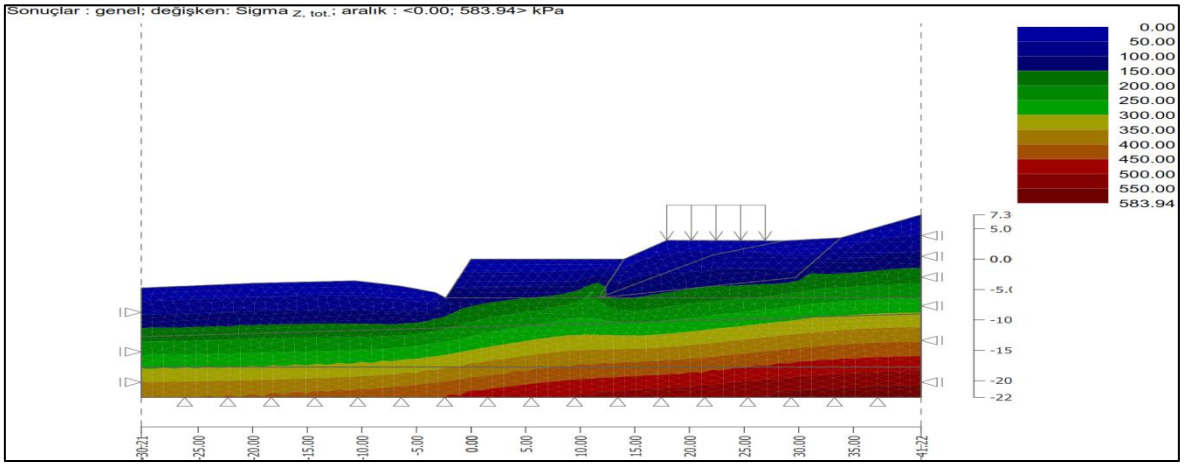
Şekil 5.20. Geogrid donatılı duvar ile limit denge esaslı deprem kuvveti uygulanmadan yapılan yerel stabilite analizi.



Şekil 5.21. Geogrid donatılı duvar ile limit denge esaslı deprem kuvveti uygulanmadan yapılan yerel stabilite analizi.

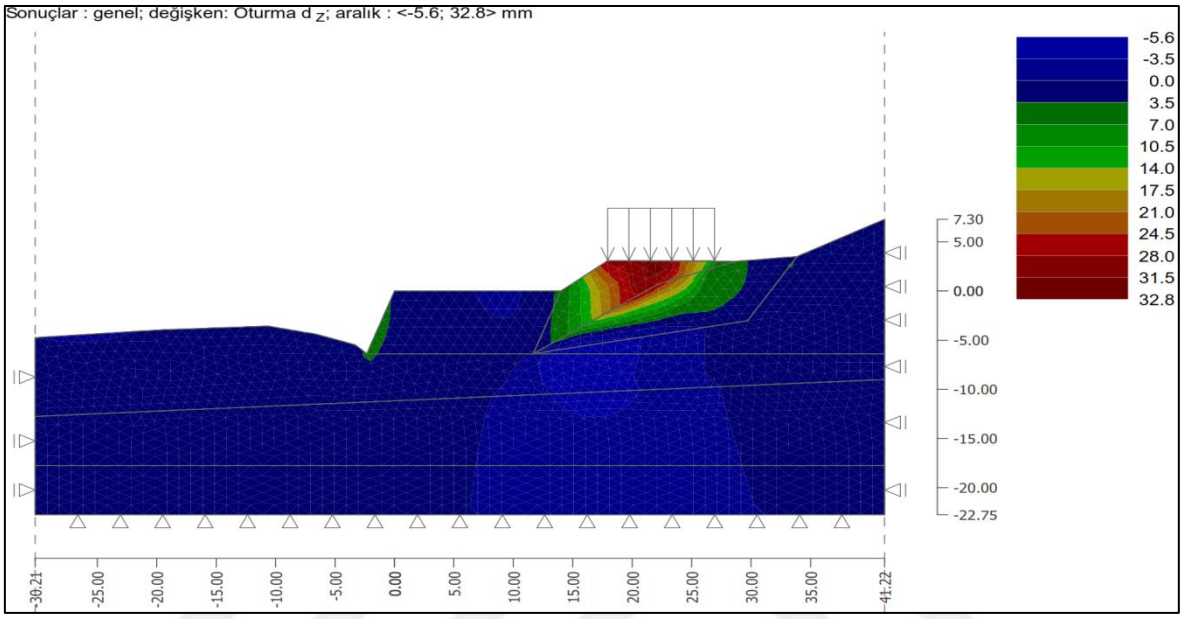
5.3.5. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tanımlanan geogrid donatılı duvara göre analizlerin yapılması

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak geogrid donatılı şevin Mohr-Coulomb modeliyle düzlemsel gerilme değerlerine bakılmıştır. Donatılı şevin önce sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Toplamda 8833 düğüm ve 5165 eleman sayısı gözlemlenmiştir. Gerilme analizinin başarıyla yapıldığı gözlemlenmiştir. Gerilme değeri düşey yönde 583,89 Kpa çıktığı görülmüştür (Şekil 5.22.)

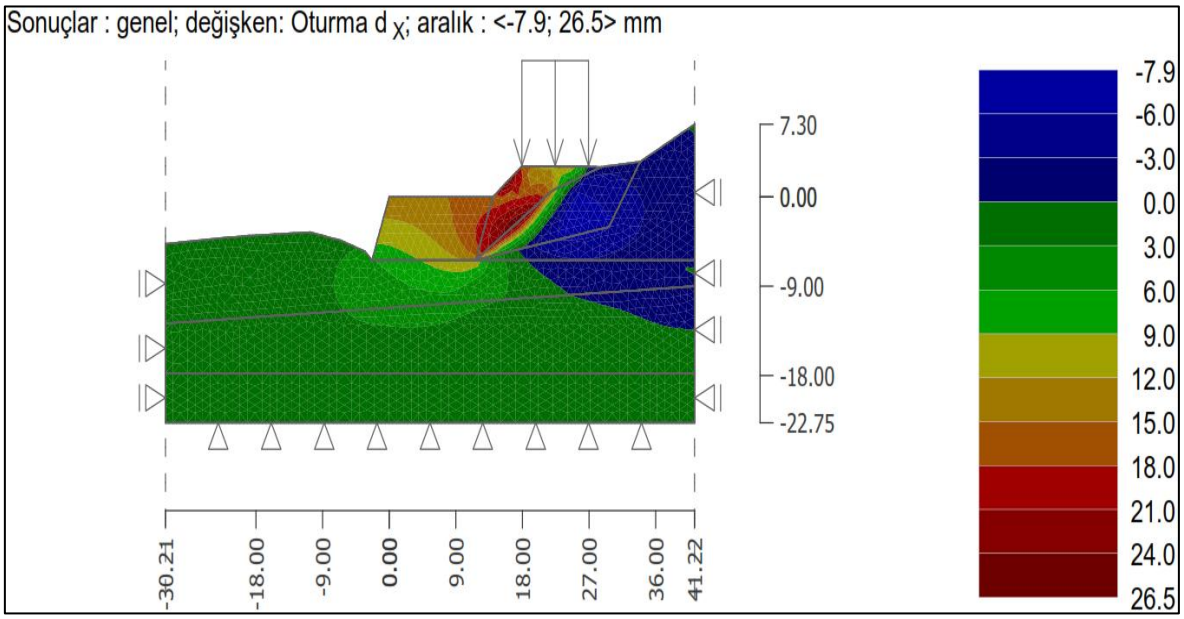


Şekil 5.22. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan donatılı şevin gerilme analizi.

Yine sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak donatılı şevin stabilite tahkiki yapılmış ve güvenlik faktörü 1,74 olarak bulunduğu gözlemlenmiştir. Düşey yönde deplasman (Şekil 5.23.) maksimum 3,28 cm ve yatay yönde ki deplasman değeri (5.24.) ise 2,65 cm olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 5.23. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan stabilite analizi ile donatılı şevde gözlemlenen maksimum düşey deplasman.



Şekil 5.24. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan stabilite analizi ile donatılı şevde gözlemlenen maksimum yatay deplasman.

Analizlerin tümünü ele aldığımızda; donatısız, rijit duvar ve geogrid donatılı duvar tanımlanan şevin limit denge ve sonlu elemanlar yöntemleriyle oluşan güvenlik sayıları ve gerilme-deformasyon değerleri Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Analizlerin donatılı ve donatışız şevlerle karşılaştırılması

Yöntemler	Güvenlik Sayısı			Gerilme Değeri Düşey Yönde (kPa)			Deplasman Düşey Yönde (maksimum) cm		
	Donatısız	Rijit	Geogridli	Donatısız	Rijit	Geogridli	Donatısız	Rijit	Geogridli
Limit Denge Yöntemine Göre Global Stabilite Analizi (Morgenstern-Price)	0,93	3,98	3,3	-	-	-	-	-	-
Limit Denge Yöntemine Göre Global Stabilite Analizi (Deprem Kuvveti Uygulanmış) (Morgenstern-Price)	0,68	2,42	1,8	-	-	-	-	-	-
Limit Denge Yöntemine Göre Yerel Stabilite Analizi (Morgenstern-Price)	0,93	1,62	1,61	-	-	-	-	-	-
Limit Denge Yöntemine Göre Yerel Stabilite Analizi (Deprem Kuvveti Uygulanmış) (Morgenstern-Price)	0,68	1,18	1,18	-	-	-	-	-	-
Sonlu Elemanlar Yöntemine Göre Stabilite Analizi	0,9	1,69	1,74	-		-	10,85	2,01	3,28
Sonlu Elemanlar Yöntemine Göre Gerilme Analizi	-	-	-	-	612,94	583,94	21,61	1,84	2,28

Çizelge 5.2'den anlaşılacağı gibi hareket gözlenmiş şevde geogrid ile donatılmış duvar kullanılarak şevin hareket etmesi engellenebilir olması gözlemlenmiştir. Yapılan analizlerde ise sonlu elemanlar yöntemi; birçok noktada gerilme ve birim deformasyonları zeminle ilişkilendirdiği için donatılı şevde güvenlik sayısı limit denge yöntemine göre daha düşük çıkmıştır bununla birlikte tasarlanan geogrid donatılı duvar çalışma alanına uygulandığı takdirde yapılan analiz sonuçlarına göre yamacın hareketi engellenebilmesi düşünülmektedir. Zamana bağlı olarak da analiz sonuçlarına bakarsak deplasman değerleri 3,28 cm'yi geçmemektedir.

Tanımlanan rijit cismin limit denge esaslı stabilite analizine göre çıkan güvenlik sayı değerleri geogrid donatılı şeve nazaran daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Fakat sonlu elemanlara göre yapılan stabilite analiz sonuçlarında geogrid donatılı duvarın güvenlik sayı değeri rijit cisme göre daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar bize geogrid donatılı duvarın heyelan hareketini engelleyebileceğini ve tanımlanan rijit cisim kadar güvenli bir şekilde şevin oluşturulabileceği göstermektedir.

5.3.6. Geogrid donatılı duvarın uygulanması ile ilgili öneriler

Geogrid donatılı duvarda kullanılacak geogrid malzeme, yüksek taşıma kapasitesine sahip, polyester örgülü tip olması ve polyester elyafların etrafı plastisol polimerle kaplanmış olmalıdır. Aynı zamanda en dip noktadan yüzeye doğru mukavemet açısından farklı tiplerde yapılabilir. Çizelge 5.3'de geogridlerin minimum çekme mukavemetleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Geogridlerin uygulamada kullanılabilecek çekme mukavemetleri

GEOGRİDLER		
	MİNUMUM ÇEKME MUKAVEMETLERİ	
Malzemenin Tipi	İmalat Yönünde	İmalat Yönüne Dik
TİP 1	35 kN/m^2	20 kN/m^2
TİP 2	55 kN/m^2	20 kN/m^2
TİP 3	80 kN/m^2	30 kN/m^2

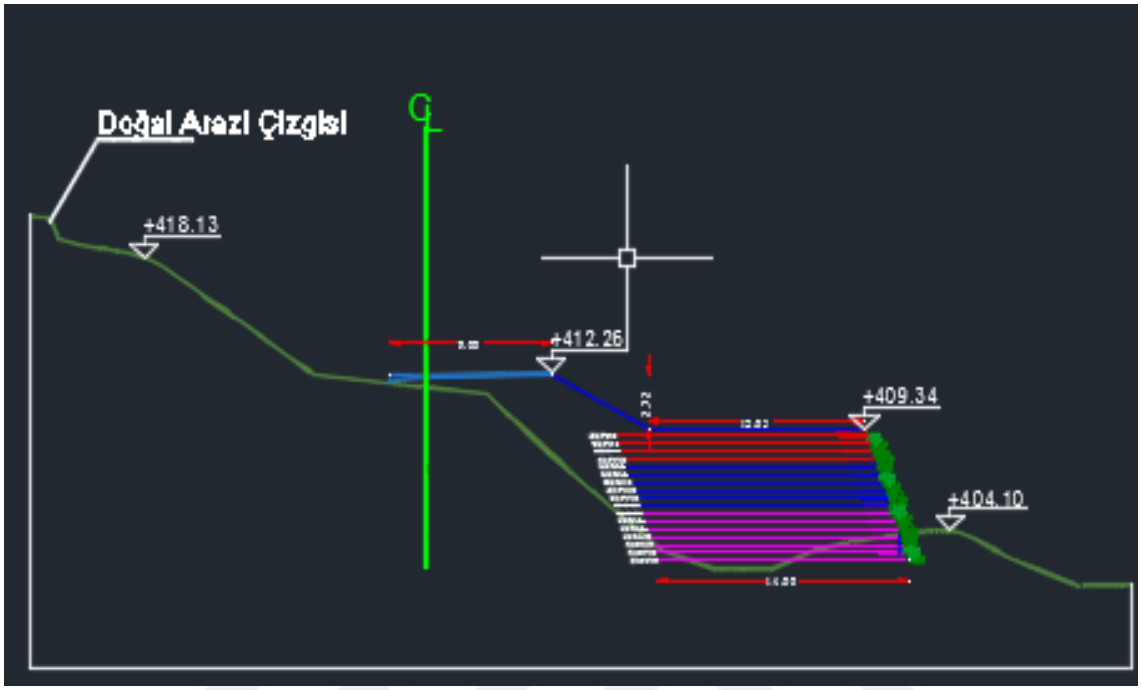
Yine uygulama yapılırken raporlarden elde edilen verilere göre -6. metrede bulunacak sağlam kaya baz alınarak yapılacak çalışmalar zemin durumuna göre değişkenlik gösterebilmektedir. Gerek görülürse taban kotlarında değişiklik yapılmalıdır. Unutulmaması gereken en önemli nokta uygulamada drenajın unutulmaması ve gerekli noktalara yapılmasıdır. Geogridler sağlam kayaya ulaşıldığında temel tabakasının reglajı yapılıp sıkıştırıldıktan sonra geogridler serilir ve 40-50 cm tabakalar halinde bohçalanarak aynı zamanda zemine sabitlenerek eğimli bir şekilde duvar oluşturulmaya devam edilir.

Geogridlerin arasında kullanılacak dolgu malzemesinin tane dağılımı çok önemlidir. Çizelge 5.4'de kullanılacak dolgu malzemesi gradasyonu verilmiştir.

Çizelge 5.4. Geogrid donatılı duvarda kullanılması gereken malzeme gradasyonu

Kullanılacak Dolgu Malzemesi Gradasyonu	
Elek Boyutu	Geçen (%)
Dmaks= 12cm	100
50	80-100
20	50-100
No 4	20-65
No 40	0-45
No 200	0-15

Yapılan çalışma kapsamında 0+170,00 kesitinde şevin stabilizasyonu için önerilen geogrid donatı ile yapılabilecek duvar kesiti Şekil 5.25'de gösterilmiştir.



Şekil 5.25. Uygulama projesi örneği.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında yürütülen Düzce ili Çilimli ilçesi Karaçörtlen köyü grup yolunda 2012 yılında meydana gelmiş heyelanın; gözlemsel, arazi çalışmaları ve proje raporları doğrultusunda elde edilen zemin özellikleriyle Geo5 programı kullanılarak analizi yapılmıştır. Analizler limit denge yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hem güvenlik sayısı hem de şekil değiştirmeler gözlenmiştir. Bu analizler sonucunda zeminin güçlendirilmesi ve yol platformunun genişletilmesi amacıyla son günlerde oldukça sık kullanılan, gerek ekonomik gerekse uygulama kolaylığı açısından geogrid donatılı duvar uygulaması düşünülerek geoteknik model ortaya konmaya çalışılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda aşağıda özetlenen sonuçlara ulaşılmıştır:

i. Limit denge yöntemlerinden hem kesme kuvveti hem de moment dengesi sağladığı için Morgenstern-Price metodu kullanılarak, potansiyel kayma yüzeyi belirlenmiştir. Bu kayma yüzeyi, analiz öncesi zaten dolgu malzemesinde gerçekleştiği biliniyordu ki kayma yüzeyi dolgu malzemesinde yolun yamaca doğru bakan kısmında gerçekleşmiştir. Depremli durumda ele alındığında güvenlik sayısı oldukça düşük çıkmıştır.
ii. Analiz çalışmalarında sonlu elemanlar metodu da kullanılarak çalışma alanının deformasyon-şekil değiştirme davranışları da incelenerek kaymanın nerede ve nasıl geliştiği tespit edilmiştir. Deformasyonların yine dolgu malzeme de yolun yamaca bakan kısmında olduğu hem analiz hem de arazide yapılan gözlemlerle de görülmüştür.
iii. Yapılan analiz çalışmalarında görüldüğü üzere çalışma alanının stabil durumda olmadığı görülerek geogrid donatılı duvar uygulamasıyla bölgenin stabil durumda kalması ve yol platformunun genişletilmesi için geoteknik model ortaya konulmuştur. Yamaçlarda stabilite sağlamak için yapılan rijit çalışmalar; duraylılığın sağlanması ve drenajın oluşması amacıyla inşası gereklidir ancak deformasyonların fazla olması sebebiyle yapılacak çalışmaların maliyeti yüksek, uygulaması zor ve etkileri zamanla düşmektedir. Özellikle yol platformunda meydana gelen heyelanların ise yanal kuvvetlere karşı koyulması amacıyla birkaç rijit yöntem bir arada kullanılmaktadır bu da yine maliyeti artırmakta ve uygulama süresini uzatmaktadır. Bu noktada geogrid donatılı duvar; maliyetinin düşük, uygulamasının kolay ve anlaşılır, belli miktarda

deformasyona ve suyun geçişine izin veren, düşey ve yanal kuvvetleri karşılayan en uygun yöntemlerden biridir. Tüm bunlar ele alındığında analiz çalışmalarında geogrid donatılı duvar tercih edilmesinin uygun olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Acar Jeofizik, 2013, "Düzce İl Özel İdaresi, karaçörtlen raporu".

Alexiew, D., Plankel, A., Thomson, G., 2014, "A geogrid–reinforced landslide stabilization: 20 year passed", The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1094-1098.

Anaçali, İ., Şirin, A., 2015, "Heyelan Tanımlama ve Veri Oluşturma Klavuzu", Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara.

Afet İşleri Genel Müdürlüğü Eğitim, Haber, Bilim Dergisi, 2001, Sayı 1.

Atkinson, J., Geotechnical Stresses, http://environment.uwe.ac.uk/geocal/SoilMech/stresses/stresses.htm, erişim tarihi: 13.07.2017

Bishop, A.W. 1955, "The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes" Geotechnique, V.5, No.1, 7-17.

Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996. Landslide Types and Processes, Landslides Investigation and Mitigation, Spescial Report 247. In Turner, A.K., Shuster, R.L., (eds.), 36-75.

Dirik, K., "Depremin Doğa ve Yapılar Üzerindeki Etkileri", ders notları, http://yunus.hacettepe.edu.tr/~kdirik/FJ_18_Depremler.pdf, erişim tarihi: 16.07.2017.

Ercanoğlu, M., Gökçeoğlu, C., Van Asch T.W.J., 2004, Landslide susceptibility zoning of North of Yenice (NW Turkey) by multivariate statistical techniques. Natural Hazards, 32 pp 1-23.

Geodizayn Proje Mühendislik Müşavirlik, 2016, Düzce İli Çilimli İlçesi Karaçörtlen Köyü Yolu Heyelan Islahına Yönelik Geoteknik Proje Raporu".

Gökçe, O., Özden, Ş., Demir, A., 2008, "Türkiye'de afetlerin mekansal ve istatiksel dağılımı afet bilgileri envanteri", Ankara: 10-15.

Güler, E., 2007, Geosentetik donatılı istinat duvarı (geoduvar) bir şartname taslağı, İkinci Uluslararası Geosentetikler Konferansı, BÜ, İstanbul, 221-227.

Janbu, N., 1973, "Slope Stability Computation" Embankment Dam Engineering, Casagrande Memorial Volume, Wiley, new York, 47-86.

Keskin, İ., "Kitle Hareketleri ve Heyelanlar", 7. Hafta, İnşaat Mühendisleri İçin Jeoloji, http://www.inankeskin.com/index.php/dersnotu/category/41-hafta-7, erişim tarihi: 27.06.2017.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Kulhawy. F.H., 1969, Finite element analysis of the behavior of embankments, Ph. D., Thesis, the Universiry of Califonia. at Berkley. Califomia. USA

Krahn, J., 2004, "Stability Modeling with Slope/W, An Engineering Methodology" First Edition, Revision 1, Canada, 1-80.

Morgenstren, N.R., Price, V.E., (965, "The Analysis of Stability of General Slip Surfaces" Geotechnique, Vol.15. No.1

Öztürk, K., 2002, "Heyelanlar ve Türkiye'ye Etkileri", Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi Cilt 22, Sayı 2, 35-50.

Savaş, H., Türkoz, M., Seyrek E., Orhan, A., 2014, "Dolgu Barajlarda Şev Stabilite Analizi ve Bir Uygulama", Uluslararası Katılımlı 4. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyomu, Elazığ.

Shukla, S.K., 2002 Geosynthetics and their applications, Published by Thomas Telford, ISBN: 978-0727731173, London, UK:430.

T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü, 2016, Ulusal Heyelan Sempozyumu Tebliğler, Ankara.

Türköz, M., 2015, "İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Geosentetikler", ders notları, Eskişehir.

Ulusay, R., "Heyelanlar ve Mühendislik Şevlerindeki Duraysızlıklar; Türleri, Etkileri ve Zararların Azaltılması", Hacettepe Üniverisitesi, Ankara, 157-182.

Umu, S.U., Işıkdağ, B., 2015, "Şev stabilizasyonunda geosentetiklerin kullanım avantajları ve bilgisayar destekli örnek tasarım problemi" Ejoir Aralık 2015 Iwcea Özel Sayısı Cilt 1: 1-15.

Umumi Hayata Müessir Afetler Dolayısı İle Alınacak Tedbirlerle Yapılacak Yardımlara Dair Kanun, 1959, Sayı 10213, Tertip 3, Cilt 40, 3203-3222.

Varnes, D.J., 1978, Slope Movement Types and Processes, In Landslides; Analysis and Control, Edited by Shuster R.L., Krizek, R.J., Transportation Research Board, National Academy Of Science, Washington, Special Report 176, Chapter 2, 11-33.

WP/WLI, (International Geotechnical Societes Unesco Working Part On World Landslide Inventory), 1990, A suggested method for reporting a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 41, 5-12.

Yıldız, C., Karakuş, K., Özmen, M., Kırkbudak, H., 2016, "Devrek heyelanının çomaklar deresine etkileri", Ulusal taşkın sempozyumu Rize: 1-38.

Yılmaz, H.R., Eskişar, T. (2007). Geosentetik ürünlerin geoteknik mühendisliği sorunlarının çözümünde kullanımı ve sağlanan faydalar. 2. Geoteknik Sempozyumu Bildiler Kitabı, Adana, Türkiye, 437-453.

Wasti, Y., İnşaat Mühendisliğinde Geotekstil ve Geomembran Uygulamaları Eğitim Semineri, 98 s.