

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZONGULDAK KILIÇ HEYELANININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
STABİLİTE ANALİZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKREM ÖZGENÇ

TEMMUZ 2018

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZONGULDAK KILIÇ HEYELANININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
STABİLİTE ANALİZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ekrem ÖZGENÇ

DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL

ZONGULDAK
Temmuz 2018

KABUL:

Ekrem ÖZGENÇ tarafından hazırlanan “Zonguldak Kılıç Heyelanının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Stabilité Analizi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 17/07/2018

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye: Doç. Dr. Utkan MUTMAN

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk ÇAPAR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

..../..../2018

Doç. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”


Ekrem ÖZGENÇ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ZONGULDAK KILIÇ HEYELANININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE STABİLİTE ANALİZİ

Ekrem ÖZGENÇ

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL

Temmuz 2018, 115 sayfa

Heyelanlar karmaşık bir doğa olayı olmakla birlikte, birçok ülke için, içerisinde doğal riskler barındırır. Uzun süreli ve yoğun yağış etkisiyle veya deprem tetiklemesi ile oluşan heyelanlar birçok insanın yaşamsal faaliyetlerini etkilemekte ve konumları itibarıyla yerleşim yerlerinin altyapılarına zarar vermektedirler. İnceleme alanı Zonguldak, Batı Karadeniz riskli bölgesinde yer almakta olup, genel topoğrafyası incelendiğinde, dağlar doğu batı yönlü sarp bir şekilde yükselmektedir. Bu çalışmada heyelan risk alanı olan Kozlu Kılıç bölgesi ile ilgili zemin parametreleri detaylı zemin ve geoteknik raporlarından elde edilmiştir. Bu geoteknik veriler yardımıyla sayısal model oluşturulmuş; heyelan bölgesi sonlu elemanlara dayalı program ile modellenerek statik durum davranışı analiz edilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, en büyük yer değiştirme birinci boy kesit için; heyelan bölgesinin taç kısmında, ikinci boy kesit için heyelan bölgesinin orta kısmı olarak belirlenmiştir. Heyelan bölgesinin topuk kısmı her iki boy kesit için güvenli kısımda yer almaktadır. Yapı yükleri modelde analiz edildiğinde, yatay ve düşey yer değiştirme değerlerini arttırdığı saptanmıştır.

ÖZET (devam ediyor)

Aynı zamanda mevsimsel değişkenlik gösteren yeraltı su seviyesinin bertarafı söz konusu gevşek malzeme için daha duyarlı hale getirdiğı birinci boy kesit analiz sonuçlarından da görölmüşür. Bu çalışma sonuçları değerlendirildiğinde; zemin yüzeyinde yer alan gevşek ve zayıf malzemenin uygun bir yöntem ile iyileştirilmesi ya da taç bölgesinde yatay destekleme sistemleriyle kazı güvenliğı sağlanarak yapılaşmaya gidilmesi bu çalışma kapsamında önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yamaç Stabilitesi, Sonlu Eleman Model Analizi, Kılıç Heyelanı

Bilim Kodu: 624.01.00.

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

STABILITY ANALYSIS BY THE END ELEMENT METHOD OF ZONGULDAK KILIÇ

Ekrem ÖZGENÇ

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Ayşe Bengü SÜNBÜL

July 2018, 115 pages

Landslides are a complex natural phenomenon and, for many countries, have inherent risks. Landslides formed by long-term, heavy rainfall or earthquake triggering affect many people's vital activities and damage their infrastructures in terms of their location. Zonguldak is located in the risky area of the Western Black Sea, and when the general topography is examined, the mountains rise steeply in an east-west direction. In this study, ground parameters related to Kozlu Kılıç region, which is a risk area of landslide, were obtained from detailed ground and geotechnical reports. With this geotechnical data, numerical model was created; the static state behavior is analyzed by modeling with the program based on the finite element of the landslide region.

According to the analysis results, the largest displacement is for the first length section; was determined as the middle part of the landslide area for the second length section in the crown

ABSTRACT (continued)

of the landslide area. The heel part of the landslide area is located in the safe part for both length sections. It has been found that when the structure loads are analyzed in the model, they increase the horizontal and vertical displacement values. At the same time, it is seen from the results of the first aspect analysis that the seasonal variability of the underground water level is more sensitive to the disposal of the loose material. When the results of this study are evaluated; the improvement of the loose and weak material on the surface of the ground by a suitable method or the horizontal support systems in the crown area to provide excavation safety and to construct the structure is proposed in this study.

Keywords: Slope Stability, Finite Element Modal Analysis, Kılıc Landslide

Science Code: 624.01.00.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana yardımlarını esirgemeyen ne zaman ihtiyaç duysam her an yardımına koşan öğretmen öğrenci ilişkisinden çok arkadaş edasıyla yol gösteren, güler yüz ve pozitif enerjisiyle tez çalışmamı tamamlamamda çok büyük katkı sahibi değerli danışman hocam Dr.Öğr.Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL'e sonsuz minnet duygularıyla teşekkür ederim.

Tez çalışmama başlamam ile birlikte her konuda fikir alış verişinde bulunduğum neşeli ve pozitif karakteriyle moral veren desteğini eksik etmeyen Öğretim Görevlisi Hüseyin MÜNGAN'a teşekkür ederim.

Çalışmamda katkılarından dolayı Sarsılmaz Maden İnşaat Taahhüt Danışmanlık Emlak Gıda Turizm Nakliyat San.Tic.Ltd.Şti'ye teşekkür ederim.

Bu tezi hazırlayabilmek için kendilerine ayırmam gereken zamandan feragat etmeme müsaade eden, sanki ne yaptığımı biliyormuş gibi çalıştığım zamanlarda hiç yaramazlık yapmayan sessiz sedasız oyunlar oynayan oğlum İsmail ve kızım Feyza'ya teşekkür ederim.

Yuvayı çekip çeviren, çalışma zamanlarım boyunca benimle birlikte bu zahmetlere katlanan çocuklara ayıramadığım zamanlarda yokluğumu hissettirmeyen değerli eşim Nurhilal ÖZGENÇ'e teşekkür ederim.

Evlatlarının yaptıklarıyla ya da yapamadıklarıyla her zaman gurur duyan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
 BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	 1
1.1 ÇALIŞMA KONUSU.....	1
1.2 AMAÇ	2
1.3 KAPSAM.....	2
 BÖLÜM 2 KONUYLA İLGİLİ GEÇMİŞ ÇALIŞMALAR.....	 3
 BÖLÜM 3 GENEL BİLGİLER	 7
3.1 KÜTLE HAREKETLERİ.....	9
3.2 KÜTLE HAREKETLERİNİN SINIFLANDIRILMASI.....	13
3.2.1 Hutchinson Heyelan Sınıflandırması	14
3.2.2 Skepmton Heyelan Sınıflandırması	15
3.2.3 Varnes Heyelan Sınıflandırması	15
3.2.4 Sassa Heyelan Sınıflandırması.....	17
3.2.5 Genel Sınıflandırma	17
3.2.5.1 Kayma Tipi Heyelan	17
3.2.5.2 Akma Tipi Heyelan	17

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

3.2.5.3 Dönel Kayma Tipi Heyelan.....	18
3.2.5.4 Blok Kayma Tipi Heyelan.....	19
3.2.5.5 Düşme.....	19
3.2.5.6 Devrilme.....	21
3.3 HEYELANIN BÖLÜMLERİ VE ŞEKLİNE GÖRE ADLANDIRMA.....	21
3.3.1 Ötelenmeli (Düzlemsel) Kayma	23
3.3.2 Düzlemsel Kayma	23
3.3.3 Kama Türü Kayma.....	23
3.3.4 İki veya Çok Yüzeyle Kayma.....	24
3.3.5 Yanal Yayılma	24
3.3.6 Karmaşık Hareketler	25
3.4 YAMAÇ STABİLİTESİ PROBLEMLERİ.....	25
3.5 HEYELAN OLUŞUM NEDENLERİ.....	27
3.6 HEYELANLARIN ÖNLENMESİ İÇİN YAPILMASI GEREKENLER.....	30
BÖLÜM 4 HEYELANLARIN İNCELENMESİ.....	37
4.1 GİRİŞ.....	37
4.2 HEYELAN ANALİZ YÖNTEMLERİ	37
4.2.1 Limit Denge Yöntemi	38
4.2.2 Bishop'un Sadeleştirilmiş Yöntemi	42
4.2.3 Janbu'nun Basitleştirilmiş Yöntemi.....	44
4.2.4 Spencer Metodu	45
4.2.5 Morgenstern-Price Metodu	47
4.2.6 Sarma Yöntemi	48
4.2.7 Janbu'nun Genelleştirilmiş Yöntemi	49
4.2.8 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	50
4.3 ANALİZLERDE UYGUN YÖNTEM SEÇME.....	53
BÖLÜM 5 YAPILAN ÇALIŞMA	57
5.1 İNCELEME ALANI.....	57

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
5.2 JEOLojİSİ.....	58
5.3 GEOTEKNİKİNCELEMESİ	60
5.4 JEOFİZİKSEL İNCELEMESİ	65
5.5 HİDROLOJİK İNCELEMESİ.....	75
 BÖLÜM 6 SAYISAL MODELLEME	 77
6.1 GİRİŞ.....	77
6.2 SONLU ELEMENLAR YAKLAŞIMI.....	79
6.2.1 Eleman Tipi Ve Gerilme Noktaları.....	83
6.3 PLAXIS PROGRAMI	87
6.3.1 PLAXIS Programı Deformasyon Teorisi.....	88
 BÖLÜM 7 SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİYLE MODELLEME	 95
7.1 GİRİŞ.....	95
7.2 PROJE ÖZELLİKLERİ.....	95
7.2.1 1. Boykesit	98
7.2.2 2. Boykesit	105
 BÖLÜM 8 SONUÇ VE ÖNERİLER.....	 109
 KAYNAKLAR.....	 111
ÖZGEÇMİŞ	115



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Afet türlerinin dağılımı afet olay sayısı bazında	3
Şekil 2.2 Heyelan olay sayısı bazında heyelanlardan etkilenen illerin dağılımı	4
Şekil 2.3 Türkiye’de heyelanlı yerleşim alanlarının mekânsal dağılımı	5
Şekil 2.4 Heyelan noktasal yoğunluk haritası	5
Şekil 2.5 Aktif faylar ve heyelan noktasal yoğunluk haritası arasındaki ilişki	6
Şekil 3.1 Karadeniz bölgesinde bir alanın maruz kaldığı heyelanlar.	8
Şekil 3.2 Türkiye’deki heyelan sayısı	13
Şekil 3.3 Skempton Heyelan Sınıflandırması	15
Şekil 3.4 Kayma tipi heyelanın genel görüntüsü.....	17
Şekil 3.5 Bazı akma türleri.....	18
Şekil 3.6 Killi, siltli vb.zeminlerde dönel kayma	19
Şekil 3.7 Kaya kütlelerinde kaya düşmelerine neden olan süreçler	20
Şekil 3.8 Doğada gözlenen devrilme türleri.....	21
Şekil 3.9 Tipik heyelan kesiti.....	22
Şekil 3.10 Kayma yüzeylerinin konumu	23
Şekil 3.11 (a.) Düzlemsel kaymalar, (b.) Kama tipi kaymalar ve (c.) Farklı ortamlarda gelişebilen çok yüzeyli kaymalar	24
Şekil 3.12 (a.)Yanal kaya yayılması ve (b.)yanal zemin yayılması	25
Şekil 3.13 Heyelan kayma yüzeyinde gerilmelerin durumu	27
Şekil 3.14 Drenaj sistemleri	32
Şekil 3.15 Eğimli araziye oturan dolgularda kademelendirilme ve drenaj	33
Şekil 3.16 Zemin ankraj elemanları	35
Şekil 4.1 Yarım Sinüs Fonksiyonu.....	39

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
Şekil 4.2 Güvenlik Faktörünün dilimler arası fonksiyon yüzdesine (λ) göre değişimi.....	40
Şekil 4.3 Bishop'un Birleştirilmiş yöntemi için serbest gövde kuvvet poligonu.....	43
Şekil 4.4 Bishop'un basitleştirilmiş güvenlik faktörü.....	43
Şekil 4.5 Janbu metodu için serbest cisim diyagramı ve kuvvet poligonu	44
Şekil 4.6 Bishop'un güvenlik faktörü	45
Şekil 4.7 Tipik şev stabilitesi durumu	46
Şekil 4.8 Spencer'ın güvenlik faktörü.....	46
Şekil 4.9 Spencer Metodu için Kesitlerarası Fonksiyonlar	47
Şekil 4.10 Yarım sinüs fonksiyonlu Morgenstern-Price güvenlik faktörleri	48
Şekil 4.11 Lineer-elastik ve elastik-plastik gerilmeler için güvenlik faktörü	53
Şekil 4.12 Limit denge yönteminde serbest gövde diyagramı ve kuvvet poligonu.	54
Şekil 5.1 Heyelan bölgesinin yer bulduru haritası	57
Şekil 5.2 Zonguldak İli ve Yakın Çevresinin Genelleştirilmiş Jeomorfoloji Haritası Genel Eğim Haritası.....	58
Şekil 5.3 İnceleme alanı 1/100000 ölçekli Genel Jeoloji Haritası	60
Şekil 5.4 Yapılan sondajların inceleme alanındaki konumları.....	61
Şekil 5.5 Sondaj alanında yapılan çalışmalardan görüntü.....	61
Şekil 5.6 Sondaj numunelerinin görüntüsü	62
Şekil 5.7 Sondaj loglarına göre kayma düzlemi tespiti	63
Şekil 5.8 İnceleme Alanında yapılan Sismik çalışmalar	66
Şekil 5.9 Sismik kırılma, sismik yansıma ve yüzey dalgası analizi dalgalarının arazide elde edilmesi.....	66
Şekil 5.10 Çok atışlı Sismik kırılma çalışmasının arazideki konumu.....	67
Şekil 5.11 Sismik verilerle oluşturulan yeraltı modeli	68
Şekil 5.12 Rezistivite çalışmalarından görünüm.....	70
Şekil 5.13 İnceleme alanındaki düşey elektrik sondajların konumları.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
Şekil 5.14 Elektrik ölçümlerinden profil oluşturularak yer altı kesiti ve rezistivite değerleri .	71
Şekil 5.15 Profillerin birleştirilerek Rezistivite değerlerine göre kesiti.....	72
Şekil 5.16 Profillerin birleştirilerek Rezistivite değerlerinin tabaka kalınlıklarına göre kesiti	72
Şekil 5.17 Hatların birleştirilerek Rezistivite değerlerinin tabaka kalınlıklarına ve topografyaya göre konumu.....	72
Şekil 5.18 Rezistivite ölçümlerine göre kayma düzleminin belirlenmesi	74
Şekil 5.19 Yüzey dalgası analizi ölçümlerine göre zayıf zonların tespiti	74
Şekil 5.20 Sismik yansıma çalışmasına göre kayma düzlemi tespiti kesiti	75
Şekil 5.21 Çok atışlı Sismik Kırılma ile formasyon sınırları	75
Şekil 6.1 Nümerik analiz yöntemleri.....	78
Şekil 6.2 Sonlu elemanlar yönteminde eleman tipleri.....	84
Şekil 6.3 Sonlu elemanlar yönteminde elemanların yer değiştirme fonksiyonları	84
Şekil 6.4 Plaxis’de kullanılan elemanlar, düğüm noktaları ve gerilme noktaları	86
Şekil 6.5 Sonlu elemanlar yönteminde seçilen geometrinin düzlem şekil değiştirmesi	87
Şekil 6.6 Geoteknik uygulamalarda karşılaşılabilecek dairesel kesitli yapı elemanları	87
Şekil 6.7 Asal gerilme uzayında akma konturları	94
Şekil 7.1 4 adet sondaj logu	96
Şekil 7.2 Riskli bölgede alınan 2 farklı boykesit	98
Şekil 7.3 Birinci boy kesit	99
Şekil 7.4a Heyelan kesiti için yüzeyde gözlenen yapısal hasarlar 2012-2018.....	100
Şekil 7.4b Yapılarda gözlenen hasarlar 2012 yılı	100
Şekil 7.5 Yapılarda gözlenen hasarlar 2012 yılı	101
Şekil 7.6 Yapılarda gözlenen hasarlar 2012 yılı	101
Şekil 7.7 Mevcut araziden görüntüler.	102
Şekil 7.8 Mevcut araziden görüntüler	103
Şekil 7.9 Mevcut araziden görüntüler	104

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 7.10 (a) ve (b). Heyelan kesiti için analiz sonucu	104
Şekil 7.11 İkinci boy kesit.....	105
Şekil 7.12 İkinci boy kesit yapıdaki deformasyonlar	105
Şekil 7.13 Mevcut araziden görüntüler	106
Şekil 7.14 İkinci boy kesit güvenlik analizi	106



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Afet türüne göre afet olay sayısı ve afettede sayılarının genel dağılımı	3
Çizelge 3.1 Skempton D/L oranları İçin Heyelan Sınıflandırması	15
Çizelge 3.2 Varnes'e göre şev kayması sınıflandırması	16
Çizelge 3.3 Kütle hareketlerini etkileyen nedenler	26
Çizelge 4.1 Limit Denge Analizlerinde kullanılan yöntemlerin özeti	55
Çizelge 5.1 SPT deney verileri.....	62
Çizelge 5.2 Atterberg Limitleri	64
Çizelge 5.3 Karot numuneleri deneyleri	65
Çizelge 5.4 Deere ve Miller (1966) sınıflamaları	65
Çizelge 5.5 Hat 2 MASW Değerlendirmesi.....	69
Çizelge 7.1 Malzeme Özellikleri.....	97
Çizelge 7.2 Sonlu eleman modelinde kullanılacak malzeme parametreleri.....	103



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
AGFI	: Adjusted Goodness of Fit Index
CFA	: Confirmatory Faktör Analysis
CFI	: Comparative Fit Index
df	: Degrees of Freedom
EFA	: Exploratory Factor Analysis
GFI	: Goodness of Fit Index
NFI	: Normed-Fit Index
NNFI	: Non-Normed-Fit Index
RMR	: Root Mean Square Residual
RMSEA	: Root Mean Square Error Of Approximation
TMMMB	: Türk Müşavir Mühendis Mimarlar Birliği
YEM	: Yapısal Eşitlik Modeli



BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 ÇALIŞMA KONUSU

Günümüzde insan nüfusu hızla artmakta ve buna bağlı olarak eğimli yamaçlarda da yerleşim alanları oluşturulmaktadır. Doğal bitki örtüsü yapısının tahribatı, mevcut arazi yapılarına uygun olamayan bina, fabrika vb. yapıların inşası ve bu yapılara ulaşımı sağlamak amacıyla yol ağının artış göstermesi jeolojik açıdan çevrenin değişmesine neden olmuştur. Yamaçlara yapılan bu inşaatlar sonrası heyelan riski taşıyan alanlarda artış söz konusu olmuştur. Eğimli arazilerdeki yerleşkelerde; doğal olarak yapılan drenajların bozulması, topuk bölgelerinde yapılan dikkatsiz kazılar ve çalışmalar, tarım amaçlı mevcut ağaçların kesilerek yerlerine toprağı çok fazla derinlere varmayan köklü bitkiler dikilmesi, atık suların yamacı oluşturan malzemeyedogru akması, yamaç üzerine yük oluşturacak yapının inşası, yeni yolların yapımı ve mevcut yollarda genişletmelerin yapılması, yeterli drenajların sağlanamaması sonucunda yüzey ve yağmur sularının etkisi ile boşluk suyu basınçlarındaki artışlar, depremler, şiddetli doğal afetler, volkanik olaylar, ani sıcaklık değişimi gibi faktörler bu tür arazilerin yapılarında bozukluklar oluşturarak zeminde duraysızlık meydana gelmesine neden olmaktadır.

Heyelan; toprak ve kaya gibi malzemelerden oluşan kütlenin yer çekimi ve eğimin etkisiyle aşağı yönlü olarak hareket etmesi sonucu oluşmaktadır. Uzun süre devam eden yağışların olduğu, daha çok nemli iklimlerde ve buna paralel dik topoğrafik yapılara sahip bölgelerde oldukça sık rastlanmaktadır.

Heyelan; depremden sonraki en fazla tahrip gücüne sahip afet olup aynı zamanda sel ve taşkınların oluşumuna da etki ettiği için can ve mal kaybına neden olabilmektedir.

İnsanlar günümüzde yeterli inceleme ve araştırma yapmadan heyelanlı ya da heyelan oluşabilecek alanlara yerleşmeleri, heyelan afetlerinin miktarındaki artışın başlıca sebebidir.

Ülkemizde ve dünyada bu afetin zararlarını azaltmak için gelişmiş teknikler kullanılmalı ve bu konuya daha fazla önem verilmelidir.

Ülkemizin jeolojik, iklim ve coğrafi özelliklerigöz önüne alındığında deprem, heyelan ve sel felaketi olayları sıkça görülmektedir. Değişik dönemleri kapsayacak şekilde yapılan çalışmaların tamamında doğal afet olay sayısı temel alınırsa heyelanların ilk sırada, doğal afetler sonucu etkilenen konut ve binaların sayısı dikkate alınarak yapılan araştırmalarda ise depremden sonra ikinci sırada olduğu görülmektedir. Afet işleri genel müdürlüğü verilerine göre Türkiye topraklarının %25 yani 194.000 kilometrekare alan heyelan tehlikesiyle karşı karşıyadır. Bu toprakların %11 lik kısmına tekabül eden 8 milyon insan ise böylesi bir risk ile yaşamaktadır. Heyelanlar, her mevsim yağışın düştüğü Karadeniz bölgesi ve daha çok yüksek arazi yapısına sahip Doğu Anadolu bölgelerimizde yoğunluk göstermektedir. Ülkemizin gelişmişlik göstergelerinden olan yolların bu bölgelerimizde yapılması aşamasında geoteknik koşul ve verilerin çok iyi irdelenmesi gerekmektedir. pProje ve yapımı çalışmalarının hayata geçirilmesi sırasında tespit edilemeyen heyelanların yeterli incelenememesi, alternatif güzergâh ya da çözüme yönelik adımların atılmaması nedeniyle ülke ekonomisine gelebilecek extra yükler üzerinde daha fazla mesai harcanması gerekmektedir.

1.2 AMAÇ

Bu tez kapsamında Türkiye’de ve dünyada oldukça sık rastlanan doğal afetlerden heyelan ile ilgili ve Türkiye’nin Karadeniz Bölgesi Zonguldak İli Kozlu İlçesi Kılıç Mahallesi mevkiinde meydana gelen heyelanın PLAXIS programıyla sonlu elemanlar yöntemi (gerilme-deformasyon) kullanılarak şev stabilize analizi yapılmıştır. Bu analizler neticesinde zemin iyileştirilmesine yönelik önerilerde bulunulmuştur.

1.3 KAPSAM

Araştırma Zonguldak ilinin Kozlu ilçesi Kılıç Mahallesinde meydana gelen heyelanın analizi ve zeminin iyileştirilmesine yönelik çalışmaları içermektedir. İnceleme alanından elde ettiğimiz veriler ışığında oluşturduğumuz profil ile bu verileri en iyi şekilde kullanarak sayısal modelleme yapmamıza olanak veren programlardan bir tanesi olan PLAXIS kullanılarak kritik kesitler üzerinde stabilite analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda ortaya çıkan bu hareketin tekrarlanmaması için alınabilecek önlemler irdelenmiştir.

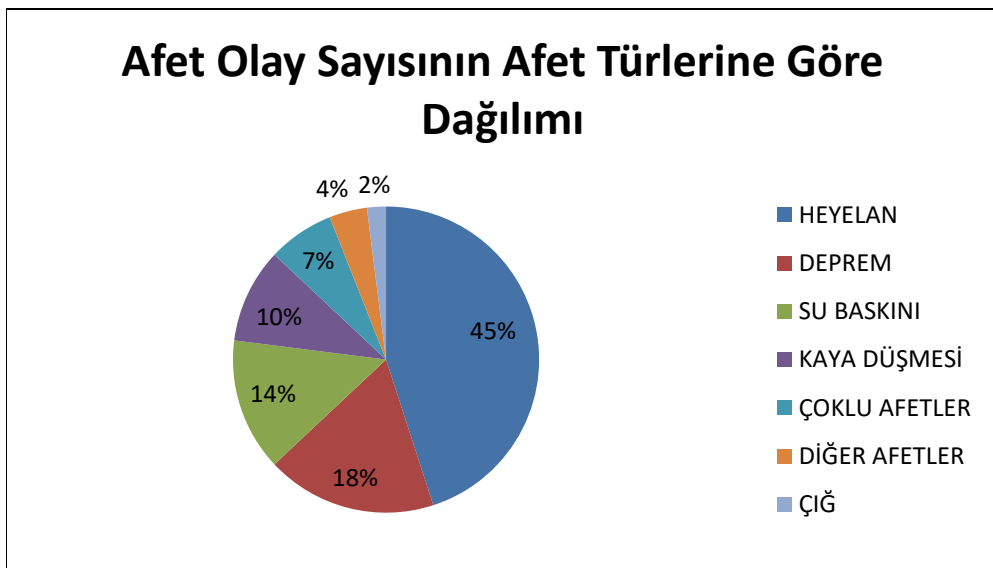
BÖLÜM 2

KONUyla İLGİLİ GEÇMİŞ ÇALIŞMALAR

Türkiye’de meydana gelen afet olayları sayısına göre en çok karşılaşılan doğal afet heyelan olur iken Çizelge 2.1. ve Şekil 2.1.’de de görüldüğü gibi depremde sonra %21’lik bir payla bu durumdan etkilenen afetzede sayısına göre 2.sırada yer alır (AFAD 2008).

Çizelge 2.1 Afet türüne göre afet olay sayısı ve afetzede sayılarının genel dağılımı(AFAD 2008)

AFETLER	AFET OLAY SAYISI	AFETZEDE				ETKİLENEN TOPLAM AFETZEDE SAYISI	ETKİLENEN AFETZEDE SAYISI(%)
		ETKİLİ NAKİL	İLAVE NAKİL	ETKİSİZ NAKİL	NAKİL İPTAL		
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	15794	45	637	235	158241	56
DİĞER AFETLER	1175	11309	8	85	2165	9237	3
ÇİĞ	731	4409	181	336	542	4384	2
ÇOKLU AFETLER	2024	17221	629	838	6478	12210	4
TASNİFEDİLMEMİŞLER	42	0	0	0	0	0	0
TOPLAM	29807	305211	4926	9533	34674	284996	100.00

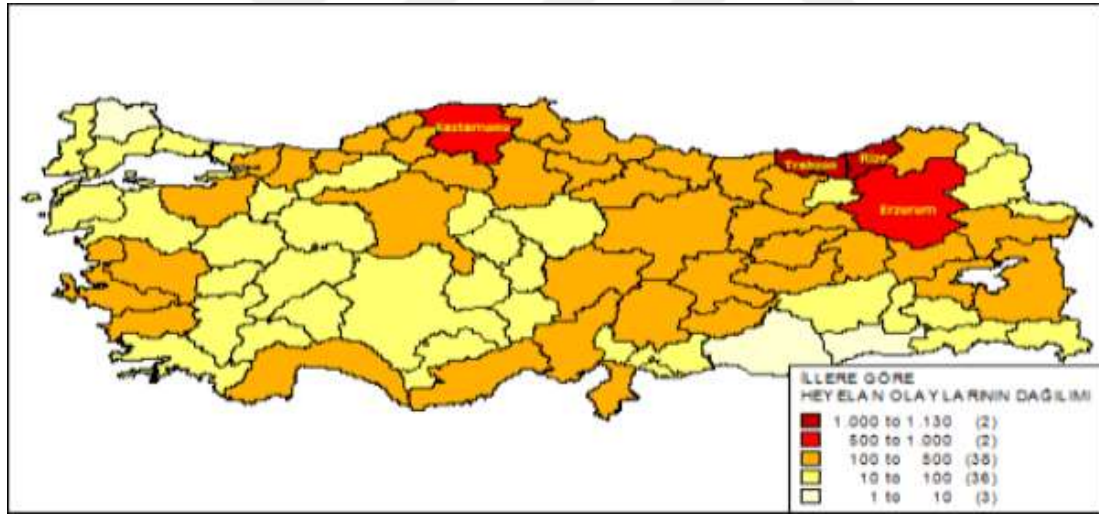


Şekil 2.1 Afet türlerinin dağılımı afet olay sayısı bazında (AFAD 2008)

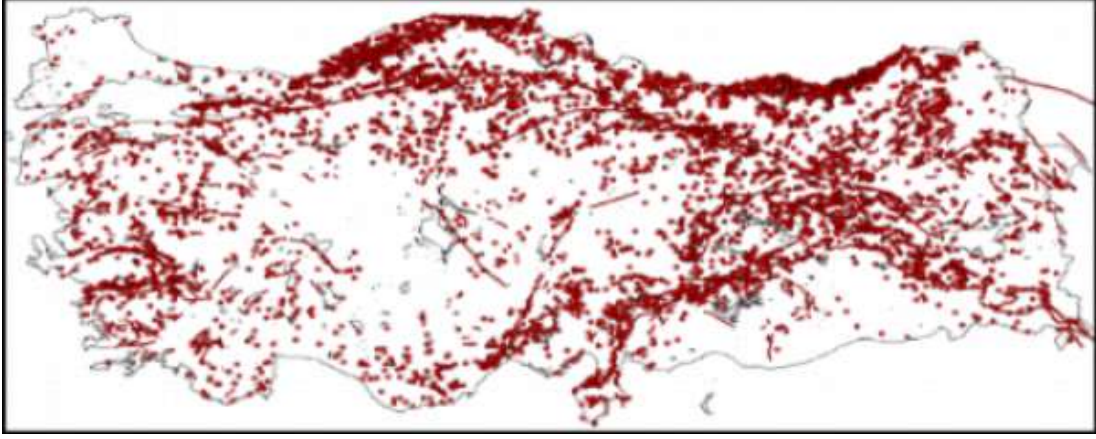
Türkiye’de heyelan riskinin en fazla olduğu bölgelerden Karadeniz Bölgesinde (Trabzon, Rize, Kastamonu, Karabük, Bartın, Zonguldak civarı) aktif fay zonları boyunca yoğunlaştığı görülmektedir.

Batı ve Orta Karadeniz’de litolojik olarak Kratese ve Eosen flişlerinin, Doğu Karadeniz’de ise Kratese ve Eosen Volkaniklerinin; heyelan oluşması yönünde etken olduğu bilinmektedir. Doğu Karadeniz’de daha çok Akma Şeklinde Heyelanlar görülürken, Batı ve Orta Karadeniz’de görülen heyelanların ise kayma şeklinde olduğu görülmüştür.

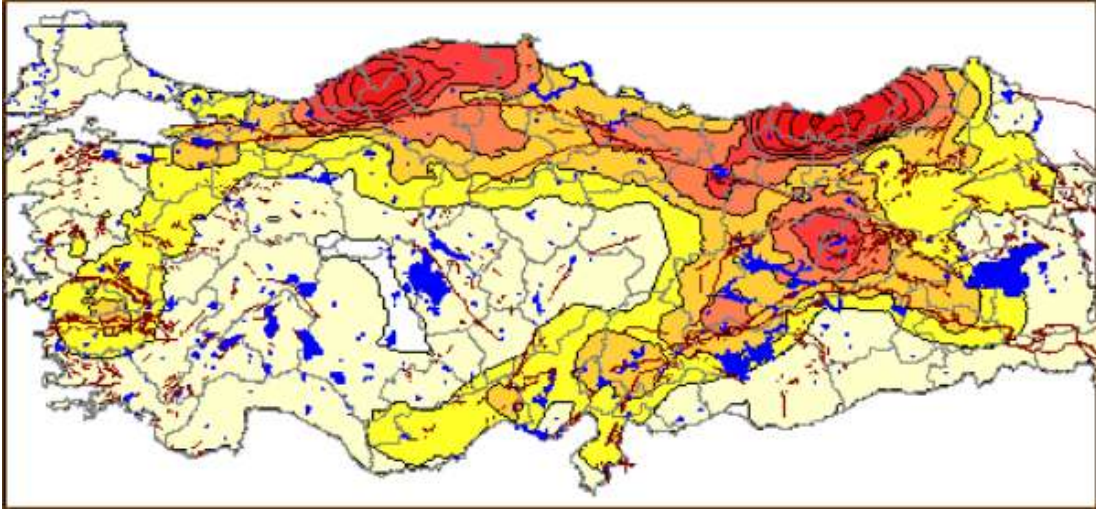
Türkiye Afet İşleri Genel Müdürlüğünden (2008), alınan verilere göre heyelanla yerleşimlerin; illere olay sayısı bakımından dağılımı Şekil 2.2. mekanlara göre dağılımı Şekil 2.3 ve heyelan yoğunluk haritası da Şekil 2.4.’de sunulmuştur. Bu şekiller vasıtasıyla ülkemizde meydana gelmiş heyelanların hangi bölgelerimizde ve nasıl bir topografik yapıda daha fazla görüldüğü anlaşılmaktadır.



Şekil 2.2 Heyelan olay sayısı bazında heyelanlardan etkilenen illerin dağılımı (Türkiye Afet İşleri Genel Müdürlüğünden 2008)

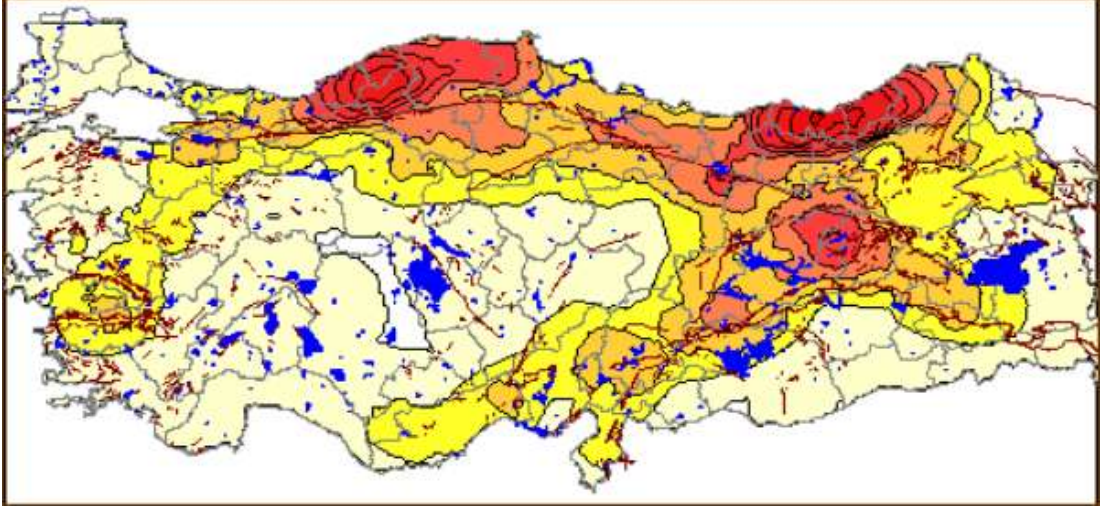


Şekil 2.3 Türkiye’de heyelanlı yerleşim alanlarının mekânsal dağılımı (AFAD 2008)



Şekil 2.4 Heyelan noktasal yoğunluk haritası (AFAD 2008)

Heyelan oluşumuna neden faktörlerden bir tanesi de depremlerdir. Heyelan meydana gelen yerleşkeler ile faylar ve fay kuşakları birlikte ele alındığında gözle görülür bir ilişkinin varlığı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.5 Aktif faylar ve heyelan noktasal yoğunluk haritası arasındaki ilişki (AFAD 2008).

BÖLÜM 3

GENEL BİLGİLER

Heyelanlar Türkiye’de depremler, su baskınları gibi doğal afetlerin içinde yer alırlar. Bu da bu afetin kütle hareketinden çok bir afet olduğunu bize göstermektedir. Kütlelerin hareketlenmesine sebep en büyük faktör yer çekimidir. Bu hareketin hızını azaltan yada artıran pekçok etken olay zinciri söz konusudur.

Ülkemizin sahip olduğu matematiksel konum neticesi iklim özellikleri, jeolojik yapısı sebebiyle büyük can ve mal kayıplarına neden olabilen doğal afetler görülebilmektedir. Ülkemizin %66 sı 1. Ve 2. Derece deprem kuşağı bölgesinde bulunmaktadır. Nüfusu milyonları bulan büyük kentlerimiz de dahil olmak üzere, nüfusun büyük bir bölümünün yaşamını sürdürdüğü ve sanayi tesislerinin de bulunduğu bu bölgelerde her an deprem ve dolayısıyla da kütle hareketinin olma olasılığı yüksektir (AFAD 2008).

Kütle hareketleri, meydana gelmesi durumunda çok ciddi can ve mal kaybına sebebiyet vermesi nedeniyle doğal afetler içinde önemli bir yere sahiptir. Bu olay yerleşim yerlerinde meydana gelirse bu durum o bölgede hem maddi olarak hem de barınma problemi olarak kendini göstereceği için o bölgenin sosyal hayatını da olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Heyelanı kısaca tarif etmemiz gerekir ise jeolojik, jeomorfolojik, meteorolojik olayların yanında insan faktörünün de dahil olması ile meydana gelen aktiviteler, yanlış arazi kullanımı, tahrip edilmiş bitki örtüsü durumlarının da etkisi ve bunun yanında da sismik olaylar ve sık ve şiddetli yağışların da etkisi ile doğal yada yapay şevlerin stabilitesini kaybetmesidir(Soetersand Van Westen 1996). Dünya genelinde heyelanların sebep olduğu ekonomik kayıp seviyesi 4 milyar US dolarına ulaşmıştır ve yine heyelanlar sebebiyle hayatını kaybeden insan sayısı yılda yaklaşık 1000 civarındadır (Alexander 1995;Singhroy 2005).

Dünyanın hiçbir yeri doğal afetler yönünden tam olarak güvenli olmadığı gibi, afetlerin etkilerinin sınırlandırılmasına yönelik çalışmalar da yetersiz kalmaktadır. Heyelan neticesiyle meydana gelen ölümlerin %97'si gelişmemiş ya da gelişmekte olan ülkelerde meydana gelmektedir. Dünya genelinde heyelan kaynaklı ölüm toplam ölüm oranının %1.5 olarak bilinmektedir (EMDAT 2003, Nadim et al. 2006). Bu değerler Türkiye verilerinde ise dünya verilerinin 10 katı fazladır.

Arazilerin yanlış kullanımı, kentsel yaşamda planlama ve yapılaşmadaki düzensizlikler, nüfusun daha çok tehlikeli bölgelere doğru kayması, denetimlerdeki yetersizlikler, mevzuatlarımızdaki eksiklik ve boşluklar, iklimsel değişikliklerin yoğun yaşanması, orman örtülerinin tahrip edilerek yok edilmesi ve bunun sonucu oluşan çölleşme Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi birbiriyle bağlantılı ve doğal afet olma riskini artıran faktörlerdir.



Şekil 3.1 Karadeniz bölgesinde bir alanın maruz kaldığı heyelanlar.

Bu sebeple şev stabilitesi İnşaat Mühendislerinin üzerinde çalıştıkları en önemli konulardan birtanesidir. Önceleri doğal oluşumlu stabilite ile ilgili çalışmalar yapılmış daha sonraları ise insan nüfus artışına bağlı barınma ihtiyaçlarından dolayı yapay oluşumlu şevlerin stabilitesiyle de ilgilenilmeye başlanmıştır. Bu alandaki çalışmalar daha çok stabiliteyi artırıcı önlemlerin alınması, dolgu ve yarma şevlerinin güvenliliğinin yanında daha ekonomik projelendirilmesi alanlarında yoğunlaşmıştır.

Bu incelemeler yapılırken arazi ve laboratuvar deneyleriyle birlikte yapılmalı, sonuç olarak da hem ekonomik hem de güvenli çözüm yolları ortaya konulmalıdır.

Çalışmamda Kozlu ilçesi Kılıç Mahallesiinde çok çetin geçen bol yağmur ve kar yağışı alan kış ayından sonra zeminde meydana gelen hareketler, bu hareketliliğin yüzeyde bulunan yerleşim yerleri kamu binaları ve yollara olan etkileri fotoğraf ve modellemeler ile gösterilerek meydana gelen zemin hareketleri incelenmiş ve ıslahına yönelik çözüm önerileri ortaya konulmaya çalışılmıştır.

3.1 KÜTLE HAREKETLERİ

Kütlesel hareketler en çok karşılaşılan doğal afetlerin başında gelirken, nüfus artışının sebep olduğu yeni yerleşim yerlerine duyulan ihtiyaç nedeniyle üzerinde daha fazla mesai harcanması gereken bir problem olmaya devam etmektedir. Zeminde meydana gelen hareketlerin başlama anı tam olarak bilinmeyen, zaman içinde gözle görülür bir şekilde gerçekleşen, meydana geldiği bölgelerde bulunan yerleşim yerleri ile bu zeminlerin üzerinde inşa edilmiş mühendislik yapılarını etkileyerek zarar verir ve nihayetinde yıkılarak kullanılamaz hale getirebilir.

Kütle hareketi olarak tarif ettiğimiz bu durum, zemin yada kayalarda gözle görülür seviyede aşağı yönlü hareket şeklinde gerçekleşir.

Kütle hareketi dediğimiz bu tanımyapılarda kırılmalara çatlamalara hatta yıkılmalara neden olan zemin yada kayaların gözle görülür seviyede aşağı yönlü hareketler olarak meydana gelebilir.

Ulusal ve uluslar arası literatürde ise heyelanlar kelime anlamı olarak farklı biçimlerde tanımlanmıştır. Skempton ve Hutchinson (1969), zemin veya kayanın hareket eden kütleinin sınırlarında kesme kırılması meydana gelmesi sonucu yamaç aşağı yönde kaymasını heyelan olarak tanımlar. Croizer (1986), sınırlı bir alan etkileyen yer kayması ile etki alanı tam tanımlanamayan ve yavaş gelişen krip arasındaki farka işaret etmiştir. Sassa (1985) “Yer Kayması” ile yatık eğimli yamaçlardaki yavaş hareketler tanımlanırken “Şev Kayması” ile dik yamaçlarda hızla gelişen hareketler tanımlanmaktadır.

Türkçe literatürde ise yamaçlarda veya insanlar tarafından şekillendirilen şevlerde çeşitli sebeplerle meydana gelen hareketler için “heyelan”, ”toprak kayması”, ”yer kayması”, ”şev kayması”, ”yamaç kayması” tanımları kullanılmaktadır.

Kütle hareketleri zemin, kaya veya bunların karışımlarından meydana gelebildiği gibi, yapay şevlerde de stabilite problemleri olarak karşımıza çıkabilmektedir.

Bunlar,

- Barajlar,
- Açık maden işletmeleri,
- Atık depoları,
- Yol dolgu ve yarmaları,
- Geçici desteksiz kazılardır.

Bugüne dek bilinen en büyük kütle hareketi Peru And Dağlarında 1962 yılındaHuascaran tepesinde meydana gelen kaya, toprak, buz ve su karışımından oluşan molozakmasıdır. Bu kütle hareketi sonucu 4000-5000 kişi ölmüştür. Bu tarihten 8 yıl sonra meydana gelen 7.7 büyüklüğündeki Peru depremi sonucunda aynı yerde, daha büyükmoloz akması afet şeklinde oluşmuş, akan malzeme büyük bir vadiyi kaplamış ve 18000 kişinin ölmesine neden olmuştur (Erguvanlı 1995).

Vajont Barajında (İtalya), 1963 yılında 250 milyon metreküp kaya ve toprak kayması meydana gelmiş, bu durum barajın dolmasına neden olmuş, bu dolma neticesinde barajda tutulan su baraj gövdesinden taşarak yerleşim yerlerine ulaşmıştır. Bu taşkın neticesinde baraja yakın yerleşimlerde oturan 2600 kişi hayatını kaybetmiştir (Erguvanlı 1995).

Heyelan sorunları ile karşı karşıya kalan İskandinav ülkeleri bilinen tarihleri içinde yaygın heyelanlara sahne olmuşlardır. Heyelanlar özellikle İsveç ve Norveç’te en önemli doğal afetleri oluştururlar. Norveç’in önemli bir kısmı sağlam anakaya üzerine okyanus içerisine çökelmiş killi siltlerle kaplıdır. Bu bölgeler buzul çağı sonunda buzulların erimesiyle denizden 500 m’ye varan yükseltilere ulaşmışlardır. Aşırı tuzlu suda çökelmiş siltli killer aradan geçen 10000 yıl içinde yağışların etkisiyle yıkanma süreci geçirmişler ve kilin dokusu aynı kaldığı halde kayma direnci aşırı düşük düzeylere inmiştir. Hassas kil olarak adlandırılan formasyonlarda eğimi oldukça düşük araziler günümüzde bazen küçük kazılar, bazen de

titreşimler sonucu birkaç milyon metre küpe ulaşan hacimlerde sıvılaşarak akmakta ve kaymaktadır (Önalp vd. 2004).

İsveç'te ise göl kökenli killer oldukça duraysızdır. Bu ülkede XX. Yüzyılın başında demiryolu çağının başlamasıyla yapılan kazılarla dikkat çekecek kadar çok sayıda kütlehareketi oluştuğunda devlet bu olayların anlaşılması için İsveç Geoteknik Enstitüsüyle (SGI) geniş bir araştırma programı örgütlemiştir. Bu araştırmaların sonucunda bugün de kullanılan ilk heyelan analiz yöntemi belirlemiştir (Fellenius ve İsveç Dilim) (Önalp vd. 2004).

Pinole yakınında Interstate 80 otoyolunun bir kesiminde oluşmuş şev yenilmesi, yolun bu kesiminde, iyi sıkıştırılmış killi zeminden oluşan dolgu üzerine gelmektedir. Kaymanın taç kısmı çok diktir. Bunun iki anlamı olabilir. Birincisi dolgu malzemesinin çok sağlam olmasıdır. Diğeri de yaklaşık 10 m yükseklikte ve düşeye yakın kayma yüzeyi üzerinde dolgunun duraylı kalamamasıdır. Kaymadaki zayıf halka, organik zemin içeren ve otoyol yapıldığında kazılıp atılmayan temel malzemesidir. Doğal zemin yüzeyinin eğimi, dolgunun güney tarafında yamaç yukarı ve sağ tarafında da yamaç aşağı yöndedir. Dolgu altında drenaj sistemi olmadığı için, yağışlar sırasında güney tarafta dolgu gerisinde biriken sular dolgu içinden kuzey tarafa sızmıştır. Kayma, 1969 kışındaki aşırı yağmurlu bir dönemden sonra meydana gelmiştir (Duncan vd. 2005).

Türkiye'de meydana gelen heyelanların Karadeniz, Doğu Anadolu ve Orta Anadolu'da daha sık rastlandığı görülmüştür. 1950-2008 yılları arasında meydana gelen afetler incelendiğinde bunlardan 13494 tanesinin heyelan olduğu görülmektedir ki bu sayılar sadece yerleşim alanlarını kapsamaktadır. Yerleşkelerin dışında meydana gelen olaylarla bu sayı aslında çok daha fazladır. 1900-2014 yılları arasında meydana gelmiş kayıt altına alınmış doğal afet türlerinin sayısı incelendiğinde heyelanın ilk sıraya oturduğu görülmektedir (AFAD 2014).

Bu tez kapsamında inceleme alanında yer aldığı Karadeniz bölgesinde dik ve engebeli arazi yapısı ile en fazla yağış alan bölge olması nedeniyle yamaç hareketleri görülmektedir. Karadeniz bölgesinde yağışlardan sonra zemin hareketleri meydana gelmekte, bu hareketler de can ve mal kayıplarını beraberinde getirmektedir. Bölgemizin topografik yapısının elverişsiz olması, dik yamaçların büyük alanlar kaplaması gibi gerçekleri bu bölgemizde yerleşim yeri belirlenirken daha fazla dikkat edilmektedir.

Türkiye’de meydana gelen birkaç büyük heyelana örnek verecek olursak;

1985 Batı Karadeniz Heyelanları: Zonguldak, Sinop ve Kastamonu’da etkili olmuştur.

23.06.1988 Çatak Heyelanı: Trabzon’un Maçka ilçesine bağlı Çatak bölgesinde meydana gelmiştir.46 vatandaşımızın ölmesine neden olmuştur.

21.07.1988 Rize Heyelanları: 3 vatandaşımız ölmüştür.

19/20.06.1990 Trabzon-Giresun-Gümüşhane Heyelanları: 65 vatandaşımız ölmüştür.

13.07.1995 Isparta-Senirkent Çamur Akması: 74 vatandaşımız ölmüştür.

20/21 Mayıs 1998 Batı Karadeniz Heyelanları: Karabük, Bartın, Zonguldak ve Bolu’da meydana gelmiştir.

07/08.08.1998 Trabzon-Besköy Heyelanı: 50 vatandaşımız hayatını kaybetmiştir.

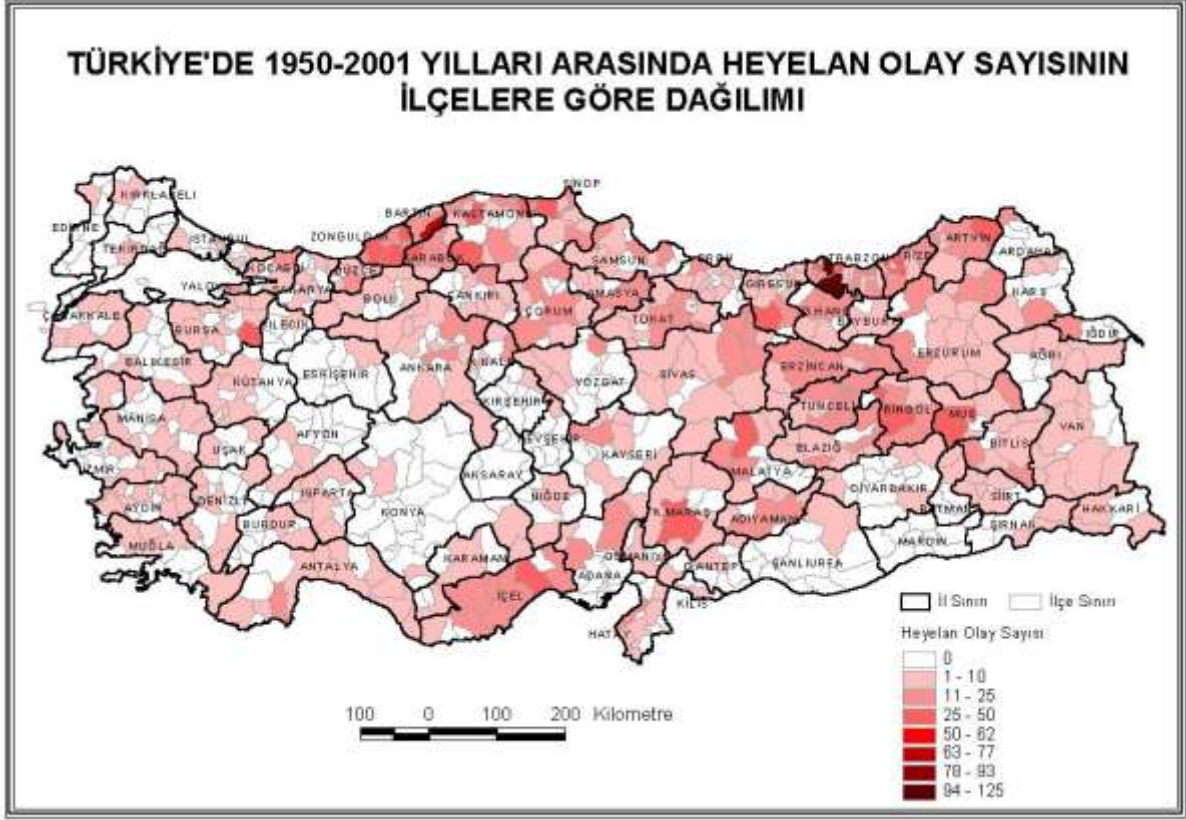
23/24.07.2002 Rize Heyelanları: Selamet köyünde 20 olmak üzere toplam 27 vatandaşımızın hayatını kaybetmiştir.

17.03.2005 Sivas Koyulhisar İlçesi Sugözü Köyü Kuyulu Heyelanı: 15 vatandaşımız hayatını kaybetmiştir (AFAD 2008).

1949 yılında Trabzon-Akçaabat arasında Sera vadisinde, Bazaltik-andezit, lav, tüf, aglomeralarda buna benzer şekilde heyelanlar, dağ kaymaları olmuş, sera vadisi kapanmış, 30-35 m. derinlikte; 125 m. genişlikte; 1.6 km uzunlukta büyük heyelan gölü oluşmuştur (Erguvanlı 1995).

Büyük kentlerde oluşan en önemli hareket, İzmir Kadife Kale bölgesinde halensürmekte olan 1500 ün üzerinde konutu etkileyen harekettir. Marmara Deniz kıyısında yer alan Küçük Çekmece – Şarköy kesiminde bu zamana kadar heyelan oluşmuş ve halen oluşmaktadır (Önalp vd. 2004).

1950-2001 AFAD verilerine göre heyelan olay sayısının ilçelere göre dağılımı görülmektedir (Şekil 3.2). Buna göre Türkiye’de; Heyelan olaylarının çoğunlukla meydana geldiği yerler Karadeniz ve Doğu Anadolu Bölgeleridir. Kaya düşmesi ve heyelan beraber değerlendirilecek olursa %44.02 oranı ile deprem kadar etkili olduğunu görürüz (Gökçe vd. 2006).



Şekil 3.2 Türkiye’deki heyelan sayısı (Gökçe vd. 2006)

3.2 KÜTLE HAREKETLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Heyelanlar konusunda araştırma yapılan ve değerlendirmelerde bulunulan en önemli konulardan bir tanesi de heyelanların türlerine göre sınıflandırılmasıdır. Bu konu aslen sayısal çözümler açısından da son derece önemlidir. Burada heyelanın ne tip bir toprak hareketi olduğu tanımlanır. Bir şev kaymasında aşağıda belirtilen husus ve faktörler dikkate alınmaktadır.

- Şev kaymasının morfolojisi(yamacın veya şevin morfoloji, kayma yüzeyinin biçimi, kayan kütleinin oluşturduğu yeni biçim)
- Hareketlerin meydana geliş şekli
- Hareketin hızı
- Harekete katılan kütleinin boyutu
- Kayan ana malzemenin cinsi
- Hareketin yaşı

Şev kaymalarını sınıflandıran çok çeşitli sınıflama sistemleri mevcuttur. Heyelanların sınıflandırılması yapılırken aşağıdaki parametreler dikkate alınmıştır (Erguvanlı 1995);

- Hareketin türü, miktarı ve hızı,
- Hareket eden malzemenin türü, dizilişi, yaşı
- Hareket eden kütleinin şekli,
- Su miktarı
- Hareket edenle alttaki arasındaki bağıntı,
- Hareketin nedenleri,
- Kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ)

Şev kaymalarını sınıflandıran çok çeşitli sınıflandırma sistemleri mevcuttur.

3.2.1 Hutchinson Heyelan Sınıflandırması

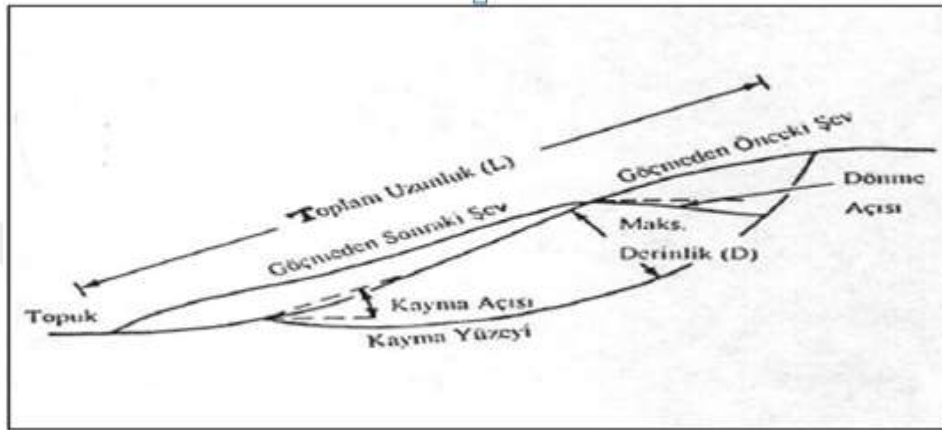
Geoteknik Mühendisliği bölümünde kullanılabilir bir sınıflama Hutchinson tarafından 1978’de yapılmıştır. Bu sınıflandırmada şevin kayma tarihçesi ve zeminin drenaj koşulları dikkate alınmaktadır. Hutchinson, heyelanları morfoloji, mekanizma, malzemenin tipi ve hareket sıklığına göre şöyle sınıflandırmıştır;

- Geriye sıçrama
- Krip
- Dağ yamacının akması
- Heyelanlar
 - Sınırlı yenileme
 - Dairesel yenileme
 - Düzlemsel yenileme
- Devrilmeler
- Düşmeler
- Kompleks kayma hareketleri

şeklindedir.

3.2.2 Skempton Heyelan Sınıflandırması

Skempton tarafından 1953 yılından yapılan sınıflamaya göre kayan kütlenin maksimum kalınlığının maksimum uzunluğuna oranına, yani derinlik (D)/uzunluk(L) oranına göre sınıflandırma yapılabilmektedir. Skempton tarafından geliştirilerek kullanılan parametreler Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Skempton Heyelan Sınıflandırması

Çizelge 3.1 Skempton D/L oranları İçin Heyelan Sınıflandırması

Şev Kayması Tipi	% D/L
Akma	0.5-3
Kayma	5-10
Dönel Kayma	15-30

3.2.3 Varnes Heyelan Sınıflandırması

İlk kez heyelan terimi yerine yamaç hareketi terimini kullanan Varnes (1978), yamaç hareketlerinin sınıflandırılmasında farklı yollar kullanılabileceğini, farklı kriterlere dikkat edilmesigerektiğini vurgulamıştır. Bu kriterleri ise şöyle sıralamıştır;

- Hareketin tipi
- Malzeme türü
- Hareketin hızı
- Yenilenen malzemenin ve yenilenen alanın geometrisi
- Yaş
- Sebepler

- Yer değiştiren kütlenin kopma derecesi
- Jeolojik yapı ile kayma geometrisi arasındaki ilişki
- Gelişme(oluşma) derecesi
- Tip örneğinin coğrafik konumu
- Etkinlik durumu

Varnes sınıflama ve tanıma için hareket tipinin ve malzemenin türünün önemli olduğu konusuna değinerek heyelanları sınıflandırırken hareketin tipine ve malzeme türü değerlerini kullanmıştır.

Çizelge 3.2 Varnes’e göre şev kayması sınıflandırması (Önalp vd. 2004)

Kayma Tipi	Malzeme Cinsi		
	Zemin		Kaya
	İnce Daneli	Kaba Daneli	
Düşme	Zemin Düşmesi	Yamaç Molozu Düşmesi	Kaya Düşmesi
Devrilme	Zemin Devrilmesi	Yamaç Molozu Devrilmesi	Kaya Devrilmesi
Dönel Kayma	Zemin Kayması	Yamaç Molozu Kayması	Kaya Kayması
Yatay Kayma	Zemin Kayması	Yamaç Molozu Kayması	Kaya Kayması
Yanal Yayılma	Zemin Yayılması	Yamaç Molozu Yayılması	Kaya Yayılması
Akma	Zemin Akması	Yamaç Molozu Akması	Kaya Akması
Karmaşık	Yukarıda belirtilen hareketlerin ikisinin veya daha fazlasının bir arada meydana gelmesi		

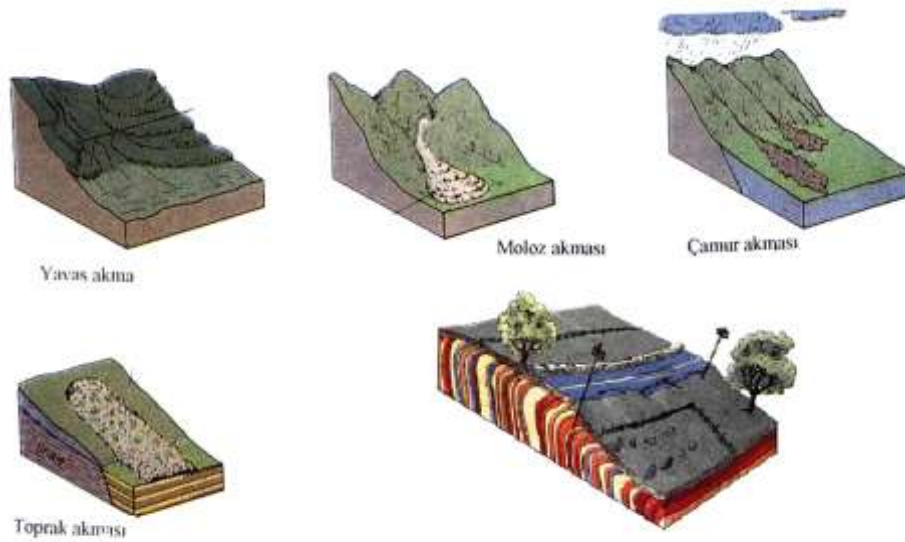
Varnes 1978 yılında bir heyelanın özelliklerini gösteren blok diyagramın hazırladıktan sonra 1990 yılında uluslar arası mühendislik jeolojisi birliği (IAEG) heyelan komisyonu, Varnes’in blok diyagra diyagramında kullanılmış olan terimleri aynen kullanarak yeni bir blok diyagramı hazırlamıştır. Varnes, hareket etmiş zeminlerde yaptığı gözlemler ile heyelan malzemesinin su içeriğini tanımlayabilmek için ilk kez Radbruch-Hall tarafından önerilen tanımlar üzerine aşağıdaki değişiklikleri yapmıştır.

- Kuru; gözle görülebilir nem yok
- Nemli; biraz su içeriyor fakat serbest su akışı yok. Malzeme katı yüksek plastik özelliği gösterir durumda ama akma göstermez
- Islak; yeterince su içermekte ve kısmen sıvı gibi davranır, içerisinde su akışı var veya sürekli su kütlelerine karşı destek verebilir.
- Çok ıslak; düşük eğimler altında sıvı şekilde akacak kadar su içerir.

ya da hızlı şeklinde tarif edilebilir (Tarhan 2002). Akma çeşitleri malzeme türlerine göre de sınıflandırılabilir (Şekil 3.5).

Yavaş Akma: Yamacın ya da şevin yüzeysel kısmının durmadan, lakin çok yavaş akması krip olarak adlandırılır. Burada hareket oldukça yavaştır. Bu hareketler sürekli yapılan gözlemlerle ve bununla birlikte aletsel ölçümlerle anlaşılabilir. Hareket hızı senede 2-3 cm kadar olabilir. Bu hareket, bloktan silt ve kile kadar her çaptaki malzemede görülebilir.

Hızlı Akma: Yukarıda açıklanan krip olayının olduğu toprak ve kayalarda su miktarı oldukça azdır. Böylesi zeminlerde suyun artması, devamlı darbe titreşim ya da boşluk basıncının çoğalması zeminin hareket hızını artırır. Bu da birikmiş olan malzemenin büyük bir hızla sürüklenmesine, hatta adeta akmasına neden olur. Bu tür akmalarda, su miktarı kütlenin iç direnci için gerekli olan su miktarından oldukça fazladır (Tarhan 2002).

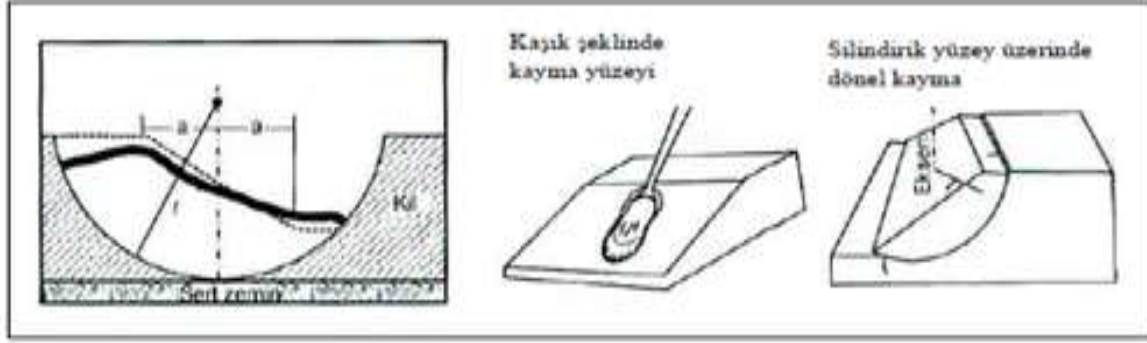


Şekil 3.5 Bazı akma türleri (Ulusay 2001).

3.2.5.3 Dönel Kayma Tipi Heyelan

Heyelan olaylarının çok büyük bir kısmını dönel kaymalarla oluşan heyelanlar oluşturur. Bu şekilde meydana gelen kaymalar dairesel yüzeyler boyunca meydana gelir ve hareket sadece bölgesel olarak kayma yüzeyleri boyunca meydana gelir ve bu da genelde yukarı doğru iç bükey olarak gerçekleşir. Kayma hareketlerinin pek çoğunda kayma yüzeyinin şekli kaşığa benzer. Bu harekete bağlı olarak kayan kütle geriye doğru yatık bir konumda olduğu için

dönel kayma meydana malzemenin üst kısımlarında su yüzeyin suları birikme meydana getirmekte, bu da heyelanın meydana geldiği malzemenin sürekli yaş kalmasını sağlamaktadır. Dönel kaymalar toprak zeminlerin yanı sıra akarsu kanalları, dolgular ve ayrılmış kayalarda da meydana gelebilir.



Şekil 3.6 Killi, siltli vb.zeminlerde dönel kayma (Ulusay 2001)

3.2.5.4 Blok Kayma Tipi Heyelan

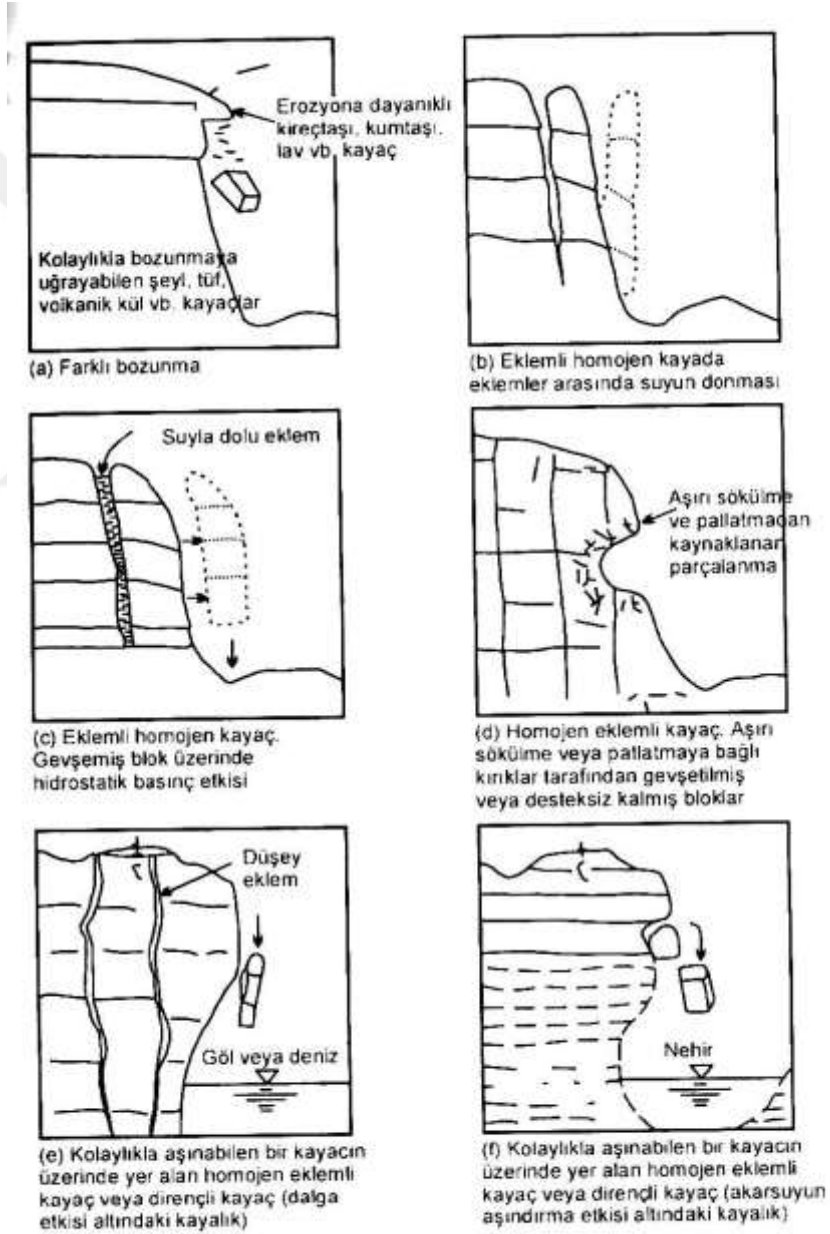
Hareket daha çok bir bloğun dışa ve aşağı yönlü düzlemsel bir kayma yüzeyi boyunca kayması ile meydana gelir. Blok, doğal arazi yüzeyinde bile kayarak uzaklaşabilir. Hareket eden kısım malzemeleri birçok yarı bağımsız blok içerir ya da büyük ölçüde deformasyona maruz kalmıştır. Hareketler yarıklar, tabakalaşma düzlemleri, tabakalaşmış bloklar arası kesme kuvvetlerindeki değişimler, çatlaklar ve malzemenin üzerinde bulunduğu sağlam ana kaya ile üzerindeki taş döküntüler arasındaki temasın değişmesi gibi zayıf yüzeylerin yapısal özelliklerinin takibi ile kontrol edilebilir.

Blokların yer değiştirmesi, maksimum boyutlu bloklar arasındaki yer değişmesine yakın ya da ondan daha küçük de olabilir. Ve bu bütün kütlenin ağırlık merkezinin yer değişiminden çok daha küçüktür. Hareket, orijinal kayma yüzeyinin ötesinde de olabilir ve blokların birçok kısmı doğal zemin üzerinde kayabilir.

3.2.5.5 Düşme

Şekil 3.7’de görebileceğimiz gibi düşey ya da düşeye yakın yamaçtan makaslama hareketi olmadan kopan parça ve blokların hareketleri düşmeye örnek teşkil eder (Ulusay 2001). Deniz, göl kenarı, dik kazı şevleri, dik yamaçlar, mağara tavanları, sivri dağ dorukları, deniz

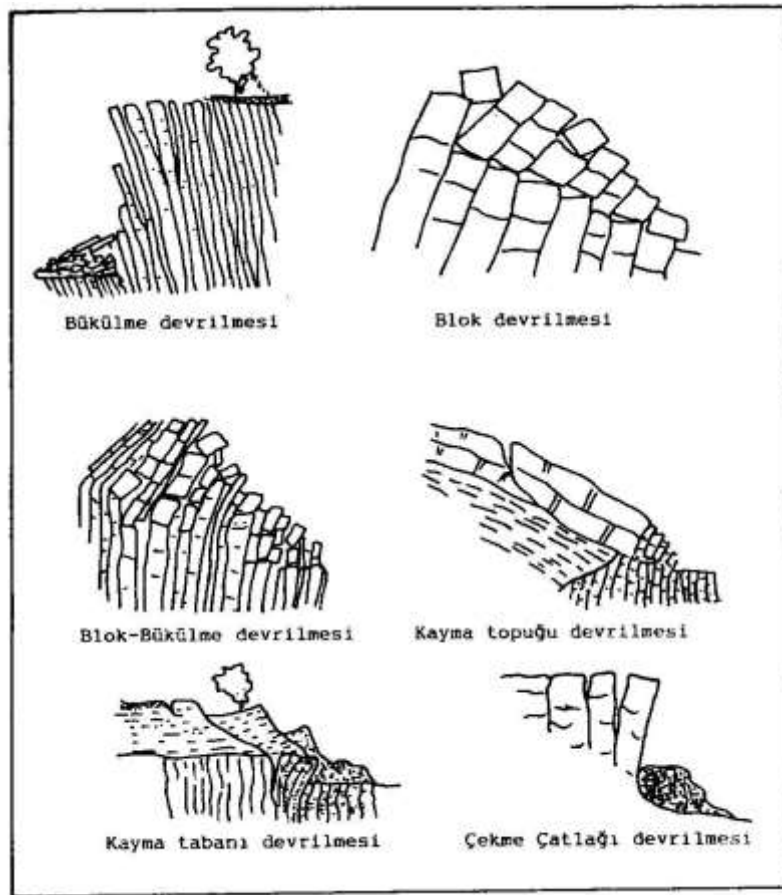
kenarındaki dik falezler, özellikle süreksizlik yüzey ile sınırlanmış münferit blokların değişik boyda ve türde kaya veya zemin parçalarının yer çekimi etkisi ile aşağıya doğru hareket ederek düşmesi olayıdır. Nehir aşındırmaları sonucu oluşan erozyon, kazılar vb. sebeplerle şevlerin topuğunun oyulması nedeniyle zemin kütlelerinin askıda kalması, çatlaklarda biriken suların donması sonucu oluşan etki kuvvetleri sonucu düşme hareketi meydana gelmesi muhtemeldir (Slope 2007). Düşen malzemenin cinsine göre “Kaya Düşmesi, Moloz Düşmesi, Zemin (Toprak) Düşmesi” gibi sınıflamalar yapılabilir. Şekil 3.7’de düşme hareketleri görülmektedir.



Şekil 3.7 Kaya kütlelerinde kaya düşmelerine neden olan süreçler (Ulusay 2001).

3.2.5.6 Devrilme

Mevcut şartlar altında birkaya kütlesinin ya da bir zemin yüzeyinin yamaç dışına, kendi ağırlık merkezinin dışında bir yerden ya da eksenini boyunca öne doğru dönmesidir. Bu yamaç içine eğimli olan süreksizliklerde görülen bir denge kaybı olarak da tarif edilebilir. Devrilme olayının sebebi blokların ağırlık vektörünün taban dışına düşmesi ve yanal sürtünme direncine yenilmesidir. Ayrıca, blokların genişlik/yükseklik oranı devrilme üzerinde etkili sebeplerdendir. Doğada çeşitli devrilme tipleri saptanmıştır. Bükülme Devrilmesi, Blok Devrilmesi veya her ikisinin karışımı olan bir devrilme çeşidi oluşabilir. Şekil 3.8.'de çeşitli devrilme tipleri verilmektedir (Tarhan 2002).



Şekil 3.8 Doğada gözlenen devrilme türleri (Tarhan 2002).

3.3 HEYELANIN BÖLÜMLERİ VE ŞEKLİNE GÖRE ADLANDIRMA

Bir heyelan meydana gelirken en üst kısımlar aşağıya doğru hareket ederki buna Kayma zonu denir, alt kısımlarda ise kabarmalar, çökmeler ya da akmalar meydana gelir ki biz buna da

Birikme Zonu diyoruz. Heyelanın oluşturduğu farklı karakteristik kısımlar söz konusudur (Şekil 3.9). Bunlar;

Taç: Heyelanın en üst kısmıdır. Ana aynanın zeminde hareketsiz kalmış kısmı olarak da isimlendirilebilir.

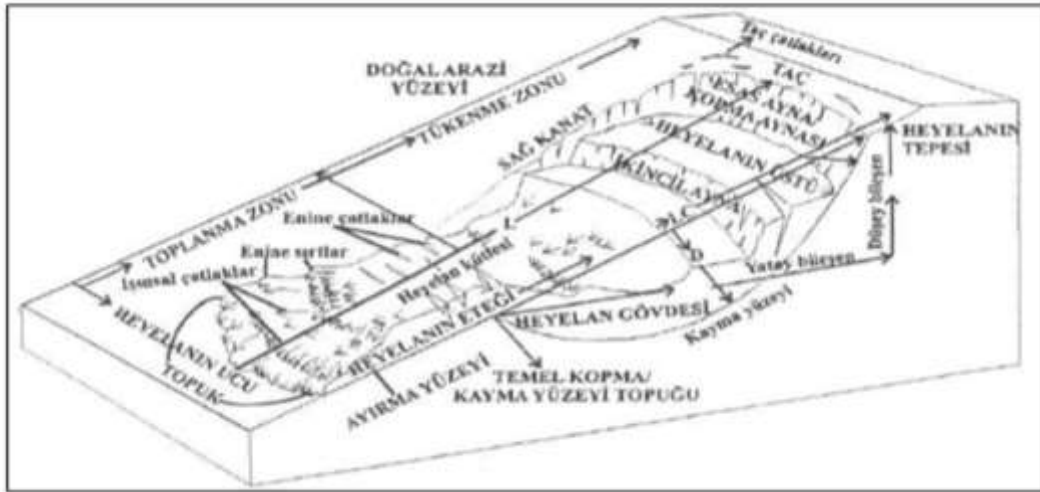
Ana (esas) ayna: Kayan zemin kütlelerinin dik veya dike yakın yüzeyidir.

Tepe: Hareket eden kütle ile ana aynanın kesiştiği yerin en üst noktasıdır.

Ana kütle: Kayma yüzeyi boyunca hareket eden malzemedir.

Çapraz (Enine) Çatlaklar: Heyelan topuğunun üst kısmında meydana gelen çatlaklardır. Genellikle kabarma bölgesinde meydana gelir. Kabarma bölgesine karşılık çökme bölgelerinin karakteristikleri ise heyelan gölcükleridir.

Topuk: Hareket eden kütleinin en son kısmıdır. Heyelan sınıflamalarında malzemenin toplandığı yer olarak tanımlansa da, topuk genellikle dairesel kaymalarda kullanılan bir terimdir. Heyelanlarda üst kısımlar aşağı doğru kayarken alt kısımlarda çökme, kabarma ve akma bölgeleri gözlemlenebilir. Heyelanların orta kısımlarında genellikle çökmeler meydana gelirken alt kısımlarında kabarmalar meydana gelir (Tunç 2002).

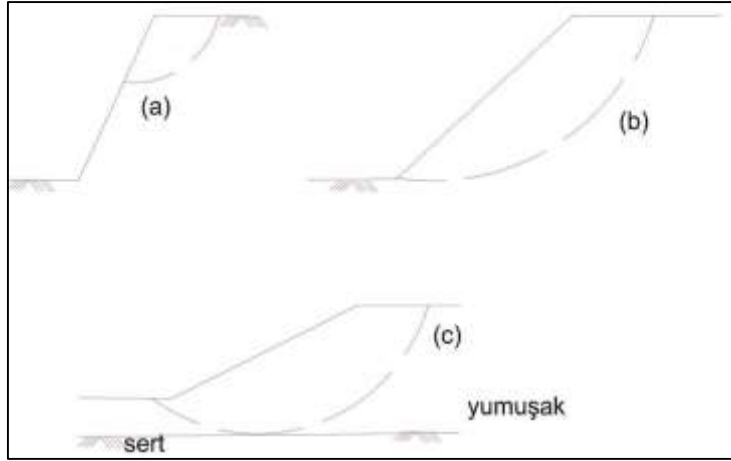


Şekil 3.9 Tipik heyelan kesiti (Ulusay 2001)

Şev dairesi; kayma yüzeyinin topuktan yukarıda oluşmasıdır (Şekil 3.10a).

Topuk dairesi; makaslama gerilmelerinin topukta yoğunlaşması sonucu kaymanın topuktan geçtiği kayma dairesidir (Şekil 3.10b).

Taban Dairesi; kayma yüzeyinin temeli oluşturan zemindeki sağlam katmana teğet geçtiğiduruma denir (Şekil 3.10c).



Şekil 3.10 Kayma yüzeylerinin konumu (Ulusay 2001)

3.3.1 Ötelenmeli (Düzlemsel) Kayma

Bu tür kaymalar, düz veya çok az ondülasyonlu bir yüzey boyunca gelişir ve zeminin kayma yüzeyine paralel şekilde öne doğru meydana gelir. Hareket eden zemin dairesel kaymalara nazaran daha az deformasyona uğrar. Bu tür zeminler kayaç veya toprak zemin malzemesine oranla daha düşük dayanıma sahip oldukları için yüzeyleri (tabakalanma, fay, makaslama zonu vb.) boyunca oluşacak olan süreksiz hareketlerdenetimli duraysızlık olarak tanımlanır. türleri aşağıda verilmiştir (Tunç 2002).

3.3.2 Düzlemsel Kayma

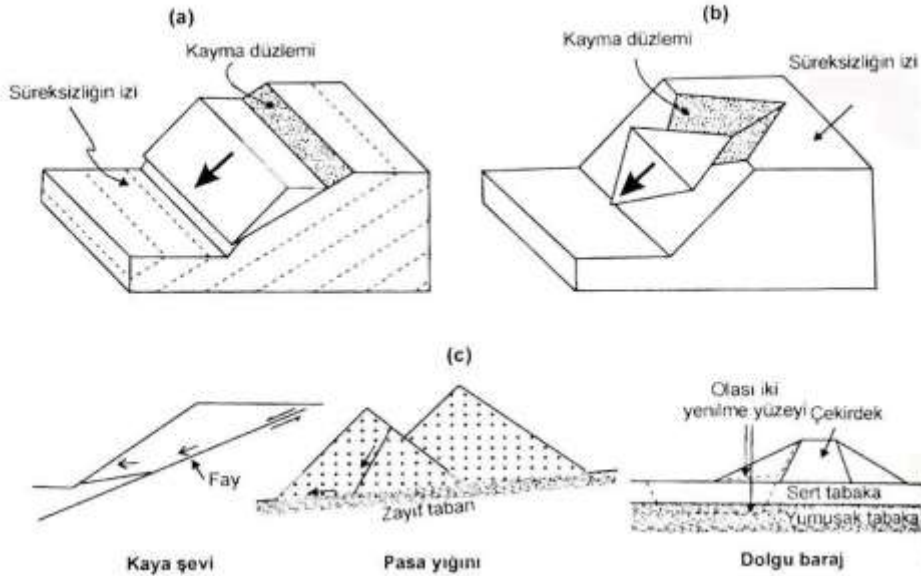
Eğimin zemin eğiminden küçük olduğu düşük dayanıma sahip zayıf bir düzlem üzerindeki zeminin kazı boşluğuna hareketidir (Şekil 3.11a).

3.3.3 Kama Türü Kayma

Bu tür hareket kesişen iki süreksizliğin oluşturduğu tetrahedral bir kama bloğunun, eğimi zemin eğiminden daha yatık olan kesişme hattı boyunca öne doğru hareket etmesi sonucu meydana gelir (Şekil 3.11b).

3.3.4 İki veya Çok Yüzeyli Kayma

Bu kayma türü, daha çok birden fazla süreksiz veya zayıf yüzey üzerinde olur. Fay ya da tabakalanmış zeminlerin birleşmesi sonucu doğal ortamlarda veya zayıf zeminler üzerinde yer alan pasa yığınlarının ya da dolguların hareket etmesiyle görebileceğimiz türden bir kayma örneğini teşkil eder (Şekil 3.11c).



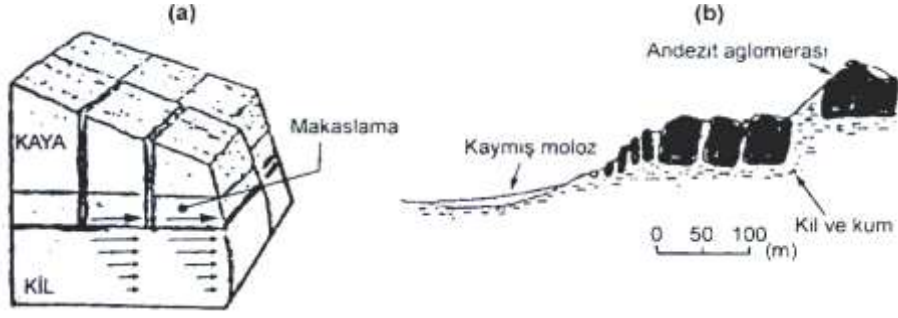
Şekil 3.11 (a.) Düzlemsel kaymalar, (b.) Kama tipi kaymalar ve (c.) Farklı ortamlarda gelişebilen çok yüzeyli kaymalar (Ulusay 2001)

3.3.5 Yanal Yayılma

Duraysızlığı meydana getiren, makaslama ve çekme çatlaklarının birlikte oluşturdukları bir yanal genişleme hareketidir. Yanal yayılma iki çeşittir;

Yanal kaya yayılması; zemin yumuşak bir malzemenin üzerinde bulunan daha sert bir malzemenin oluşur. Yumuşak malzeme plastik bir davranış sergiler ve akma şeklindeki hareket eder. Altındaki sert malzeme de bloklara ayrılır ve plastik malzeme tarafından taşınır (Şekil 3.12a).

Yanal zemin yayılması; killi, zayıf bir malzeme içinde yüzer şekilde durmakta olan sert, büyük kaya bloklarının bu killi malzeme ile birlikte yavaş yavaş hareket etmesi olarak tanımlanır. Yıllık hareket hızı 10-25 mm arasındadır. Aşırı miktardaki gözenek suyu basıncı, zemin hareketine önemli faktördür (Ulusay 2001).



Şekil 3.12 (a.)Yanal kaya yayılması ve (b.)yanal zemin yayılması (Ulusay 2001).

3.3.6 Karmaşık Hareketler

Adından da anlaşılacağı üzere birden fazla türde hareketin bir arada olduğu olaylar dizisi karmaşık hareketler olarak isimlendirilmektedir. Mesela devrilme şeklinde başlayan hareket türü kaya düşmesine, daha sonra ise kaya akmasına, kaya kayması da kaya düşmesine dönüşüyorsa bu karmaşık hareketlere örnek olarak gösterilebilir.

3.4 YAMAÇ STABİLİTESİ PROBLEMLERİ

Zeminlerde denge olayı, daha çok o zemineetki eden gerilmelerde meydana gelen değişimlerin sonucu bozulur. Bu durum gerilmelerde artış şeklinde meydana gelirken bunun yanında ortamın direncinin azalması dengenin bozulmasına neden olmaktadır. Zeminlerin dengesinde meydana gelen bu değişimlerin bir kısmı zemine ait özelliklerden meydana gelirken bir kısmı ise dışarıdan müdahaleler sonucunda oluşmaktadır. Yapılan araştırmalara göre zemin stabilitesini en fazla etkileyen faktörün su olduğu görülmüştür. Bu durumu örnekleyecek olursak, yağışlardan sonra meydana gelen heyelan sayısı diğer nedenlerden kaynaklanana oranla çok daha fazladır (Önalp 1983). Heyelanlar doğal ya da yapay faktörlerin etkisi ile meydana gelebilirler. Olayların meydana geldiği bölgenin jeolojik geçmişi ve insan faktörü sonucu bölgede meydana gelen değişiklikler zeminlerin dayanımının bozulmasına neden olur. Ayrıca deprem de zeminlerin stabilitesini bozarak kaymalara neden olmaktadır. Zemin stabilitesine etki eden en önemli faktörlerden bir diğeri de yerçekiminin etkisidir. Heyelana uğrayan zeminler diğer sebeplerin de yardımıyla yerçekimi kuvvetinin etkisi altında hareket ederler. Ülkemiz karayolları üzerinde meydana gelen heyelan hareketleri üzerinde yapılan araştırmalarda, heyelana neden olan en önemli faktörün su etkisi (YASS yüksekliği) olduğu belirlenmiştir. YASS etkisinden hemen sonra %37 ile ayrışma, %28 ile dik

yamaç problemleri, %23 ile zemin koşulları ve %12 ile diğer nedenler sıralanmaktadır (Selçuk vd. 2005).

Heyelana neden dört ana faktör şunlardır:

- Zeminin eğimi (Topoğrafya),
- Yağış, (Yoğun yağış, Ani kar erimesi, Uzun süreli yağış)
- Tekrar aktivite kazanabilecek eski heyelan kütlelerinin varlığı
- Ana kaya ve onun üzerindeki konsolide olmamış birimlerin litolojik özellikleri (Tunç 2002).

Zemindeki kütle hareketleri sebepleri irdelenirken buna sebep olan ya da olabilecek kesme direnci ile kesme gerilmesinin göz ardı edilmeden mukayese edilmesi gerekir. Stabilitenin sağlanabilmesi için kesme direncinin kesme gerilmesinden büyük olmalıdır. Stabilitate bu yüzden iki yönüyle incelenmelidir.

- Kesme dayanımındaki azalma,
- Kesme gerilmesindeki artış (TSE 8853 1991).

Çizelge 3.3 Kütle hareketlerini etkileyen nedenler (TSE 8853 1991).

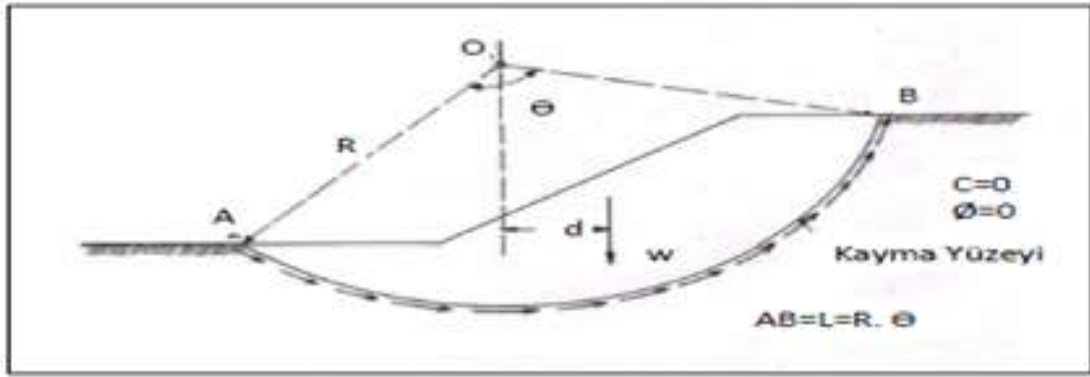
I-Gerilme Artışı	II-Dirençte Azalma
1.Zemin üstünde yük artışı	1.Aşınma, yıpranma
2.Topuğa yakın bölgeden malzeme kaybı	2.Sürekli yüzeylerinde su basıncı
3.Deprem ve diğer titreşim ivmeleri	3.Kuru ortamda ani ıslanma ve yapının bozulması
4.Boşluk veya çatlak suyu basınçlarında artış	4.Zaman ve hareket sonucu dirençte maksimumdan kalıcıya düşme
5.Çekme çatlaklarına su dolması	5.Killi matrisin şişmesi
6.Giderek kırılma olayı	6.Çatlak ve boşluklarda bulunan buz mercceklerinin erimesi
7.Zemin dışındaki su düzeyinde düşme	7. Çimentolayıcı malzemenin yıkanması

Zemin hareketine neden olan kütle yenilmelerini tek bir nedene bağlamaya çalışırsak doğru sonuçlar elde edemeyebiliriz. Bunun yerine arazide bol miktarda etütler yapılmalı çıkan sonuçlar gözden geçirilmeli ve sonuca bağlanmalıdır. Gerçek nedenin ortaya çıkarılması zeminlerin onarılarak iyileştirilmesi aşamasında doğru işler yapılmasını sağlayacaktır. Yeni zeminler projelendirileceği vakit, işletme aşamasına gelindiğinde sorunlarla karşılaşmak istenmiyorsa etüt sayısını artırmalı ve gözlem yapmalıyız.

İklim-çevre koşulları ve ana kayacın özelliklerine bağlı olarak oluşma hızı değişen reziduel zeminler heyelan açısından önemli sorunlar oluşturmaktadır. Türkiye’de bazı bölgelerde meydana gelen zemin hareketlerinin bu tür zeminlerde etkin olduğu görülmekte, bitki örtüsünün azlığı çoğunlukla sorunu daha da büyötmektedir. Reziduel zeminin olduğu bölgelerde reziduel zemin üstte ayrıışmış kayaç ise altta (özellikle heyelan oluşumuna neden olan bölge) ve en altta ana kayaç bulunur (Ünsal 2005).

3.5 HEYELAN OLUŞUM NEDENLERİ

Her zeminin bünyesinde mutlaka bir kayma gerilesi mevcuttur. Bir yüzeyde bulunan kayma gerilmeleri toplamı yine o yüzeydeki mevcut kayma mukavemet değerlerini aştığı vakit kayma hareketi başlar. Kaymaya neden olan gerilmelerin artması ya da direnç gösteren kayma mukavemetinin azalmasıdır.



Şekil 3.13 Heyelan kayma yüzeyinde gerilmelerin durumu (Selçuk vd. 2005).

Heyelanların kayma gerilmelerinin artmasına neden olan sebepler şöyle sıralanabilir;

- Topuktaki yükün veya desteğin kalkması
 - Erozyon
 - Şevin dikleşmesi
 - Topukta kazı
- Sürşarj yükünün (üst yük) artması
 - Şev üstüne yük konması (malzeme, yapı inşası vs.)
 - Yağış(kar) yükleri
 - Volkanik aktivite ile malzemenin şev üstüne birikmesi
 - Tarım amaçlı yüklemeler, sulama

- Ötelenmeden veya titreşimden dolayı gerilmelerin artması
 - Deprem(kum ve killerde danelerin dönmesi, yer değiştirmesi)
 - Patlama
 - Kazık çakma
 - Ağır taşıt trafiği
- Yükleme veya Devrilme (Dönme)
 - Tektonik kuvvetler
 - Volkanik hareketler
 - Buzul kuvvetler

Heyelanlarda kayma mukavemetini azaltan sebepler şunlardır;

- Suya doygunluk (Aşırı yağışlar ya da sel baskınları, akarsu taşkınları)
- Zeminin organik olması
- Kil kökenli kayaların kimyasal ayrışması
- Hassas zeminler
- Fay, fisür, tabakalanma yüzeyleri, ezilme zonlarının varlığı
- Su etkisi ile iyon değişimi ve fiziksel yapı değişimi
- Donma-Çözülme (süreksizliklerde açılma)
- Olumsuz geçirimsizlik (Üstte geçirimli altta geçirimsiz)
- Olumsuz sıkılık (Plastik malzeme üzerinde sıkı sert malzeme)
- Su seviyesinde ani düşüş (danelerin yer değiştirmesi)
- Tektonik veya volkanik yükselme (şev dikleşmesi)
- Aşırı yağış, eriyebilen bağlayıcı maddelerin yıkanması (ince tanelerin yıkanması)
- Hızlı kar-buz erimesi (hidrostatik basınç artışı)
- Uzun süreli yağış (danelerin üzerinde basınç artışı)
- Ani su seviyesi düşüşleri-yanal destek kayıpları
- Tesisat, havuz, kanalizasyon vb. yapıların su sızıntıları
- Yapraklaşmış ve şiştoz metamorfik kayalarda kazı dışına doğru yapraklanmanın yanı sıra mika ve serpantin yoğunlaşması
- Yeraltı su seviyesinin yükselmesi
- Geçirimli tabaka altındaki geçirimsiz tabakaya su sızıntısı

- Boşluk suyu basıncının artışı (titreşim vb.ile)
- Birikinti su gölleri (hem sürşaj hemde mukavemet yönüyle)
- Bitki örtüsünün kalkması yada örselenmesi ile yapısal bozulmaya uğrama
- Konsolide olamamış malzemelerin düşük kayma dayanımına sahip olması
- Sedimanter kayalarda olumsuz yönde tabakalaşma
- Geçirimli tabakaya doğru borulanmanın neden olduğu hidrostatik basınç ve boşluk suyu basıncı artışı

Yeraltı su seviyesinde, yağış veya kar erimesi gibi sebeplerden ötürü artış olacaktır. Zeminde meydana gelen bu su miktarındaki artışlar kohezyonsuz zeminlerde sürtünme direncinin azalmasına, kohezyonlu zeminlerde meydana gelecek muhtemel şişmelerden dolayı ilave gerilmelerin oluşmasına ve efektif kohezyonun azalmasına ayrıca yeraltı suyunun meydana getireceği yatay toprak basıncından dolayı kaymaya çalışan kuvvetlerde artış meydana getirecektir. Bunun doğal bir sonucu olarak da elbette zeminin stabilitesinde bozulma meydana gelecektir (Tunç 2002).

Sonbahar ve kış aylarında şiddetli yağışların meydana geldiği bölgelerde yeraltı su seviyelerinde yükselmelerin olabileceği ve bunun sonucu zeminlerin boşluk suyu basınç oranlarında büyük değişimler olabileceğini daima göz önünde bulundurmak gerekir. Ayrıca, çamurtaşı gibi içeriğinde kil bulunan zeminler, şiddetli yağışlardan sonra kuruyarak bünyesindeki fisürleşme (ince çatlaklar) meydana getirecek ve şiddetli yağışlar sonrasında ise zemin stabilitesini tamamen kaybederek göçmelere neden olacaktır. Ayrıca, çamurtaşında gözlenen ayrışma yani “Ayrışma derecesi” özellikle kohezyon “c” ve içsel sürtünme açısı “ ϕ ” olmak üzere azalarak zeminin stabilitesini olumsuz yönde etkiler (Arioğlu vd. 2005).

Kar ve yağmur sularının yeraltı su seviyesinde artışlara neden olması zeminin büyük ölçüde doymuş hale gelmesine ve dolayısıyla boşluk suyu basıncında artmaya, bu artış da içsel sürtünmede azalmalara neden olacağından büyük heyelanlar şiddetli yağışlardan sonra oluşur. Yağışsız aylarda çok daha az olmaktadır. Ayrıca su, zeminin birim hacim ağırlığında ve ince daneli kum zeminlerde kohezyonu sağlayan yüzeysel gerilimlerde azalmalara neden olur. Su bazı durumlarda da yağlayıcı etki yaparak, ortamın kayma direncinde azalmalara neden olur. İçsel sürtünme açısının da düşmesine neden olur. Su, bazen zeminin içindeki kayalara nüfuz ettiğinde kimyasal olarak değişmelere, ayrışmalara ve kütlenin direncinde azalmalara neden olur.

Yeraltı suları, zemin hareketlerine çeşitli yollarla etki eder. Mesela önce boşlukları doldurur, boşluk suyu basıncı oluşur. Sıcaklıkta meydana gelen değişimler, zeminlerde donmalara yada çözülmelere neden olacağından erozyon ve gerilme değişikliklerine sebep olur. Bitkiler suların zemin içerisinden uzaklaştırılmasına yardımcı olmakta, yüzeysel akış hızını azaltmaktadır. Buda zemin hareketinde erozyon oluşmasının önüne geçmektedir. Bu değişimler zeminde gerilme değişikliğine neden olduğu için, zemin yüzeyinde çatlamlar oluşmakta ve buradan sızan sular zeminin direncini zayıflatarak harekete geçmesine neden olmaktadır (Erguvanlı 1995). Tanelerin biçimleri, kayaların porozitesi, boşluk oranları, özgül ağırlıkları gibi fiziksel özellikleri, içsel sürtünme açısı, sıkışabilirlik, basınç direnci gibi mekanik özellikleri üzerinde etkilidir. Bunu örneklendirecek olursak tanelerin köşeli olması içsel sürtünme açısını, sıkışabilirliğini ve boşluk oranını artırırken buna karşın zeminin basınç direncini azaltmaktadır (Tarhan 2002).

Heyelan olan bölgelerde zemin üzerine herhangi bir şekilde ilave bir yük konulması gerilme artışına sebebiyet vermekte, bunun yanında killi zeminlerde ise boşluk suyu basıncını artırmaktadır. Bu yüklemeler sonucu daha öncesinde dengede olan zemin kritik bir stabilite düzeyine gelebilmektedir. Titreşimler zeminde ilave gerilmeler oluşmasını sağlayarak zeminin dengesini etkilemektedir. Bu sebeple depremler zeminin, kohezyon ve içsel sürtünme açısında azalmalara neden olarak zeminin harekete geçmesinde tetikleyici rol alabilmektedir.

3.6 HEYELANLARIN ÖNLENMESİ İÇİN YAPILMASI GEREKENLER

Yapılar henüz proje aşamasında iken zemin koşulları, yapım ve proje kriterleri açısından teknik ve ekonomik imkânlar da göz önüne alınarak heyelan riski bulunan bölgelerden daha uzak bir yerde projelendirilmesi alınabilecek ilk önlemdir. Kesinleşen proje aşamasından sonra zemin üzerinde veya yakınlarında meydana gelen tespit edilmiş heyelanlar titizlikle incelenerek yapılacak yapıya etkisi irdelenmelidir. Eğimli arazilerde projelendirme aşamasında tespit edilemeyen heyelan riskine karşı yapım aşamasında dikkatli olunmalıdır. Kısa vadede heyelanın hızını yavaşlatmak ya da heyelan hareketinin büyümesini önlemek için acil alınması gerekenler şu şekilde sıralanabilir;

- Ripaj: Diğer önlemlerle maliyet karşılaştırması yapılarak karar verilmesi gereken ilk önlem heyelan alanından uzaklaşmaktır.

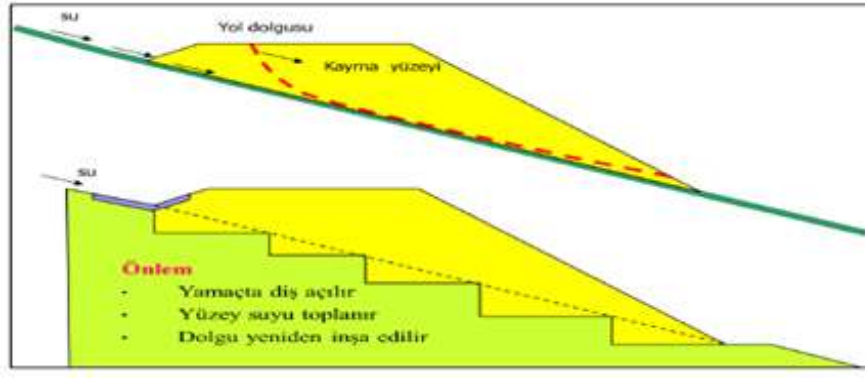
- Kazı: Hareket eden zeminin üst kısımlarında kazılar yapılarak ağırlık yükünün azaltılması olumlu yönde etki edecektir. Eğer zemin müsait ise kademeli olarak yapılacak kazılar ile şev eğiminin azaltılması amaçlanmalıdır.
- Yüzey suyu drenajı: Yarmalarda şev kazığı gerisinde kafa hendeği yapmak ve şevlerin dip kısımlarında kaplamalı hendek oluşturmak, şev yüzeyine 1m derinlikte drenler yerleştirmek, şev yüzeyinde varsa çatlakların kapatılması ve yine şeve ters eğim oluşturmamak olumlu etki edecektir.

Zemin iyileştirme yapılabilmesi için arazi etütlerinin yeterince yapılması ve zemin stabilitesini bozan nedenlerin iyi irdelenmesi gerekir. Gerekli jeolojik araştırmalar, harita çalışmaları, araştırma sondajları, sismik ve elektriksel araştırmalarla desteklenerek iyi bir etüt çalışması elde edilmelidir. YASS araştırılmalıdır ki en önemli faktörlerden birisi budur. Zemin hareketleri ve nedenleri araştırılırken, bu harekete neden olan sebepler doğru tespit edilmeli ve çözüm önerileri iyi belirlenmelidir.

Önalp, olası bir heyelanın önlenmesi için alınması gereken önlemleri şöyle sıralamaktadır (Önalp vd. 2004);

Suyun Kontrolü (Drenaj)

- Problemlili zemine gelen yüzey suları uzaklaştırılmalıdır.
- İçinde geçirimli dolgu malzemesi bulunan sığ ve derin hendekler yapılmalıdır.
- Zemin içine geçirimli kama/payanda yerleştirilmelidir.
- Küçük çaplı pompajlı ve pompajsız sondaj kuyuları açılmalıdır.
- Yer çekimiyle çalışan büyük çaplı drenaj kuyuları açılmalıdır.
- Düşeyden sapmış drenaj delikleri yapılmalıdır.
- Drenaj tünel veya galerileri yapılmalıdır.
- Vakumla su alma yöntemleri uygulanmalıdır.
- Sifonla drenaj yapılmalıdır.
- Elektro-osmotik yoldan su alma yapılabilir.
- Ağaç ve bitkilerin yardımıyla yüzey koruması ve su miktarının azaltılması.



Şekil 3.15 Eğimli araziye oturan dolgularda kademelendirilme ve drenaj (Önalp vd. 2004)

YASS, Zeminlerin stabilizasyonunda ilk araştırılan konudur. Bundan sonra araştırılması gerekense drenaj konusudur. Zemin hareketleri genellikle YASS yükselmesi ve boşluk suyu basınçlarının ani değişimi sonucu oluşur. Bu nedenle YASS düşürülerek boşluk suyu basıncının azaltılması ilk amaçtır. Bu sebepten dolayı drenaj konusu çok önemlidir. Boşluk suyu basıncında meydana gelecek bir artış efektif gerilme ve kesme dayanımında azalmaya neden olacaktır. Drenaj sistemi dizayn edilirken herhangi bir aksamaya neden olmadan çalışması esas alınmalıdır. Yüzey veya yüzeye çok yakınıyapılan drenler ve hendekler erozyondan etkilenebilmektedir (Duncan vd. 2005).

Yatay drenler; zeminde yeraltı drenajı sağlamak üzere açılan yatay sondaj kuyularına yerleştirilen üzeri delikli borulardan oluşur. Yeraltı suyunun boşaltılabilmesi için yerçekiminden faydalanırız. Bu sebepten ötürü boruların hafif yukarı eğimli yerleştirilmeleri gerekmektedir. Uzunlukları 30-90 m kadar olabilir. İçi delikli sondaj burguları içerisinde zemine yerleştirilirler. Burgu dışarı çekildikten sonra boru deliğin içerisinde bırakılır. Boru ile zemin arasında filtreleme malzemesi bulunmaz. Bu kuyuların zeminin en alt kotlarında yapılması tercih edilir.

Düşey Drenaj Kuyuları; geçirgenliği değişken katmanların yatay olmasının söz konusu olmadığıdurumlarda, düşey drenler kullanılır. Düşey drenaj kuyular açılır ve bu kuyular filtre ölçütlerindeki daha önceden belirlenmiş olan malzeme ile doldurulur. Drenajın yerçekimi yardımı ile yapılabilmesi asıl hedeftir. Bunun için en alt kotlarda yatay drenlerin açılır. Bu mümkün değil ise özel teçhizatlandırılmış derin kuyu pompaları kullanılarak suyun uzaklaştırılması yoluna gidilir. Drenaj galerileri; zeminde bulunan ve drene edilmesi gereken su miktarına göre derin drenajlara gerek varsa drenaj galerisi(tüneli) kullanılabilir. Çevre

koşullarıyada başka sebeplerden dolayı diğer yöntemleri kullanamıyorsakbudurumlarda bu yöntem kullanılır. Galeri içinde değişik yönlerde doğru uzun metrajlı drenaj sondajları açılır (Duncan vd. 2005).

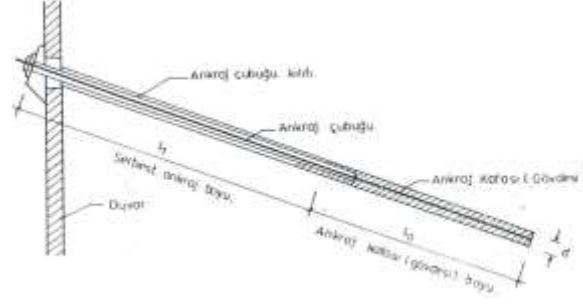
Yapısal Önlemler; bu aşamada zemin hareketine direnen kuvvetlerin artırılması yoluna gidilerek duraylılığın sağlanılmasına çalışılır (Duncan vd. 2005).

- Dış önlemler (Ağırlık, yarı ağırlık, yanal yüklü kazıklar, sandık ve kafes duvarlar)
- İç önlemler (Donatılandırılmış zemin)

Rijit duvarlar, zeminde oluşabilecek hareketi durdurmak için beton ağırlık duvarları, betonarme duvar vb.yapılar yapılarak durdurulmaya çalışılır. Burada, şöyle bir zemin ortaya çıkabilir; zeminde meydana gelen hareket ile topuk heyelanından dolayı duvarı oturtacak ya da yıkacak. Böylesi bir durumda taban heyelanını oturtmakta temel olarak alınacak kot kazıklı temellerle sağlam kayaca ulaşılarak sağlanabilmektedir. Bu tip çözümler elbette ki sisteme ilave maliyet getirecektir ama yine de uygulanması gereklidir. Bu yapılar tasarlanırken drenaj problemi de söz konusu ise bu konuda eş zamanlı olarak çözüme kavuşturulmalıdır. Kazıkların, zemin duraylılığını sağlaması için kayan kütleyi geçerek alttaki daha duraylı zeminin içine kadar inecek şekilde yapılması gerekmektedir.

Zemin özelliklerine ve kayma yüzeyi derinliğine bağlı olarak kazık araları ve uzunlukları belirlenmelidir. Zemin hareketinin önlenmesinde ankrajlarda kullanılabilir ve bu ankrajların kullanılması ekonomik ve pratik çözümler verebilmektedir (İncecik 1987).

Zeminin içine yerleştirilen ve çekmeye dayanıklı malzeme ankrajın temelini oluşturur (Şekil 3.16). Zemine yatay olarak gömülü vaziyette bulunan donatının içinde oluşan çekme gerilmeleri serbest ya da basınçlı çimento şerbeti enjeksiyonu işlemi sırasında oluşacak olan sürtünme ile zemine aktarılmaktadır.



Şekil 3.16 Zemin ankraj elemanları (Ulusay 2001).

Ankrajlar uygulamaları sonucunda granüler zeminlerde 100 ton, kohezyonlu zeminlerde ise 60 tonu aşan proje yükleri elde edilebilmektedir. Bu değerler 8 – 12 cm’lik bir delgi çapı ve 4-8 m’lik ankraj boyları ile sağlanabilmektedir.

- ϕ 8-12-14 cm çapında bir delgi koruma borusunun yerleştirilmesi,
- Boru içine ankraj gergi elemanlarının yerleştirilmesi,
- Boruyla çimento şerbetinin enjekte edilmesi (Enjeksiyon sadece projesinde kuvvet aktarma bölgesi olarak belirlenen ankraj gövdesi bölgesinde yapılacaktır (Erdemgil 1987).

Enjeksiyon yöntemleri diğer yöntemlere nazaran daha düşük maliyetle uygulanabildiklerin denenjeksiyon zemin iyileştirilme yöntemlerinde her zaman en cazip olanıdır. Akışkan enjeksiyonlarının yapıldığı durumlarda reaksiyon başlayana kadar kısa bir süre etkisi uygulanan zeminin duraylılığının daha da kaybolmasına neden olabilir. Bunun en büyük nedeni enjeksiyon malzemesinin içinde bulunan sudur. Ancak, enjekte edilen malzeme daha sonra sertleşir ve zemin ile etkileşime girerek zeminin özelliklerini değiştirerek duraylılığını artırır ve iyileştirir. Çimento şerbeti enjeksiyonuyla, çakıllı, kumlu, bloklu hatta siltli zeminlerin de sağlamlaştırılması yapılmaktadır. Parçalı yapılar ve taneler çimento şerbeti ile birbirine yapıştırılmakta, sürtünme direnci ve kohezyonun arttırılması sağlanmaktadır. Ayrıca bu yöntem ile boşluk suyu basıncı oluşumu da engellenebilmektedir. Su ve çimento karışımı ile elde edilen şerbet diye adlandırdığımız karışım basınçlarla zemin boşluklarına enjekte edilerek zeminin sertleştirilmesi sağlanmakta buda zeminin iyileştirilmesi anlamını taşımaktadır (Duncan vd. 2005).

Bir diğ er yöntem olan sondaj deliklerinin kireç ile doldurulması ise kireç kazığı olarak tarif edilir.

Vejetasyonun rolü; Otsu odunsu vejetasyonun erozyonun engellenerek kontrol altına alınmasındaki başlıca etkileri; intersepsiyon, engelleme, geciktirme, infiltrasyon ve transpirasyonu olarak tarif edilebilir (Görcelioğlu 1991).

Vejetasyon, odunsu bitkiler, zemin hareketinin, özellikle sığ kaymaların önlenmesinde yararlı olurlar. Bilindiği üzere, zemin hareketini etkileyen faktörler genellikle ya kayma direncini azaltacak faktörler ya da kayma zorlanmasını arttıracak faktörlerdir.

Kökler, toprağa mekanik olarak destek sağlar ve onu güçlendirir. Ayrıca, kökler vasıtasıyla toprağın suyu ve dolayısıyla da rutubetinin etkisi azalır. Ağaç gövdeleri de toprağa çakılan doğal tahkim kazıklar gibi görev yaparak zemini destekler. Erozyonun  nlenmesinde de olumlu katkıları vardır. Fakat bitkilerin sürşarj yükünün olumsuz etkileri de göz ardı edilmemelidir (Görcelioğlu 1991).

BÖLÜM 4

HEYELANLARIN İNCELENMESİ

4.1 GİRİŞ

Heyelanlar incelenirken mühendislik jeolojisi konuları ve zemin mekaniği konuları olmak üzere iki farklı alanda incelenir. Burada mühendislik jeolojisi alanında heyelanın meydana geldiği bölgedeki kayaç ve zeminlerin jeolojik açıdan yapısı, jeomorfolojik yapısal geçmişleri, bileşimi, oluşumu, hidrojeolojik durumu, jeomorfolojik yapı geçmişi irdelenir. Zemin mekaniği açısından ise heyelanın meydana geldiği bölgenin geoteknik açıdan çözümünde kullanabileceğimiz her türlü zemin parametreleri kullanılır ve bu parametreler yardımı ile zemin sayısallaştırılarak modelleme yapılır ve böylece sayısal çözüm üretilmeye çalışılır.

4.2 HEYELAN ANALİZ YÖNTEMLERİ

Güçlendirilmiş ya da herhangi bir güçlendirmenin gerçekleştirilmediği heyelan bölgelerinin tasarımının analizleri birbirleri ile benzerlik gösterir. Analizler, oluşabilecek en kötü duruma göre yapılmalı ve bu duruma göre güvenlik faktörü belirlenmelidir.

Kaya, zemin ve benzeri malzemelerin doğal yada insan eli ile eğimli olan yöne doğru hareket etmesine heyelan denilir. Heyelanlar ve diğer doğal afetler insan hayatına etki etmeleri ve mali yöndende ciddi etkileri sebebiyle inşaat sektöründe karşılaşılan en önemli problemlerin başında yer almaktadır. Heyelan ve toprak kaymaları ise Türkiye’de en önemli inşaat sorunlarından biridir. Heyelan ve toprak kaymaları ülkemizde depremler gibi ortalama 5-6 senede bir değil daha sık periyotlarda gerçekleşmektedir. Bu sebeptendir ki bilimsel olarak ve uygulama olarak dikkat ve özen isteyen bir konudur bunlar.

Heyelan riski olan zeminlerde inşaat koşullarının ve uygulamalarının yapılabilmesi için öncelikle arazi ve laboratuvar araştırmalarının özenli yapılması, bu çalışmalardan elde edilen sonuçların titizlikle değerlendirilmesi, tecrübelerden yararlanılması ve en önemlisi ise bu konular ile ilgi teknolojik gelişmelerin iyi takip edilmesi ve bilinmesi çözüme ulaşmak konusunda çok önemlidir. Bu arada her türlü bilimsel uygulamanın bağlı olduğu ekonomik durumların da çözüme kavuşulması aşamasında giderlere yansması mühendislik açısından karşılaşılan bir diğer problemidir.

Yıllar içerisinde güvenlik faktörleri hesaplayabilmek için birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Tüm bu yöntemler (sonlu elemanlar yöntemi hariç) limit-denge formülasyonuna dayanmaktadır.

4.2.1 Limit Denge Yöntemi

1970 li yıllarda Fredlund tarafından genel bir limit denge (GLE) formülasyonu geliştirilmiştir (Fredlund ve Krahn 1977, Fredlund vd. 1981).

Zeminin güvenlik sayısı bu yöntemde en küçük kayma dayanımı değerine karşılık gelen güvenlik sayısı olarak kabul edilir. Bu güvenlik sayısının 1,3'den büyük olması gerekmektedir (Shukla 2002, Duncan and Wright 2005). Pekçok çalışma bu yöntemle dayanılarak türetilmiştir. Bu yöntemle göre göçme belirli bir yüzeyde gerçekleşmektedir.

Limit denge yöntemi formülasyonun temelini iki güvenlik denklemi oluşturur. Bu denklemler bir çok dilim içi kesme-normal kuvvet varsayımına izin verir. Burada bir denklem moment dengesine (F_m) göre güvenlik faktörünü verirken diğer denklem yatay kuvvet dengesine (F_f) göre güvenlik faktörü vermektedir.

Güvenlik denkleminde bu iki faktörün kullanması fikrini ortaya atan Spencer (1967) dır.

Bu yöntemde kesme kuvvetleri, Morgenstern ve Price (1965) tarafından önerilen bir denklem ile ele alınmaktadır. Denklem şu şekildedir;

$$X = E \lambda f(x)$$

Burada;

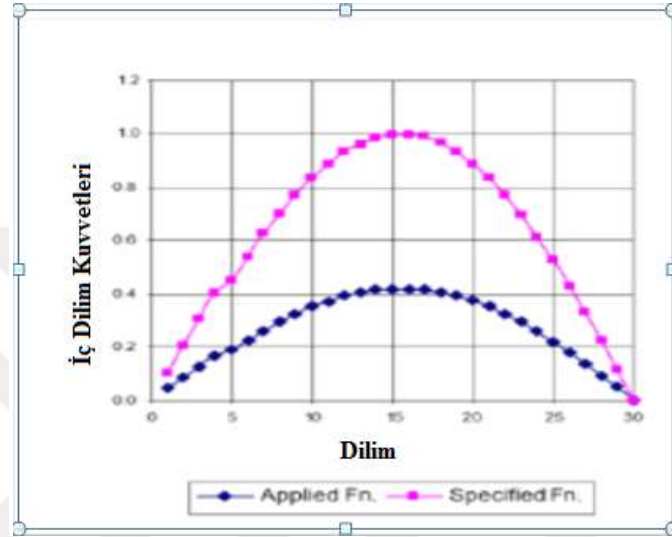
$f(x)$: Bir fonksiyon

λ : Kullanılan fonksiyonun yüzdesi

E: Kesit normal kuvveti

X: Kesme kuvveti(intersliceshearforce)

Şekil 4.1’de tipik bir yarım sinüs fonksiyonu gösterilmektedir. Bu şekilde üst eğri, gerçek işlev ve düşük eğri ise çözümde kullanılan işlevdir. İki eğri arasındaki oran lamda (λ) olarak adlandırılır.



Şekil 4.1 Yarım Sinüs Fonksiyonu (Krahn 2004).

Limit Denge Yöntemi güvenlik denkleminin moment dengesine göre şu şekildedir:

$$F_m = \frac{\Sigma(c' = \beta R + (N - u\beta)R \tan \phi')}{\Sigma Wx - \Sigma Nf \pm \Sigma Dd} \quad (4.1)$$

Güvenlik denklemi aktörü yatay kuvvet dengesine göre ise:

$$F_f = \frac{\Sigma(c' \beta \cos \alpha + (N - u\beta) \tan \phi' \cos \alpha)}{\Sigma N \sin \alpha - \Sigma D \cos \omega} \quad (4.2)$$

Denklemden kullanılan terimler;

c' : Efektif kohezyon

ϕ' : Efektif sürtünme açısı

U : Gözenekli su basıncı

N : Dilim taban normal kuvveti

W : Dilim Ağırlığı

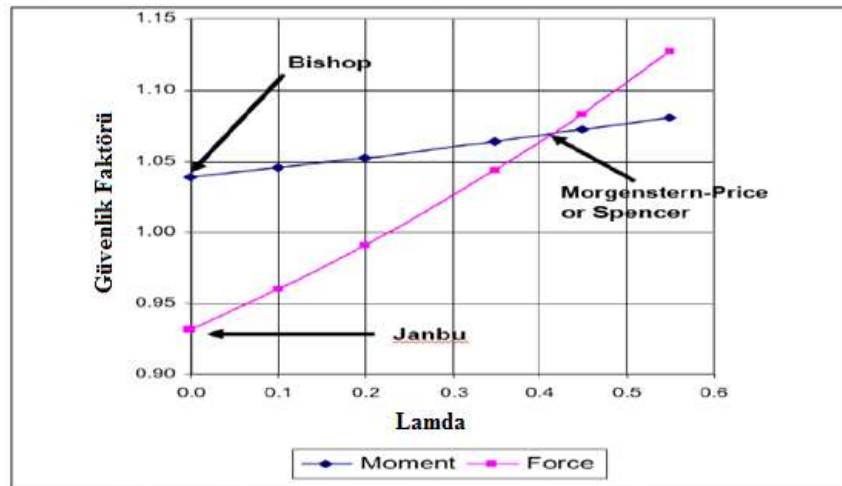
D : Hat yükü
 $\beta, R, x, f, d, \omega$: Geometrik parametreler
 α : Dilim taban eğimidir.

Her iki denklemde de mevcut olana N, her dilim tabanında standart olan anahtar değişkenlerdendir. Bu denklem oluşturulurken dikey kuvvetlerin toplamından faydalanılır. Böylece dikey denge oluşur. Eşitlik formunda standart şu şekilde tanımlanır;

$$N = \frac{W + (XR - XL) - \frac{c' \beta \sin \alpha + u \beta \sin \alpha \tan \phi'}{F}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F}} \quad (4.3)$$

Eğer N güvenlik denklem momentine uygulanırsa F, Fm ye dönüşür, şayet N güvenlik denkleminin kuvvet faktörüne uygulanırsa ozamanda F, Ff olur. Stabilite analizlerinde çoğunlukla payda mα olarak görülür.

Burada dikkat edilmesi bir diğer nokta da dilim taban normalinin XR ve XL dilimleri arası kesme kuvvetlerine bağımlı olmasıdır.



Şekil 4.2 Güvenlik Faktörünün dilimler arası fonksiyon yüzdesine (λ) göre değişimi (Krahn 2004).

Bir çoklamda (λ) değeri için Fm ve Ff değeri Limit denge yöntemi ile hesaplanabilir. Bu hesaplamalar sayesinde lamda (λ) değerine göre Fm ve Ff değerlerindeki değişimleri görmek mümkündür. Böylelikle güvenlik faktörleri arasındaki farklılıklar daha net anlaşılmakta ve bu sayede seçilecek güvenlik kuvveti fonksiyonuna etkisi bariz görülmektedir.

Bishop Basitleştirilmiş Yöntemin temelinde iki varsayım karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan ilki dilimler arasındaki kesme kuvvetini dikkate almaması ve diğeri ise sadece dengesini sağlamasıdır. Limit-Denge terminolojisinde kesme kuvvetleri dikkate alınmadığında lamda (λ) sıfır demek olur.

Bishop Basitleştirilmiş güvenlik faktörü, lamda (λ)'nın sıfır olduğunda Şekil 4.2.'deki moment eğrisine denk düşer. Janbu'nun Basitleştirilmiş yönteminde ise buna ilaveten birde dilimler arasındaki kesme kuvvetlerini yok sayarak sadece kuvvet dengesini sağlar. Janbu'nun Basitleştirilmiş güvenlik faktörü bu durumda Şekil 4.2.'deki lamda (λ) değeri sıfır olan kuvvet eğrisine denk gelmektedir. Spencer ve Morgenstern-Price(M-P) faktörleri moment ve kuvvet dengeleri sağladıkları için bu eğrilerin kesiştikleri noktaya denk gelmektedir.

Limit denge yöntemi her türlü kabul edilebilir kayma düzlemlerine uygulanabilir. Burada bahsettiğimiz yöntemlerin hepsi statik denklemlerin uygulanması ile kesme kuvvetleri ile nasıl baş edebildiği ile ilgilidir. Yani kayma dairesi yüzeyi dairesel ise güvenlik moment faktörü kesişim kuvveti fonksiyonuna bağlı değildir. Bishop'un basitleştirilmiş güvenlik faktörü Spencer veya M-P faktörüne yakındır diyebiliriz. Bu sebeptendir ki Bishop Basitleştirilmiş yönteminde bulunan varsayımlar dairesel olmayan kayma yüzeylerine eşit derecede uygulanabilir. Buda şu demek oluyor ki limit denge yöntemi kayma yüzeyi biçime bakılmadan bütün yöntemleri kapsar.

Limit denge yöntemi içerisinde pek çok kesme kuvveti barındırabilir. Bunlar;

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

Limit denge yöntemi; F_m ile F_f eğrilerinin çapraz noktasını bularak moment ve kuvvet dengelerini karşılamaktadır. Bu tüm kuvvetlerin doğru yönde karşılanması adına gerekli bir durumdur. Mesela büyük yanal kuvvetler uygulandığında lamda değeri negatif yönlü değer kazanabilir.

4.2.2 Bishop'un Sadeleştirilmiş Yöntemi

Bishop, 1950 lerde Londra'daki İmparatorluk Kolejinde profesör olarak çalışmıştır. Burada çalıştığı yıllarda normal kuvvetler içeren bir yöntem geliştirmiştir. Bishop bu yöntemle dilim kuvvetlerini dikey yönde toplayarak dilim tabanında normal kuvvet için bir denklem geliştirdi. Bunun sonucu olarak tabannormal güvenlik unsurunun bir fonksiyonu haline geldi. Bu da güvenlik denklemini doğrusal hale getirmektedir. Ve böylece de güvenlik faktörü hesaplamak için tekrar eden bir prosedür gerekli olmuştur.

Bishopun her hangibir gözenek suyu basıncı olmadığındaki Basitleştirilmiş güvenlik faktörü denklemi şöyledir;

$$FS = \frac{\sum[(c\beta + W \tan \phi)(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi}{FS})]}{\sum W \sin \alpha} \quad (4.4)$$

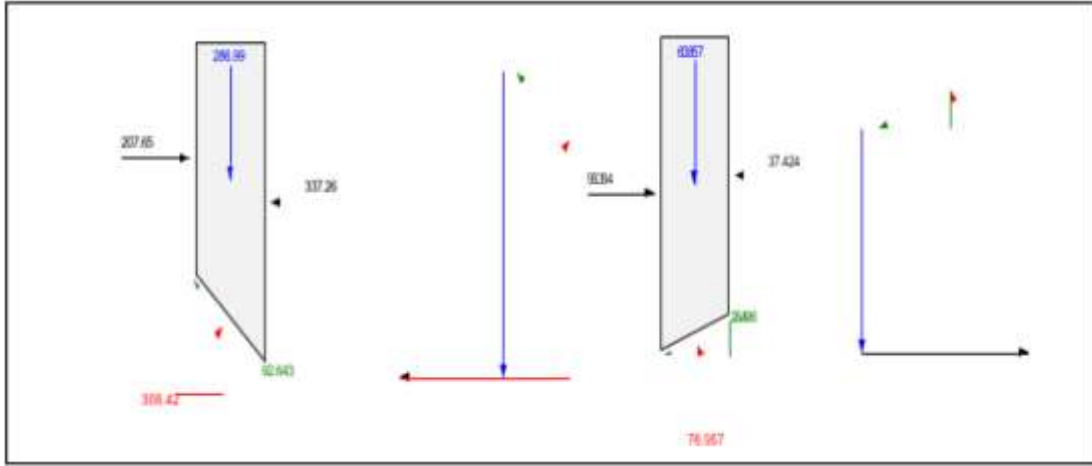
FS denkleminde de görüleceği üzere eşitliğin her iki tarafındadır. Denklem, aşağıda örneği verilen $m\alpha$ terimi haricinde, sıradan güvenlik denkleminin faktöründen farklı değildir.

$$m\alpha = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi}{FS} \quad (4.5)$$

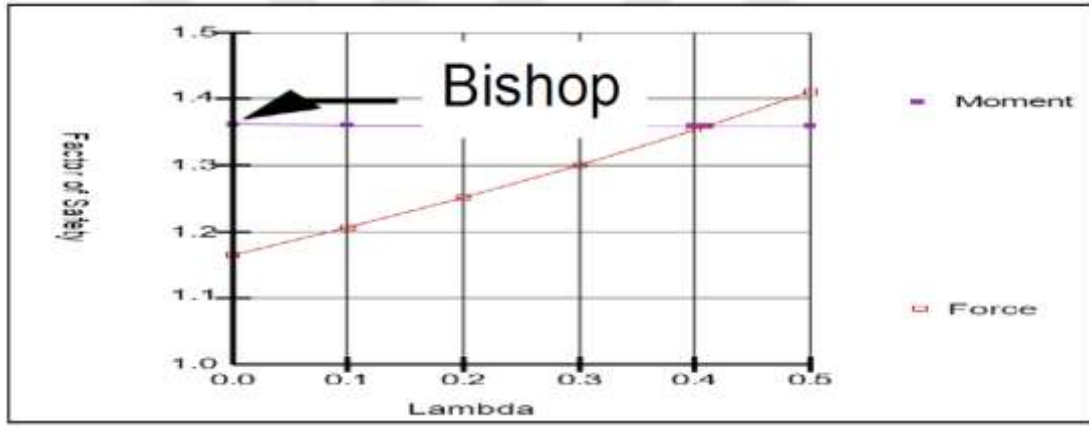
Bishop Basitleştirilmiş güvenlik faktörünü çözmek için bir tahminde bulunulması gerekir. FS için ilk tahmin, $m\alpha$ hesaplaması için kullanılır ve daha sonra yeni bir FS hesaplanır. Daha sonra yeni FS, $m\alpha$ hesaplamak için kullanılır ve bundan sonra başka bir yeni FS hesaplanır. Bu böyle son hesap edilen FS nin bir önceki FS değeri için toleransına gelene kadar devam eder.

Serbest cisim diyagramlarını ve kuvvet poligonlarını aynı kesitler altında sıradan yöntemle göre incelersek belirgin bir farklılık görürüz (Şekil 4.3). Kuvvet poligonunun kapanması kesme normal kuvvetlerinin eklenmesiyle birlikte Bishop'un varsaydığı gibi kayma yüzeyi bulunmamaktadır. Ancak kesme normal kuvvetleri bu poligona dahil edilmiştir.

Şekil 4.3'deki gibi güvenlik faktörü vs. λ da grafiğinde Bishop'un Basitleştirilmiş güvenlik faktörü λ danın sıfır olduğu yerde yani $FS=1.36$ 'da moment denge eğrisine denk düşer.



Şekil 4.3 Bishop'un Birleştirilmiş yöntemi için serbest gövde kuvvet poligonu.



Şekil 4.4 Bishop'un basitleştirilmiş güvenlik faktörü (Krahn 2004).

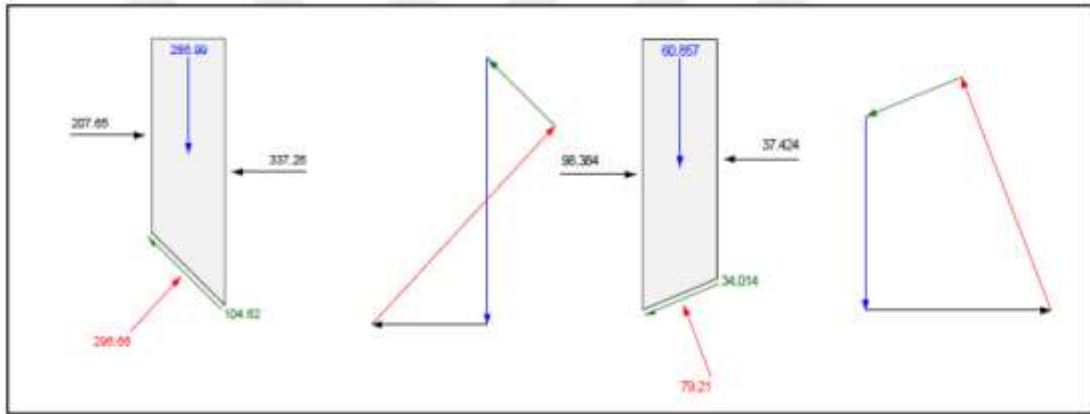
Güvenlik moment faktörü (F_m) kesme kuvvetlerinden etkilenmemiştir. Çünkü kayan kütle için dilimler arasında kayma olmamalıdır. Fakat bu kuvvetler dengesi için doğru olmaz ve bu sebeple güvenlik faktörü (F_f) yüzey gerilmelerinden etkilenir.

Bishop'un Basitleştirilmiş yöntemi kesme normal kuvvetlerini dikkate alır. Fakat kayma yüzeyi gerilmesini göz ardı eder. Tüm moment dengesini sağlar ama toplam yatay kuvvet dengesini maalesef karşılamaz.

4.2.3 Janbu'nun Basitleştirilmiş Yöntemi

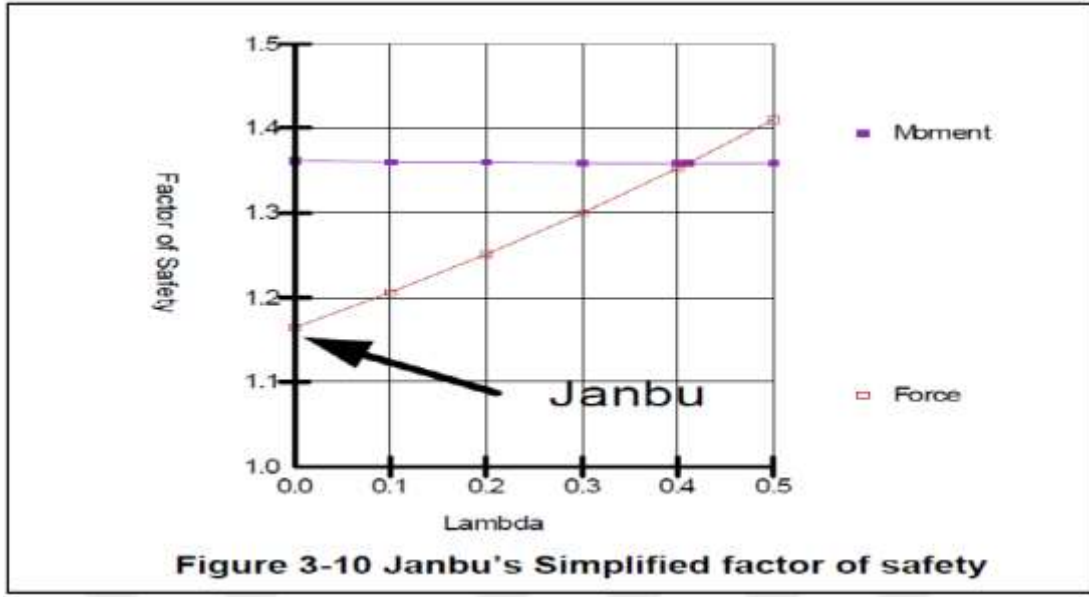
Janbu'nun basitleştirilmiş yöntemi genel moment dengesini değil sadece toplam yatay kuvvet dengesini sağlar.

Şekil 4.5'de Janbu'nun basitleştirilmiş yönteminin serbest cisim diyagramları ile kuvvet poligonlarını göstermektedir. Aslında dilim kuvvetin poligon kapanışı Bishop'un Basitleştirilmiş yöntemi ile 1.36'ya karşılık 1.16'dır.



Şekil 4.5 Janbu metodu için serbest cisim diyagramı ve kuvvet poligonu (Krahn 2004).

Janbu'nun yönteminde lamda (λ), tıpkı Bishop yönteminde olduğu gibi sıfırdır. Bunun sebebi kesme kuvvetlerinin dikkate alınmamasıdır. Bu sebeple Şekil 4.6.'da görüleceği gibi Janbu'nun Basitleştirilmiş güvenlik faktörü lamdanın sıfır olduğu yerde kuvvet eğrisine düşer. Güç dengesi, kabul edilen zemin kayma yüzeyleri için güvenlik faktörünü çok düşük seviyelere indirir.



Şekil 4.6 Bishop'un güvenlik faktörü (Krahn 2004).

Janbunun Basitleştirilmiş yöntemi sonuç olarak normal kesme kuvvetlerini dikkate alır, zemin kayma kuvvetlerini dikkate almaz ve tüm yatay kuvvet dengesini karşılar ama bu durum tüm moment dengesinde geçerli değildir.

4.2.4 Spencer Metodu

1967 yılında Spencer iki güvenlik faktörü denklemini bulmuştur. Bunlardan birincisi dengesine göre ikicisi ise yatay kuvvet dengesine göredir. Kesitler arasında meydana gelen kesme kuvveti ile yine kesitler arasında meydana gelen normal kuvvetler arasında sabit bir ilişki kurarak bu iki güvenlik faktörü de aynı olana kadar tekrarlanan bir döngü ile kesme kuvvet oranı normal oran ile değişmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken güvenliğin iki faktörü de aynı olan normal kesme oranını bulmak hem moment hem de kuvvet dengesi sağlanıyor demektir.

Burada bu ilişkiyi kurabilmek için Kesme kuvveti (X) ve normal kuvvet (E) değerleriyle aşağıdaki denklem yazılarak kullanılır.

$$X=E \lambda F(x) \quad (4.6)$$

Şekil 4.7, bir yamaçın kesitini göstermektedir. Yamaçın üst kısmı koyu gri, alt kısmı ise yeşil ve sarı alanlara ayrılmıştır. Yamaçın eğri kenarları, yeşil alanın alt kısmında, dikey çizgilerle bölünmüştür. Bu çizgiler, yamaçın stabilite analizinde kullanılan bölümleri temsil etmektedir.

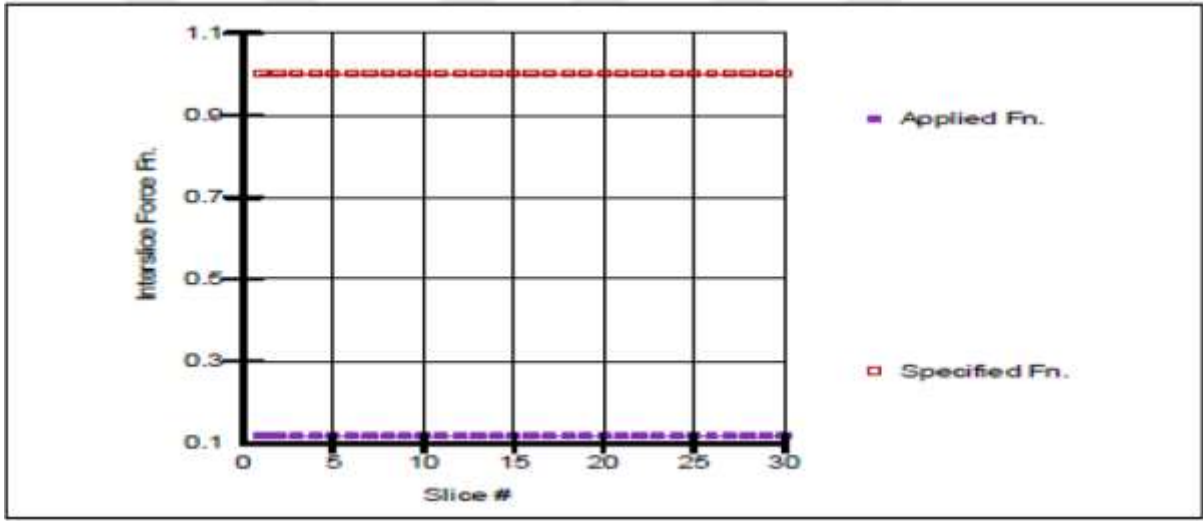
Şekil 4.7 Tipik şev stabilitesi durumu (Krahn 2004).

Belirtilen foksiyonun ve uygulanan kesit fonksiyonun bir grafiği ise Şekil 4.8.'de gösterilmiştir.

A line graph showing the Factor of Safety (Y-axis, ranging from 1.0 to 1.4) versus Lambda (X-axis, ranging from 0.00 to 0.30). Two data series are plotted: Moment (purple line with square markers) and Force (red line with square markers). The Force curve starts at approximately (0.00, 1.06) and increases linearly to (0.30, 1.33). The Moment curve starts at approximately (0.00, 1.12) and increases linearly to (0.30, 1.17). An arrow labeled 'Spencer' points to the intersection of the two curves at approximately (0.11, 1.14).

Lambda	Moment (Factor of Safety)	Force (Factor of Safety)
0.00	1.12	1.06
0.05	1.13	1.09
0.10	1.14	1.12
0.11	1.14	1.14
0.15	1.15	1.17
0.20	1.16	1.21
0.25	1.17	1.25
0.30	1.17	1.33

Şekil 4.8 Spencer'ın güvenlik faktörü (Krahn 2004).



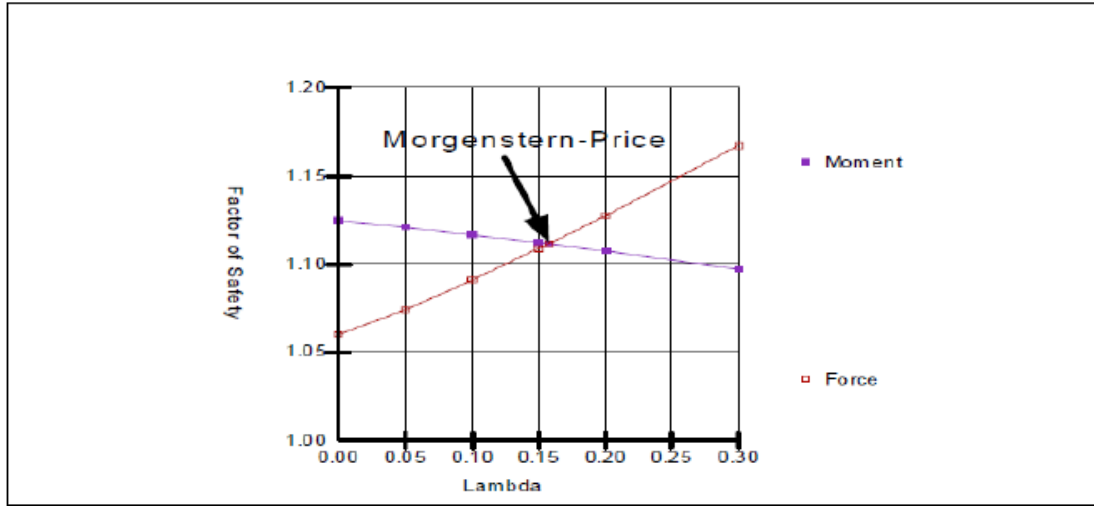
Şekil 4.9 Spencer Metodu için Kesitlerarası Fonksiyonlar (Krahn 2004).

4.2.5 Morgenstern-Price Metodu

1965 yılında Morgenstern ve Price, spencer yöntemine benzeyen bir yöntem geliştirmişlerdir. Morgenstern-Price (M-P) yöntemi ile kullanılacak kesit fonksiyonları şunlardır:

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

Sabit fonksiyonunun seçilmesi, M-P metodu Spencer metoduyla özdeşleşmesini sağlar. Şekil 4.10.'da kuvvet faktörü ve güvenlik momentinin lamda ile nasıl değişime uğradığı görülmektedir. İki eğrinin çaprazlama olduğu yerde M-P Güvenlik Faktörünün oluştuğu görülür.



Şekil 4.10 Yarı sinüs fonksiyonlu Morgenstern-Price güvenlik faktörleri (Krahn 2004)

Kuvvet poligonu kapanması M-P yönteminde tıpkı Spencer yönteminde olduğu gibi çok iyidir. Bunun sebebi hem normal kesme hemde kesit kuvvetlerin dahil edilmesidir.

M-P Güvenlik Faktörünün (kesişim noktası) Bishop'un Basitleştirilmiş Güvenlik Faktöründen (sıfır lamdadaki moment dengesi) daha düşük olabilmektedir. Buna sebep moment denge eğrisinin negatif yönlü bir eğilimde olmasıdır. Burada şunu söyleyebiliriz, kesme kuvvetleri dikkate almayan Bishop'un Basitleştirilmiş yöntemi gibi daha basit bir yöntem, güvenli alanda kalabilmektedir. M-P yöntemi hem normal hemde kesme kuvvetleri dikkate alan daha titiz bir yöntem, bu durumda daha düşük bir güvenlik faktörüne neden olabilir.

Morgenstern-Price yöntemi:

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

4.2.6 Sarma Yöntemi

1973 yılında Sarma, genel bloklar ve dikey olmayan kesitler için stabilize yöntemini geliştirmiştir. Sarma tarafından geliştirilen bu yaklaşımda bloklar arası kesme kuvveti ile normal kuvvetlerin ilişkilendirilmesi için ve yine normal kuvvetler ile kesişim arasındaki kesme kuvvetlerin arasındaki ilişkinin tanımlanması içinde kullanılmaktadır.

Sarma, kesişim kuvveti ile normal kuvvetleri ilişkilendirmek için Mohr-Coulomb kesme kuvveti denkleminin benzer bir denklik ortaya çıkarmıştır. Bu eşitliğe göre;

$$X=c*h+Etan\phi \quad (4.7)$$

c: Bir kohezyon mukavemeti

H: Kesit kenarı yüksekliği

ϕ : Madde sürtünme açısıdır.

Bu yaklaşımın iyi tarafı kesişim kuvvetlerinin, bir işleve göre kavramsallaştırılması ve daha kolay olan malzeme özellikleri ile ilişkili olmasıdır. Ancak sonuç olarak kesişim noktası işlevini belirlemek başka bir mekanizmadır.

Bu yaklaşıma göre bütünlük sıfır olduğunda yada çok küçük olduğunda en iyi sonucu alır. Uyum sıfır olduğunda, kesişim kayması normal doğru ile doğru orantılıdır. Uyum değeri belirtilirse, kesişim kayması, normalinden bağımsız hale gelir ve yakınsama güçlüklerine yol açabilir.

Kesişim kuvvetlerinin ilişkilendirilmesi haricinde Sarma yöntemi, Spencer ve Morgenstern-Price yöntemiyle aynıdır. Hesaplanan kesişim kayma kuvveti, moment ve genel kuvvet dengesi sağlanana kadar lamdaya benzer bir faktör ile ayarlanır.

4.2.7 Janbu'nun Genelleştirilmiş Yöntemi

Janbu'nun genelleştirilmiş yöntemi, diğer limit denge yöntemlerinden biraz ayrıdır. Bu yöntemde, bir itme uzantısı boyunca kayma meydana gelen kütleye gerilme dağılımı uygulanır. Kesitler arasında meydana gelen normal-kesme sonucu, itme meydana gelen hatta kenarlar boyunca hidrostatik bir gerilim dağılımı meydana gelir. Bu hidrostatik dağılımı temsil etmek için dilimlerin kenarları boyunca 1/3 noktasında kesitlerin kesiştiği yerde hareket ettiği düşünülür. En son halindeki durumunda taban dilim merkezi etrafındaki momentler hesaplanarak kesişim kesme kuvvetlerinin bulunabileceği düşünüldüğünde Janbu Basitleştirilmiş yöntemi kullanılarak bulunabilir. Bundan sonra dilimler arasında meydana gelebilecek kesme kuvvetleri, dilim tabanındaki momentlerin yardımıyla belirlenir.

Janbu'nun geliştirilmiş yöntemi sadece Janbu'nun basitleştirilmesiyle aynı olan toplam kuvvet dengesini karşılamaktadır. Moment dengesini ise sadece dilim seviyesinde tahmin eder. Janbu'nun geliştirilmiş yöntemi sadece kuvvet denge faktörünü (F_f) hesaplar. Güvenlik momentinin toplam denge faktörü (F_m) hesap edilemez.

Limit dengesi formülleri, her dilim için sabit bir emniyet faktörü sağlayan ve yine her dilimin kuvvet dengelerini sağlayan dilim kuvvetlerini bulur. Bu durumlarda bazen gerçek dışı gerilmeler ile karşılaşılabilir. Bu şu anlamı taşımaktadır; kesişimin sonuç noktası uygulama noktası diliminin dışında bir yerde olabilir. Bu durumun tam tersi her dilimin dilimin moment dengesini sağlayan dilim kuvvetlerini bulusak eğer, güvenlik faktörünün her dilim için aynı olduğu da kabul edilirse her dilimin kuvvet dengesinin sağlanması mümkün olmayabilir. Sabit bir güvenlik faktörü kabul edilirse, bu sıkıntı bazı durumlarda aşırı zor hale gelir. Bu zorluğun üstesinden gelebilmek için yerel bir güvenlik faktörü kullanılmalıdır. Bir limit denge formülasyonunda ise bu mümkün değildir.

Yoğunlaşmayı temsil eden konsantre kuvvetlerden kaynaklanan gerilme konsantrasyonları yada parçalı doğrusal kayma yüzeyindeki keskin köşelerden meydana gelen gerilme konsantrasyonları Janbu'nun geliştirilmiş yönteminde yakınsama güçlüklerinin meydana gelmesine neden olabilir. Ayrıca yöntem zayıf kuvvet poligonu kilidinin ortaya çıkmasına neden olabilir. Kesit momenti dengesini zorlamak, dilim kuvvet dengesini elde etmenin her zaman mümkün olmadığı anlamını taşır.

Bunu özetleyecek olursak Janbu'nun geliştirilmiş yöntemi limit denge formülasyonuna farklı bir yaklaşım şeklidir. Diğer tüm yöntemlerin olduğu gibi bu yöntemin de sınırları vardır ve bu sebeple diğer yöntemlere nazaran ne daha iyi ne de daha kötüdür. Janbu'nun geliştirilmiş yöntem faktörleri, genellikle kayma yüzeyinde keskin köşeler ile gerilme yoğunlaşmalarına neden olabilecek yüksek konsantrasyonlu yükler olmazsa kesme ve normal kesişim yöntemlere benzeyen bir yöntem olacaktır.

4.2.8 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Limit Denge formülasyonları şu güç ve gerilmeleri verir;

- Her dilimin kuvvet dengesini sağlamayı amaçlar
- Güvenlik faktörünü her dilim için aynı yapar

Bu sınırlamaları aşmak için stabilize analizine bir fizik parçası ilave edilmelidir ki bu parça gerilme-deformasyon ilişkisidir. Böyesi bir ilişki dahil edilir ise yer değişim uyumluluğu oluşur ki bu durumda gerçekçi gerilim dağılımlarının oluşmasını sağlar.

Bir stabilize analizi yapılırken bu analize gerilme-deformasyon ilişkisi eklenmek isteniyorsa önce herhangi bir sonlu elemanlar analizi kullanarak zemindeki gerilme dağılımı oluşturulur ve daha sonra da bu gerilmeler bir stabilize analizinde kullanmakla mümkün olur.

Harekete geçirilmiş kesme kuvvetleri ile dirençli kesme kuvvetleri her dilim için mevcut ise kuvvetler, denge faktörü belirleyebilmek için kayma yüzeyi uzunluğu boyunca uyarlanabilir. Bu durumda Stabilize faktörü şu şekilde tanımlanır;

$$FS = \frac{\sum Sr}{\sum Sm} \quad (4.8)$$

Sr: Mevcut toplam kayma direnci

Sm: Kayma yüzeyinin tüm uzunluğu boyunca toplam harekete geçirilmiş kesmedir (Kulhawy 1969, Naylor 1982).

Hesaplanacak olan iki küresel güvenlik faktörü de derin kayma yüzeyi için hemen hemen aynıdır. Buna ilaveten bölgesel olarak güvenlik faktörleri, güvenlik sabit limit denge faktörü tarafından gösterilen genel değerden daha küçük yada daha büyüktür. Toplam kayma direnci ve kayma yüzeyi boyunca harekete geçirilmiş kesme entegrasyonu, varyasyonun ortalamsını alır ve bu durumda iki güvenlik faktörü aynı hale gelir.

Yakınsama, limit denge oluşumunda, kayma yüzeyi dik olduğunda, bağlantı duvarının arkasında olduğunda sorunludur. Sonlu elemanlar gerilmelerinin kullanımı, dik yamaç ve duvarların takviye ile analiz edilmesi zorluklarının üstesinden gelinmesini sağlar. Ayrıca, sonlu elemanlar gerilmelerinin kullanımı zemin yapısından kaynaklanan pekçok zorluğun da üstesinden gelinmesini sağlar.

Limit-Denge çerçevesi ile sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmış gerilmelerin kullanılmasının bir çok avantajı vardır. Bunlar;

- Kesişim kuvvetleri ile ilgili tahminlerde bulunmaya gerek yoktur.
- Kararlılık faktörü, gerilme bir kez hesaplandıktan sonra belirleyici olur ve sonuçta da 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. Depremden kaynaklanan dinamik gerilmeler bir stabilize analizinde doğrudan düşünülebilir.

Sonlu elemanlar yaklaşımları, denge-limit analizinde sınırlandırmaların çoğunun üstesinden gelir. Böylece yeni konular da ortaya çıkar.

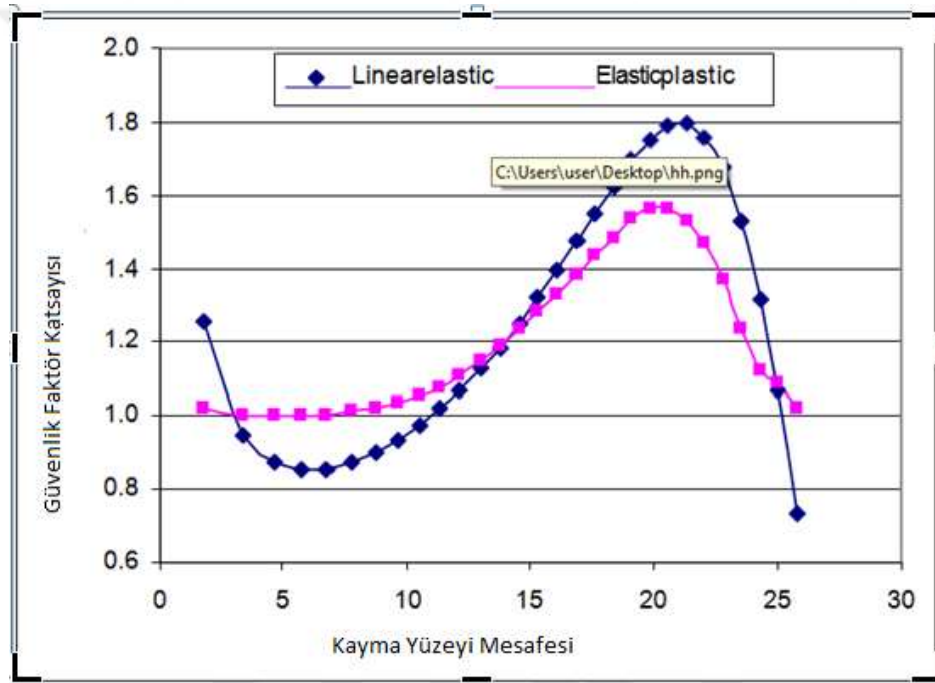
İlk olarak yapılması gereken tavsiye edilen yaklaşımla bir sonlu elemanlar analizi yapmaktır.

Malzeme özellikleri basit ve elastik davranış ile sınırlandırılmışsa sonlu elemanlar analizi oldukça kolay olur. Lineer olmayan yapıda modellerde ise problem çıkaracak yakınsama güçlükleri olmadığı için sadece doğrusal elastik modellerinin kullanılması doğru olacaktır. Pekçok durumda gerilme koşullarının makul sonuçlarını elde etmek için doğrusal elastik analiz yeterli olmaktadır. Makul bir gerilme dağılımı elde edilmesi için ortalama elastik-doğrusal özellikleri bile yeterlidir ve böylece de doğrusal elastik parametrelerin tanımlanması için çok fazla çaba sarf edilmesine gerek yoktur.

Doğrusal elastik analiz sonucu bazen bazı bölgelerdeki hesaplanan gerilmeler, mevcut toprak kuvvetinden daha fazla olur. Bu, fiziksel olarak mümkün olmayan bazı dilimlerde 1.0'dan daha küçük bir güvenlik faktörü olarak karşımıza çıkar. Burada ideal olan ise doğrusal olmayan yapısal modeller ile gerilmelerin yeniden dağıtılmasıdır.

Şekil 4.11.'de gerilmeler bir doğrusal elastik analiz ve elastik-plastik analiz kullanılarak belirlenirse, lineer elastik gerilmeler bölgesel güvenlik faktörlerinin 1.0'dan düşük olmasına sebep olur. Elastik-plastik analizi ise gerilmeleri yeniden dağıtır ve yerel güvenlik faktörlerinin hiçbiri 1.0'dan küçük değildir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmış gerilmeleri kullanmak, stabilite hesaplamalarının yatay gerilmeleri ve dikey gerilmeleri içerdiği anlamını taşır. Bu hem kötü hemde iyi bir durumdur. İyi olan kısmı stabilize analizinde K_0 (σ_x/σ_y) oranı koşullarının dikkate alınabilir olmasıdır. Kötü olan kısmı ise K_0 'nın tanımlanmasının gerekmesidir. Lineer elastik gravite dönüşümü analizinde σ_x/σ_y oranı Poisson oranı (ν) ile yansıtılır. Yer seviyesi için K_0 , $\nu/(1-\nu)$ 'e eşittir. Ele alacağımız farklı K_0 koşulları farklı güvenlik faktörleri verecektir. Fredlund ve arkadaşları 1999 yılında değişen Poisson oranının güvenlik faktörüne olan etkisini konusunda araştırmalar yapmışlardır. Bu incelemeden sonuçlar neticesi K_0 koşullarını tanımlamak imkansız değildir. Kararlılığı değerlendirirken sonlu elemanlar gerilmelerinin kullanılmasını önlemek kolaydır.



Şekil 4.11 Lineer-elastik ve elastik-plastik gerilmeler için güvenlik fakörü (Krahn 2004).

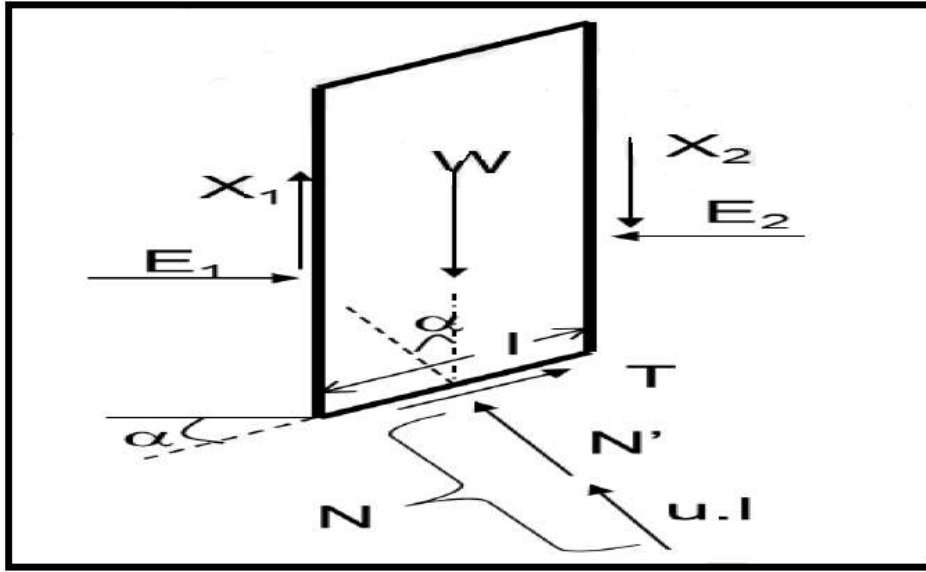
4.3 ANALİZLERDE UYGUN YÖNTEM SEÇME

Limit denge yöntemi yer kabuğunun stabilitesini analiz etmek için pratikte kullanılabilecek en faydalı araç olarak önümüze çıkmaktadır. Limit denge yöntemlerini etkili kullanabilmek için, kullanılacak yöntemin sınır ve yeteneklerinin aşılması gereklidir. Bu yöntem statik ilkelere dayalı çalıştığından ve üstüne yer değiştirme hakkında hiç birşey söyleyemediğinden gerçekçi gerilme dağılımları elde etmek her vakit mümkün olmayabilir. Bunun yanında bazı

dilimlerdeki bazı gerçek dışı gerilmelerin görülmesi ise genel güvenlik faktörünün kabul edilemez olduğu anlamını taşımaz.

Yöntem ve sınırlarının tam olarak anlaşılması sonuçların analiz edilmesinde büyük önem taşımaktadır. Limit denge yönteminin etkili bir şekilde kullanılması için proje süresinde kayma yüzeyi boyunca detaylı kesme kuvvetleri ve geoteknik parametrelerin değişimini incelemekte önemlidir. Mesela bir FS'ye karşılık lamda değişimlerini takip etmek, bir kesişim kuvveti fonksiyonunun tanımlanması konusunda birinin ne denli etkili olması gerektiğinin kararının verilmesinde büyük bir yardımcıdır.

Limit-Denge yöntemlerinde kullanılan yöntemlerin şematik hali Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Limit denge yönteminde kullanılan serbest cisim diyagramı ve kuvvet poligonu da yine Şekil 4.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Limit denge yönteminde serbest gövde diyagramı ve kuvvet poligonu.

Çizelge 4.1 Limit Denge Analizlerinde kullanılan yöntemlerin özeti

METOD	Yatay ve Düşey Kuvvetler	Düşey Denge	Yatay Denge	Moment Dengesi
Fellenius	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	$X = c \cdot h + E \tan \phi$	Evet	Evet	Evet

Ayrıca pratikte kullanılan limit denge analizleri minimum olarak Morgenstern-Price yada Spencer yöntemleri gibi moment-kuvvet dengesini de sağlayan bir yöntemin kullanılması doğru olacaktır.

Sonlu elemanlar yöntemi şekil değiştirme ve gerilmelerin hesaplandığı yarı elastik bir bütün olarak yaklaşımla uygulanmaktadır. Sonlu elemanlar sayesinde hesaplanmış gerilmelere dayanan geoteknik stabilite analizlerin gerçekleştirilmesi için gereken araçlar bugün mevcuttur. Bu araçların uygulanması pratiktir. Belki ileride şuan öngörülemeyen meseleler çıkacaktır lakin geoteknik mühendislik uygulamalarında bu yöntemlerin daha fazla kullanılması bu sorunların zamanla çözüme kavuşmasını sağlayacaktır.

Yapıların kararlılığını analiz etmek için bir limit denge çerçevesi içinde sonlu elemanlar ile hesaplanmış gerilmelerin kullanılması geleneksel limit denge yöntemlerinde bulunan sınırlamaların çoğunun üstesinden geldiği ve uygulama aşamasında rutin kullanılan limit denge yöntemlerinin bilgisine aşinalık kazandırması açısından son derece önemli bir aşamadır.



BÖLÜM 5

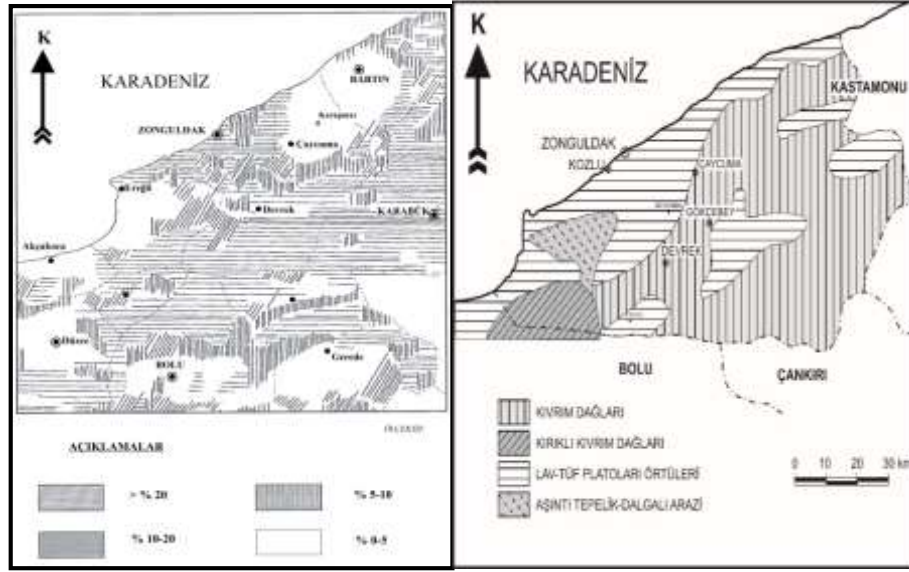
YAPILAN ÇALIŞMA

5.1 İNCELEME ALANI

İnceleme alanı Zonguldak ili Kılıç Mahallesi lojman bölgesi arazi olarak engebeli ve orta yükseklikteki dağların oluşturduğu kısımda yer almaktadır. Bol yağışlı bir iklime sahip olan Zonguldak'da yeraltı su seviyesi yüzeye yakındır. Bölge topraklarının % 52' si ormanlarla kaplıdır ve bulunduğu yer itibariyle Karadeniz iklimi hüküm sürer. Ormancılık, hayvancılık ve tarla tarımı ikinci önemli bir kaynaktır. İl sınırları içinde zengin kömür (kara elmas) yatakları bulunur.



Şekil 5.1 Heyelan bölgesinin yer bulduru haritası (GoogleEarth 2012)



Şekil 5.2 Zonguldak İli ve Yakın Çevresinin Genelleştirilmiş Jeomorfoloji Haritası Genel Eğim Haritası (Yamanel 1987)

Türkiye Taşkömürü Kurumu tarafından çıkarılan maden kömürü bakımından Türkiye'nin en zengin ilidir. Maden kömürü çıkarılan üretim havzasında 14 milyar ton kömür rezervi vardır. Zonguldak ilinde zengin maden kömürü yanında demir, manganez, barit, kalker, dolomit, kuvarsit, alüminyum ve kil de bulunmaktadır. Kömür havzasının boyu 180 km, eni 50 km'dir. Bu bölgedeki kömürün enerjisi bol, kalitesi üstün ve dünyanın en iyi cins taşkömürleri arasında yer alır.

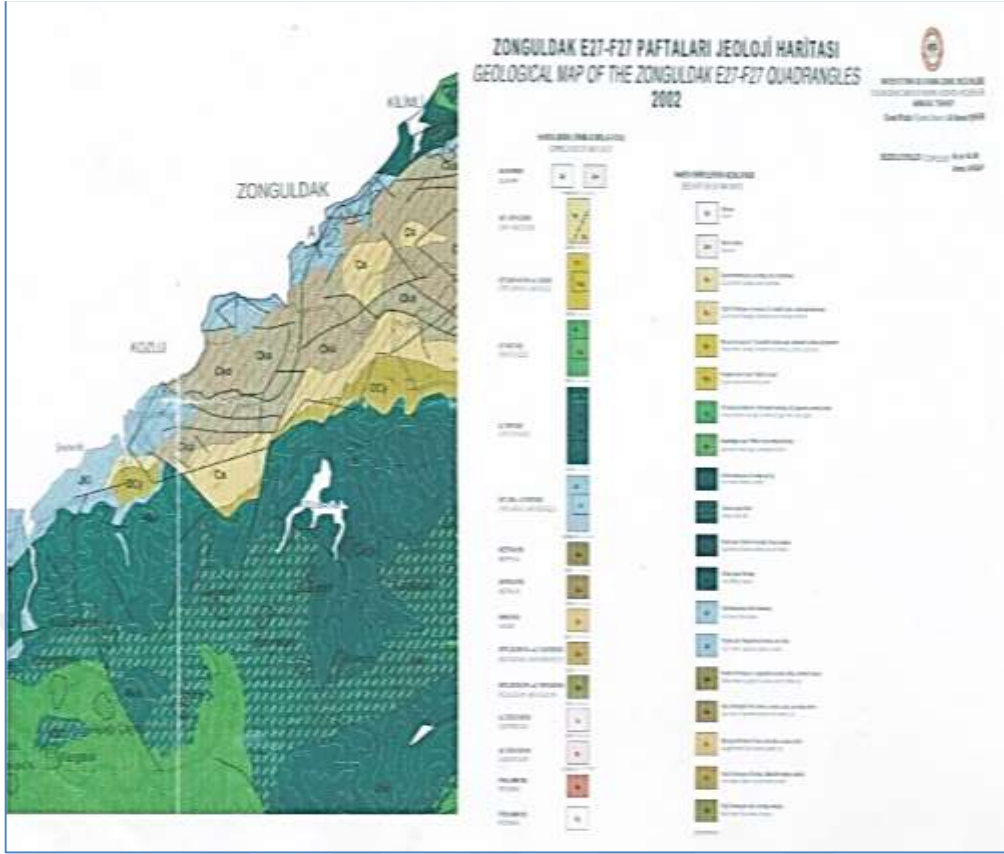
5.2 JEOLJİSİ

İnceleme alanı 1/100000 ölçekli Genel Jeoloji Haritasından hareketle bölgesel olarak Kozlu Formasyonu sınırları içerisinde yer almaktadır.

Kozlu formasyonu yapı olarak kömür damarlı konglomera, kumtaşı, şeyl ve çamur taşlarından oluşan birim, Ralli (1933) tarafından adlandırılmıştır. Zonguldak havzasında kömür kapsayan Karbonifer birimlerinin en önemlisi olan birim, mikalı karbonatlı kumtaşı, orta-kaba taneli kumtaşı, çakıllı kumtaşı, masif veya yatay katmanlaşmış konglomera, organik maddece zengin çamurtaşı ve kömür damarlarının ardalanmasından oluşur. Altan Alacağzı, üstten ise Karadon Formasyonlarıyla geçişli olan birimin kalınlığı Dil ve Konyalı (1978)'e göre 700 m. dir.

Birimin yaşı palinolojik bulgulara göre Westfaliyen A'dır. Kerey (1984) ile Yergök ve diğ. (1987) birimin Üst Namuriyen-Westfaliyen A yaşı olduğunu belirtirler. Birim, delta düzlüğü ve hızla göçen menderesli akarsuların taşkın ovalarından oluşmuştur (Kerey 1984).

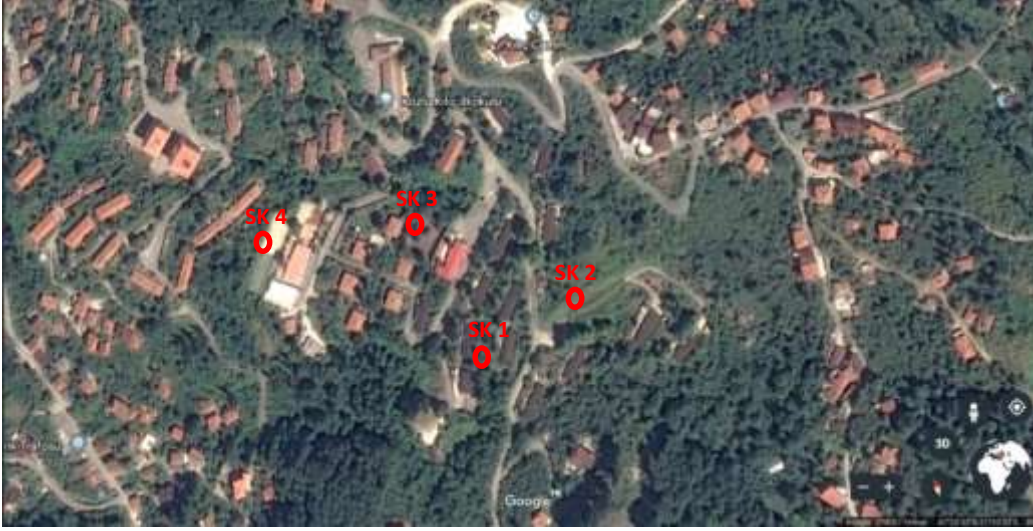
İnceleme alanında yapılan sondaj çalışmalarında toplam 52 m. 4 adet sondaj kuyusu açılmış olup ilerleme sırasında ilk olarak 0-1 metreler arası dolgu malzemesi sonrasında ise kil-silt-kum birimleri daha sonrasında kilaşları arabantlı şekilde ve son olarak ardalanmalı şekilde konglomera çakıllı birimler gözlenmektedir. SK-1 sondaj kuyusunda 0.00 - 1.00 m dolgu malzemesi 1.00-3.60m kil birimleri 3.60 - 4.00 m kilaşı, 4.00 - 11.00 m kumtaşı, kırıklı, konglomera çakıllı birimler ve 11.00 - 12.00 m konglomera birimleri ardalanmalı olarak ilerlemektedir. SK-2 sondaj kuyusunda 0.00 - 1.50 m dolgu malzemesi, 1.50 - 3.50 m kil birimleri, 3.50 - 4.10 m kilaşı, 4.10 - 6.00 m kumtaşı, kırıklı, konglomera çakıllı birimler, 6.00 - 7.20 m silttaşı 7.20 - 7.50 m kömür bandı, 7.50 - 9.50 m silttaşı, 9.50 - 13.00 m kumtaşı, kırıklı, konglomera çakıllı birimler mevcuttur. SK-3 sondaj kuyusunda; 0.00 - 2.70 m dolgu malzemesi, 2.70 - 3.30 m kil birimleri, 3.30 - 4.00 m kilaşı, 4.00 - 6.00 m kumtaşı, iri taneli birimler, 6.00 - 12.50 m kil-konglomera çakılları ardalanması ve 12.50 - 13.50 m konglomera olarak devam etmektedir. Sk-4 sondaj kuyusunda; 0.00 - 1.00 m dolgu malzemesi, 1.00 - 4.10 m kil birimleri, 4.10 - 4.50 m kilaşı, 4.50 - 9.70 m kil-konglomera çakılları ardalanması, 9.70 - 10.10 m kumtaşı, iri taneli birimler, 10.10 - 12.50 m kil-konglomera çakılları ardalanması ve 12.50 - 13.50 m konglomera birimleri mevcuttur. Kilaşları-silttaşları ince taneli dokuya sahip olup yer yer kömür bantları içermektedir. SK-2 sondaj kuyusunda yüzeyden itibaren 7.20 - 7.50 m derinliğe kadar kömür bandı kesilmiştir.



Şekil 5.3 İnceleme alanı 1/100000 ölçekli Genel Jeoloji Haritası

5.3 GEOTEKNİKİNCELEMESİ

İnceleme alanında toplam 52.00 m. derinlikte 4 adet sondaj kuyusu açılmış olup sondaj kuyusu açılmadan önce kazı ve hafriyat çalışması yapılmış ve yüzeyden itibaren ortalama 4.00 - 5.00 m derinliğe kadar ayrılmış kil birim gözlenmektedir. 4.00 m derinlikten sonra Kozlu Formasyonuna ait kahverengimsi renkli ve yer yer kömür bantlarına sahip kumtaşlarından oluşan birimler, konglomera birimleri gözlenmektedir. İnceleme alanında yapılan sondajları Şekil 5.4.'te işaretlenmiştir



Şekil 5.4 Yapılan sondajların inceleme alanındaki konumları



Şekil 5.5 Sondaj alanında yapılan çalışmalardan görüntü

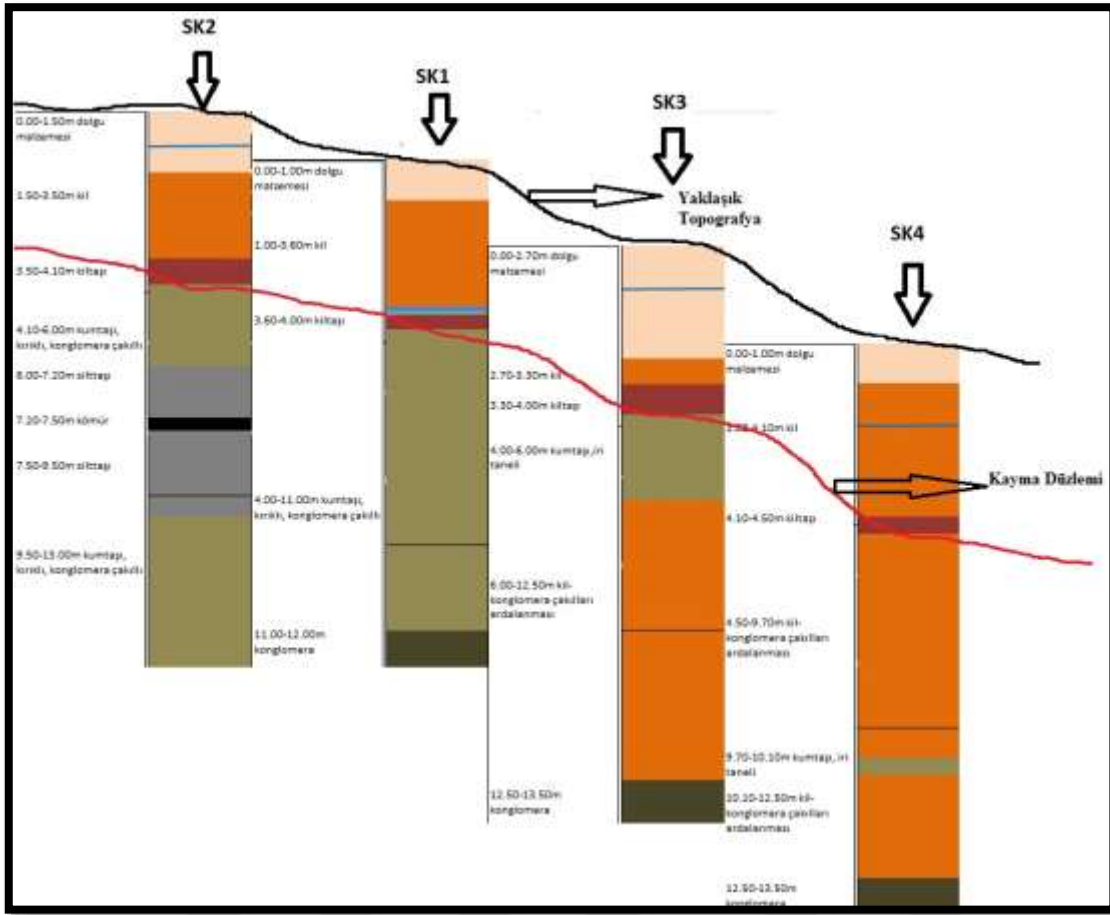


Şekil 5.6 Sondaj numunelerinin görüntüsü

Her sondaj kuyusu adlandırılmış ve her 1.50 m’de Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) sondajlarda yapılarak zeminlerin dayanım parametreleri, sıklık ve kıvam özellikleri belirlenmeye çalışılmış ve örselenmiş örnekler (SPT) alınmıştır. Alınan örnekler izolasyonu ve korunması ile ilgili olarak ASTM D-1586, TSE 1901 standartlarına uyulmuştur.

Çizelge 5.1 SPT deney verileri

KUYU NO		1.50-1.95	3.00-3.45	4.50-4.95	6.00-6.45	7.5-7.95	9.0-9.45	10.5-10.95
SK-1	N30	10	R	-	-	-	-	-
SK-2	N30	8	36	-	-	-	-	-
SK-3	N30	4	4	R	16	30	20	15
SK-4	N30	27	23	-	12	33	23	R



Şekil 5.7 Sondaj loglarına göre kayma düzlemi tespiti

Laboratuvar çalışmaları kapsamında sondajlardan alınan SPT ve CR örnekleri üzerinde zeminin fiziksel – mekanik ve mühendislik parametrelerini belirlemeye yönelik TSE17025 standartlarına sahip laboratuvar deneyleri yaptırılmıştır. Yapılan laboratuvar çalışmaları sonuçları derlenerek toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 5.2 Atterberg Limitleri

Kuyu No	Numune No	Derinlik(m)	Su Muhtevası %	Dbha g/cm ³	No +10	No -200	Atterberg Limitleri			Zemin Sınıfı
							LL	PL	PI	USCS
SK-1	SPT	1.50-1.95	14.98	-	61.7	12.65	-	-	NP	GM
	SPT	3.50-3.95	12.26	-	55.3	29.16	-	-	NP	GC
SK-2	SPT	1.50-1.95	18.12	-	42.7	17.78	-	-	NP	GM
	SPT	3.00-3.45	13.76	-	43.6	25.64	-	-	NP	GC
SK-3	SPT	1.50-1.95	8.93	-	54.6	21.79	-	-	NP	GC
	SPT	3.00-3.45	23.78	-	36.3	12.76	-	-	NP	SM
	SPT	6.00-6.45	20.41	-	32.9	43.68	35	16	19	GC
	SPT	7.50-7.95	22.74	-	37.7	44.31	39	17	22	GC
	SPT	9.00-9.45	16.78	-	44.2	35.02	-	-	NP	GC
	SPT	10 -10.45	19.16	-	45.5	16.37	-	-	NP	GM
SK-4	SPT	1.50-1.95	23.6	-	0	90.09	44	21	23	CL
	SPT	3.00-3.45	19.42	-	0	83.37	40	21	19	CL
	SPT	6.00-6.45	10.88	-	65.1	16.43	-	-	NP	GM
	SPT	7.50-7.95	19.4	-	47.4	32.98	-	-	NP	GC
	SPT	9.00-9.45	13.29	-	38.7	20.33	-	-	NP	SM
	SPT	10 -10.45	16.03	-	40.6	15.38	-	-	NP	SM

İnceleme alanında yapılan sondajlarda kesilen Kuvaterner yaşlı Alüvyon (Qal) birimlere ait indeks ve fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla, sondaj kuyularından alınan SPT örnekleri üzerinde gerekli deneyler yapılmış ve sonuçlar Çizelge 5.1’de sunulmuştur. Atterberg Limitleri yapılan 16 adet su içeriği deneyi sonuçlarına göre su içeriği en düşük % 8.93, en yüksek % 23.78 aralığında değişmektedir. Ortalama % 17.09 olarak bulunmuştur. İnceleme alanında yapılan toplam 52 m derinlikteki 4 sondajda; SK-1 nolu sondaj kuyusunda 1.70 m’de, SK-2 nolu sondaj kuyusunda 1.00 m’de ve SK-3 nolu sondaj kuyusunda 1.00 m ve SK-4 nolu sondaj kuyusunda 2.0 m’de yer altı su seviyesine rastlanılmıştır. İnceleme alanında yapılan sondaj çalışmasında alınan karot numuneleri üzerinden de kayaçların mekanik özelliklerine ulaşılmıştır. Buna göre yapılan deneyler ve sonuçları Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3 Karot numuneleri deneyleri

Sondaj No.	Numune Türü	Derinlik (m.)	Nokta yükleme Is =kgf/cm ²
SK-1	KAROT	4.70-4.85	186.02
SK-1	KAROT	7.70-7.90	247.58
SK-2	KAROT	12.65-12.80	272.11
SK-3	KAROT	4.15-4.30	156.65
SK-3	KAROT	13.0-13.10	318.20
SK-4	KAROT	10.20-10.30	304.56
Ortalama	-	-	247.52

Bu birim üzerinde yapılan Nokta yükleme deney sonuçları değerlendirildiğinde Deere ve Miller sınıflamasına göre **çok düşük dayanımlı kaya** sınıfına girmektedir.

Çizelge 5.4 Deere ve Miller (1966) sınıflamaları

Sınıf	Dayanım	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (kgf/cm ²)
A	Çok Yüksek	> 2200
B	Yüksek	1100 – 2200
C	Orta	550 – 1100
D	Düşük	275 - 550
E	Çok düşük	< 275

5.4 JEOFİZİKSEL İNCELEMESİ

Sismik yöntemler: olarak inceleme alanında çok atışlı sismik yöntemi kullanılmış, P dalgası kayıtları elde edilmiştir. Kayıtlar değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Sismik kesitler çıkarılmış, kayma yüzeyi belirlenmeye çalışılmıştır. İnceleme alanında yapılan Sismik kırılma, Sismik yansıma ve Yüzey dalgası analizi çalışmaları Şekil 5.8.'de sismik kırılma, sismik yansıma ve yüzey dalgası analizi dalgalarının arazide elde edilmesi ise Şekil 5.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 5.8 İnceleme Alanında yapılan Sismik çalışmalar



Şekil 5.9 Sismik kırılma, sismik yansıma ve yüzey dalgası analizi dalgalarının arazide elde edilmesi

İnceleme alanında sismik P ölçüm kayıtları kırılma tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen kayıtlardan oluşturulan dalganın jeofonlara varış zamanları belirlenerek hız ve tabaka kalınlıkları hesaplanmıştır.

Çalışma alanında 1 profil alınarak, serim uzunluğu 52 m olarak belirlenmiştir.

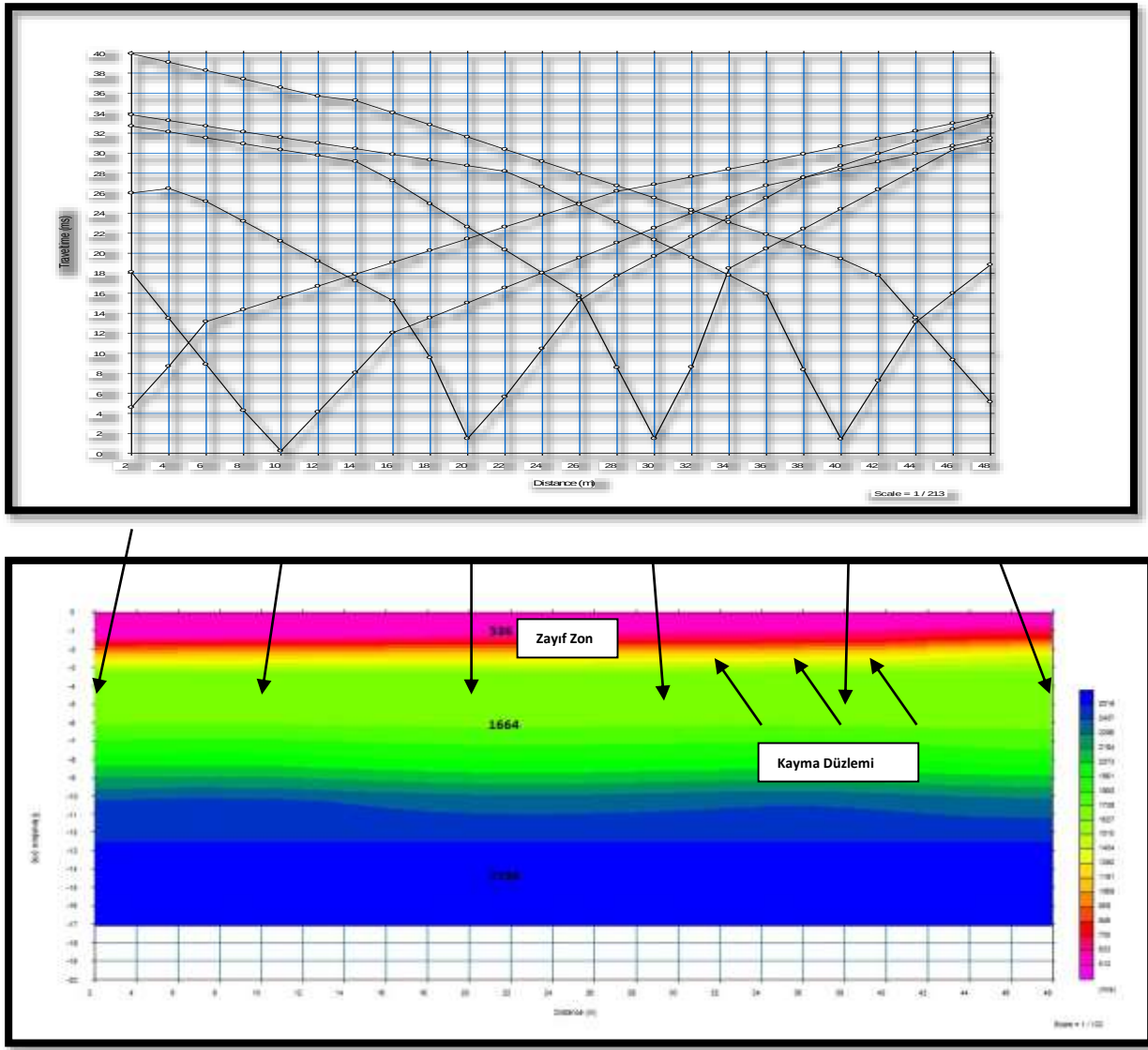


Şekil 5.10 Çok atışlı Sismik kırılma çalışmasının arazideki konumu

Birinci tabakanın boyuna dalga hızı (VP_1) 386 - 587m/s arasındadır. 1. tabaka kalınlığı 1 - 3 m arasında değişmektedir. Hızı düşük olan üst tabaka gevşek yapıda az killi ve çakıllı siltli birimlerdir. Formasyonuna ait konglomera birimleri yer alır. Sismik P dalgası hızı (VP_2) 1500 - 1750 m/s arasında değişmektedir. Kalınlığı 3 - 8 m arasında değişim göstermektedir.

3.Tabakada ise yine Kozlu Formasyonuna ait birimler ardalanmalı olarak yer almaktadır. Tabaka hızı (VP_3) 2000 - 3000 m/s arasındadır. Kalınlık ise 8 - 20 m arasında değişir. İlk tabaka kayan malzemeden oluşmaktadır. En üst tabaka kalınlığı düşük hızlıdır ve heyelan malzemesidir. Arada iri bloklar vardır. Bu bloklarında diğer düşük hızlı malzemeye birlikte kaydığı gözlemlenmiştir. Yamaç yukarısında bulunan malzeme heyelan ile yamaç aşağılarına doğru kaymıştır.

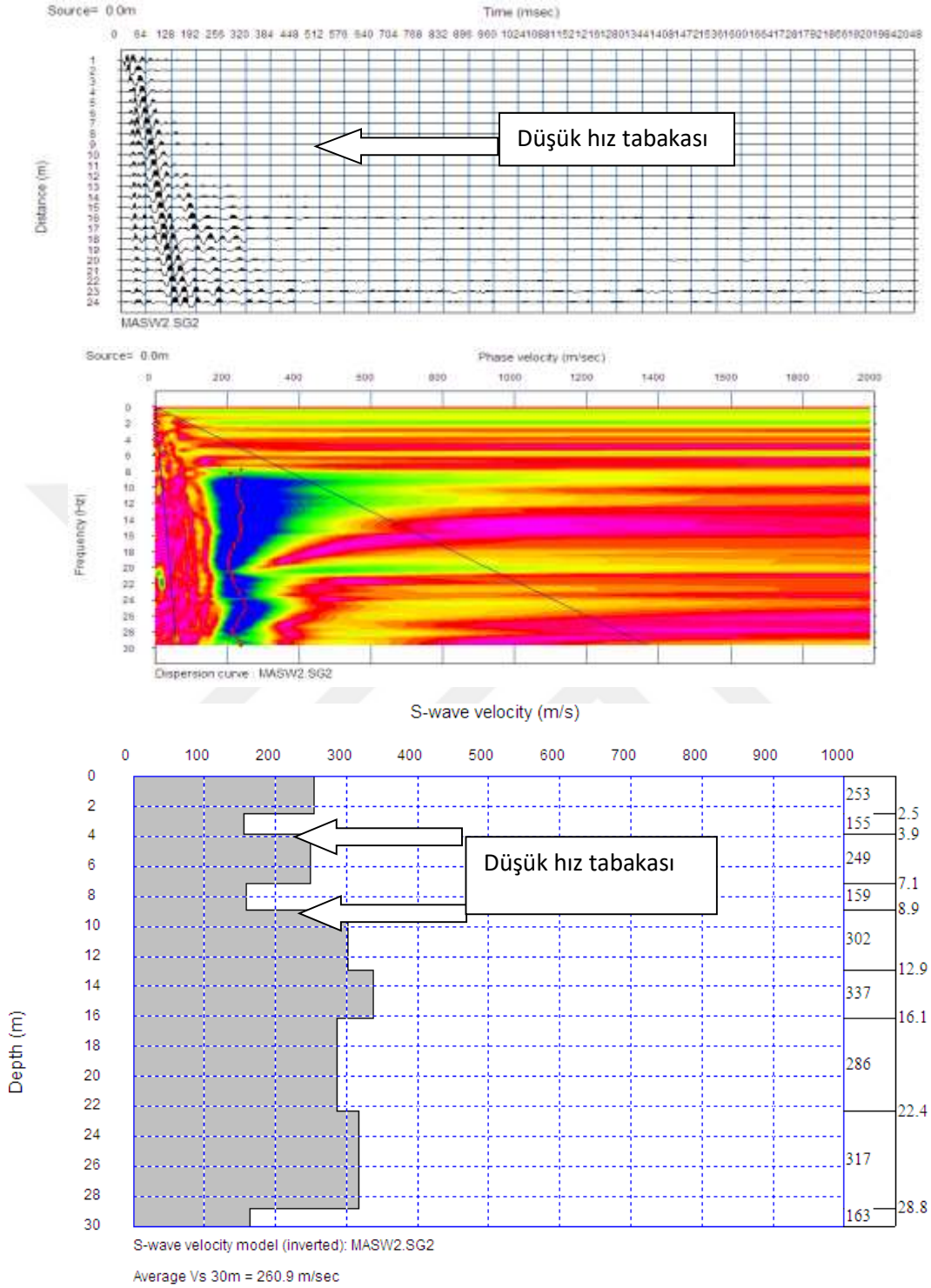
Sismik Kayıt Uzaklık - Zaman Grafikleri ile yapılan sismik kırılma çalışmalarında bir serim üzerinde alınan tüm kayıtlar tek bir x – t grafiğine işaretlenmiştir. Noktalar arasında en uygun eğri işaretlenmiştir. Eğimden her bir tabakaya ait hız bulunmuştur. Bu verilerle yer altı modeli oluşturulmuştur.



Şekil 5.11 Sismik verilerle oluşturulan yeraltı modeli

Yüzey Dalgası Analiz Yöntemi MASW (Multichannel Analysis Surface Waves) tekniği ile yüzey dalgası analizi için alınan ölçümlerin değerlendirilmesi gösterilmiş olup düşük hız tabakasının varlığı tespit edilmiştir.

Çizelge 5.5 Hat 2 MASW Değerlendirmesi



Yukarıdaki değerlendirmeler göz önünde bulundurularak hemen hemen hepsinde düşük hız tabakası gözlemlenmiştir. Hat 9 da düşük hız tabakasının varlığının olmayışı hat 9 'daki ölçümün bölgedeki kaymanın topuğunda alınmasıdır. Bu ölçüyle de kayma topuğu da sınırlanmıştır. Düşük hız tabakası için yapılmış olan sismik kırılma yöntemi ile neredeyse

aynı metrajlarda bir yorum elde edilmiştir. Buradaki tabaka kalınlıkları 2 - 6 m civarında değişmektedir.

Çalışmada; heyelan alanında, yöntem olarak seçilen A.C. Özdirenç Yöntemi, Düşey Elektrik Sondajı, Schlumberger Elektrot Dizilimi kullanılarak 6 noktada çalışma yapılmıştır. Bunlardan tüm ölçüm noktaları değerlendirilmiştir. Elde edilen değerler Ip 2 win programında ve Schlumberger programında yeniden çizdirilmiş olup Surfer adlı Programda yer altı kesiti oluşturulup kayma düzlemi tespit edilmiştir.



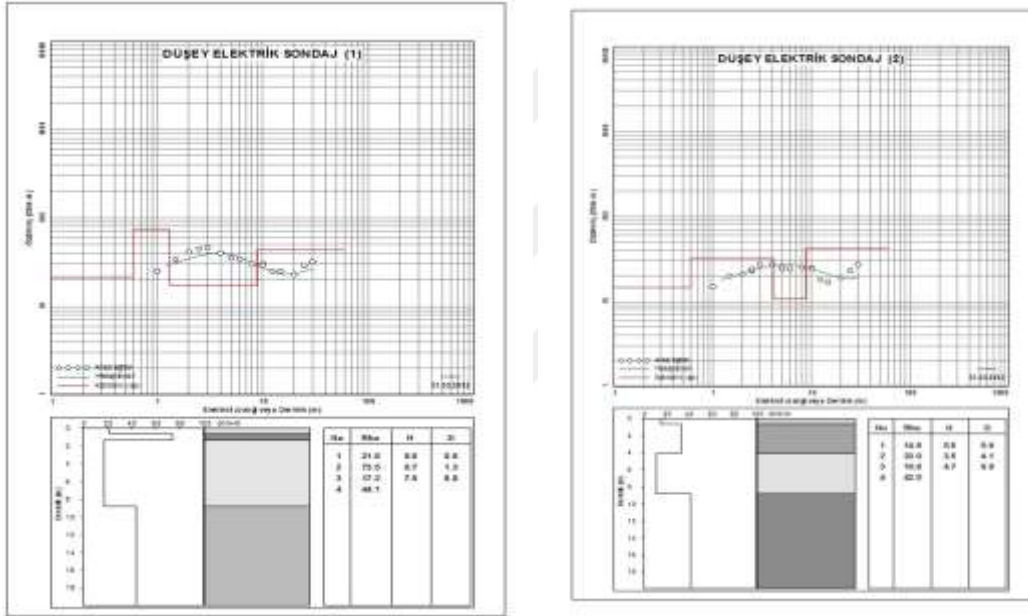
Şekil 5.12 Rezistivite çalışmalarından görünümeler.

İnceleme alanında yapılan düşey elektrik sondajları Şekil 5.13.'te gösterilmiştir.

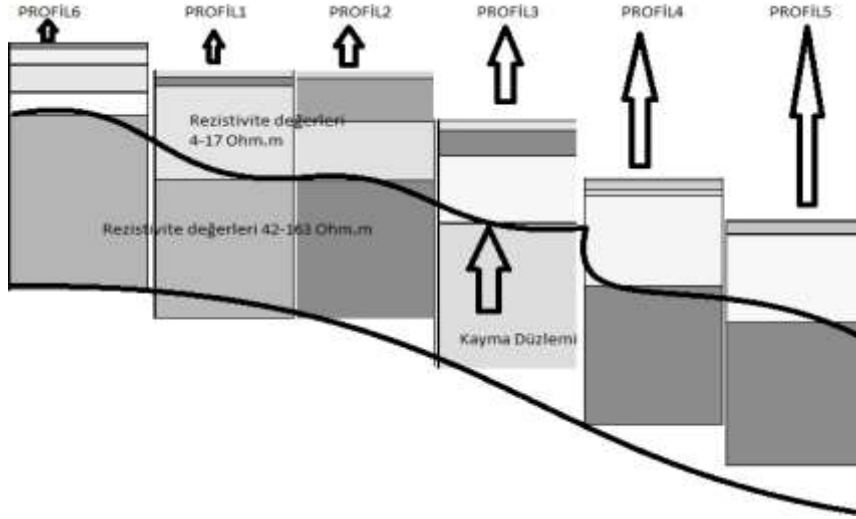


Şekil 5.13 İnceleme alanındaki düşey elektrik sondajların konumları

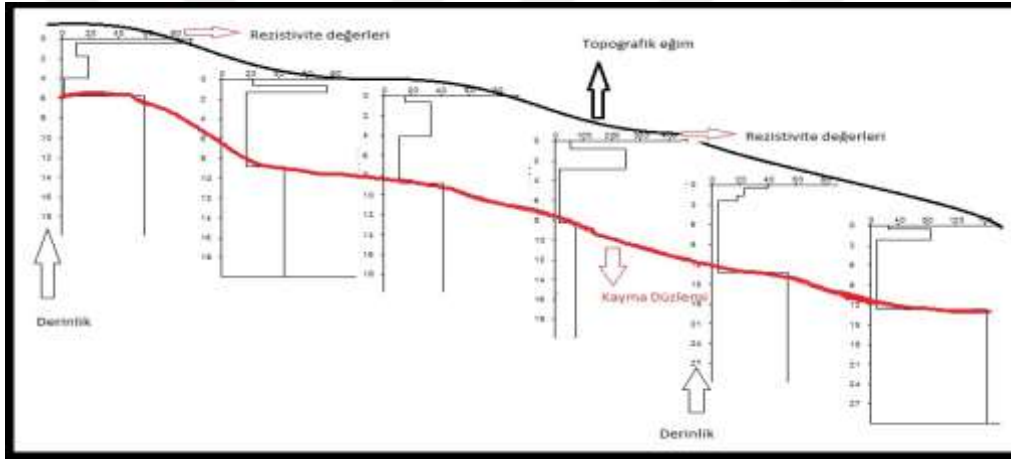
Ana kaya üzerindeki feyezan malzemesinin kalınlığının ve kaymaya neden olan alterasyon zonu belirlemek için, AC Özdirenç Yöntemi ile Düşey Elektrik Sondajı, Schlumberger Elektrot Dizilimi kullanılarak 6 noktada çalışma yapılmıştır. 6 noktada alınan ölçümler bir hat oluşturacak şekilde birleştirilerek yer altı kesiti çıkartılmıştır ve yer altı kesitinde kayma düzlemi gösterilmiştir. Ölçüm alınan alan akma yüzeyidir ve altında kırıklı bir yapıya rastlanılmamıştır. Ana kaya üzerini dolduran akıntı malzemesidir ve yer yer büyük blok kitleleri de bulunmaktadır. Heyelan alanının ana kayası basamaklı bir yapıdadır ve üzerini gevşek, düşük hızlı feyezan malzemesi doldurmaktadır. Kozlu İlçesindeki heyelan bölgesinde heyelanın konumunu saptamak amacıyla 6 noktada Düşey Elektrik Sondajı (DES) yapılmıştır.



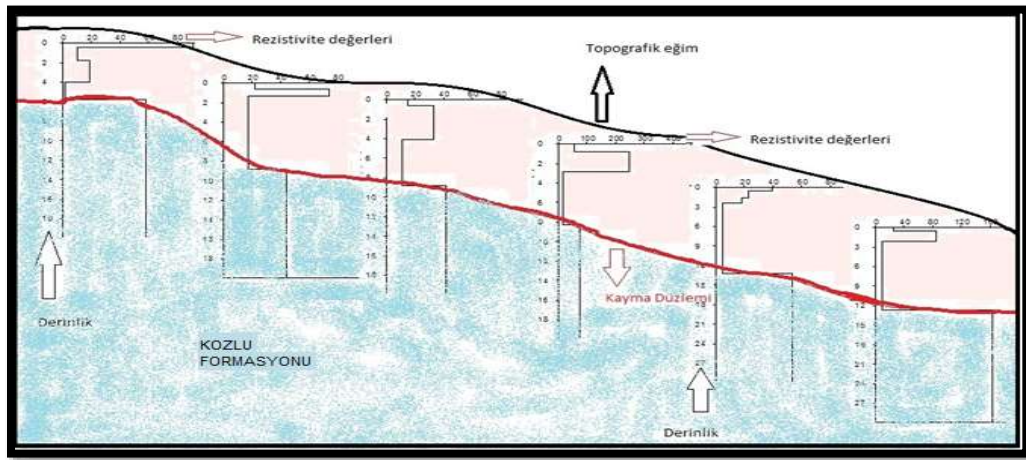
Şekil 5.14 Elektrik ölçümlerinden profil oluşturularak yer altı kesiti ve rezistivite değerleri



Şekil 5.15 Profillerin birleştirilerek Rezistivite değerlerine göre kesiti



Şekil 5.16 Profillerin birleştirilerek Rezistivite değerlerinin tabaka kalınlıklarına göre kesiti



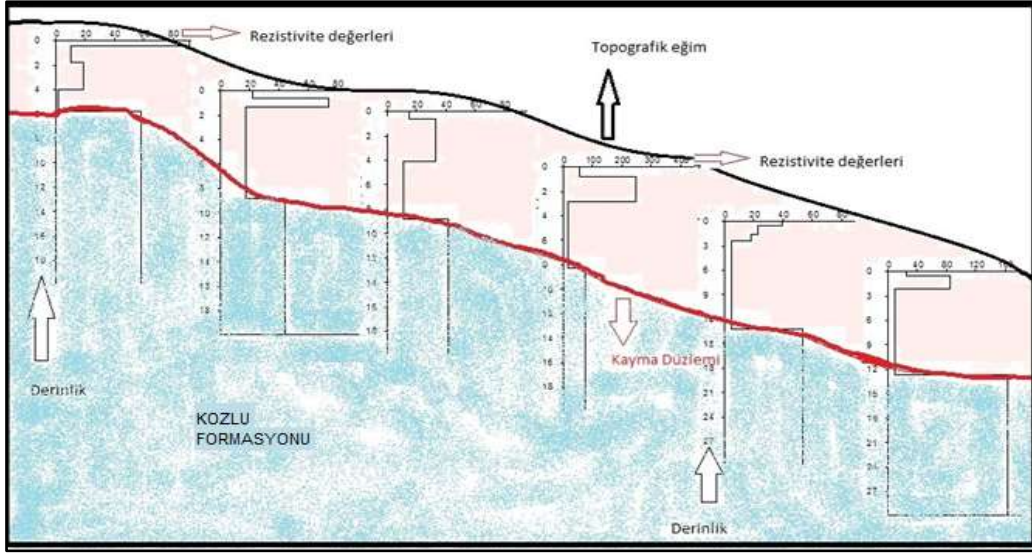
Şekil 5.17 Hatların birleştirilerek Rezistivite değerlerinin tabaka kalınlıklarına ve topografyaya göre konumu

Profil 1'in rezistivite değerleri katmanlı yapı modelinde ölçüm alınan noktaların topografik düzeltmeleri yapıldıktan sonra yaklaşık olarak 4 - 5 m bir feyezan malzemesinin olduğu tespit edilmiştir. Hat 6 da yüzeyden başlayarak 5 m, hat 1'de 6m, hat 2'de 4 m, hat 3'de 5 m, hat 4'de 6 m ve hat 5'de 6 m olarak feyezan malzemesinin varlığı tespit edilmiştir. Bu metrelerden sonra rezistivite değerleri anakaya olarak kozlu formasyonuna ait kum taşı-silt taşı birimlerine girmektedir.

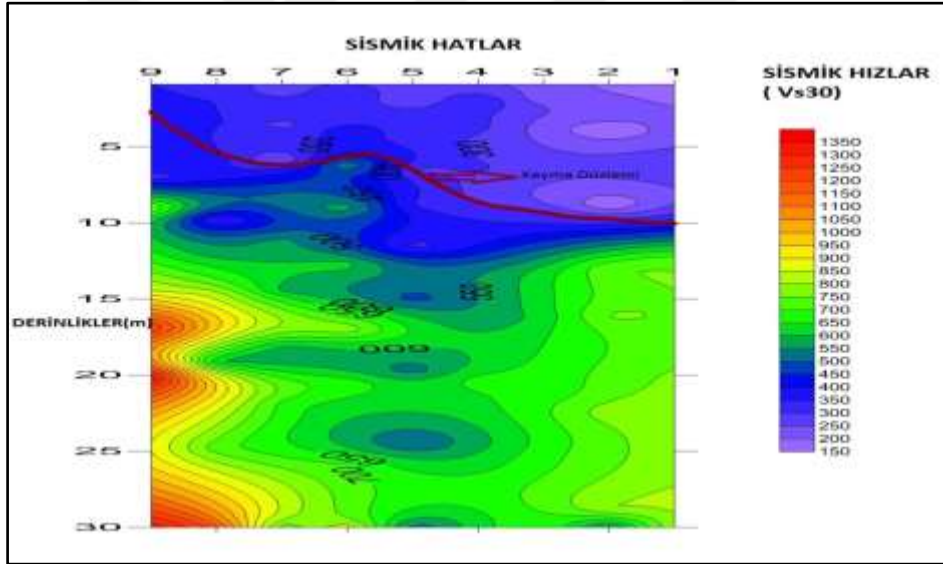
Aşırı yağış, üzerindeki yükler ve arazi eğimi nedeni ile; Kozlu formasyonunun üzerindeki feyezan malzeme aşırı doygun hale geldikten sonra akma seviyesi olarak Kozlu formasyonunun üzerinden kaymaya başlamıştır. Profil 1'in topografik gösteriminde kayma yönüne dik olarak alınan ölçülerin topografik gösterimi verilmiştir. Aynı şekilde kayma bölgesinin başlangıcı ve sonunda bu malzemenin yaklaşık derinlikleri gösterilmiştir. Bu seviyenin zemin mekaniği laboratuvarlarında yapılan Atterberg limitleri deneylerine göre yüksek plastisiteli olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla fazla yağışlarda likit limitlik sınır aşıldığı için zeminde akma olayları meydana gelmektedir. Hat 6'da bitkisel örtüden sonra aşırı doygun birime (silt+kil+kum+çakıl) girmiş daha sonra Kozlu formasyonuna girmiştir. Bu tanımlama hemen hemen hepsinde aynı şekilde ifade edilebilir.

Kozlu formasyonun basamaklı yapısı heyelanın daha büyük boyutta oluşunu engellemektedir. Yani basamakların çukurluğunda yer alan malzemelerin akması engellenmiş durumdadır. Dolayısıyla heyelan daha çok üst seviyelerdeki killerin su içeriğinin artmasıyla likit limit sınırının aşılması ve eğimin fazla oluşu nedeniyle akma şeklindedir. Bu akan malzeme üzerindeki bloklu seviyeyi de birlikte aşağıya doğru taşımaktadır.

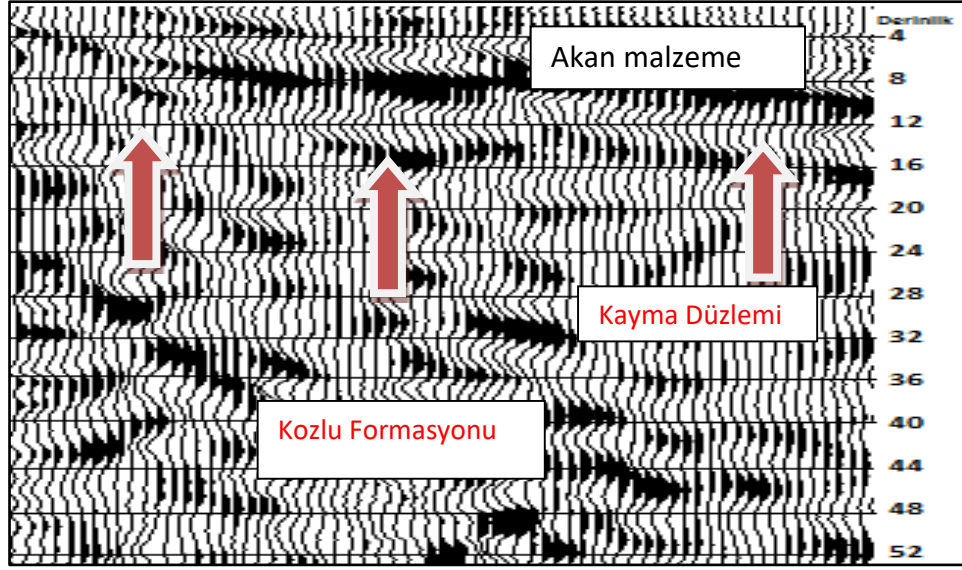
Özetle sismik ve sondaj verilerinin birlikte değerlendirilmesi durumunda; Anakaya olarak Kozlu formasyonu birimlerinin tabakalı yapısı yine ayırt edilmiştir. Basamak şeklindeki formasyon üzerini dolduran heyelan tabakaları görölmektedir.



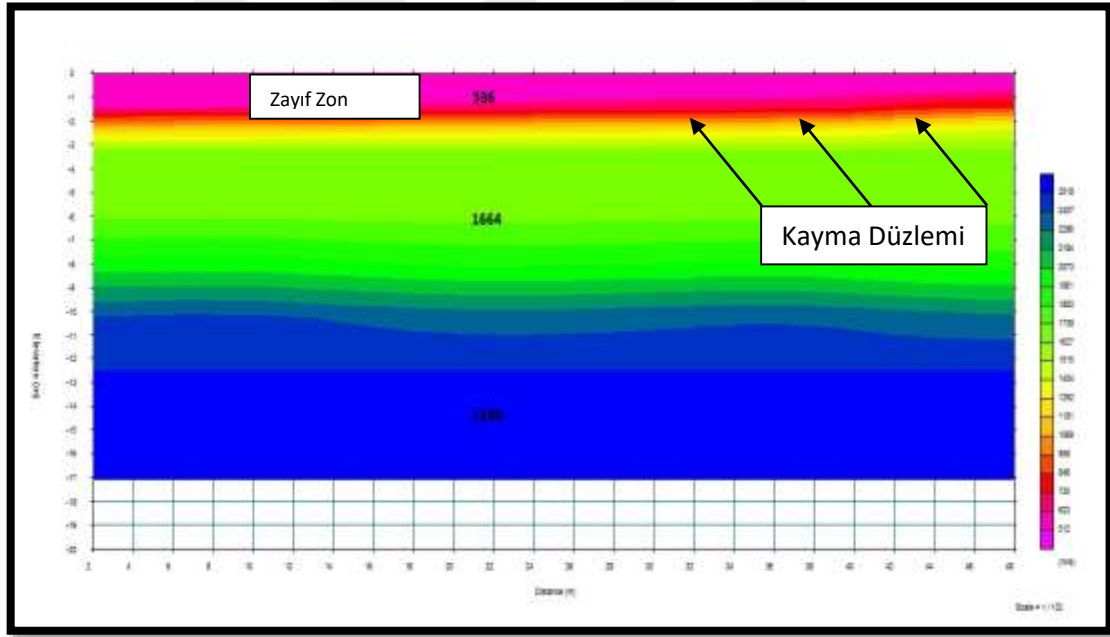
Şekil 5.18 Rezistivite ölçümlerine göre kayma düzleminin belirlenmesi



Şekil 5.19 Yüzey dalgası analizi ölçümlerine göre zayıf zonların tespiti



Şekil 5.20 Sismik yansıma çalışmasına göre kayma düzlemi tespiti kesiti



Şekil 5.21 Çok atışlı Sismik Kırılma ile formasyon sınırları

5.5 HİDROLOJİK İNCELEMESİ

İnceleme alanında yapılan toplam 52 m derinlikteki 4 sondajda; SK-1 nolu sondaj kuyusunda 1.70 m’de, SK-2 nolu sondaj kuyusunda 1.00 m’de ve SK-3 nolu sondaj kuyusunda 1.00 m ve SK-4 nolu sondaj kuyusunda 2.0 m’de yer altı su seviyesine rastlanılmıştır. İnceleme alanı yakınlarından geçen akarsu bulunmaktadır fakat kot farkından dolayı kayma düzlemini fazla

etkilememektedir. Bununla birlikte aşırı yağış nedeni, inceleme alanı üst taraflarında bulunan su depolarının taşması, drenaj sistemlerinin dolması ve dolayısıyla bölgede bulunan su miktarının artması nedeniyle inceleme alanının eğiminden dolayı kayma gerçekleşmiştir.

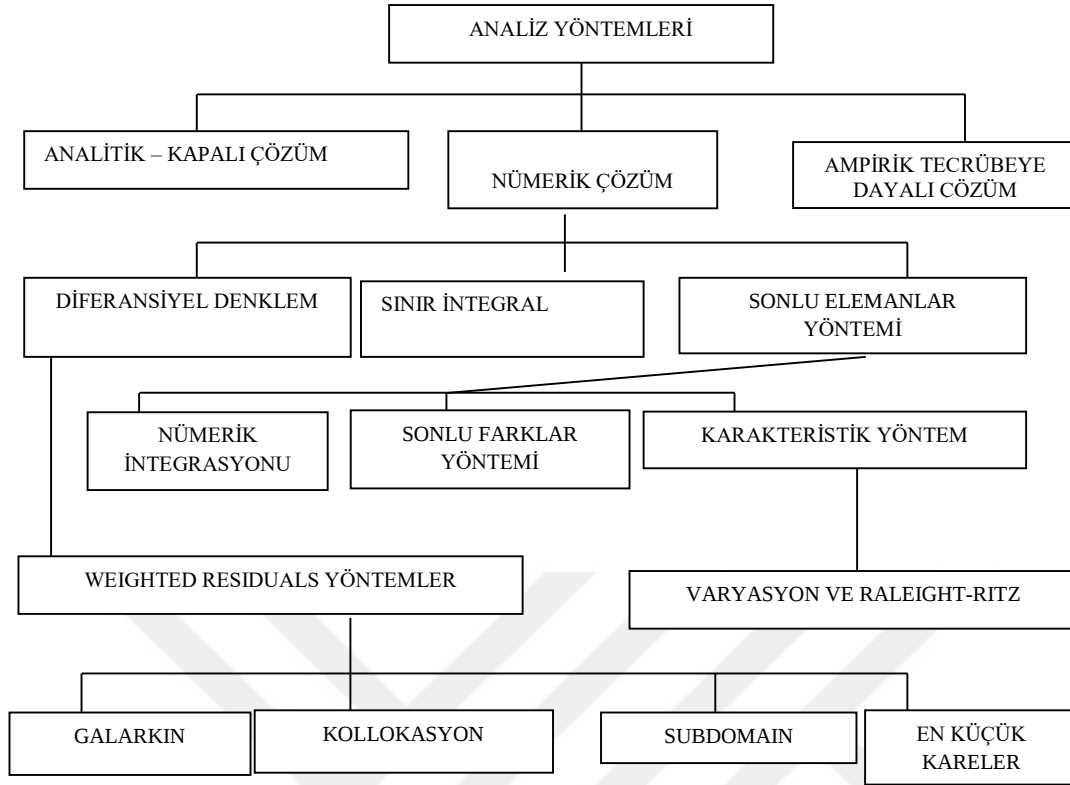


BÖLÜM 6

SAYISAL MODELLEME

6.1 GİRİŞ

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında, amprik bağıntılar ile yapılan analizler genelde yaklaşık sonuçlar vermesi yanında, gerçek değerden çok uzak değerlerde sonuçlar verebilmektedir. Jeolojik ortamları sürekli ortam gibi kabul eden, çeşitli etkiler karşısında davranışı (yükleme, sızıntı, konsolidasyon v.b.) fiziksel bir temele dayanan teoriler ileri sürülmüştür. Terzaghi (1943) geliştirdiği “Konsolidasyon Teorisi” ile geoteknik mühendisliğinde fiziksel bir temele dayanan ilk teoridir. Geliştirilen bu teoriler matematiksel olarak diferansiyel denklemlerden meydana geldiği için kapalı çözümlere ulaşmak için basit kabuller yapmak gerekmektedir. Bu yaklaşımlar pratik durumlar için yeterli çözümü sağlamasına karşın jeolojik ortamların homojen olmayan yapısı, non-lineer malzeme davranışı, ortamın geometrisi, ortam içindeki süreksizlikler, malzeme özelliklerinin zaman ve ortamla değişimi v.b. karmaşık özellikler nedeniyle problemin gerçekçi çözümlere ulaşması zaman almaktadır. Bu nedenle geoteknik problemlerin analizinde adı geçen faktörlerin bir çoğunu aynı anda göz önüne alan nümerik yöntemler geliştirilmiş olup bunların çoğu yukarıda sözü edilen teorilerin matematiksel ifadesi, diferansiyel denklemlerin çözümünde nümerik analiz yöntemlerinin uygulanmasıdır (Wood 2006). Bilgisayarların gelişmesine bağlı olarak nümerik analiz yöntemlerinin gelişmesi ve birçok özelliği aynı anda göz önüne alabilmesi önemlidir. Desai ve Abel (1972) tarafından verilen ve geoteknik problemlerin çözümünde kullanılan nümerik analiz yöntemleri Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Burada adı geçen yöntemlerden *Sonlu Elemanlar* yöntemi gerilme-şekil değiştirme-konsolidasyon analizinde en yaygın olarak kullanılan yöntemdir.



Şekil 6.1 Nümerik analiz yöntemleri (Desai ve Abel 1972)

Analizlerde, toplam gerilme izini elastik analizle, boşluk suyu basıncının veya efektif gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin elasto-plastik analizle tahmin edilmesi yönteminde analizler iki bölüme ayrılarak basitleştirilmekte ve gerçek çözümden uzaklaşmaktadır. Ancak gerçeğe yakın çözümler, gelişmiş bünye eşitlikleri kullanılarak, bilgisayarlarla yapılan nümerik analiz yöntemleri ile elde edilebilmektedir. Sonlu elemanlar nümerik analiz yöntemi, Zienkiewicz (1977), tarafından, matematiksel ifadelerle tanımlanan sürekli problemlerin genel çözüm yöntemi olarak tanımlanmıştır. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemi şeklinde olmak üzere sayısal yöntemlerin genelde mühendislik problemlerine ve özelde geoteknik problemlerine uygulanması üzerine yazılmış çok sayıda kitap bulunmaktadır. (Taylor 2000, Cook, Malkus ve Pleska 1989, Cook 1995, Livesley 1983, Smith ve Griffiths 1988, Britto ve Gunn 1987) Geoteknik problemler için matematiksel ifadeler; su akışı (boşluk suyu basıncını içeren problemler) ve denge eşitlikleri, sınır durumları ve deformasyonların uygunluğu ve gerilme-şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi tanımlayan eşitliklerdir (Wood 1990).

6.2 SONLU ELEMANLAR YAKLAŞIMI

Sonlu elemanlar yöntemi günümüzde birçok mühendislik dalında olduğu gibi geoteknikte de yaygın olarak kullanılan bir sayısal analiz yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi mühendisliğin çok geniş bir alanında sınır değer problemlerine uygulanabilmektedir (katı cisim mekaniği, termoelastite, termodinamik, akışkanlar mekaniği, magnetizma vb). Bu yöntem, bilgisayar yazılımları için en uygun formülasyona sahiptir. Bunun nedeni, karmaşık sınır koşulları ve non-lineer malzeme davranışını modellemeye uygun ve homojen olmayan malzemeler gibi zor ve karmaşık problemlerin çözümünde sistematik bir programlama için elverişli olmasıdır.

Herhangi bir geoteknik tasarım yapılırken yerel veya toptan göçme olup olmayacağı kesit tesirlerinin (eğilme momenti, eksenel kuvvetler veya kesme kuvvetleri) değeri yapı ve komşu zeminde meydana gelecek deformasyonlar oluşturulan yapı nedeniyle çevre yapılar veya servis ağlarında oluşacak etki dikkate alınması gereken konudur. Analitik çözüm yöntemleri yukarıda belirtilen çözümlerin tamamını tek bir çözümde ele alamadıkları için sadece göçme ile ilgili fikri verebilmektedirler. Sonlu elemanlar yönteminde gerçeğe uygun zemin profilleri tanımlanabilmekte ve tüm dış yapı ve yükleme etkileri hesaplarda dikkate alınmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi çözüm olarak, sürekli bir sistemi problemin karakteristiğine bağlı sonlu elemanlara ayırarak, elemanlar üzerinde iç ve dış kuvvetleri minimum olması ve sonra bu elemanların birleştirilmesi şeklinde çözüm üretir. Bunun sonucu olarak, sınır koşulları, sisteme ait özellikler, dış yüklerin sürekli veya ani değişimleri kolayca göz önüne alınır, ayrıca sürekli sistemin tipik bölgelerinde eleman boyutları küçültülerek o bölgenin daha ayrıntılı incelenmesi mümkün olmaktadır. Sınır şartlarının problemin çözüm sırasına göre en son adımda hesaplara dâhil edilmesi en önemli özelliğidir. Bu durum çeşitli sınır şartlarını probleme uygularken baştaki yoğun hesapların tekrarına gerek kalmamasıdır.

Geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasına 1966 yılında başlanmıştır. Bu amaçla, Clough ve Woodward (1967), dolguda gerilmeleri, yanıl ve düşey hareketleri belirlemek ve Reyes ve Deene (1966), yeraltında kayada kazı yapılması uygulamalarında kullanmışlar ve geçen 40 yıllık zaman süresince teoride ve pratikte birçok avantajlar sağlanmıştır. Çoğu geoteknik sonlu eleman analizleri gerçek yapıyı modelleyecek şekilde adım adım (aşamalı yükleme, aşamalı kazı) yapılmaktadır. Birinci adımda; analizlerde

dolgu yerleştirilmesi veya kaldırılması durumunda, geometri her bir adımda değişmektedir. Geometrideki değişim sonlu elemanlar ağına eleman ekleyerek veya kaldırılarak modellenabilmektedir. Diğer adımda; zemin kütlesi içinde gerilmelerin değişimi sonucu her bir yükleme kademesinde zemin özellikleri değişmektedir.

Sonlu eleman methodu sonucunda gerilmeler, yanal ve düşey hareketler, boşluk suyu basınçları ve zemin suyu akışı vb. belirlenebilmektedir. Zeminlerin gerilme - şekil değiştirme davranışı non-lineer olduğundan geoteknik mühendisliği sonlu eleman analizlerinde bu davranışın modellenmesi, yapımdan önceki başlangıç gerilme durumu, zeminin non-lineer gerilme - şekil değiştirme, mukavemet özellikleri, yükleme aşamaları arasındaki bekleme süreleri analizlerde gerçek duruma yakın olarak belirlenmelidir (Department of the Army 1995).

Sonlu Eleman Formülasyonu: Sonlu elemanlar formülasyonun da deplasman (yer değiştirme) yöntemi uygulanmıştır, yani deplasmanlar esas bilinmeyen olarak kabul edilmiştir. Deplasmanların esas bilinmeyen olarak seçildiği sonlu elemanlar uygulamaları için şu formülasyonlar uygulanmaktadır.

Sürekli bir ortamın statik dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$[L^T] \{\sigma\} + \{p\} = 0 \quad (6.1)$$

Bu eşitlikte $\{\sigma\}$, altı gerilme bileşeninin kısmi türevini içeren vektörü $\{p\}$, kütle kuvvetlerinin 3 bileşenini göstermektedir. $[L^T]$, diferansiyel operatörün transpozesidir. $[L^T]$ aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$[L^T] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Denge eşitliğine ek olarak kinematik ilişki aşağıdaki gibi yazılırsa,

$$\{\varepsilon\}=[L] \{u\} \quad (6.3)$$

elde edilir.

Eşitlikteki $\{\varepsilon\}$, altı şekil değiştirme bileşeni vektörü $\{u\}$, üç yer değiştirme bileşeninin kısmi türevi ve $[L]$, ise diferansiyel operatördür. (6.1) ve (6.3) eşitlikleri arasındaki ilişki, malzeme davranışını temsil eden bünye ilişkileri ile aşağıdaki eşitlikle sağlanır.

$$\{\dot{\sigma}'\}=[M] \{\dot{\varepsilon}\} \quad (6.4)$$

Burada $[M]$ bünye matrisidir ve (5.1), (5.2) ve (5.3) eşitliklerinin birleşimine, Galarkin varyasyon prensibi uygulanarak denge eşitliği belirlenir ve bu eşitliğe Green Teoremi uygulanarak aşağıdaki virtüel iş eşitliği elde edilebilir.

$$\int \delta\{\varepsilon^T\} \{\sigma\} dV = \int \delta\{u^T\} \{p\} dV + \oint \delta\{u^T\} t dS \quad (6.5)$$

Eşitlikteki $\{t\}$, vektörü S yüzeyindeki kuvvetleri ve $\{p\}$, ise V hacmindeki cismin kütle kuvvetlerini göstermektedir. $\{\varepsilon^T\}$ V hacmindeki cismin şekil değiştirme matrisini göstermektedir. Meydana gelen gerilmeler artımsal biçimde aşağıdaki gibi gösterilebilir;

$$\{\sigma^i\}=\{\sigma^{i-1}\}+\{\Delta\sigma\} \quad \{\Delta\sigma\}=\int \dot{\sigma} dt \quad (6.6)$$

eşitlikteki $\{\sigma^i\}$, bilinmeyen gerilmenin başlangıç durumunu, $\{\sigma^{i-1}\}$, bilinmeyen gerilmenin bir adım önceki değerini, gerilme artımı $\{\Delta\sigma\}$ 'da küçük bir zaman artışı üzerinden integre edilen gerilme hızını belirtir. (5.5) eşitliği yeniden düzenlenirse,

$$\int \delta\{\varepsilon^T\} \{\Delta\sigma\} dV = \int \delta\{u^T\} \{p^i\} dV + \oint \delta\{u^T\} t^i dS - \int \delta\{\varepsilon^T\} \{\sigma^{i-1}\} dV \quad (6.7)$$

elde edilebilir. (6.1)-(6.7) arasındaki eşitliklerde gösterilen bütün büyüklükler üç boyutlu uzayda düşünülmelidir. Sonlu elemanlar yöntemine göre, bir sürekli ortam birçok elemana

ayrılır ve her bir eleman üzerindeki düğüm noktaları bir serbestlik derecesine sahiptir. Deformasyon teorisinde serbestlik derecesi yer değiştirme bileşenlerine karşılık gelir ve bir eleman içindeki yer değiştirme vektörü $\{u\}$ ile, herhangi bir noktada $\{u\}$ deplasmanlarının düğüm noktasındaki ifadesi $\{v\}$ ile, şekil fonksiyonlarını içeren matris ise $[N]$ ile gösterilir ve deplasmanlarının düğüm noktasındaki ifadesi aşağıdaki eşitlikle belirtilebilir.

$$\{u\} = [N] \{v\} \quad (6.8)$$

(6.8) eşitliği (6.3) kinematik eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$\{\varepsilon\} = [L] [N] \{v\} = [B] \{v\} \quad (6.9)$$

elde edilir.

Bu eşitlikteki $[B]$ matrisi deplasmanları, şekil değiştirmelere dönüştüren deformasyon matrisidir, $\{\varepsilon\}$ ve $\{u\}$ terimleri bilinmeyenlerdir ve eleman deplasmanları $\{v\}$ cinsinden ifade edilir. (5.8) ve (5.9) eşitlikleri varyasyonel, artımsal ve hız formunda da yazılabilir. (5.7) denklemini minimize edecek şekilde varyasyon prensibi uygulanırsa;

$$\int [B]^T \{\delta v\}^T \{\Delta \sigma\} dV = \int [N]^T \{\delta v\}^T \{p^i\} dV + \oint [N]^T \{\delta v\}^T t^i dS - \int [B]^T \{\delta v\}^T \{\sigma^{i1}\} dV \quad (6.10)$$

olarak elde edilir. Düğüm deplasmanlarının $\{\delta v\}$ değişimi keyfi olduğundan, integralin dışına çıkartılabilir,

$$\{\delta v\}^T \int [B]^T \{\Delta \sigma\} dV = \{\delta v\}^T \int [N]^T \{p^i\} dV + \{\delta v\}^T \oint [N]^T \{t^i\} dS - \{\delta v\}^T \int [B]^T \{\sigma^{i1}\} dV \quad (6.11)$$

ve aşağıdaki şekilde belirtilebilir.

$$\{\delta v\}^T \int [B]^T \{\Delta \sigma\} dV = \{\delta v\}^T \int [N]^T \{p^i\} dV + \{\delta v\}^T \oint [N]^T \{t^i\} dS - \{\delta v\}^T \int [B]^T \{\sigma^{i-1}\} dV \quad (6.12)$$

Eşitlikte, sağ taraftaki birinci ve ikinci terim dış kuvvet vektörünü, son terim ise iç reaksiyon vektörünü belirtmektedir. Dış kuvvet vektörü ile iç reaksiyon vektörü arasındaki fark $\Delta \sigma$

gerilme artımı ile dengelenebilir. Gerilme ve şekil değiştirme artımı arasındaki ilişki genellikle non-lineerdir. Şekil değiştirme artımları direkt olarak hesaplanamaz, bütün malzeme noktaları için global iterasyon yöntemi uygulanarak (6.12) eşitliğinde denge durumu sağlanır.

6.2.1 Eleman Tipi Ve Gerilme Noktaları

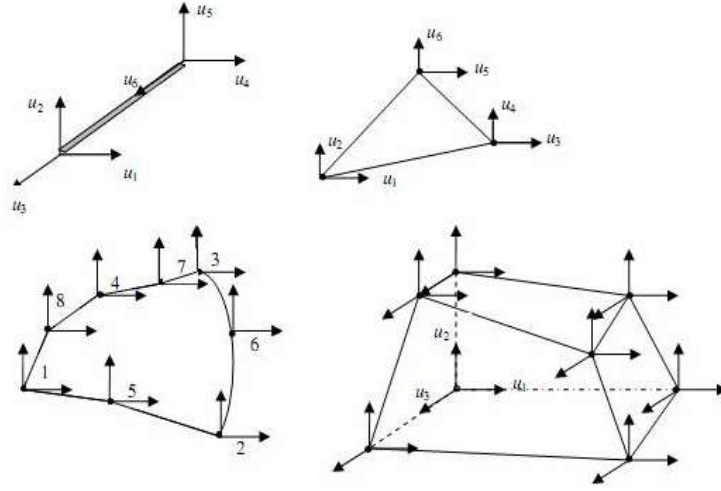
Sonlu elemanlar yönteminde eleman seçimi ve eleman tipleri için karşılaşılan probleme uygun eleman tipleri, belirlenen esas (birincil) bilinmeyene göre bir boyutlu, iki boyutlu ya da üç boyutlu elemanlar ve eğri yüzeyler için eğrisel elemanlardır. Eleman seçiminde önemli olan, gerekli serbestlik derecesini sağlamaktır. Bir boyutlu eleman seçimi konsolidasyon problemlerinde kullanılmaktadır.

Yaklaşım Modeli (şekil fonksiyonu): Bu adımda bilinmeyenlerin ortamda dağılımını veren bir şekil fonksiyonu seçilir. Eleman düğüm noktaları, eleman bölgesinde bilinmeyen büyüklüğün (örneğin yer değiştirme) dağılım eğrisini tanımlamak üzere matematiksel bir fonksiyon yazmak için stratejik noktalar sağlar. Polinomlar veya seriler bu amaçla kullanılabilir.

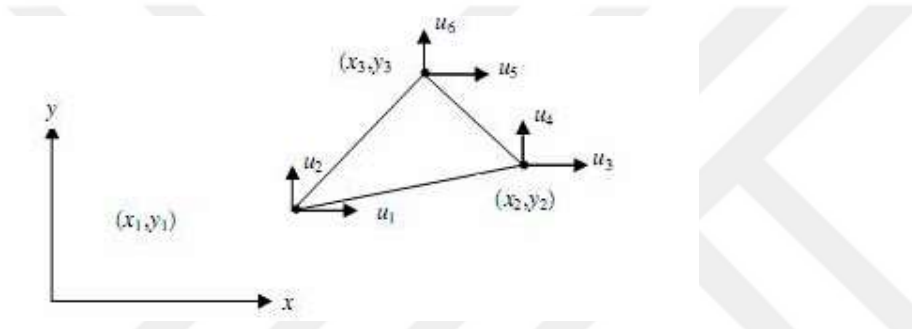
u =düğüm noktası bilinmeyenleri (veya serbestlik derecesi)

$$u = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 + \dots + N_m u_m \quad (6.13)$$

Çözüm yalnız düğüm noktaları için gerçekleştirilir. Şekil fonksiyonu çözüm ortamında bilinmeyenler yanında ortam geometrisini (genel koordinatlar) de ifade etmekte kullanılabilir. Buna izoparametrik yaklaşım denmektedir. İzoparametrik yaklaşım, bilgisayar kapasitesi bakımından yer ve zaman kaybını önleyen bir yaklaşımdır.



Şekil 6.2 Sonlu elemanlar yönteminde eleman tipleri



Şekil 6.3 Sonlu elemanlar yönteminde elemanların yer değiştirme fonksiyonları

Yer değiştirmeler; Düzlem şekil değiştirme hali üç düğüm noktalı üçgen eleman için deplasman fonksiyonu gibidir.

$$u(x, y) = N^e a^e$$

$$u = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} N = \begin{Bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{Bmatrix} \quad (6.14)$$

Şekil değiştirmeler; Sonlu elemanlar modelinde seçilen elemanların şekil değiştirmeleri eşitlikler ve matrisler yardımıyla elde edilmektedir.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \quad (6.15)$$

$$\varepsilon = B u^e$$

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (6.16)$$

Malzeme bünye davranışı (gerilme-şekil değiştirme ilişkisi) ; Sonlu elemanlar yönteminde ideal malzeme lineer elastik, homojen ve izotropdur. Bu kabuller doğrultusunda malzeme bünye davranışı ifade edilebilir:

$$\sigma = D\varepsilon$$

$$D = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{pmatrix} \quad (6.17)$$

Minimum enerji prensibi kabulü ile gerilmeler, şekil değiştirmeler olarak ifade edilebilir. Yayılı yükler, enterpolasyon yapılarak düğüm noktalarına indirgenir. Burada p, eleman üstündeki yayılı yükün düğüm noktasına indirgenmiş hali olan düğüm yüklerini gösteren yük vektörüdür

Eleman rijitlik matrisi eşitlikteki gibi ifade edilmektedir.

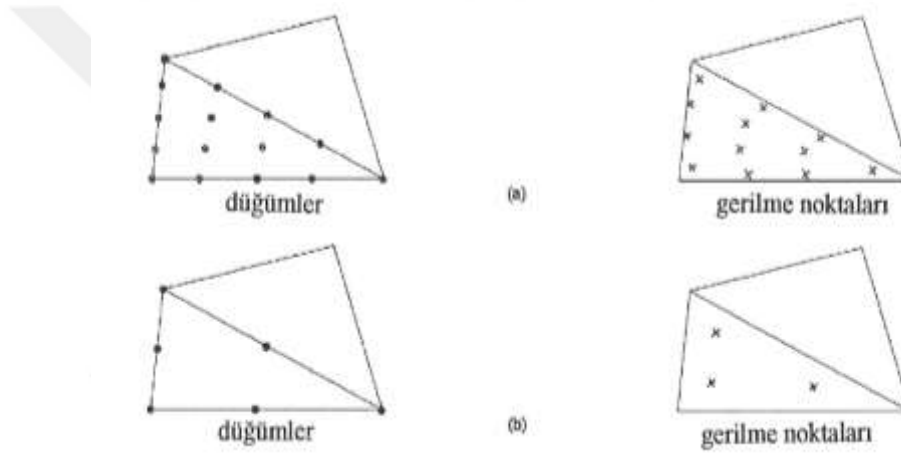
$$K^e = \int B^T DB dv \quad K^e u^e = p^e \quad p^e = \begin{pmatrix} p_{1x} \\ p_{1y} \\ p_{2x} \\ p_{2y} \\ p_{3x} \\ p_{3y} \end{pmatrix} \quad (6.18)$$

Sistem denklemi, Eleman denklemleri birleştirilerek sistem denklemleri elde edilir. Eleman rijitlik matrisinin birleştirilmesi ile global rijitlik matrisi elde edilir.

$$KU=P \quad (6.19)$$

Sınır koşulları; esas bilinmeyenler cinsinden (esas veya zorlanmış) olması yanında ikincil bilinmeyenler (doğal) cinsinden de olabilir.

Eleman tipleri; Sonlu elemanlar yönteminde iki çeşit eleman tipi vardır, 6 düğümlü üçgen elemanlar ve 15 düğümlü üçgen elemanlar. 6 düğümlü ve 15 düğümlü üçgen elemanları performans açısından da kıyaslayacak olursak, ikisinde de yaklaşık eşit miktarda düğüm ve gerilme noktaları oluşacaktır. Ancak, 15 düğümlü elemanlar göçme yüklerinin hesaplanmasında %10 daha doğru çözüme ulaşılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde oluşturulan geometri bazı kabullere göre idealize edilmektedir. Bunlar düzlem şekil değiştirme ve aksi simetrikliktir.

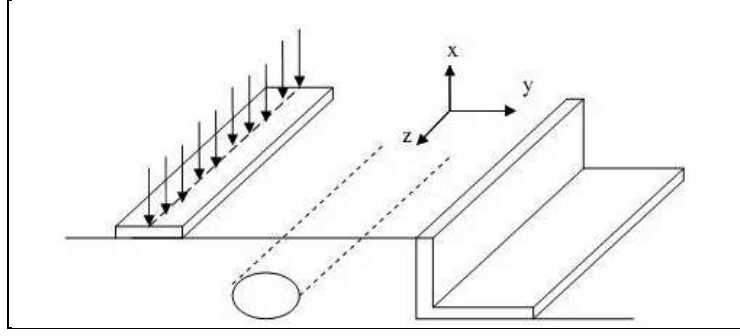


Şekil 6.4 Plaxis’de kullanılan elemanlar, düğüm noktaları ve gerilme noktaları

Düzlem şekil değiştirme; Sonlu elemanlar yönteminde yük altındaki elemanların düzlemsel olarak şekil değiştirmeleri şekildeki gibidir. Eşitliği de şekil değiştirme matrisini vermektedir.

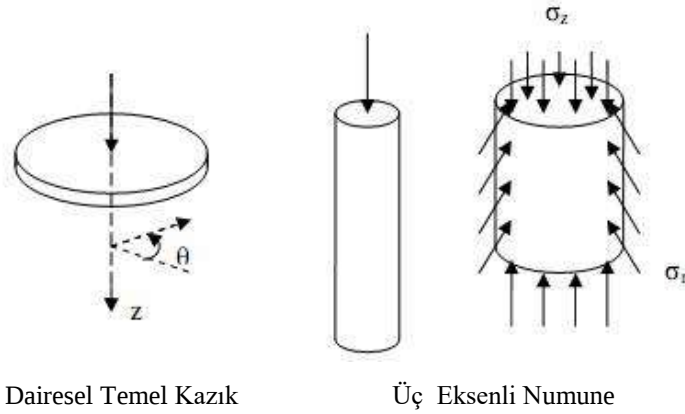
$$\varepsilon_{zz} = 0; \gamma_{yz} = 0; \gamma_{xz} = 0 \quad (6.20)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta \sigma_x \\ \Delta \sigma_y \\ \Delta \sigma_z \\ \Delta \tau_{xy} \\ \Delta \tau_{xz} \\ \Delta \tau_{zy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{44} \\ D_{51} & D_{52} & D_{54} \\ D_{61} & D_{62} & D_{64} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_x \\ \Delta \varepsilon_y \\ \Delta \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (6.21)$$



Şekil 6.5 Sonlu elemanlar yönteminde seçilen geometrinin düzlem şekil değiştirmesi

Aksi simetrik; Dairesel kesitli geometrilerde uygulanması gereken model aksi simetrik modeldir. Şekildeki geoteknik uygulamalarda karşılaşılabilecek dairesel kesitli yapı elemanları göstermektedir.



Dairesel Temel Kazık

Üç Eksenli Numune

Şekil 6.6 Geoteknik uygulamalarda karşılaşılabilecek dairesel kesitli yapı elemanları

Aksi simetrik geometrilerdeki şekil değiştirmeler teoride(a) eşitliğindeki gibi belirlenmektedir. Plaxis programında ise diğer (b) eşitliği dikkate alınmaktadır.

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_x}{\partial r}; \varepsilon_z = \frac{\partial u_y}{\partial z}; \varepsilon_{\theta r} = \frac{u_x}{r}; \gamma_{rz} = \frac{\partial u_y}{\partial r} + \frac{\partial u_x}{\partial z}; \gamma_{r\theta} = \gamma_{z\theta} = 0; \quad (6.22 \text{ a- b})$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{u_x}{r} = 0; \gamma_{xz} = 0; \gamma_{yz} = 0;$$

6.3 PLAXIS PROGRAMI

1987’de Delft Teknik Üniversitesinde geliştirilen özellikle de deformasyon ve stabilite analizleri için geliştirilmiş bir sonlu eleman yazılımı olan Plaxis 2D; iki boyutlu deformasyon

analizi ve geoteknik mühendisliği stabilite analizlerinde sonlu elamanlar ile çözüm üretir. Program kapsamında nonlinear simülasyonla oluşturulmuş modellerin zamana dayalı ve anizotrop davranışları zemin ve kayaları birleştirir. Yapı ve zemin arasında kesişim modeli oluşturulmasına imkân sağlar. Plaxis Vs üzerinde yer alan Dynamics modeli ise zeminleri analiz eder ve deprem gibi dinamik yükleme etkisinde kalmış yapıların analizini mümkün kılar. Dinamik etkiler ile oluşturulan titreşimlerin etkilerini yapılarda incelenebilir. Boşluklardaki suyun sönümlenmesi Darcy Yasası 'na uymakta ve danelerin deformasyonu efektif gerilmeler tarafından kontrol edilmektedir (Nystrom 1984). Tek boyutlu davranış için efektif gerilme formülasyonu (Terzaghi 1943) tarafından incelenmiş, daha sonra Terzaghi'nin teorisi (Biot 1956) tarafından üç boyutlu durum için genişletilmiştir.

Jeolojik ortamın sınır koşullarının ve ortamın davranışının karmaşık olması (elasto-plastik malzeme davranışı) ve bu davranışın zamana bağlı olarak değişmesi (konsolidasyon) nedeniyle, temel zemininin gerilme - şekil değiştirme - konsolidasyon davranışı birlikte analiz edilmelidir. Başlangıçtaki drenajsız şartlar ile zamana bağlı olarak değişen gerilme durumu (fazla boşluk suyu basıncının sönümlenmesi ve efektif gerilmedeki artış) drenajlı koşullarda birlikte analiz edilebilmektedir (Plaxis Manual 7.2 2000).

6.3.1 PLAXIS Programı Deformasyon Teorisi

Statik deformasyon durumunda temel bağıntılar zemin modelini sürekli yapı olarak değerlendirir. Deformasyonlar küçük olarak sınırlandırılır. Bu deforme olmamış orijinal geometri formülüyle ifade edilir. Sürekli zemin modeli ise sonlu elemanlara dayalı belirlenir. Sürekli deformasyon modeli temel eşitlikleri:

Statik sürekli denge denklemi formülü;

$$\underline{\underline{L}}^T \underline{\underline{\sigma}} + \underline{\underline{p}} = \underline{\underline{0}} \quad (6.23)$$

$\underline{\underline{\sigma}}$ vektörel olarak gösterilen 6 gerilme tensöründen oluşur, $\underline{\underline{p}}$ ile gösterilen üç tanesi cisim kuvveti sabiti, $\underline{\underline{L}}^T$ ile gösterilen diferansiyel operatörü dür.

$$\underline{\underline{L}}^T = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{pmatrix} \quad (6.24)$$

Sonuç olarak denge denklemindeki kinematik ilişki şu şekilde formüle edilir;

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{L}}\underline{u} \quad (6.25)$$

Bu denklem $\underline{\underline{\varepsilon}}$ ile gösterilen 6 şekil değiştirme sabiti ve $\underline{u}$ ile gösterilen 3 adet yer değiştirme sabitidir. $\underline{\underline{L}}$ diferansiyel operatörü kullanılarak elde edilir. Gerilme ve şekil değiştirme değerleri arasındaki oran malzeme modelleri el kitabında tanıtılmıştır. Genel denklem tekrar yazılırsa;

$$\underline{\underline{\sigma}}^{\bullet} = \underline{\underline{M}}\underline{\underline{\varepsilon}}^{\bullet} \quad (6.26)$$

Direk kombinasyonlar dışında Galerkin değişken prensibine göre (Zienkiewicz,1967):

$$\int \delta \underline{u}^T (\underline{\underline{L}}^T \underline{\underline{\sigma}} + \underline{p}) dV = 0 \quad (6.27)$$

Bu eşitliğinde δu kinematik kabul edilen yer değiştirme değişkenlerini ifade eder. Bu teoreme göre;

$$\int \delta \underline{\underline{\varepsilon}}^T \underline{\underline{\sigma}} dV = \int \delta \underline{u}^T \underline{p} dV + \int \delta \underline{u}^T \underline{t} dS \quad (6.28)$$

Sınır integrali oluşur. Çekme sınır koşullarını $\underline{t}$ vektörü ifade eder. Gerilme durumu $\underline{\underline{\sigma}}$ için yedek denklem oluşumu;

$$\underline{\underline{\sigma}}^i = \underline{\underline{\sigma}}^{i-1} + \Delta \underline{\underline{\sigma}} \quad (6.29 \text{ a-b})$$

$$\Delta \underline{\underline{\sigma}} = \int \underline{\underline{\sigma}}^{\bullet} dt$$

Bu denklemde $\underline{\sigma}$ şimdiki durumdaki gerilme durumunu ve $\underline{\sigma}^{i-1}$ geçmişteki gerilme durumunu gösterir. $\Delta \underline{\sigma}$ gerilme değişimi küçük artımlar için integre edilir. Bu eşitliklerde çıkan sonuçlar üç eksenli 3 boyutlu alanlar içindir.

$$\int \delta \underline{\varepsilon}^T \Delta \underline{\sigma} dV = \int \delta \underline{u}^T \underline{p}^T dV + \int \delta \underline{u}^T \underline{t}^T dS - \int \delta \underline{\varepsilon}^T \underline{\sigma}^{i-1} dV \quad (6.30)$$

Sonlu elemanlara dayalı çözümde ise sürekli zemin parçalara bölünür ve düğüm noktalarıyla tanımlanır. Burada $\underline{u}$, $\underline{v}$ vektöründeki düğüm noktasından elde edilen elemanın yer değiştirmesi ve $\underline{N}$ matrisi ile elde edilir.

$$\underline{u} = \underline{N} \underline{v} \quad (6.31)$$

İnterpolasyon fonksiyonundaki $\underline{N}$ matrisi şekil fonksiyonlarını ifade eder. (6.31) in çözümünden kinematik ilişki elde edilir.

$$\underline{\varepsilon} = \underline{L} \underline{N} \underline{v} = \underline{B} \underline{v} \quad (6.32)$$

Burada $\underline{B}$ şekil değiştirme enterpolasyon matrisi enterpolasyon matrisindeki uzaysal ayrımları iyi oranda ifade eder. Bu ayrımlar tekrar formüle edilirse:

$$\int (\underline{B} \delta \underline{v})^T \Delta \underline{\sigma} dV = \int (\underline{N} \delta \underline{v})^T \underline{p}^T dV + \int (\underline{N} \delta \underline{v})^T \underline{t}^T dS - \int (\underline{B} \delta \underline{v})^T \underline{\sigma}^{i-1} dV \quad (6.33)$$

Ve bu değerlerin integral dışına çıkarılmasıyla;

$$\delta \underline{v}^T \int \underline{B}^T \Delta \underline{\sigma} dV = \delta \underline{v}^T \int \underline{N}^T \underline{p}^T dV + \delta \underline{v}^T \int (\underline{N}^T \underline{t}^T dS - \delta \underline{v}^T \int \underline{B}^T \underline{\sigma}^{i-1} dV \quad (6.34)$$

Kinematik yer değiştirmelerin değişkeni $\delta \underline{v}^T$ olarak yazılırsa;

$$\int \underline{B}^T \Delta \underline{\sigma} dV = \int \underline{N}^T \underline{p}^T dV + \int (\underline{N}^T \underline{t}^T dS - \int \underline{B}^T \underline{\sigma}^{i-1} dV \quad (6.35)$$

Elde edilen denklemde sağ taraftaki birinci terim ve ikinci terim bugünkü dış kuvvet vektörünü, son terimde iç reaksiyon vektörünü ifade eder. Dış kuvvet ve iç reaksiyon vektörü arasındaki fark $\Delta \underline{\sigma}$ gerilme değeri ile dengelenebilir.

Gerilme sabitleri ve şekil değiştirme sabitleri arasındaki ilişkili genellikle non liner (doğrusal olmayan davranış) davranış gösterir. Sonuç olarak doğrudan ölçülemez. Denge denklemlerini elde etmek için tekrarlanan işlemlere ihtiyaç vardır. Diferansiyel plastik modellerde integral; plastik bölgelerde gerilme değerleri gerilme oranlarına bağlı $\Delta \underline{\sigma}$ içeren şekilde yazılır.

$$\Delta \underline{\sigma} = \underline{\underline{D}}^e (\Delta \underline{\varepsilon} - \Delta \underline{\varepsilon}^p) \quad (6.36)$$

Burada $\underline{\underline{D}}^e$ elastik malzeme matrisini, $\Delta \underline{\varepsilon}$ şekil değiştirme ve B matrisi ile bulunan $\Delta \underline{v}$ kullanılarak şu şekilde yazılır.

$$\Delta \underline{\varepsilon}^p = \Delta \lambda \left[(1 - \omega) \left(\frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} \right)^{i-1} + \omega \left(\frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} \right)^i \right] \quad (6.37)$$

Elastik davranış için, plastik şekil değiştirme $\Delta \underline{\varepsilon}^p$ değeri “0”dır. Plastik malzeme davranışı için Vermeer (1979) a göre yazarsak denklemi:

Bu denklemde $\Delta \lambda$ plastik sabitin çarpanı, ω zaman integralinin şekli gösterir.

$$\omega = 0 \text{ iken integral açık net, } \Delta \underline{\varepsilon}^p = \Delta \lambda \left[\frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} \right]^i \quad (6.38)$$

$$\omega = 1 \text{ iken integral örtülü, } \underline{\sigma}^i = \underline{\sigma}^{ir} - \Delta \lambda \underline{\underline{D}}^e \left(\frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} \right)^i \quad \underline{\sigma}^{ir} = \underline{\sigma}^{i-1} + \underline{\underline{D}}^e \Delta \underline{\varepsilon}$$

(6.39)

olarak adlandırılır.

Eşitlikte $\underline{\sigma}^{ir}$ yardımcı gerilme vektörü elastik gerilmeleri ve denenmiş gerilmeleri lineer elastik davranış olarak tanımlar.

$\Delta\lambda$ plastik çarpan yeni gerilme durumundaki yenilme koşullarında çözülür.

$$f(\underline{\sigma}^i) = 0 \quad (6.40)$$

Tam plastik ve doğrusal hardening modellerde plastik çarpan şu şekilde yazılır.

$$\Delta\lambda = \frac{f(\underline{\sigma}^{ir})}{d+h} \quad (6.41)$$

$$d = \left(\frac{\partial f}{\partial \underline{\sigma}} \right)^{\sigma^{ir}} \underline{\underline{D}}^e \left(\frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} \right)^i \quad (6.42)$$

Buradaki h tam sembolü plastik modelde 0 olan hardening parametreyi ve doğrusal hardening modeldeki doğrusal olan değeri ifade eder. Yeni gerilme durumu şu şekilde ifade edilir.

$$\underline{\sigma}^i = \underline{\sigma}^{ir} - \frac{\langle f(\underline{\sigma}^{ir}) \rangle}{d+h} \underline{\underline{D}}^e \left(\frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} \right)^i \quad (6.43)$$

Büyük parantez McCauley değerleridir.

$$\langle x \rangle = 0 \text{ için } x \leq 0 \text{ ve } \langle x \rangle = x \text{ için } x > 0$$

Gerilme artışı ve şekil değiştirme artışları arasındaki farka bakıldığında denge denkleminde elde edilir. Buradan

$$\Delta \underline{\sigma} = \underline{\underline{M}} \Delta \underline{\varepsilon}_i \underline{\underline{K}}^i \Delta \underline{v}^i = \underline{f}_{ex}^i - \underline{f}_{in}^{i-1} \quad (6.44)$$

Bu denklemde $\underline{\underline{K}}$ rijitlik matrisidir, $\underline{\underline{v}}$ yer değiştirme vektörü, $\underline{f}_{ex}$ dış kuvvet vektörü, ve $\underline{f}_{in}$ iç reaksiyon vektörüdür.

Gerilme ve şekil değiştirme artışları arasındaki ilişki genelde doğrusal olmayan (non linear) davranış gösterir.

$$\underline{\underline{K}}^j \delta \underline{v}^j = \underline{f}_{ex}^i - \underline{f}_{ex}^{j-1} \quad (6.45)$$

İterasyon sayısı j , şu yer değiştirme değeri;

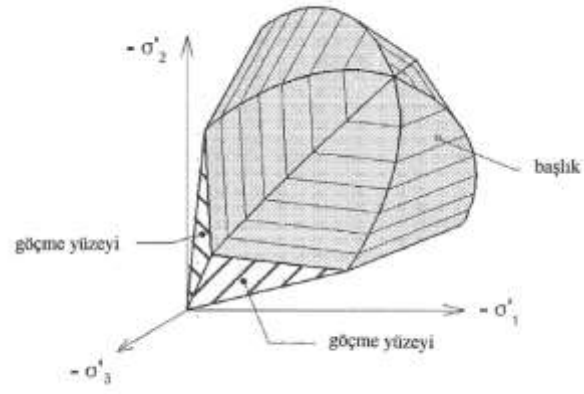
$$\Delta \underline{v}^i = \sum_{j=1}^n \delta \underline{v}^j \quad (6.46)$$

K matrisi malzeme davranışını gösterir, basit olarak K matrisi linear elastik (doğrusal elastik) davranış gösterir. Rijitlik matrisi şu şekilde formüle edilebilir.

$$\underline{\underline{K}} = \int \underline{B}^T \underline{D}^e \underline{B} dV \quad (6.47)$$

Burada D^e Hook yasasına göre belirlenen elastik malzeme matrisi ve $\underline{B}$ şekil değiştirme matrisidir. Doğrusal davranış gösteren elastik malzeme modellerinde özellikle Mohr Coulomb modeli tanım kümesinde elastik rijitlik matrisi kullanılır. Plaxis programı ile efektif parametrelerle drenajsız analiz yapabilmek olanağı vardır. Gerilme - şekil değiştirme analizlerinde drenajsız durum göz önüne alındığından, malzeme parametreleri (deformasyon modülü, kayma modülü, Poisson oranı, kohezyon ve içsel sürtünme açısı) efektif gerilmeler cinsinden göz önüne alınmaktadır. Bu durum ortamın (zemin) iki fazlı yani sıvı (su) ve katı (dane) malzemeden meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Buna göre ortamdaki toplam gerilmeler σ , efektif gerilmeler σ' ve boşluk suyu basıncı P_w cinsinden ifade edilir.

Malzeme Modeli olarak bu çalışma kapsamında Hardening - Soil modeli; Drenajlı üç eksenli deneyin özel bir durumunda, eksenel şekil değiştirme ve deviatorik gerilme arasında tanımlanan ilişki bir hiperbol ile modellenebilir. Bu ilişki Duncan ve Chang, (1970) tarafından hiperbolik model olarak tanımlanmıştır. Hardening - Soil model hiperbolik modelin yerini almış gelişmiş bir bünye modelidir. Modelde plastisite teorisi kullanılmış, zeminin genleşmesi dikkate alınmış ve akma bir akma başlığı ile tanımlanmıştır. Modelin bazı temel özellikleri; m üst sayısına göre gerilme bağımlı Rijitlik, Deviatorik gerilme – şekil değiştirme arasında hiperbolik ilişki, Deviatorik yükleme ve boşaltma / tekrar yükleme arasında ayırım ve Mohr-Coulomb modeline göre göçme davranışı şeklinde sıralanır.



Şekil 6.7 Asal gerilme uzayında akma konturları (Plaxis Manual V8 2005).

BÖLÜM 7

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MODELLEME

7.1 GİRİŞ

Matematiksel ifadelerle sürekli problemlerin genel çözüm yöntemi olarak tanımlanan sonlu elemanlar yöntemi ilk kez Zienkiewicz (1977) tarafından kullanılmıştır. Bu yöntem, çeşitli mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan bir sayısal çözüm yöntemi olup literatürde mühendislik problemlerine ve geoteknik problemlerine uygulanmasına dair birçok çalışma mevcuttur (Potts ve Zdravkovic 1999, Cai ve Ugai 2000, Demirkoç 2007).

Çalışma alanında elde edilen arazi ve yapısal durumu yansıtan parametreler ile sayısal model Plaxis 2016 yazılımında oluşturulmuştur.

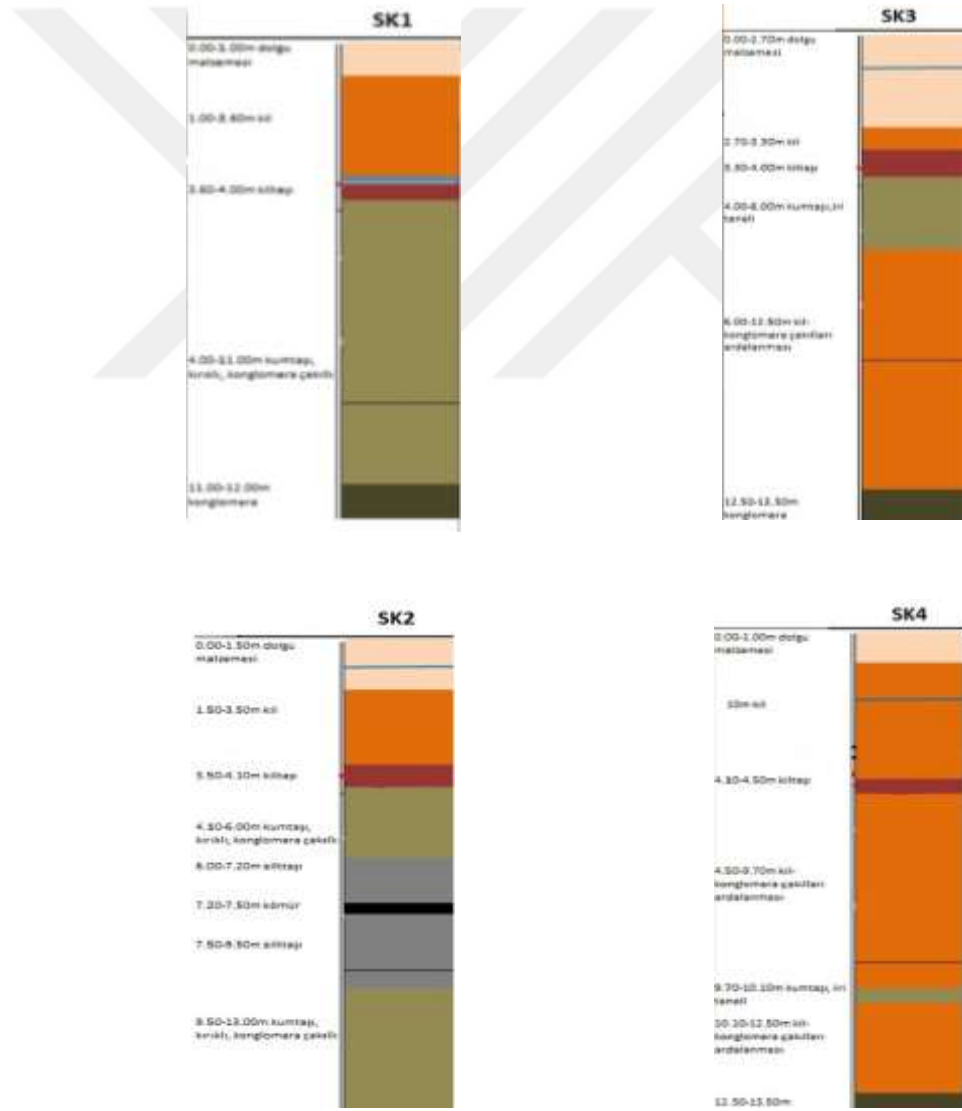
Bu bölümde daha önceden Kılıç Mahallesinde yapılmış olan Geoteknik rapordaki verilerden yararlanılarak, 2 farklı boykesitte modellenerek, statik durumdaki deformasyonlara ve dinamik durumdaki deformasyonlara bakılarak, riskli bölgeler tespit edilerek iyileştirme yöntemleri önerilmiştir.

7.2 PROJE ÖZELLİKLERİ

Çalışma kapsamında ilk olarak incelenecek alanın boyutlarına göre zemin modeli belirlenmiştir. Model de düzlemsel şekil değiştirme (plane strain) esası, 15 düğüm noktalı üçgensel elemanlarla temsil edilmiştir. Model yatayda 350 m düşeyde 200 m seçilerek, modelin sınır koşulları standart sınır koşulları kabul edilmiştir. Düşey yönde her iki doğrultuda deplasmanlar kısıtlanmış, yatay yönde ise düşey deformasyona izin verilmiştir ($u_x = \text{serbest}$, $u_y = 0$). Model tabanındaki düğüm noktaları sabit yani yatay ve düşey yönde hareketi engellenmiş olarak alınmıştır. Sonlu eleman çözümünde gerilmelerin yüksek olduğu yerlerde elemanların sıklaştırılması ile sonuçlar daha gerçekçi olarak bulunabilmektedir.

Deformasyonları daha net analiz edebilmek için sonlu eleman sıklığı iyi (fine) olarak seçilmiştir. Sonlu eleman ağının kenar ve köşelerine doğru ise ağ elemanları büyütülmesi ile büyük hacimli problemlerde eleman sayısının gereğinden fazla olması önlenmekte ve çözümde zamandan tasarruf sağlanarak analiz yapılmasına olanak sağlamıştır (Potts ve Zdravkovic 2001, Reul ve Randolph 2002, Brinkgreve 2005).

Öncelikli olarak arazi için yapılan zemin etütleri ve geoteknik raporlardan sonlu elemanlar modelinde kullanılacak parametreleri elde edilmiştir. İnceleme alanında 15 m'lik 4 adet sondaj logundan elde edilen ve arazi deneyleriyle belirlenen parametreler ile sismik yöntemler ile yüzeysel analizle elde edilen veriler literatür çalışmaları ile beraber değerlendirilerek modelleme de kullanılmıştır (Şekil 7.1).



Şekil 7.1 4 adet sondaj logu

Analizlerde kullanılan geoteknik parametreler Çizelge 7.2’ de verilmiştir. Proje verileri ışığında arazi için yapılan zemin etütleri ve geoteknik raporlardan YASS seviyesi yeryüzünden 1 - 1.5 m aşağıdadır. Zeminde üç farklı elastisite modülü tanımlayıp, zeminin elastoplastik özelliğini daha iyi yansıttığı için Pekleşen Zemin (hardening soil) modeli tercih edilmiştir (Sert 2003). Zemin yüzeyinde mevcut yapı yükleri modele yapı yükünü temsilen zemine 50 kPa ve 100 kPa yayılı yük ile yansıtılmıştır.

Çalışma bölgesinde heyelanda hasar görmüş 7 adet yapının bulunduğu doğrultu seçilerek 2 adet boykesit çıkarılmıştır

Çizelge 7.1 Malzeme Özellikleri

	Dolgu	Kil	Kil Taşı	Kum Taşı	Konglomera
Malzeme Modeli	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin
Drenaj Durumu	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
ρ (kN/m ³)	18	18	25	28	30
ρ_{sat} (kN/m ³)	18	18	25	28	30
E_{50} (kPa)	3000	6080	33000	36750	39000
E_{oed} (kPa)	3000	6080	33000	36750	39000
E_{ur} (kPa)	9000	18240	99000	11050	117000
c' (kPa)	5	5	23	10	45
ϕ' (°)	25	35	20	33	40

Burada, E_{50} : Kiriş modülü, E_{oed} : Ödometre modülü, E_{ur} : Yükleme boşalma modülüdür.

Çalışmada heyelan bölgesinde en fazla hasarın görüldüğü yani riskli bölgede iki farklı boy kesitüzerindeki yapılar ile modellenerek analiz edilmiştir.

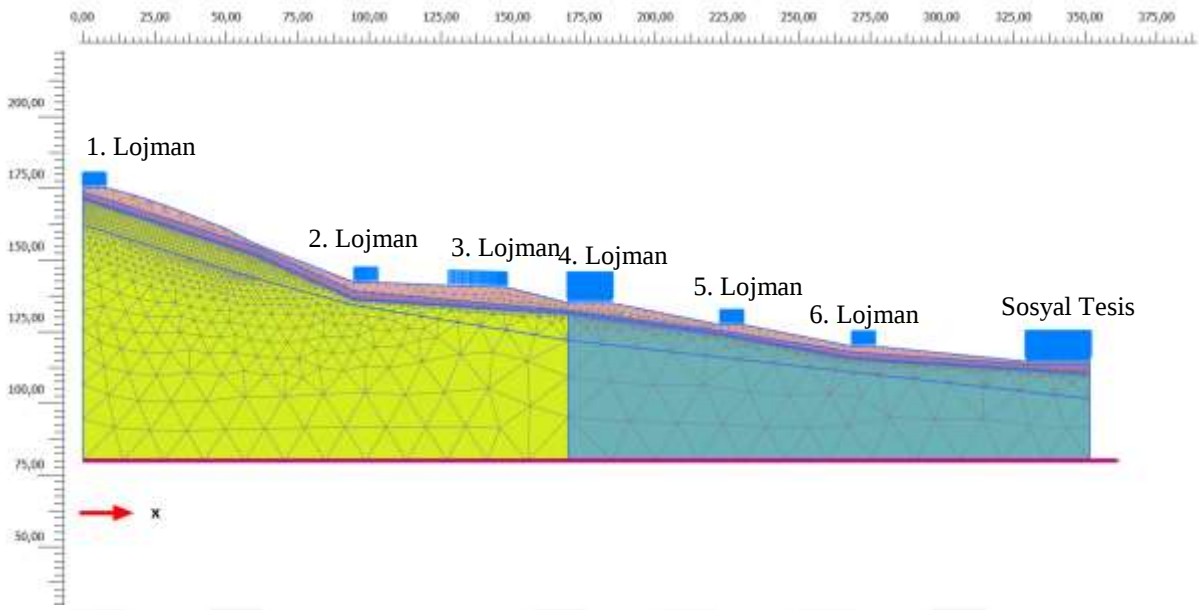


Şekil 7.2 Riskli bölgede alınan 2 farklı boykesit (Google earth 2018)

7.2.1 1. Boykesit

Bu kesit üzerindeki yapı sayısı (6 adet lojman-sosyal tesis) ve buna bağlı yapısal hasar oranı daha yüksek olması nedeniyle tercih edilerek sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.

Şekilde görüldüğü gibi 0 - 350 m genişliğinde ve 100 - 180 m kot yüksekliğinde tanımlanmış 1.Boykesit görülmektedir. 1.Boykesitte 6 tane lojman binası ve 1 adet sosyal tesis görülmektedir. Lojman binalarından 1,2,3,5 ve 6' için yapı yükünü temsilen zemine 50 kPa yük 4. Lojman ve sosyal tesisten ise 100 kPa yük gelmektedir.



Şekil 7.3 Birinci boy kesit

Yapının ve zeminin ayrı ayrı nümerik olarak modellenerek deplasman analizlerinin yapıldığı bu çalışmada zemin etütlerinden birebir alınarak farklı zemin türünden oluşan homojen zemin yapıları ve bu zeminler için literatürde önerilmiş değerlerden uyumlu zemin parametreleri seçilerek model kendi ağırlığı altında analiz edilerek deformasyon durumu gerçekleştirilmiştir.

İlk durumda yapılan analizde; Şekil 7.5.'de 1. Boykesitte toplam oturma 30.41 cm olup riskli bölge olarak 1. Lojman çevresinde deformasyonlar fazla görülmektedir. Şekil 7.6.'da yapılan güvenlik analizinde 1. Lojman yamacı tehlikeli bölge olarak görülmektedir. Analiz sonuçları arazi koşullarında meydana gelen hasar durumuyla karşılaştırıldığında; sonlu elemanlar modelinde elde edilen deformasyonlar ile arazide yapı üzerindeki göçmeler ve zemin hasarları göz önünde tutulduğunda, ölçülen deformasyonlarla uygunluk göstermektedir.

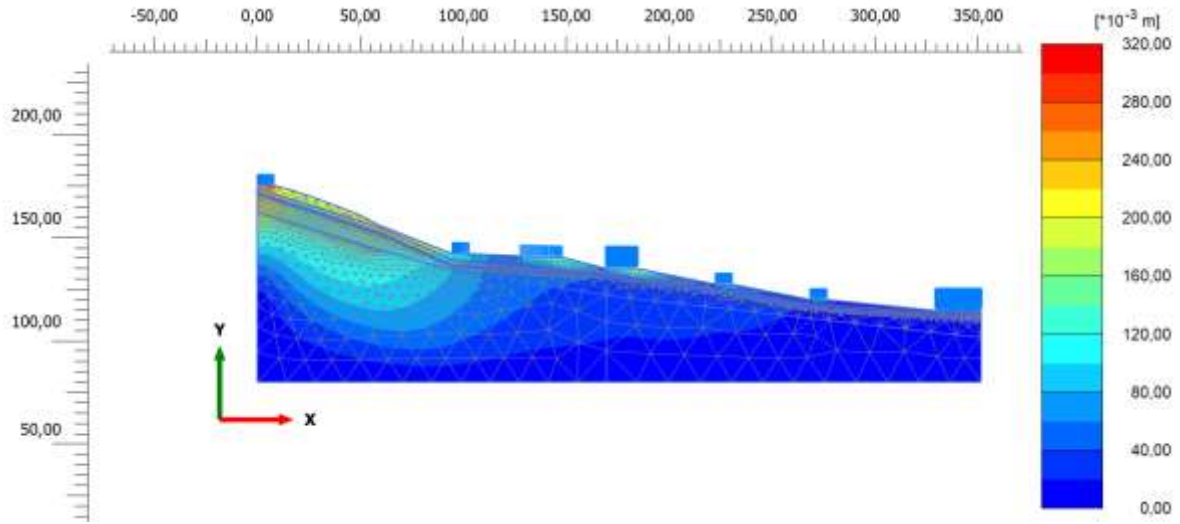
Buna göre heyelanın ardından bölgede yapılan detaylı incelemelerde yapısal hasarlar ve zeminde gözlenen çatlaklar ve deformasyonlar Şekil 7.4a ve Şekil 7.4b'de görülmektedir.



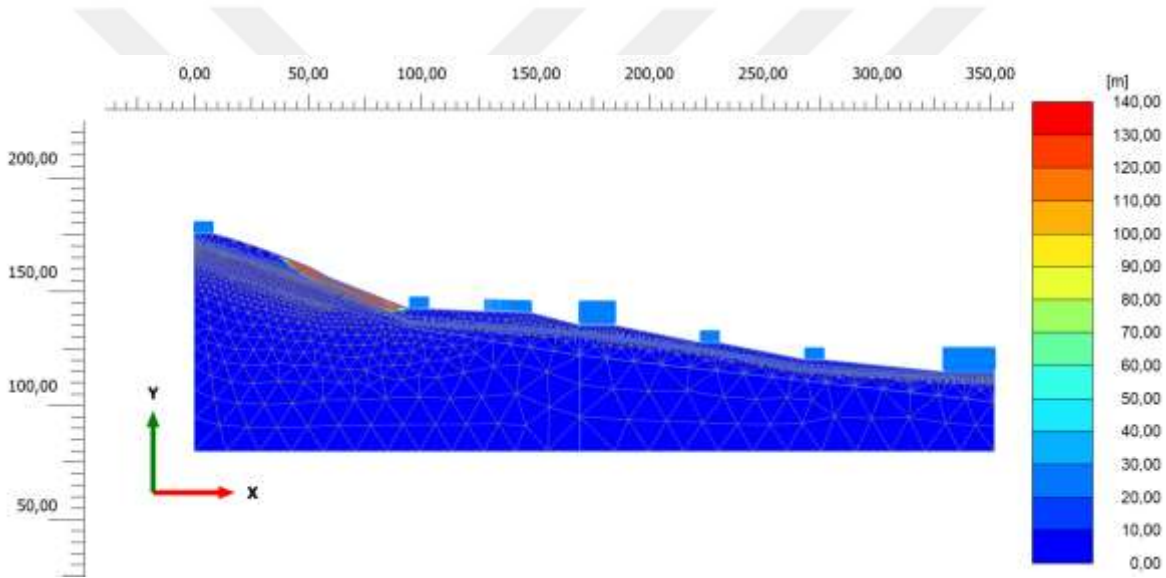
Şekil 7.4a Heyelan kesiti için yüzeyde gözlenen yapısal hasarlar 2012-2018



Şekil 7.4b Yapılarda gözlenen hasarlar 2012 yılı



Şekil 7.5 Yapılarda gözlenen hasarlar 2012 yılı



Şekil 7.6 Yapılarda gözlenen hasarlar 2012 yılı

Mevcut durum için çalışma kapsamında uygun görülen iyileştirme yöntemi olarak ilk olarak zemin profilinde kilaşı üzerinde birikmiş doymuş kil tabakası olması ve bölgenin yoğun yağış alan bir bölge olması durumu göz önünde tutularak yeraltı su seviyesinin “7 metre” düşürülmesi öngörülmüştür. Bu durum modelde yass’ın 7 metre derinde olduğu varsayımıyla tekrarlanmış ve durumun heyelan kesitinde etkisi değerlendirilmiştir.

Modelde doymuş kil malzeme olmasından ötürü, YASS derine indirildiğinde toplam oturmalar 23.77 cm olarak elde edilmiş, bu durumda toplam oturmalar %23 civarında azalmıştır.

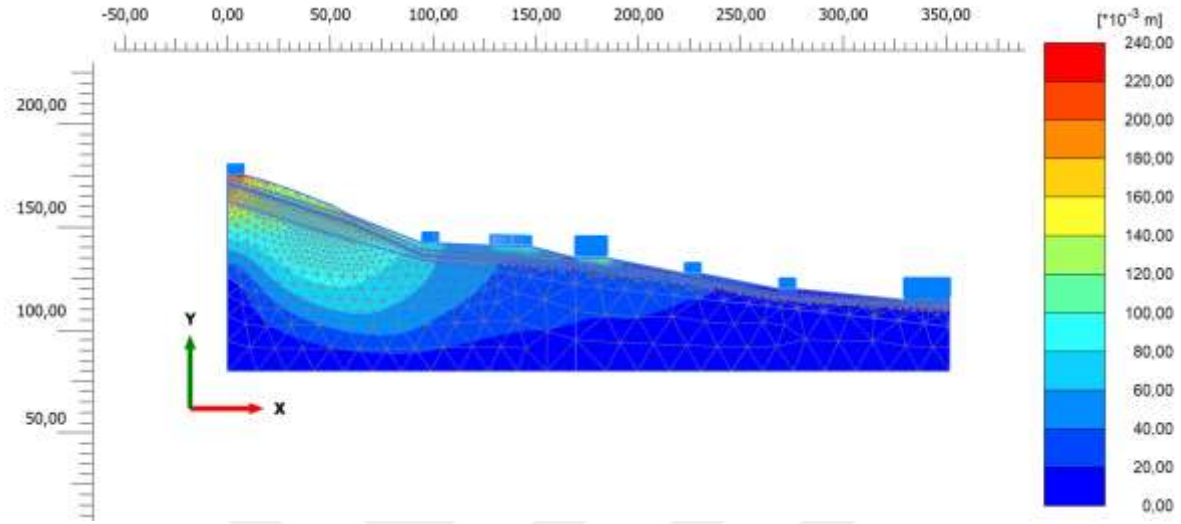
Analiz sonuçları arazi koşullarında meydana gelen hasar durumuyla karşılaştırıldığında sonlu elemanlar modelinde elde edilen deformasyonlar ile arazide ölçülen deformasyonlar uygunluk göstermektedir.



Şekil 7.7 Mevcut araziden görüntüler.

Mevcut durum için çalışma kapsamında uygun görülen iyileştirme yöntemi olarak ilk olarak zemin profilinde kilaşı üzerinde birikmiş doygun kil tabakası olması ve bölgenin yoğun yağış alan bir bölge olması durumu göz önünde tutularak yeraltı su seviyesinin 7 metre düşürülmesinin heyelan kesitinde etkisi değerlendirilmiştir.

Modelde doymun kil malzeme olmasından ötürü, YASS 7 m derine indirildiğinde Şekil 7.8.’de görüldüğü gibi toplam oturmalar 23.77 cm elde edilmiş olup, oturmaların %23 civarında azaldığı görülmüştür.

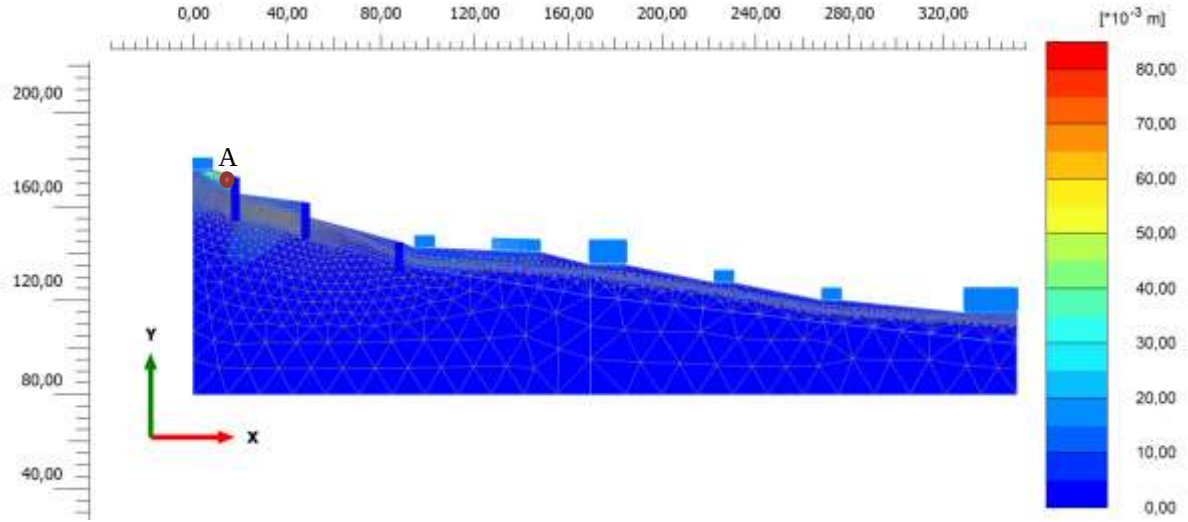


Şekil 7.8 Mevcut araziden görüntüler

Aynı boy kesit için alternatif bir zemin iyileştirme yöntemi önerilerek güvenlik analizi gerçekleştirilmiştir. Göçme riski yüksek bölge için diyafram duvar önerisi ile model analiz edilmiştir. Çalışmada, yamaç üzerinde diyafram duvar Çizelge 7.2.’de verilen parametreler kullanılarak boyutlandırılmıştır. Dolgu ve kil tabakası zemin kazılarak alınmış ve 3 farklı noktada duvar inşa edilmiştir. Bu imalat sonucunda modelde toplam oturmalar, 8.06 cm elde edilmiş olup toplam oturmaların %73 civarında azaldığı görülmüştür (Şekil 7.9.).

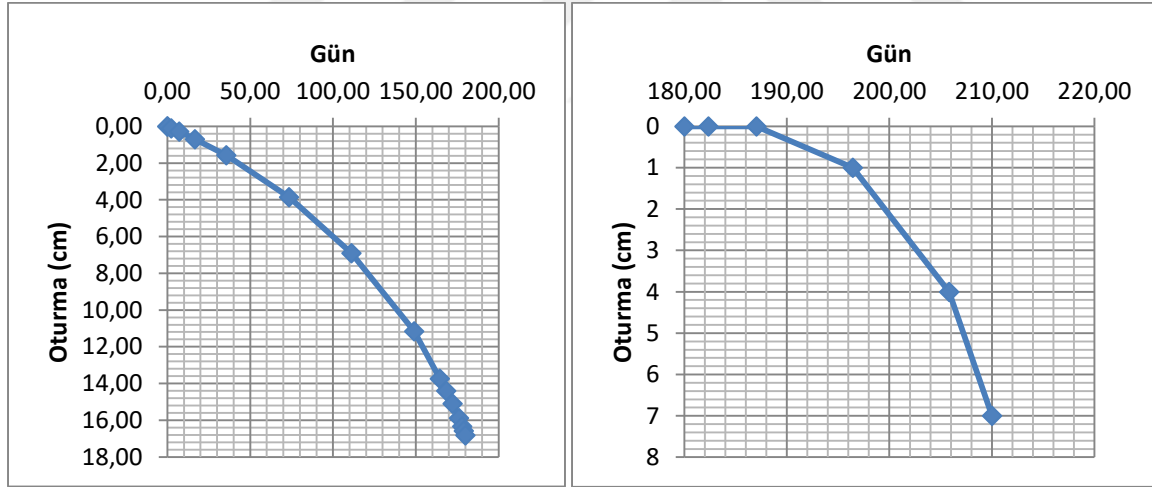
Çizelge 7.2 Sonlu eleman modelinde kullanılacak malzeme parametreleri

Malzeme modeli (Diyafram Duvar)	Lineer Elastik
EA (kN/m)	12 10 ⁶
EI (kNm ² /m)	12000
Ağırlık (kN/m/m)	8.3
Poisson Oranı (v)	0.15



Şekil 7.9 Mevcut araziden görüntüler

Diyafram duvar imalatı ile duvar arkasında seçilen A referans noktasında elde edilen oturma değeri 180 gün duvar imalat sürecinde 16.8 cm ölçülmüştür (Şekil 7.10a). Aynı nokta üzerinde duvar imalatından sonra 6.6 cm oturma ölçülmüştür (Şekil 7.10b).



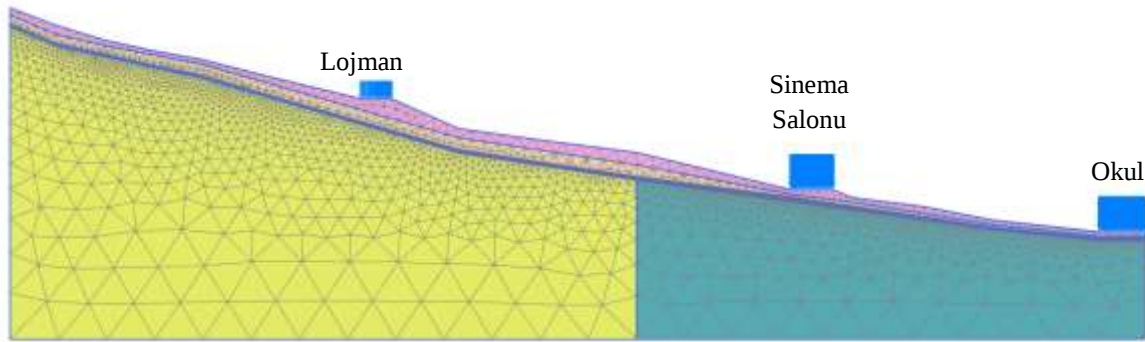
Şekil 7.10 (a) ve (b). Heyelan kesiti için analiz sonucu

Boykesit için ilk durumda elde edilen 30.41 cm oturma değeri; önerilen yeraltı su seviyesinin uzaklaştırılması durumu için 23.27 cm toplam oturma ve riskli 3 farklı noktada duvar inşası ve kazı için ile elde edilen 8.06 cm toplam oturma değerleri analizlerde görülmüştür.

7.2.2 2. Boykesit

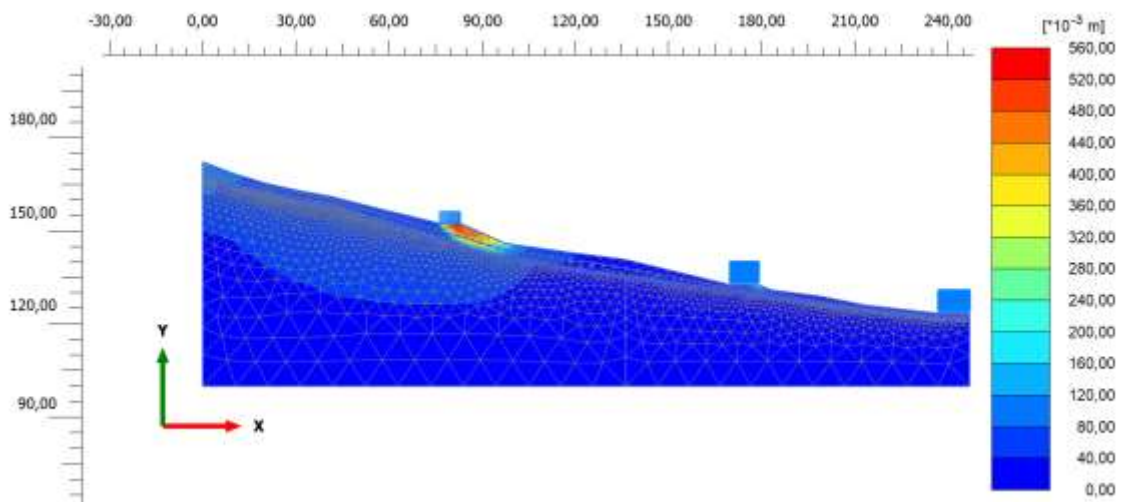
Bu kesit üzerinde yapı sayısı 1 adet sinema salonu, 1 adet lojman ve heyelan topuk bölgesinde bir okul dan oluşmaktadır. Gerçekleşen heyelan sonrasında en fazla hasarın görüldüğü 1 adet lojman kullanılmaz hale gelmiş, sinema salonu yıkılmış ve enkaz kaldırılmış ve okul binasındaki hasar dolayısıyla eğitime ara verilmiştir.

Boy kesit 0 - 350 m genişliğinde ve 100 - 180 m kot yüksekliğinde tanımlanmış yapı yükleri lojmandan zemine 50 kPa yük, sinema salonu ve okuldan zemine 100 kPa yük olarak tanımlanarak modele yansıtılmıştır.



Şekil 7.11 İkinci boy kesit

2. boykesitte yapılan analizlerde toplam oturma 53.67 cm olup riskli bölge olarak Lojman çevresinde deformasyonlar fazla görülmektedir. Şekil 7.12.'de yapılan güvenlik analizinde Lojman yamacı tehlikeli bölge olarak görülmektedir.

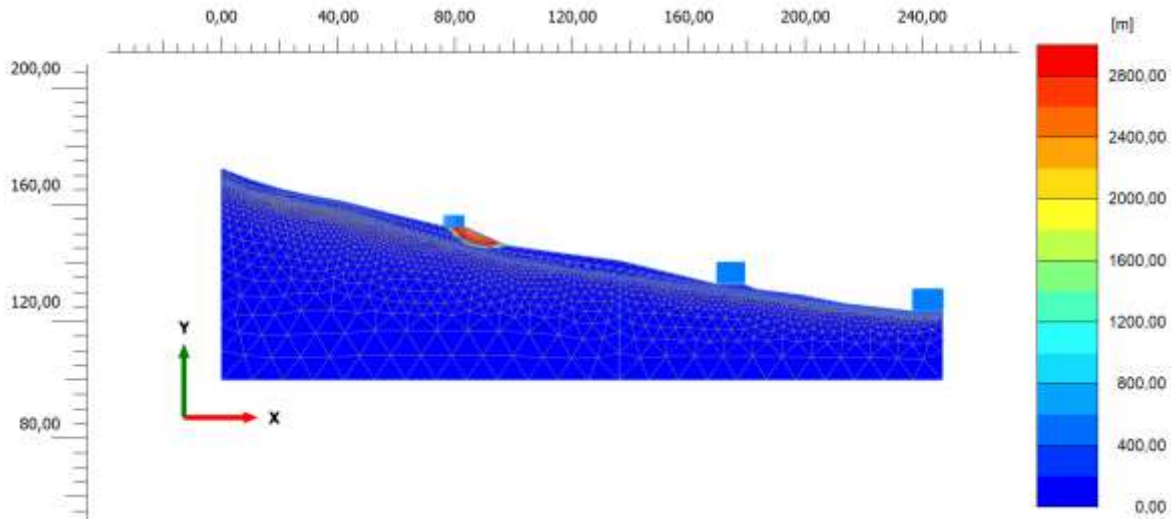


Şekil 7.12 İkinci boy kesit yapıdaki deformasyonlar

Bu değerlendirme sonucu arazi fotoğrafları incelendiğinde benzerlik göstermektedir.



Şekil 7.13 Mevcut araziden görüntüler



Şekil 7.14 İkinci boy kesit güvenlik analizi

Güvenlik analizi sonucuna göre en riskli bölgedeki lojman kayma eğilimi göstermektedir. Aynı zamanda yamaçta yeraltı su seviyesi yüzeyden akış göstermekte ve bu bölgedeki killler aşırı doymun durumdadırlar. Ayrıca yamaç eğiminin % 30'dan fazla olması buradaki suya doymun killerin akma eğiliminde olmasını doğrulamaktadır. Bu alandaani yağışlarla beraber YASS yüzeylenme göstermekte ve belirli bölgelerde yüzeyde su akışının olduğu tespit edilmiştir. Bu su ortamdaki kil zemini doyurarak şişmeye sebep olmakta ve üzerindeki yapılarda hasara neden olmuştur.





BÖLÜM 8

SONUÇ VE ÖNERİLER

Heyelanlar karmaşık bir doğa olayı olmakla birlikte, birçok ülke için, içerisinde doğal riskler barındırır. Uzun süreli ve yoğun yağış etkisiyle veya deprem tetiklemesi ile oluşan heyelanlar birçok insanın yaşamsal faaliyetlerini etkilemekte ve konumları itibariyle yerleşim yerlerinin altyapılarına zarar vermektedirler. İnceleme alanı Zonguldak, Batı Karadeniz riskli bölgesinde yer almakta olup, genel topoğrafyası incelendiğinde, dağlar doğu batı yönlü sarp bir şekilde yükselmektedir.

Zonguldak İli Kozlu İlçesi Kılıç mahallesinde yapılan bu çalışmada, yamaç üzerinde yapısal hasarları yamaçtaki kaymaya bağlı yapılardan yola çıkarak yamaçta iki farklı boy kesitte heyelan analizi yapılmıştır. Arazide yerinde yapılan gözlemler sonucunda, hasar gören yapılar incelenmiş ve ağır hasar almış, kullanılamaz durumdaki yapılar boşaltılmak zorunda kalmıştır.

Bu çalışma kapsamında heyelan riski taşıyan alana ait zemin parametreleri ilgili idaresi tarafından yaptırılan detaylı zemin ve geoteknik raporlarından elde edilmiştir. Bu geoteknik veriler yardımıyla sayısal model oluşturulmuş; heyelan bölgesi sonlu elemanlara dayalı yazılım ile modellenerek statik durum davranışı analiz edilmiştir.

Plaxis 2D ile yapılan analiz sonuçlarına göre, en büyük yer değiştirme, heyelan bölgesinin taç kısmında elde edilmiştir. Heyelan bölgesinin orta bölümü, taç ve topuk kısımlarına göre daha güvenli kısımda yer almaktadır. Yapı yükleri modelde analiz edildiğinde, yatay ve düşey yer değiştirme değerlerini arttırdığı saptanmıştır. İnceleme alanında mevcut bir yapılaşma olduğu ve yeni yapılaşmalarında arttığı gözlenmektedir.

1.Boy kesitte yapıların inşasıyla beraber olarak 30.41 cm oturma elde edilmiştir. Oturma bölgesi daha çok heyelanın taç kısmındadır. Yapılan güvenlik analizi sonucunda da heyelanın

taç kısmı riskli bölge olarak görülmektedir. Modelde doygun kil malzeme olmasından ötürü, YASS derine (7m) indirildiğinde toplam oturmalar 23.77 cm olarak elde edilmiş, bu durumda toplam oturmalar %23 civarında azalmıştır. Aynı boy kesit için alternatif bir zemin iyileştirme yöntemi önerilerek güvenlik analizi gerçekleştirilmiştir. Göçme riski yüksek bölge için diyafram duvar nerisi ile model analiz edilmiştir. Çalışmada, yamaç üzerinde diyafram duvar kullanılarak boyutlandırılmıştır. Dolgu ve kil tabakası zemin kazılarak alınmış ve 3 farklı noktada diyafram duvar inşa edilmiştir. Bu imalat sonucunda modelde toplam oturmalar, 8.06 cm elde edilmiş olup toplam oturmaların %73 civarında azaldığı görülmüştür.

2. boykesitte yapılan analizlerde toplam oturma 58.67 cm olup riskli bölge olarak lojman çevresinde deformasyonlar fazla görülmektedir. Yapılan güvenlik analizinde lojman yamacı tehlikeli bölge olarak görülmektedir.

Bölge bütünüyle incelendiğinde, ani yağışlarla beraber YASS seviyesinin yeryüzüne kadar çıktığı ve arazide sürekli bir su akışının olduğu tespit edilmiştir. Bu su ortamdaki kil zemini doyurarak şişmeye neden olduğu anlaşılmış ve yapılarda önemli hasarlara neden olmuştur. Söz konusu su kaynağı akiferinin sondajlarla membası bulunup drenaj sağlanmalı ve farklı zemin iyileştirme yöntemleri denenerek optimum olanı tercih edilmelidir. Ayrıca ortamın 2. Derece deprem bölgesi olmasından dolayı deprem analizi yapılması ortamın dinamik yükler altında nasıl davranış göstereceğinin belirlenmesi açısından öneri sunulmaktadır.

KAYNAKLAR

- Anonim D.S.İ. XVIII** (1995) Bölge Müdürlüğü, *Senirkent Doğru ve Suyolu Dereleri Taşkın ve Rusubat Kontrol Nazım Planı*. Isparta.
- Arioğlu E ve Tokgöz N** (2005) Şev Stabilitesi Analizi. *Evrin Yayınevi*. İstanbul.
- Avcı M** (2003) Senirkent Sel Felaketi ve Ormanda yaşanan Zararlar, *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları*. Isparta.
- Bulut M** (1995) D.S.İ.'nin Yandere Islah Uygulamaları ve Kazanılan Deneyimler *İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*. (yayınlanmamış). İstanbul.
- Diniz A R** (1995) Stable Bilgisayar Programı Eğitim Kitabı. *Devlet Su İşleri Yayını*. Konya.
- Duncan J M ve Wright S G** (2005) *Zemin Şevlerinin Duraylılığı*, Kayabalı K. Gazi Kitapevi. Ankara.
- Erdemgil M** (1987) Yamaç ve Şevlerin Stabilitesi Dayanma Yapıları Semineri, *Devlet Su İşleri Yayını*. Cilt II. Samsun.
- Erguvanlı K** (1995) *Mühendislik Jeolojisi*. Seç Yayın Dağıtım, İstanbul. 348 s.
- Ertek T A** (1995) Senirkent Seli (13 Temmuz 1995-Isparta). *Türk Coğrafya Dergisi*, 127-141s. İstanbul.
- Gökçe O, Demir A ve Özden Ş** (2006) Türkiye'nin Heyelanlı Yerleşim Birimlerinin Dağılımı ve CBS Ortamında Sorgulama, *1. Heyelan Sempozyumu*. Trabzon. Bildiriler Kitabı 24-40.
- Görcelioğlu E** (1991) Türkiye I. Ulusal Heyelan Sempozyumu. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Matbaası*. Trabzon.
- Gürgen G** (1996) 14 Temmuz 1997 Senirkent Çamur Akması, A. Ü. Türkiye Coğ., Araşt. Ve Uyg. Merk. III. Coğ. Sempozyumu. 21. Yüzyıla doğru Türkiye. 15-19 s. Ankara.
- Hotz R D ve Kovacs W D** (2002) Geoteknik Mühendisliğine Giriş. *Gazi Kitapevi*. Ankara.
- İncecik M** (1987) Yamaç ve Şevlerin Stabilitesi Dayanma Yapıları Semineri, *Devlet Su İşleri Yayını*. Cilt II. Samsun.
- Karagüzel R, Bozcu M ve Yılmaz A** (1996) Senirkent (Isparta) Moloz Çamur Akması Ön Mühendislik jeolojisi.49. *Türkiye Jeoloji Kurultayı*. 16-25 s. Ankara.
- Keçeli A ve Dizioğlu M Y** (1981) Elektrik ve Elektromanyetik Prospeksiyon Yöntemleri. *Ankara Üniversitesi*. Ankara.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Önalp A** (1983) *Geoteknik Bilgisi Cilt II*, Karadeniz Teknik Üniversitesi. Trabzon.
- Önalp A ve Arel E** (2004) *Geoteknik Bilgisi Cilt II-Yamaç ve Şevlerin Mühendisliği*. Birsen Yayınevi. İstanbul.
- Özaydın K** (1989) *Zemin Mekaniği. Meya Matbaacılık*. İstanbul.
- Öztürk K** (2002) Heyelanlar ve Türkiye'ye Etkileri. *Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*. sayfa 35-50.
- Özüdoğru K, Tan O ve Aksoy İ H** (1988) Çözümlü Problemlerle Zemin Mekaniği, *Birsen Yayınevi*. İstanbul.
- Sarsılmaz** (2012) Maden İnşaat Taahhüt Danışmanlık Emlak Gıda Turizm Nakliyat San.Tic. Ltd. Şti. Zemin Etüdü
- Selçuk M E ve Terzi N U** (2005) YASS'nin Drenaj Hendekleri ile Düşürülmesinin Bir Şev Duraylılığı Örneğinde İncelenmesi. *II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongre*. 467- 474. İstanbul,
- Slope Design. Meng Final Year Project Report.** (2007) *School of Engineering, University of Durham*, Connolly H. www.dur.ac.uk,.
- Şekercioğlu E** (2002) Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi. *Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları*. No:28. Ankara.
- Tarhan F** (2002) Mühendislik Jeolojisi Prensipleri.3. Baskı., *Karadeniz Teknik Üniversitesi*. Trabzon.
- Tatar O, Gürsoy H, Koçbulut F ve Mesci L** (2005) Aktif Fay Zonları ve Heyelanlar, 17 Mart 2005 Kuzulu (Koyulhisar) Heyelanı, Cumhuriyet Bilim ve Teknik, No:941, İstanbul.
- TSE 8853.** (1991)*Yamaç ve Şevlerin Dengesi ve Hesap Metodları*. Ankara.
- Tunç A** (2002) Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, *Atlas Yayın Dağıtım*. İstanbul.
- Türker A E** (1991) Heyelanların Jeoelektrik Yöntemlerle Araştırılması, *Yağış Sel, Heyelan Sempozyumu*. Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği. Ankara.
- Türker A E ve Uyanık O** (2000) Eşen II HES Şalt ve Santral Sahası Potansiyel Heyelanların Geometrisini Saptamak İçin Jeofizik Çalışma, *Süleyman Demirel Üniversitesi Deprem ve Jeoteknik Araştırma Merkezi*. Isparta.
- Ulusay R** (2001) Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler. *Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları*. No:38. Ankara.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

Uzuner B A (1996) Temel Zemin Mekaniği. *Teknik Yayınevi*. Ankara.

Ünsal N (2005) Heyelanlar ve Kütle Hareketleri, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi*. Ankara.





ÖZGEÇMİŞ

Ekrem ÖZGENÇ, 1979 yılında Kütahya ili Gediz ilçesinde dünyaya geldi. İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimini Kütahya’da tamamladı. 2002 yılında Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2002 - 2006 yılları arası özel bir şirkette şantiye mühendisi olarak, 2006-2008 yılları arasında İstanbul Emniyet Müdürlüğünde ve 2008 yılından beri de Türkiye Taşkömürü Kurumunda (TTK), İnşaat Mühendisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Güney Mah. Emek (46 Evler) sk. G Blok 18/4
Kozlu/ZONGULDAK

Tel : 0505 499 27 64

E-Posta : ek.oz@mynet.com