



*Sevgili Eşim Sinem
Ve
Babam Kemal DELİBALTA'ya*

**TKİ – GELİ MUĞLA BÖLGESİNDE DEKAPAJ
DÖKÜM SAHASINDAKİ ŞEV
DUYARSIZLIKLARININ İNCELENMESİ**

143106

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Mahmut Suat DELİBALTA
(505952024)**

143106

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 17 Nisan 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Mayıs 2003**

Tez Danışmanları :

Prof.Dr. Senai SALTOĞLU

Prof.Dr. Erkin NASUF

Diğer Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Nuh BİLGİN (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Nuri Ali AKÇİN (Z.K.Ü.)

Doç.Dr. Ali KAHRİMAN (İ.Ü.)

**YÜKSEKÖĞRETİM FAKÜLTESİ
DANIŞMANLIK MERKEZİ**

MAYIS 2003

ÖNSÖZ

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi programında gerçekleştirilen, “*TKİ-GELİ Muğla Bölgesinde Dekapaj Döküm Sahasındaki Şev Duraysızlıklarının İncelenmesi*” konulu doktora tez çalışmasında, ortak danışmanlık görevini üstlenen sayın hocam *Prof.Dr.Senai SALTOĞLU* ve *Prof.Dr.Erkin NASUF*’a, Deutscher Akademischer Austauschdienst (Alman Akademik Değişim Servisi- DAAD) bursiyeri olarak Clausthal Teknik Üniversitesindeki araştırmalarımı destekleyen sayın hocam *Prof.Dr.Gerhard REIK* ve *Prof.Dr.Mahir VARDAR*’a, ayrıca RWE- Rheinbraun Engineering und Wasser GmbH kömür açık işletmelerinde teknik gezi olanakları sunan *Dipl.-Ing.K.J.PIERSCHKE* ve *Dr.-Ing.Karlheinz WINTER*’e sonsuz teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Laboratuar deneylerinin yapılmasında yakın ilgi ve desteğini gördüğüm, Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Jeoteknik Anabilim Dalı öğretim üyelerinden *Doç.Dr.Mustafa LAMAN* ve *Arş.Gör.Dr.Azım YILDIZ*’a, Jeoloji Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden *Doç.Dr.Hasan ÇETİN*’e ve özellikle MATLAB bilgisayar programının hazırlanmasında çalışma arkadaşım Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü *Arş.Gör.Mustafa AÇIKKAR*’a teşekkür ederim.

Pilot bölge olarak araştırma ve uygulama olanakları sunan *TKİ-Genel Müdürlüğü*’ne, Etüd, Proje ve Tesis Dairesi Başkanı sayın Maden Yüksek Mühendisi *Ömer ÜNVER*’e ve mesai arkadaşlarına, ayrıca *TKİ-GELİ Muğla Bölge Müdürlüğü* yetkililerine ve Jeoloji Yüksek Mühendisi *Yüksel AKIN*’a teşekkürlerimi sunar, çalışmanın madencilik sektörüne katkı sağlamasını temenni ederim.

Tez’in yazım aşamasında katkıda bulunan Elektronik Mühendisi *Özer ÖZTÜRK*’e ve her türlü maddi-manevi desteğini esirgemeyen aileme ve ağabeyim *Dr.Abuzer DELİBALTA*’ya şükranlarımı sunarım. Saygılarımla,

Adana, Mayıs 2003

Mahmut Suat DELİBALTA

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No.
ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
SEMBOL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	1
2. TKİ - GELİ MÜESSESESİNİN TANITIMI.....	3
2.1. Coğrafi Durum ve Rezerv	3
2.2. İklim ve Bitki Örtüsü.....	4
2.3. Jeolojik Durum	4
2.4. Morfolojik ve Yapısal Durum	4
2.5. Hidrolojik Durum	6
2.6. İşletme Yöntemi	7
2.7. Arazi Rehabilitasyonu ve Çevresel Önlemler	9
3. PASA ŞEV TASARIMI İÇİN GEREKLİ ZEMİN MEKANİĞİ VE JEOTEKNİK ANALİZLER.....	11
3.1. Pasa Şev Duraysızlıklarının Mekanizması	12
3.2. Pasa Şev Duraysızlıklarının Oluşum Koşulları	12
3.3. Pasa Şev Kayma Riskinin Belirlenmesi için Gerekli Kriterler	14
3.3.1. Dane Boyut Dağılımı ve Formu	15
3.3.2. Pasa Yığınlarında Su Seviyesi Oranları	17
3.3.3. Yığın Yoğunluğu ve Malzemenin Dayanım Özellikleri	20
3.3.4. Şev Geometrisi ve Dekapaj Sistemi	23
3.3.5. Dinamik Etki Büyüklükleri (Sismik Aktivite)	25
3.3.6. Zaman Etkisi.....	27
3.3.7. Yeraltı Suyu ve Kimyasal Bileşiminin Etkisi.....	28
4. PASA ŞEV KAYMA RİSKİNİN SAYISAL ANALİZİ	31
4.1. Klasik Yöntemler ile Şev Stabilite Analizleri	32
4.1.1. Sonsuz Yamaçta Duraylılık.....	32
4.1.2. Duraylılığın Dilim Yöntemleri ile Hesaplanması.....	34
4.1.2.1. Adi Dilim Yöntemi (İsveç Dilim Yöntemi).....	34
4.1.2.2. Sadeleştirilmiş Bishop Yöntemi.....	35
4.1.3. Duraylılığın Kama Analizi ile İncelenmesi.....	37
4.1.4. Dairesel Kaymaların Grafiksel Yöntem ile Analizi	39
4.1.5. Kayma Dairesinin Ampirik Yöntemler ile Belirlenmesi.....	41
4.1.5.1. Kayma Dairesi Yöntemi.....	42
4.1.5.2. Konsantrik Daire Yöntemi	42

4.1.5.3.	Gerilme Çatlakları Yöntemi	43
4.1.6.	Dairesel Olmayan Kayma Yüzeyleri için Duraylılık Analizi (Janbu Yöntemi).....	43
4.1.7.	Φ - Dairesi Yöntemi (Taylor Yöntemi)	48
4.1.8.	Logaritmik Sarmal Yöntem (Rendulic Yöntemi)	49
4.1.9.	Taban Kaymalarında Duraylılık (Tshebotariof-Taylor Yöntemi)	50
4.1.10.	Tabakalı Ortamlarda Yamaç ve Şev Stabilitesi.....	52
4.1.10.1.	Ardalanmalı Yatay Tabakalı Ortamlarda Şev Stabilitesi	52
4.1.10.2.	Ardalanmalı Eğik Tabakalı Ortamlarda Şev Stabilitesi	53
4.1.11.	Hoek ve Bary Yöntemi	55
4.2.	Yöntem Seçimi ve Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi	57
4.3.	Hypoplastik Madde Yasasına Göre Stabilite Analizi.....	60
4.3.1.	Hypoplastik Madde Yasası.....	60
4.3.2.	Hypoplastik Madde Yasasının Kullanım Özellikleri	61
4.3.3.	Hypoplastik Parametre Büyüklükleri ve Etki Faktörleri	63
4.3.4.	Başlangıç Gerilme Durumunun Belirlenmesi	65
4.3.5.	Stabilite Hesaplaması	68
4.3.6.	Bilgisayar Algoritması ve Model Deneyler.....	70
4.3.6.1.	Stabilite Kriterleri.....	72
4.3.6.2.	Arazi ve Laboratuvar Testleri	80
4.3.6.3.	Model Deneyler ve Sonuçları	88
4.4.	Depremsellik Etkisinde Pasa Şev Stabilite Analizi	98
4.5.	Şev Stabilite Analiz Yöntemlerinin Karşılaştırılması	104
4.6.	Kalitatif Değerlendirme.....	107
5.	MUHTEMEL BİR PASA ŞEV KAYMA ETKİ SAHASININ BELİRLENMESİ	108
5.1.	Hesaplama Alternatifi I	111
5.2.	Hesaplama Alternatifi II.....	112
5.3.	TKİ-GELİ Muğla Bölgesinde Bir Uygulama.....	114
6.	PASA ŞEV DURAYSIZLIKLARINA KARŞI ALINABİLECEK ÖNLEMLER.....	116
6.1.	Arazi Rehabilitasyon Yöntemleri	116
6.1.1.	Patlatmayla Dinamik Pasa Stabilitesi	118
6.1.2.	Titreşimli/Vibrasyonlu Dinamik Pasa Stabilitesi (RDV)	119
6.1.3.	Şev Önünde Bir Destek Bloğu Oluşturmak.....	121
6.1.4.	Ağırlıkla Dinamik Sıkıştırma (DYNIV).....	123
6.1.5.	Maden Reçinesi Enjeksiyonu ile Sıkıştırma.....	124
6.1.6.	Müller Resonans Sıkıştırması (MRC)	125
6.1.7.	Boşluk Suyu Basınç Bariyerleri	126
6.2.	Arazi Rehabilitasyon Yöntemlerinin Değerlendirilmesi	128
7.	AÇIK İŞLETME SONRASI BOZULAN ARAZİLERİN YENİDEN KULLANIM ALTERNATİFLERİ.....	130
8.	SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	136
	KAYNAKLAR	140
	EKLER.....	147
	ÖZGEÇMİŞ.....	154

KISALTMALAR

KISALTMA	ANLAMI
YK	Yuvarlaklılık Katsayısı, Dane Formu
SPT	Standart Penetrasyon Testi
RDV	Titreşimli/ Vibrasyonlu Dinamik Sıkıştırma
MRC	Müller Rezonans Kompaksiyon
DYNIV	Ağırlıkla Dinamik Sıkıştırma
AID	Kömürün Birim Alt Isı Değeri
K,G,D,B	Coğrafik Yönler
LL, w _L	Likit Limit
PL, w _P	Plastik Limit
PI, I _P	Plastisite İndeksi
TKİ	Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu
GELİ	Güney Ege Linyitleri İşletmesi
YLİ	Yeniköy Linyit İşletmesi
MW	Mega Watt
TL	Türk Lirası
MTA	Maden Tetkik Arama Enstitüsü
DSİ	Devlet Su İşleri Müdürlüğü
ÇED	Çevresel Etki Değerlendirme Yasası
İTÜ	İstanbul Teknik Üniversitesi
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	Amerika Test ve Malzeme Merkezi
BSI	İngiliz Standartları Enstitüsü
ISRM	Uluslararası Kaya Mekaniği Merkezi
DAAD	Alman Akademik Değişim Servisi
GTZ	Toplumsal ve Teknik İşbirliği Servisi
FBE	Fen Bilimleri Enstitüsü
km	kilometre
cm	santimetre
kg	kilogram
gr	gram
kcal	kilokalori
bkz	bakınız
vb	ve benzeri

TABLO LİSTESİ

Sayfa No.

Tablo 2.1. Açık işletme sonrası bozulan arazileri yeniden düzenleme maliyetleri..	10
Tablo 3.1. $H_{WK}/H_K = f(\tan \beta)$ regresyon analizi sonuçları.....	19
Tablo 3.2 . Pasa şev kayma risk dereceleri	19
Tablo 3.3. Farklı deprem şiddetleri için sismik katsayılar (C_s).....	26
Tablo 4.1. Bishop yönteminde duraylılık analizi için kullanılan çizelge	36
Tablo 4.2. Kama analizinde kuvvetlerin özellikleri	37
Tablo 4.3. Janbu yönteminde duraylılık analizi için kullanılan çizelge	48
Tablo 4.4. İncelenmiş zeminlerin hypoplastik parametre büyüklükleri	63
Tablo 4.5. Model deneye ait konsolidasyon basınç-deformasyon oranları	90
Tablo 4.6. Farklı poroziteli malzemeler için α_k , α_1 ve α_2 katsayıları.....	102
Tablo 5.1. Regresyon analizi sonuçları (Alternatif I)	111
Tablo 5.2. Regresyon analizi sonuçları (Alternatif II)	113
Tablo 6.1. Arazi iyileştirme yöntemlerinin kullanılabilirliği	129
Tablo 7.1. Arazi düzenlenme ve iyileştirilmesi ile işletme sonrası arazi planlamasında genel faktörler	133
Tablo 7.2 Teknolojik sürecin arazi rehabilitasyonu üzerine etkileri	134

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No.

Şekil 2.1. TKİ-GELİ (Muğla) bölgesi coğrafik ve ulaşım durumu .	3
Şekil 2.2. İşletme ve yakın çevresinin jeolojisini temsil eden genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesit	5
Şekil 2.3. Düz (a) ve konik (b) şekilli pasa yığın geometrisi ve su koşulları	7
Şekil 2.4. TKİ- GELİ (Muğla) bölgesi açık işletme yöntemi	8
Şekil 3.1. Kumun akma davranışının şematik gösterimi	12
Şekil 3.2. Şev duraysızlığına neden olan etki kuvvetleri	13
Şekil 3.3. Şev kayma sürecinin zamansal ve geometrik gelişimi	14
Şekil 3.4. Pasa şevlerinde kayma eğilimli dane boyut dağılım spektrumu	15
Şekil 3.5. TKİ- GELİ Muğla bölgesindeki pasa malzemesi ve taban zeminleri için tipik dane boyut dağılım eğrileri	16
Şekil 3.6. Oluşan şev duraysızlıkların su seviyesine bağlı olarak gelişim sıklığı	18
Şekil 3.7. TKİ- GELİ Bağyaka döküm sahası plan ve kesit görünüşü	20
Şekil 3.8. SPT- Bağlı yoğunluk indeksi ve kayma eğilimi arasındaki ilişki	21
Şekil 3.9. Pasa malzemesinde deviator gerilme-deformasyon arasındaki ilişki	22
Şekil 3.10. Zemin makaslama kutusunda test edilen pasa malzemesi örneklerinin normal gerilme-makaslama gerilmesi grafiğindeki dağılımı ile doruk ve artık makaslama dayanımı için genelleştirilmiş yenilme zarfları	23
Şekil 3.11. TKİ- GELİ pasa yığınlarında kritik yükseklik-şev açısı ilişkisi	25
Şekil 3.12. Deprem büyüklükleri ve Türkiye’de sınılaşmanın gözlemlendiği lokasyonların odak noktasına olan uzaklıkları arasındaki ilişki	26
Şekil 3.13. Türkiye deprem bölgeleri haritası ve risk büyüklükleri	27
Şekil 3.14. Şevlerin zamana bağlı 3 aşamalı akma davranışı (HÖFER)	28
Şekil 3.15. Boşluk suyu basıncının gerilme durumuna etkisi	28
Şekil 4.1.A. Dönel Kayma a-Genel şekilli kayma b-Dairesel kayma c-Ardışık kayma d-Karışık kayma	31
Şekil 4.1.B. Düzlemsel kayma a-Blok kayması b-Kama kayması c-Heterojen yamaçta kayma d-Yüzeysel kayma e-Aktif blok kayması	31
Şekil 4.2. Sonsuz yamaçta özellikler a-Yamaç kesiti b-Sızıntı yamaca paralel c-Sızıntı yamaç dışında (kaynak)	32
Şekil 4.3. Sonsuz yamaçta duraylılık hesabı için abaklar, a-A katsayısı abağı b- B katsayısı abağı	34

Şekil 4.4. Dilim analizinde kuvvetler a-Yamaç kesiti b-Dilime etkiyen tüm kuvvetler c-Dilime etkiyen kuvvetler (Sadeleştirilmiş Bishop)	35
Şekil 4.5. Kama analizi yöntemi a-Yamaca etkiyen kuvvetler b-Birinci kamaya ait kuvvet poligonu c-İkinci kamaya ait kuvvet poligonu	38
Şekil 4.6.a. Dairesel kaymaların grafiksel yöntem ile analizi için şev kesitleri	40
Şekil 4.6.b. Dairesel kaymaların grafik yöntemle analizi için şev tasarım grafiği	41
Şekil 4.7. Kayma dairesi yöntemi	42
Şekil 4.8. Konsantrik daire yöntemi	43
Şekil 4.9. Gerilme çatlağı yöntemi ile kayma dairesinin bulunması	43
Şekil 4.10.Dairesel olmayan kaymaların analizi için gerekli parametreler ve eşitlikler (Janbu yöntemi)	45
Şekil 4.11.a. Pozitif α açıları için n_α grafiği	46
Şekil 4.11.b.Negatif α açıları için n_α grafiği	47
Şekil 4.12. Janbu yönteminde f_0 düzeltme faktörü tayin grafiği	48
Şekil 4.13. Φ - dairesi (Taylor) yönteminde kayma dairesi ve kuvvetler	49
Şekil 4.14. Logaritmik sarmal yöntem (Rendulic yöntemi)	50
Şekil 4.15.a. Taban kaymalarında Tshebotariof-Taylor yöntemi	51
Şekil 4.15.b. Tshebotariof-Taylor yönteminde kritik şev yüksekliği abağı	51
Şekil 4.16. Ardalanmalı yatay tabakalı ortamlarda şev stabilitesi	52
Şekil 4.17. Ardalanmalı yatay tabakalı ortamlarda kayma dairesi merkezleri	53
Şekil 4.18. Ardalanmalı eğik tabakalı ortamlarda şev stabilitesi	54
Şekil 4.19. Kuru (drene olmuş) bir şevde kritik kayma yüzeyinin ve gerilme çatlağının lokasyonlarını tayin grafikleri	55
Şekil 4.20. Yeraltı suyunun bulunduğu bir şevde kritik kayma yüzeyinin ve gerilme çatlağının lokasyonlarını tayin grafikleri	56
Şekil 4.21. Stabilitate analizinde denge koşulunun üç farklı durumu	57
Şekil 4.22. Şevlerde stabil(a), kararsız(b) ve stabil olmayan(c) denge koşulları ..	58
Şekil 4.23. Yüksüz bir şev için gerilme bileşenleri	66
Şekil 4.24. Pasa şev geometrik büyüklükleri ve sınır koşulları	67
Şekil 4.25. Bir şev elemanında gerilme yönleri ve şekil değiştirme tasarımı	68
Şekil 4.26. Şev bölgesinde lokal (sol) ve global (sağ) duraysızlıkların şematik oluşumu	69
Şekil 4.27. Pasa şev stabilitesi analizi için genel algoritma akış diyagramı.....	70
Şekil 4.28. Hız vektörleriyle kama hareket bölgesi	71
Şekil 4.29. Hız vektörleri ile dairesel değişim bölgesi	71
Şekil 4.30. Bireysel noktaların deformasyon alanı	72
Şekil 4.31. Kinematik ve statik sınır koşullarıyla bir cisimdeki yük davranışları.	72

Şekil 4.32. Pasa şev stabilitesi için MATLAB bilgisayar programı algoritması ..	74
Şekil 4.33. Şev geometrisi ve parametrik büyüklükler	75
Şekil 4.34. Rankine gerilme alanı için tansörel büyüklükler	76
Şekil 4.35. TKİ-GELİ (Muğla) bölgesi pasa yığınlarında dane boyut dağılımı alt ve üst sınırları (A: Draglayn dökümü, B: Eski pasa yığınları, C: Kayma yüzeyleri örnekleri)	83
Şekil 4.36. Pasa malzemesi ile taze dekapaj kayacı örneklerinin plastisite indeksi ve suda ayrışmaya karşı dayanıklılık parametrelerine göre sınıflandırılması ve sınıflandırmada çevrim sayısının etkisi	86
Şekil 4.37. Model deneye ait konsolidasyon boşluk oranı- basınç (log) eğrisi	91
Şekil 4.38. Deney numunesine ait kesme kutusu deney sonuçları	92
Şekil 4.39. Deney numunesine ait elek analizi ve granülometre eğrisi	93
Şekil 4.40. Suya doymuş şev sisteminde yanal etki durumunda stabilite analizi a) Kayma öncesi, b) Kayma sonrası	95
Şekil 4.41. Malzeme parametrelerine bağlı olarak şev stabilitesi analiz sonuçları	97
Şekil 4.42. Gerilme yüklenici olarak kolon zemin taslağı	98
Şekil 4.43. Redüksiyon faktörü (r_d) için değer bölgeleri	99
Şekil 4.44. Farklı basınç koşullarında değişken yük-devir sayısı ilişkileri	99
Şekil 4.45. Akma (kayma) bölgesinin belirlenmesi	100
Şekil 4.46. Deprem etkisinde kayma riskinin belirlenmesi için algoritma	103
Şekil 4.47. Dilim metodu ile şev stabilite analizi örnek uygulama	106
Şekil 5.1. Mevcut etki sahasının ($X_{r,vorh}^*$) belirlenmesi için tanım büyüklükleri	108
Şekil 5.2. Akma yönünün ilerleme yönüne göre etki genişliği (X_r); (p) paralel, (s) dikey	109
Şekil 5.3. Etki sahasının belirlenmesinde kayma koşulları (u) önlemsiz, (b) önlemlili	110
Şekil 5.4. $\left(\frac{H_{wk}}{H_k} \right)$ Su koşullarına göre şev kayma etki sahasının (X_r) belirlenmesi için bir uygulama.....	114
Şekil 6.1.a. Patlatmayla dinamik pasa şev stabilitesi	118
Şekil 6.1.b,c. Patlayıcı maddenin yerleştirilmesi ve ateşleme durumu	119
Şekil 6.2.a. Titreşimli kol	120
Şekil 6.2.b. Titreşimli/vibrasyonlu dinamik pasa şev stabilitesi	121
Şekil 6.3. Koruyucu bloğun oluşturulması a) Karma malzeme, b) Temel inşası	122
Şekil 6.4. TKİ-GELİ Muğla bölgesinde uygulanan pasa şev stabilitesi önlemleri	122
Şekil 6.5. Ağırlıkla dinamik sıkıştırma (a) ve oluşan konsolidasyon (b)	123
Şekil 7.1. Tarımsal ve ormansal arazi kullanımı için şev tasarımı	131

Şekil 7.2. Dinlenme alanları için şev tasarımı	132
Şekil 7.3. Doğal çevre için şev tasarımı	132



SEMBOLLER LİSTESİ

SEMBOL	ANLAMI	SI-BİRİMİ
U, Cu	Eş şekillilik, üniformluk katsayısı	-
d	Dane çapı	mm
d ₁₀ , d ₅₀ , d ₆₀	%10, %50, %60 elekten geçen miktarın dane çapı	mm
N _i	Dane sayısı	adet
Ψ _i	Dane şekil faktörü	-
H _K , h	Pasa şev yüksekliği	m
H _{WK} , h _w	Pasa şev içerisindeki su seviyesi	m
H _{WR}	Pasa şev önündeki su seviyesi	m
β	Şev açısı, genel eğim	°
b	Kayan şev genişliği	m
V	Kayan şev hacmi	m ³
X _r	Kayan şev etki uzunluğu	m
I _D	Bağıl yoğunluk indeksi	-
e, e _{io}	Boşluk oranı, in-situ porozite oranı	-
e _{max}	Gevşek yığındaki porozite oranı	-
e _{min}	Sıkıştırılmış yığındaki porozite oranı	-
e _c , e _d	Basınç bağımlı sınır porozite oranları	-
n̄	Ortalama porozite değeri	%
2q	Deviatör (ortanca) gerilme	kPa
ε _v	Düşey deformasyon miktarı	%
σ ₁	Toplam yatay gerilme, en büyük asal gerilme	kPa
σ ₃	Toplam düşey gerilme, en küçük asal gerilme	kPa
σ ₁ ', σ _h '	Efektif yatay gerilme	kPa
σ ₃ ', σ _v '	Efektif düşey gerilme	kPa
σ _{xx} , σ _{yy} , σ _{zz}	Asal gerilme bileşenleri	kPa
σ _{xy} , σ _{xz} , σ _{yz}	Kayma gerilmesi bileşenleri (2.Enerji yasasında)	kPa
σ ₁₁ , σ ₂₂ , σ ₃₃	Efektif gerilme bileşenleri	kPa
σ' _{ij}	Efektif gerilme oranı	-
τ _{max}	Maksimum kayma gerilmesi, max. kesme gerilmesi	kPa
τ _{in-situ}	İn-situ (yerinde) kayma gerilmesi	kPa
τ _{vorh.}	Mevcut kayma gerilmesi	kPa
τ _{zul.}	Mümkün kayma gerilmesi	kPa
r	Regresyon analiz katsayısı	-
σ _{n-1}	Ortalama hata, örnek standart sapma	-
(H _{WK} /H _K)*	Yığındaki kritik su seviyesi oranı	-
C _s	Sismik aktivite katsayısı	-
W _i	Dilim ağırlığı	kPa
R	Kayma dairesi yarıçapı	m
a _i	Kayma dairesi ağırlık merkezine olan düşey uzaklık	m
c, C	Kohezyon kuvveti	kPa

SEMBOL	ANLAMI	SI-BİRİMİ
ϕ	İçsel sürtünme açısı	°
γ'	Zeminin tabii birim hacim ağırlığı	kN/m ³
γ_k	Zeminin kuru birim hacim ağırlığı	kN/m ³
γ_s	Zeminin suya doymun birim hacim ağırlığı	kN/m ³
s'	Konsolidasyon gerilmesi, ortalama etkin gerilme	kPa
$\Delta^2 E$	2.Enerji yasası	J/s ²
S_r	Zemin doygunluk derecesi	%
F	Emniyet katsayısı, güvenilirlik katsayısı	-
K	Yanal basınç katsayısı	-
K_a	Aktif basınç katsayısı	-
K_c	Efektif basınç katsayısı	-
K_o	Statik basınç katsayısı	-
Ψ	Asal gerilme ekseninin yatayla yaptığı açı	°
Δh	Kot farkı, yükseklik farkı	m
$g_{i,j}$	Şekil değiştirme ivmesi	m/s ²
p_u, p_w, u_w	Boşluk suyu basıncı	kPa
γ_w	Suyun birim hacim ağırlığı	kN/m ³
δ	Blok kesme açısı	°
α	Blok taban açısı	°
v	Dilatans açısı, şekil değiştirme açısı	°
a_{max}	En büyük yer ivmesi, sismik aktivite yer ivmesi	m/s ²
g	Yerçekimi ivmesi	m/s ²
r_d	Redüksiyon faktörü	-
f	Frekans	H _z
k_f	Zeminin su geçirgenlik katsayısı, permeabilite	m/s
x, y, z	Bölge koordinatları	-
x_1, x_2, x_3	Bölge koordinatları	-
F_x	X ekseninde etkiyen kuvvet	kN
f_o	Janbu şev duyarlılık analizinde düzeltme faktörü	-
α_n	Janbu şev duyarlılık analizinde geometrik bir fonksiyon	°
i	Grafik yöntemde şev açısı	°
$\Delta\sigma$	Normal gerilme farkı	kPa
$\Delta\tau$	Kayma gerilmesi farkı	kPa
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_k$	Kayma koşulundaki anizotrop durum katsayıları	-
$\beta_1, \beta_2, \beta_k$	Kayma koşulundaki izotrop durum katsayıları	-
N_B	Malzeme kırılma yük devir sayısı	-
$I_{1\sigma}$	1.Temel sabiti	-
$I_{2\sigma}$	2.Temel sabiti	-
$I_{2\sigma,Dp}$	Peryodik gerilmelerin 2.Deviatör gerilme sabiti	-
$X^*_{r, vorh.}$	Mevcut kayma koşulu etki uzunluğu	m
$X^*_{r, theor.}$	Teorik kayma koşulu etki uzunluğu	m
a_1, a_2, b_1, b_2	Kayma koşulu regresyon analiz katsayısı	-
δ_1, δ_2	Kayma koşulundaki etkin kuvvet katsayısı	-
ha	Alan birimi, hektar	10 ⁴ m ²
t	Ağırlık miktarı, ton	1000 kg
m	Uzunluk birimi, metre	100 cm

SEMBOL	ANLAMI	SI-BİRİMİ
yd ³	Hacim birimi, yarda küp	0,7646 m ³
°C	Sıcaklık birimi celsius (santigrad) derece	-
c _p	Viskozite, centipoise = 0,01 Pois	0,01 dyn.sn/cm ²
B	Hacimsel tepki kuvveti	kN/m ³
D	Dağılma hız tansörü	/s
L	Lineer tansörel fonksiyon	-
N	Lineer olmayan tansörel fonksiyon	-
T	Cauchy gerilme tansörü	kPa
$\dot{T}$	Cauchy gerilme tansörü zamansal değişimi	kPa/s
$\tilde{T}$	Jaumannsch gerilme oranı	kPa/s
$\hat{T}$	Norm gerilme tansörü	kPa
$\hat{T}^*$	Norm gerilme tansörünün deviatörü	kPa
E	Sistem enerjisi	J
a ₁ ,a ₂ ,a ₃ ,a ₄	Kalibrasyon sabitleri	-
b _E	Ara değişken	-
h _g	Granüle malzeme sertliği	MPa
h _o	Kalibrasyon sabiti	-
f _a	Argotrapı faktörü	-
f _b	Barotropi faktörü	-
f _d ,f _e	Pyknotropi faktörü	-
f _e [*]	Sıfır gerilmedeki pyknotropi faktörü	-
e _{kr}	Kritik porozite oranı	-
e _c	Peryodik kesme gerilmesine göre porozite oranı	-
e _{co}	Sıfır basınçta kesme gerilmesine göre porozite oranı	-
s	Deformasyon miktarı	m
S ₁ ,S ₂	Ara değişkenler	m
θ	Kayma yüzeyi açısı	°
e _f	Düzgün akıştaki porozite oranı	-
e _{fo}	Düzgün akıştaki sıfır basınçta porozite oranı	-
e _o	Başlangıç porozite oranı	-
e _{oo}	Sıfır basınçta başlangıç porozite oranı	-
C _{c1} ,C _{c2}	1. ve 2. Konsolidasyon (sıkışma) indisleri	-
C _c	Konsolidasyon indisi	-
n	Konsolidasyon exponenti	-
α, β	Hypoplastik malzeme üstel parametreleri	-
z	Derinlik, düşey uzaklık	m
η	Pasa şev kayma koşulu sınır değeri	-
€	Avrupa para birimi	-
\$	Amerikan doları	-

TKİ-GELİ MUĞLA BÖLGESİNDE DEKAPAJ DÖKÜM SAHASINDAKİ ŞEV DURAYSIZLIKLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Sekiz bölümden oluşan doktora tez çalışmasında; ilk iki bölümde giriş, amaç ve kapsam belirtildikten sonra, TKİ-GELİ Müessesesinin kısa bir tanıtımı yapılmıştır. Kömür açık işletmelerinde gerek üretim, gerekse dekapaj faaliyetleri sırasında ve sonrasında pek çok üretim çukurları/ boşlukları ve şev yüzeyleri oluşmaktadır. Büyük bir tehlike potansiyeli içeren bu yüzeylerde oluşacak şev duraysızlıklarının tespiti için, gerekli zemin mekaniği ve jeoteknik analizler üçüncü bölümde incelenmiştir. Dördüncü bölümde; pasa şev kayma riskinin sayısal analiz yöntemleri tanıtılarak, özellikle klasik analiz yöntemleri ile sınır denge durumunun tespitinin gerekli olduğu, ancak stabilite koşulunun sağlanması için yeterli olmadığı belirtilmiştir. Bundan dolayı; pasa şev stabilitesi analizi için, 2. enerji yasasına (Δ^2E) dayalı olarak geliştirilen hypoplastik madde yasasının kullanımı öngörülmüştür. Bu yasaya göre yeter derecede stabilite sağlamak için, hiçbir şev bölgesinde (lokal veya global) $\Delta^2E < 0$ olmamalıdır. İkinci enerji yasası çerçevesinde hazırlanan MATLAB 6.0 bilgisayar programında nümerik hesaplamalar ve laboratuarda model deneyler yapılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, öngörülen yasanın geçerliliği ve uygun çözümler sunduğu tespit edilmiştir.

Muhtemel bir kaymanın şev gerisine doğru etki sahasının belirlenmesi ve buna bağlı olarak riskli bölgenin boyutlandırılması ise, beşinci bölümde iki farklı hesaplama alternatifine göre yapılmıştır. Altıncı bölümde, kayma riski taşıyan pasa şev yüzeylerinin stabilitesi için çeşitli arazi rehabilitasyon yöntemleri tanıtılmıştır. Özellikle gerekli arazi rehabilitasyon hedefine yalnız bir yöntem ile değil, bilakis birden fazla yöntemin uygun bir kombinasyonu ile erişilebileceği vurgulanmıştır. Açık işletme sonrası bozulan arazilerin yeniden kullanım alternatifleri ise, yedinci bölümde tanıtılmıştır. Madencilik faaliyetleri sonucu bozulan arazilerin yeniden düzenlenmesi ve iyileştirilmesinde temel amaç; bu arazilerin güzel bir peyzaj görünüm kazanması yanında, eski ekolojik ve ekonomik değerine kavuşturulması veya daha da geliştirilmesi olmalıdır. Çok yönlü disiplinler arası çalışmayı gerektiren bu faaliyetler; ancak ülke kaynaklarına verilen önem, mevcut hukuksal, ekonomik ve zamansal olanaklar ölçüsünde gerçekleştirilebilir. Bu hususta; TKİ-GELİ Müessesesine katkıda bulunmak maksadıyla, sekizinci bölümde sonuç ve tartışmalar sunulmuştur.

THE ANALYSIS OF SLOPE INSTABILITY ON THE AREA OF CARVING OUT IN TKİ-GELİ MUĞLA

SUMMARY

The TKİ-GELİ Institution was introduced after the introduction, aim and contents of the study were given in the first two sections of this Ph.D. study consisting of 8 sections. A number of production pits/ caverns and slopes are formed whether during and after production or carving out activities in coal open pit mines. Soil mechanics and geotechnical analysis of these potentially hazardous slopes have been discussed in order to identify areas of instability in the third section. In the fourth section, by introducing the methods of numerical analysis of slopes for landslide risk, especially the necessity of classical methods and determination of the state of equilibrium conditions were explained, but it was added that this is not enough to provide the stability condition. Therefore, usage of hypoplastic materials theory based on the second energy theory (Δ^2E) was suggested for the stability of slopes. According to this theory, in order to provide necessary stability, $\Delta^2E < 0$ should not occur in no parts (local or global) of a slope. Laboratory model tests and numerical calculations using the MATLAB computer program prepared according to the second energy theory were applied. According to the results, it was determined that the proposed theory is valid and offers proper solutions.

The determination of the effect area behind a possible slide and the size of the risk were investigated through two different methods in the fifth section. In the sixth section, different field rehabilitation methods for stabilizing potential slopes were introduced. Here, it was emphasized that rehabilitation was possible by using combination of different methods. Reuse alternatives of the fields modified after open mining was given in the seventh section. The main purpose of rehabilitation of the fields disturbed after mining activities was to give these areas a good-looking landscape as their previous ecological and economic values. These kinds of studies, which need interdisciplinary approaches, depend on how the country's resources are valued, present judicial, economical and timing conditions. Conclusions and suggestions are presented to improve the TKİ-GELİ Institution in the eighth section.

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelerin hızla devam ettiği günümüzde, artan hammadde ihtiyaçlarını karşılamak ve büyük üretim miktarına düşük maliyetler ile erişmek maksadıyla, açık maden işletmeciliği kullanılmaktadır [1]. Gerek üretim, gerekse dekapaj faaliyetleri sırasında ve sonrasında; kömür açık işletmelerinde pek çok üretim çukurları/ boşlukları ve şev yüzeyleri oluşmaktadır. Geometrilere; örtü kalınlığına, işletme büyüklüğüne ve seçilen açık işletme üretim yöntemine bağlı olan bu alanların yeniden kullanımı, çevresel etki bakımından büyük önem taşımaktadır. Farklı kullanım alternatiflerinin tasarlanabileceği bu arazilerin, başta jeoteknik ve zemin mekaniği bakımından duraylı (stabil) ortam koşullarına sahip olması gerekmektedir [2].

Araştırma ve gözlem sonuçlarına göre; açık işletme sonrası oluşan üretim çukurlarının dekapaj malzemesiyle doldurulmaması halinde, yüzey suları ve yeraltı su seviyesinin yükselmesi ile büyük göletler oluşmaktadır. Gevşek kayaç ve zemin özelliği gösteren pasa şevlerinin, değişen hidrojeolojik koşullarda emniyet sınır değerleri değişebilmekte ve bazı durumlarda büyük maddi kayıplarla sonuçlanan heyelan türü şev kaymaları meydana gelebilmektedir. Farklı karakteristik özellikler gösteren bu koşullarda, üretim çukurları/ boşlukları ve şev yüzeylerinden yararlanmak kısıtlanmakta veya tamamen olanaksız hale gelmektedir [3,4]. Bu ve benzeri problemler ile karşılaşmamak için, doktora tez çalışması kapsamında konu detaylı araştırılarak, modern teknoloji uygulamaları, farklı bakış açıları ve alternatif çözüm önerileri sunulmaktadır.

1.1. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Çevre bilinci tüm Dünya’da özellikle son 25-30 yılda hızla gelişmiş ve çevreye verilen zararların en aza indirgenmesi için çeşitli kanunlar yürürlüğe konulmuştur (Kanada 1975, ABD 1977, Avustralya 1971, Almanya 1980, İngiltere 1975, Fransa 1977).

Türkiye’de de çevre konusu ilk olarak 1982 Anayasasının 56. maddesi ile yeniden başlamış, 15.06.1985 tarihinde yürürlüğe giren 3213 sayılı maden kanununun 46. maddesi ile devam etmiş ve 11.08.1993 tarih, 2878 sayılı çevre kanununun 28. maddesi ile yasal bir önem kazanmıştır.

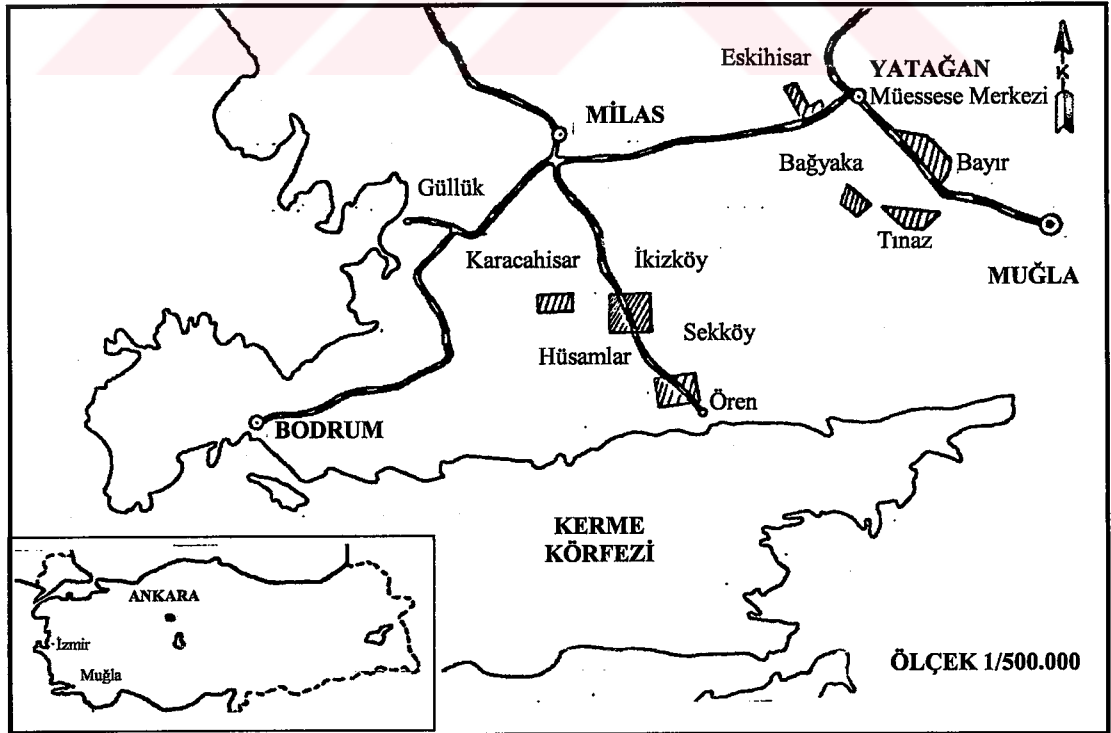
Ülkemizdeki toplam linyit üretiminin yaklaşık % 90’nın açık işletme yöntemi ile gerçekleştirildiği dikkate alınır, madencilik faaliyetleri nedeniyle bozulan arazilerin oldukça önemli boyutlara ulaştığı açıkça görülecektir. Bundan dolayı kömür madenciliğinde çevresel etki değerlendirme (ÇED) esaslarına göre, bozulan arazilerin yeniden düzenlenmesi büyük önem taşımaktadır [5]. Bu amaçla; TKİ – GELİ Muğla bölgesinde madencilik sonrası oluşan dekapaj döküm sahasındaki şev duraysızlıklarının incelenmesi ve jeoteknik yönden rehabilitasyonu hedeflenerek, özellikle detay çalışmalar;

- pasa şev duraysızlık kriterlerinin belirlenmesi,
- muhtemel bir pasa şev kayma yüzeyinin oluşum koşulları ve analizi,
- pasa şev yüzeylerinde olası kayma riskine karşı alınabilecek stabilite önlemleri,
- bozulan arazilerin yeniden düzenlenmesi ve verimli kullanımı için çevresel alternatifler sunmak olacaktır.

2. TKİ - GELİ MÜESSESESİNİN TANITIMI

2.1. Coğrafi Durum ve Rezerv

Muğla ili sınırları içerisindeki kömür potansiyelinin varlığı 1956 yılından itibaren bilinmesine rağmen, MTA tarafından etüt ve sondajlı arama faaliyetlerine 1973 yılında başlanmıştır. Rezervlerin işletmeye alınması, merkezi İzmir’de olan Ege Linyitleri İşletmesi (ELİ) Müessesesinin 1979 yılında kurulmasıyla başlamış olup, 29.09.1983 tarih ve 2980/1294 sayılı TKİ yönetim kurulu kararı ile Güney Ege Linyitleri İşletmesi (GELİ) Müessesesi kurularak, 01.01.1984 yılında faaliyetlerine devam etmiştir. Yatağan, Tınaz-Bağyaka ve Milas işletmeleri şeklinde tesis edilmiş olan GELİ Müessesesi, 1991 yılında yapılan reorganizasyon çalışmaları ile YLİ ve GELİ Müdürlüğü’ne dönüştürülmüştür. Eskihisar, Tınaz ve Bağyaka ocakları olarak faaliyetlerini sürdüren GELİ, yaklaşık 86.009.000 ton görünür rezerve sahiptir. Öngörülen proje kapasitesi yıllık 5.035.000 ton linyit üretimidir [6]. Çalışma alanının genel konumu ve sınırları şekil 2.1’de verilmiştir. Yatağan ilçesine 8 km uzaklıktaki işletme sahası, 1:25.000 ölçekli Aydın-N20-a4 paftasında yer almaktadır [7].



Şekil 2.1. TKİ-GELİ (Muğla) bölgesi coğrafi ve ulaşım durumu [7].

2.2. İklim ve Bitki Örtüsü

Çalışma alanının doğal çevresi Akdeniz ikliminin etkisi altında olup, yazları sıcak ve kurak, kışları ılık ve yağışlıdır. Yağışlar yağmur şeklindedir ve genellikle kış ve ilkbahar aylarında düşer. Meteorolojik verilere göre en çok yağış 167,5 mm/m² su ile Aralık, en az yağış 1 mm/m² ile Temmuz ayında tespit edilmiştir. En sıcak ay 42,7 °C ile Ağustos, en soğuk ay ise -8,2 °C ile Aralık'tır.

Çöküntü havzasının kenarlarını çevreleyen yükseltiler; makiler ve çam ormanlarıyla kaplıdır. Halen işletme faaliyetlerinin yapılmadığı düzlükler ise bitki bakımından fakir olup, tarıma uygun alanlar olarak değerlendirilmektedir [8,9].

2.3. Jeolojik Durum

Açık işletme ve yakın çevresinde kayaçları oluşturan Paleozoik yaşlı şistler ve Mesozoik yaşlı mermerlerin üzerinde Turgut, Sekköy ve Yatağan formasyonlarından oluşan Neojen yaşlı çökeller bulunmaktadır. Ayrıntılı jeolojik çalışmalar, saha stratigrafisinin iki ana bölümden oluştuğunu göstermektedir.

1 – Temel Kayaçlar

1.a – Paleozoik yaşlı şistler (Ş)

1.b – Mesozoik yaşlı mermerler (Mr)

2 – Neojen Yaşlı Çökeller (Orta- Üst Miosen)

2.a – Turgut formasyonu (Tmt)

2.b – Sekköy formasyonu (Tms)

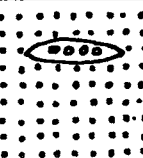
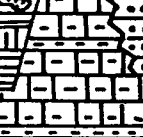
2.c – Yatağan formasyonu (Tmy)

İşletme ve yakın çevresinin jeolojisini temsil eden stratigrafik kolon kesit şekil 2.2'de verilmiştir [8,9].

2.4. Morfolojik ve Yapısal Durum

İşletme faaliyetlerinin yoğun ve sürekli olduğu çalışma alanının topografyası; işletmeciliğin gereği olarak yapılan üretim ve dekapaj dökümleri ile hemen her gün değişmekle birlikte, bölgenin genel topografyası ana hatlarıyla bilinebilir niteliktedir. Çalışma alanı, Yatağan'ın kuzey batısından başlayıp güney doğuda Muğla'ya doğru devam eden büyük bir çöküntü havzasının bir bölümünü oluşturmaktadır.

Batı'dan ve güney'den tamamen kapalı olan çalışma alanı, doğu'ya açılan bir boğaz ile ana çöküntü havzasına bağlantılıdır.

			FORMASYON	LİTOLOJİ	MAKSİMUM (m) KALINLIK	TANIM
SENOZOYİK	TERSİYER	MUĞLA GRUBU	YATAĞAN		~ 50	Tmy: KUMTAŞI (üstte) konglomera mercikleri
			SEKKÖY		~ 60	Tms ¹ (Kırıntılı fasiyes): KİREÇ- TAŞI ve KONGLOMERA
					~ 25	Tms ² (Geçiş zonu): KİL, killi SİLT
					~ 90	Tms: Üstte KİLTAŞI, KİREÇ- TAŞI, MARN ardalanması altta kompakt MARN
					20	Lg : LİNYİT
			TURGUT		> 180	Tmt: Üstte KİL, SİLT; altta ince den iriye doğru klastikler
PALEO. MESO.					?	M : MERMER
					?	Sch: ŞİST

Şekil 2.2. İşletme ve yakın çevresinin jeolojisini temsil eden genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesit [8].

Dekapajın önemli bir bölümünü oluşturan Sekköy formasyonuna ait birimler ile daha az olmakla birlikte Yatağan formasyonu, Neojende gelişmiş GD, KB ve GB'ya 60°- 80° eğimli normal faylarla bölünmüştür. Düz ve pürüzsüz yüzeylere sahip bu fay zonlarının genişliği 5 cm ile 40 cm arasında değişmekte ve doğrultuları arasında bir paralellik gözlenmektedir.

Sekköy formasyonu ve linyit horizonu içinde normal faylara uyumlu yönde geli mi , s rekli i nispeten fazla olan    adet eklem sistemi ocak genelinde yaygındır. Bu sistemler KD – GB ve KB – GD doğrultulu olup, $80^0 - 90^0$ arasında değişen e imlerle GD ve KD'ya dalmaktadırlar.

Tabakalanma genellikle K – G do rultuludur. Ocak içi pasa y  nları, eğimi $3^0 - 15^0$ arasında değişen kömür tabanı üzerinde, dış döküm ise ekseri mermer temel kayası üzerinde bulunmaktadır [8,9].

2.5. Hidrolojik Durum

1990 ve 1994 yıllarında işletme  evlerinin stabilitesi konusunda yapılan et t ler sırasında, saha genelinde yeraltı su tablasının marn ile kömür horizonu arasındaki sınır boyunca yer aldığı, suyun kömürün açığa çıkarıldığı yüksek  evlerde kömür içerisinden kazı bo lu una doğru aktı ı ortaya konulmuştur.

Pasa y  nlarının genel olarak kuru olduğu, ancak ya ı  sularının pasa içerisine süzülerek malzemeyi yer yer nemli hale getirdiği belirlenmiştir.

TKİ – GELİ Müessesesinin GMS – 300 model düz takımla ilerleme yapan sondaj makinası ile yapılan jeoteknik amaçlı sondajlarda, y kse li az da olsa suyun saptanmış olması ve yapısal olarak senklinalin varlığı, y  nların tabanlarında bir su tablasının varlığına işaret etmektedir. Suyun birikmesinde tabanın geçirimsiz olu u da önemli rol oynamaktadır. TKİ yetkililerinden alınan bilgilere göre;  ahinler bölümünde Nisan 1993'te  3 duyarsızlığı gelişmesine paralel olarak pasa y  nı içerisinden su bo aldı ı ve y  nın üzerinde yer aldığı vadi tabanı boyunca aktı ı belirtilmiştir. Gerek bu duyarsızlıkta, gerekse buna komşu  1 ve  2 nolu duyarsızlıklarda gözlenen ve geniş alanları kapsayan akma şeklindeki pasa hareketinin ancak suyun varlığı ile olabileceği d   n lm  t r. İşletme genelinde; aktif – pasif kama ve dairesel olmak üzere toplam dokuz pasa duraysızlı ı saptanmıştır [8,9].

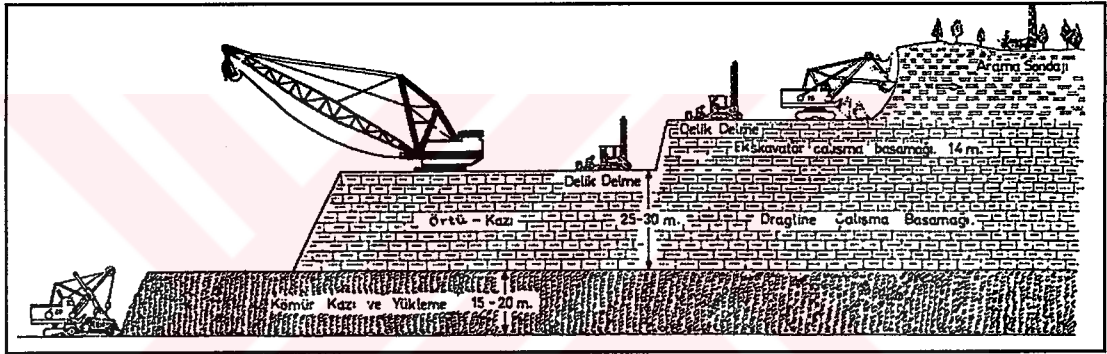
İşletme sahasının farklı bölgelerinde yapılan toplam 10 test sonucuna göre; su geçirgenlik katsayısının $k_f = 10^{-5} - 10^{-6}$ m/s düzeyinde olup, orta derecede bir geçirgenlik özelliği gösterdiği ve bu değerin de kayacın yapısıyla uyumlu olduğu belirlenmiştir.

[illegible]

2.6. İşletme Yöntemi

7

Kömür üretimi için oluşturulan dilimler 80 metre genişliğinde olup, kuzey – güney doğrultuludur. İşletme ilerleme yönü, doğudan batıya planlanmıştır. İşletme genelinde uygulanan yöntem; Draglaynın çalışacağı dilimi hazırlamak üzere üst katlarda PH 2100 tipi 15 yd³ kepçe kapasiteli ekskavatörler ile inceltme kazısı yapılmaktadır. Ocağın nispeten sert kumlu kireç taşları ve kömür damarının hemen üzerinde yer alan kompakt marnlarda kazı işleminin kolaylaştırılması amacıyla 9” (inch) çaplı 30 metre delik kapasiteli REEDRILL marka derin kazı makinası ile hazırlanan deliklerde gevşetme atımları yapılmaktadır. Ekskavatörlerce kazılan malzeme 85 short tonluk kamyonlarla (CAT 777) döküm sahasına nakledilmektedir. Kömür damarının hemen üzerindeki yaklaşık 25 metre kalınlıktaki örtü kazısı ise, Draglayn ile yapılmaktadır. Draglayn kaldırdığı örtüyü bir önceki kömürü alınmış dilimdeki boşluğa dökmekte ve ocak içi pasa yığınları oluşturulmaktadır (şekil 2.4).



Şekil 2.4. TKİ- GELİ (Muğla) bölgesi açık işletme yöntemi [7].

Draglayn tarafından üzeri açılan kömür damarı ise, 10 yd³'lük PH 1900 marka elektrikli ekskavatörler ile kazılarak, 150 short tonluk TEREX 34-11C tipi alttan boşaltmalı kamyonlar ve bant konveyörler ile TKİ ve 3x210 MW gücündeki termik santral silosuna nakledilmektedir. Ayrıca küçük kepçeli yükleyiciler ile de piyasa kamyonlarına kömür verilmektedir [6,7].

Ortalama kömür kalitesi;

Doğal nemi : % 32 - 39

Kuru külü : % 20 - 28

Toplam kükürt : %1,90 ~2,49

Orijinal AID : 1792 kcal / kg ~ 2131 kcal / kg dır.

İşletme yetkililerinden alınan bilgiye göre, 2002 yılında ekskavatörler ile 19.896.724 m³ inceltme dekapajı (TKİ+Müteahhit Firma), 3.055.000 m³ Draglayn dekapajı olmak üzere toplam 22.951.724 m³ örtü dekapajı yapılmıştır. Kömür üretimi ise 3.721.927 ton gerçekleştirilmiştir [6,10]. İşletme genelinde ortalama dekapaj oranı 3,96 m³/ton dur.

2.7. Arazi Rehabilitasyonu ve Çevresel Önlemler

Ülkemiz linyit rezervinin (8,275 milyar ton) yaklaşık %30'na sahip (2,500 milyar ton) TKİ kurumu, kömür üretiminin %85'i gerçekleştirmektedir [11]. Bu üretimin yaklaşık %90'ı açık işletmelerden sağlanmaktadır. TKİ'nin halen madencilik faaliyetlerini sürdürdüğü toplam 36.000 hektar yüzölçümündeki sahaların %35'i orman arazisi, %11'i hazine arazisi ve %54'ü şahıslardan kamulaştırma yoluyla alınan arazilerden oluşmaktadır. Orman idaresine ait sahalarda kurum sadece kullanma (irtifak) hakkı ile üretim yapmaktadır. Bu arazilerin yeniden düzenlenmesi TKİ, ağaçlandırması ise orman idaresi tarafından ücret karşılığı yapılmaktadır. Diğer arazilerin düzenlenmesi TKİ tarafından yürütülmektedir. TKİ'nin 1977 yılında başlattığı işletme sonrası bozulan arazileri yeniden düzenleme ve iyileştirme faaliyetleri, son 5 – 10 yılda büyük bir hız kazanmıştır.

Arazi kullanımı ve çevre düzenleme ile ilgili TKİ– GELİ Bölge Müdürlüğüne bağlı Yatağan bölgesindeki çalışmalar (orman irtifak hakkı alınan alanlarda dahil) 1991 yılında başlatılmış ve bu güne kadar 292,0 ha'lık alana 795.080 adet Yalancı Akasya, Macar Akasyası, İğde, Kara Servi, Dışbudak, Akçaağaç, Lingustrum, Zeytin ve Aylantluns gibi değişik türde ağaçlar dikilmiştir. Dikilen ağaçların tutma verimi %95'tir. Yeniköy bölgesinde ise çalışmalar 1993 yılında başlatılmış olup, 94,9 ha'lık alana 93.000 adet Yalancı Akasya ve çam türü ağaçlar dikilmiştir. Dikilen ağaçların tutma verimi %90'dır [6,10-13]. Arazi iyileştirme faaliyetleri ağaçlandırma, teraslama, tel-çit ve çapalama olmak üzere, toplam maliyeti 1997 yılı değeriyle yaklaşık 58,5 milyon TL/ ha olarak, 1994-1998 yılları arasında toplam 2.381.378.000 TL harcama gerçekleştirilmiştir (EK 1,2)[10,11].

Madencilik faaliyetleri sonrası bozulan arazilerin yeniden rehabilitasyonu ve maliyetleri ile ilgili genel bir değerlendirme ve de dünyadaki uygulamalarla karşılaştırma yapabilmek için, aşağıdaki bilgiler verilmiştir.

GRIM ve HILL (1974) kömür açık işletmeciliğinin düzenleme ve iyileştirme maliyetleri üzerine yaptıkları araştırmalarda, Batı Kentuckuy'da düzenleme ve iyileştirme maliyetlerinin toplam işletme maliyetinin %8'i olduğunu hesaplamışlardır. RAMANI ve arkadaşları ise (1980), örtü kömür oranı = 8:1 ve her 1000 ton üretim için 0,2 ha'lık arazinin bozulduğu bir açık işletmede, iyileştirme maliyetinin 0,32 ABD\$/ton veya toplam maliyetin %7,6'sı olduğunu belirlemişlerdir. Diğer ülkelerdeki değerler, tablo 2.1'de özetlenmektedir [5,11,14,15].

Tablo 2.1. Açık işletme sonrası bozulan arazileri yeniden düzenleme maliyetleri

Ülke	Yeniden Düzenleme Maliyeti
ABD	<1-10 \$/ton 400-3300 \$/hektar
Kanada	2370 \$/hektar
İngiltere	7000 \$/hektar
Almanya	8530 €/hektar
Türkiye (TKİ-Genel)	58,5 Milyon TL/hektar

Ülkemizdeki maliyetlerin çok düşük olması, bu alanlarda sadece ağaçlandırma faaliyetlerinin yapılmasından kaynaklanmaktadır. TKİ – GELİ kömür açık işletmesinin turizm bölgelerine yakın olması ve gerek tarım, gerekse imar alanları olarak değerlendirilebilecek bu arazilerin rehabilitasyonu özel bir önem taşımaktadır. Açık işletme sonrası bozulan arazilerin yeniden düzenlenmesi ve farklı çevresel kullanım alternatifleri, Bölüm 7'de ayrıntılı olarak verilmektedir.

3. PASA ŞEV TASARIMI İÇİN GEREKLİ ZEMİN MEKANİĞİ VE JEOTEKNİK ANALİZLER

Kömür açık işletmelerinde; gerek planlı üretim sonrası, gerekse dış dekapaj dolayısıyla oluşan üretim boşlukları ve şev yüzeylerinde jeoteknik ve zemin mekaniği bakımından güvenli (stabil) ortam koşulları sağlanmadığı sürece, pasa malzemesinin gevşek yapısal ve oluşum özellikleri nedeni ile önemli bir kısmı kayma veya akma eğiliminde olmaktadır. Bunun meydana gelmesi için önemli bir koşul; boşluk suyu basıncının artması ile kayma gerilmesinin azalması ve denge durumunu bozacak yeterli büyüklükteki bir iç veya dış kuvvetin yüzeye etkimesidir. Çok kısa zaman dilimli (birkaç saniye veya dakika) içerisinde ani hızlara ulaşan ve büyük bir enerji boşalmasıyla sonuçlanan bu tür kaymalar, önemli tehlike potansiyelleri içermektedir. Araştırma sonuçlarına göre, ardışık kaymaların daha doğrusu seri kaymaların hacimsel büyüklüğü $10^3 \sim 10^6 \text{ m}^3$, ekstremum durumlarda 10^7 m^3 'e kadar ulaşabilmektedir. Diğer taraftan bu tür kaymaların özel bir tehlike potansiyeli içermesi, kayma öncesi belirtiler olarak yorumlanan;

- şev yüzeyindeki hareketlerin yavaş yavaş ilerleyerek artması,
- şev'in göbek oluşturmaları,
- şev gerisinde gerilme çatlaklarının oluşması gibi alışlagelmiş belirtiler göstermemesi ve
- ani meydana gelen bir kaymanın zaman diliminin tam olarak tahmin edilememesinden kaynaklanmaktadır [16].

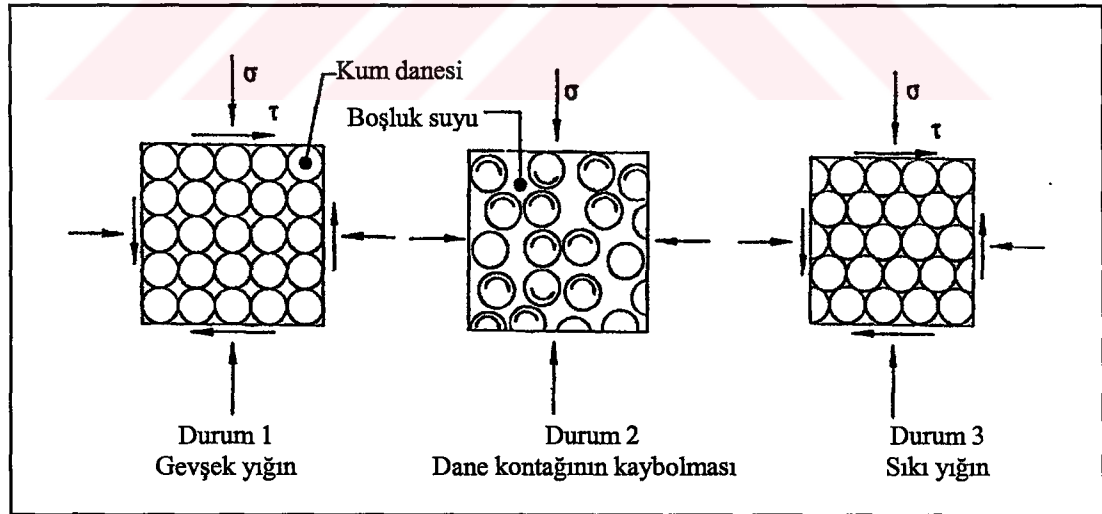
Bu ve benzeri şev kaymaları, TKİ – GELİ Muğla bölgesinde de geçmiş yıllarda meydana gelmiştir [8,9].

Bu amaçla, pasa şev yüzeylerinin stabilitesi ve rehabilitasyonu için gerekli tüm önlemlerin planlanması ve uygulanması, ancak bir dizi zemin mekaniği ve jeoteknik analizlerin yapılması ile mümkündür.

3.1. Pasa Şev Duraysızlıklarının Mekanizması

Suya doymun, düşük kohezyonlu, özellikle gevşek pasa şev yığınlarının heyelan türü kayması; ani bir stabilite kaybı daha doğrusu hızlı bir dayanım azalmasıyla karakterize edilen, bir zemin mekaniği kavramıdır. Prensip olarak tamamen kuru daneli yığınlar da kayabilir, fakat açık işletme pasa şev davranışlarının araştırılmasında bu tür durumların pratik önemi çok azdır. Doğal koşullarda suya doymun bir zeminin stabilite kaybı, hem periyodik hem de sürekli olarak ve sanki statik bir kuvvetin etkimesiyle meydana gelir. Bu süreç; boşluk suyu basıncının yükselmesi ve etkin gerilmelerin azalması ile oluşan, yapısal bir değişimin sonucu olarak ortaya çıkar. İyi yuvarlanmış, kaygan yüzeyli ve etkileşimli davranan özellikle çok gevşek yığınlar da kayma daha kolay meydana gelir. Kayma sonrası malzeme davranış özelliği olarak, artık (kalıcı) kesme dayanımı sıfıra kadar düşer. Bu tür malzemelerin davranış özellikleri şekil 3.1’de verilmektedir [17].

Şevlerin akma türü kayması ile ilgili düşünceler, ilk kez TERZAGHI tarafından açıklanmıştır. Bu alanda daha sonra CASAGRANDE çalışmıştır [18]. Hızla şekil değiştirerek tekrar stabil hale gelen bir kumun dinamik etkiyle akması, literatürde periyodik hareketlilik olarak tanımlanmaktadır. Kayma, zeminin sıkı bir yığın haline gelmesi ve tekrar stabilite kazanması ile sonuçlanır [19].



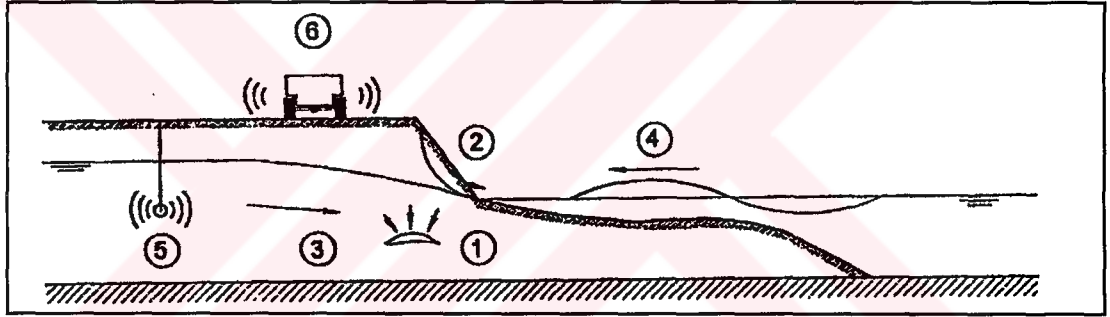
Şekil 3.1. Kumun akma davranışının şematik gösterimi [20].

3.2. Pasa Şev Duraysızlıklarının Oluşum Koşulları

Bir pasa şev duraysızlığının oluşabilmesi, aşağıda belirtilen koşulların açığa çıkması ile mümkündür:

- Dane boyut dağılım eğrisinde bir dane büyüklüğünün baskın olarak gözükmesi,
- Yığın danelerinin büyük bir kısmı iyi yuvarlanmış ve kaygan yüzey özellikleri göstermesi,
- Gevşek / çok gevşek yığın halinde bulunması,
- Boşluk ve gözeneklerin tamamen suyla dolu olması,
- Kritik denge durumundaki yığının bir iç veya dış etkisiyle bozulması,
- Dinamik kuvvetlerin etki büyüklükleri ve sıklığıdır.

Eğer pasa şev yüzeylerinin duraysızlığı için gerekli tüm koşullar oluşmuş ise, yığının denge koşullarını bozacak bir iç veya dış kuvvetin yüzeye etkisi ile kayma başlayabilir. Kaymayı kolaylaştıran muhtemel etki kuvvetleri, şekil 3.2’de verilmektedir.

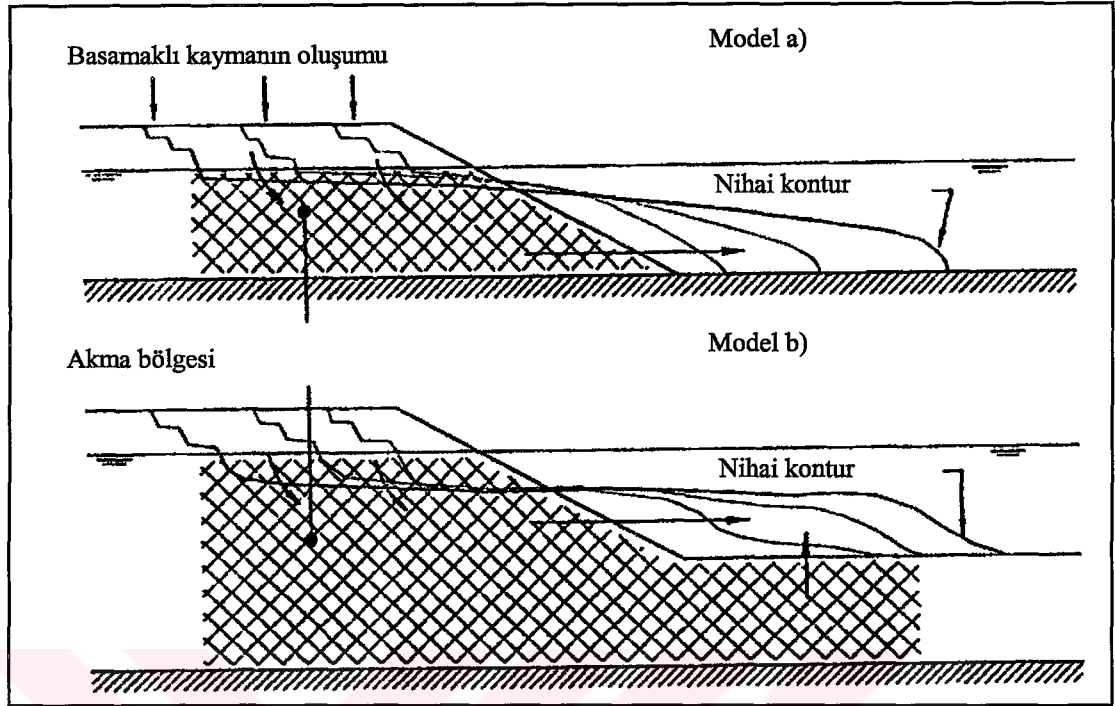


Şekil 3.2. Şev duraysızlığına neden olan etki kuvvetleri [20].

- ① Gözenek ve boşluk alanların oturması sonucu çökmesi,
- ② Lokal / dik şev kaymaları,
- ③ Yeraltı su tablasındaki akışlar,
- ④ Yüzey suları ve su dalgalarının etkisi,
- ⑤ Yeraltında yapılan dinamik uyarılar (örneğin patlama veya sarsıntılar),
- ⑥ Yüzeyde yapılan dinamik uyarılar (örneğin çalışan iş makineleri vs.),
- ⑦ Bölgenin depremsellik özelliği.

Burada, sadece dinamik uyarıcıların ⑤ ve ⑥ etkisi zamansal olarak kısıtlanabilir. Diğer etki faktörlerinin herhangi bir zamanda gerilme değişimine neden olup olmayacağı, bir kayma oluşturup oluşturmayacağı ve ne zaman meydana

geleceği henüz belirsizdir. Bir kayma sırasında şev geometrisindeki değişimin nasıl oluşabileceği şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Şev kayma sürecinin zamansal ve geometrik gelişimi [20].

Gözlemlere göre duraysızlık sonrası oluşan şev geometrisinde şekil 3.3'deki gibi bir benzerlik söz konusu ise, her iki hareket mekanizması şev'in su seviyesi üzerinde kalan kısmında benzer kontur oluşumuna yönelecektir [16,20].

3.3. Pasa Şev Kayma Riskinin Belirlenmesi için Gerekli Kriterler

Pasa yığınlarında oluşacak kayma riskinin göreceli bir tahmini için öncelikle;

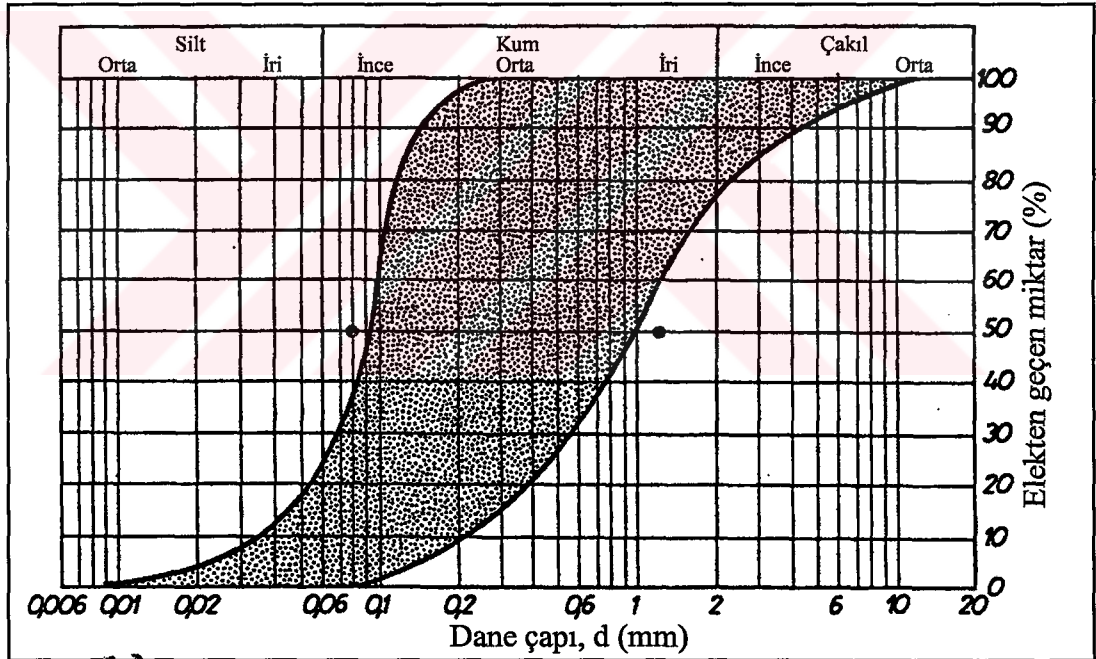
- yığının dane boyut dağılımı ve formu,
- erişilen su seviyesinin pasa yüksekliğine göre oransal değişimi,
- dinamik etki büyüklükleri (sismik aktivite),
- ilgili yığın yoğunluğu (kompaksiyon) ve de malzemenin dayanım özellikleri dikkate alınır.

Ayrıca; sınır koşulları ve ortam büyüklüklerine bağlı olarak (geometri, dekapaj sistemi, in-situ durum vb.), nitel ve ampirik bağıntılar ile de kayma riskinin bir tahmini mümkündür. Tamamlayıcı olarak, kritik denge koşullarında kaymaya yol açan etki kuvvetlerin oluşumu hakkında testlere de gereksinme olabilir [21,22].

Eğer karar verilecek şev için ilgili bulgular, söz konusu büyüklüklere ait daha önceden belirlenmiş kriterlerin geçerlilik sınırları içerisinde kalıyor ise, bir kaymanın meydana gelmesi kaçınılmaz olur [23,24]. Bu kriterler aşağıda ayrıntılı olarak verilmektedir.

3.3.1. Dane Boyut Dağılımı ve Formu

Kömür açık işletmelerinde meydana gelen pasa şev duraysızlıklarının kapsamlı araştırılması ile, kayma riskinin oluşabileceği bir dane boyut dağılım spektrumu tespit edilmiştir (şekil 3.4). Kaymış veya kolay kayabilir malzeme için; düşük oranda ince dane boyutu, büyük oranda ince ve orta kum boyutu ve de görülebilir eş şekillilik (üniformluk) tipik karakteristik özelliktir [25]. Burada, özellikle eş şekillilik olarak dane büyüklüğünün etkisi önemli rol oynar. $d_{50} = 0,1$ mm ve eş şekillilik oranının $U < 3$ olduğu benzer daneli ince kumlar için kayma eğilimi çok yüksektir.



Şekil 3.4. Pasa şevlerinde kayma eğilimli dane boyut dağılım spektrumu [25].

Eş şekillilik oranı;

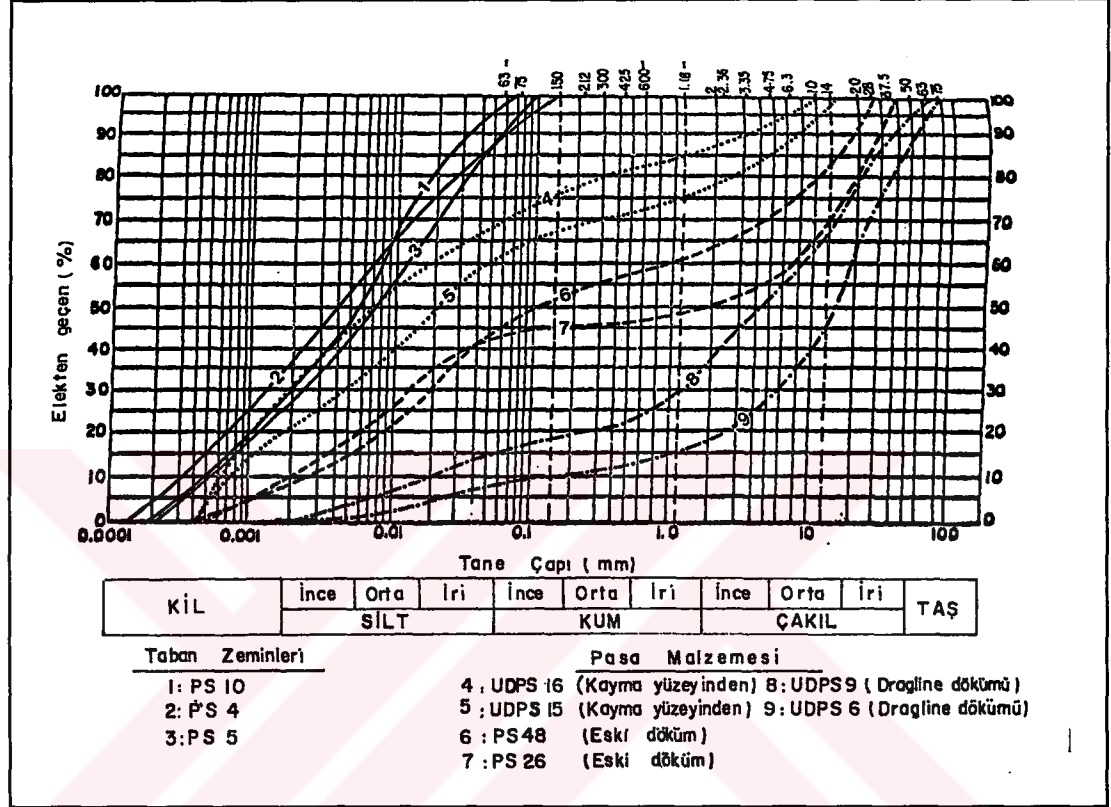
$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.1)$$

eşitliği ile bulunur ve U ne kadar küçük değer gösteriyor ise, daneler arasındaki eş şekillilik o kadar büyük demektir [26]. Burada;

d_{10} : %10 elekten geçen miktarın dane çapı (mm),

d_{60} : %60 elekten geçen miktarın dane çapıdır (mm).

TKİ – GELİ Muğla bölgesindeki pasa malzemeleri için dane boyut dağılım eğrisi şekil 3.5’de verilmiştir. Kayma bölgeleri için, her iki grafikte de bir uyumluluk görülmektedir.



Şekil 3.5. TKİ– GELİ Muğla bölgesindeki pasa malzemesi ve taban zeminleri için tipik dane boyut dağılım eğrileri [9].

Dane formu ise, ayrıık danelerin mikroskop veya bilgisayar destekli yöntemlerle incelenmesi ve bulunan yuvarlaklılık katsayısı “YK” ile belirlenir. Artan yuvarlaklılık katsayısı ile malzemenin akma türü kayma eğilimi artar [24]. Bu oran aşağıda verilen bağıntıyla belirlenebilir.

$$YK = \frac{\sum \Psi_i \cdot N_i}{\sum N_i} \quad (3.2)$$

N_i : Dane sayısı (adet)

Ψ_i : Dane şekil faktörü (-)

Yuvarlaklılık katsayısına göre dane form özellikleri;

0,65	YK	0,759	Köşeli dane,
0,76	YK	0,819	Kırık kenarlı dane,
0,82	YK	0,878	Yuvarlanmış dane,
0,88	YK	1,000	İyi yuvarlanmış danedir.

Daneler ne kadar yuvarlak ve pürüzsüz yüzeyli olursa, kayma eğilimi o kadar büyük ve hızlı olur [20,25].

3.3.2. Pasa Yığınlarında Su Seviyesi Oranları

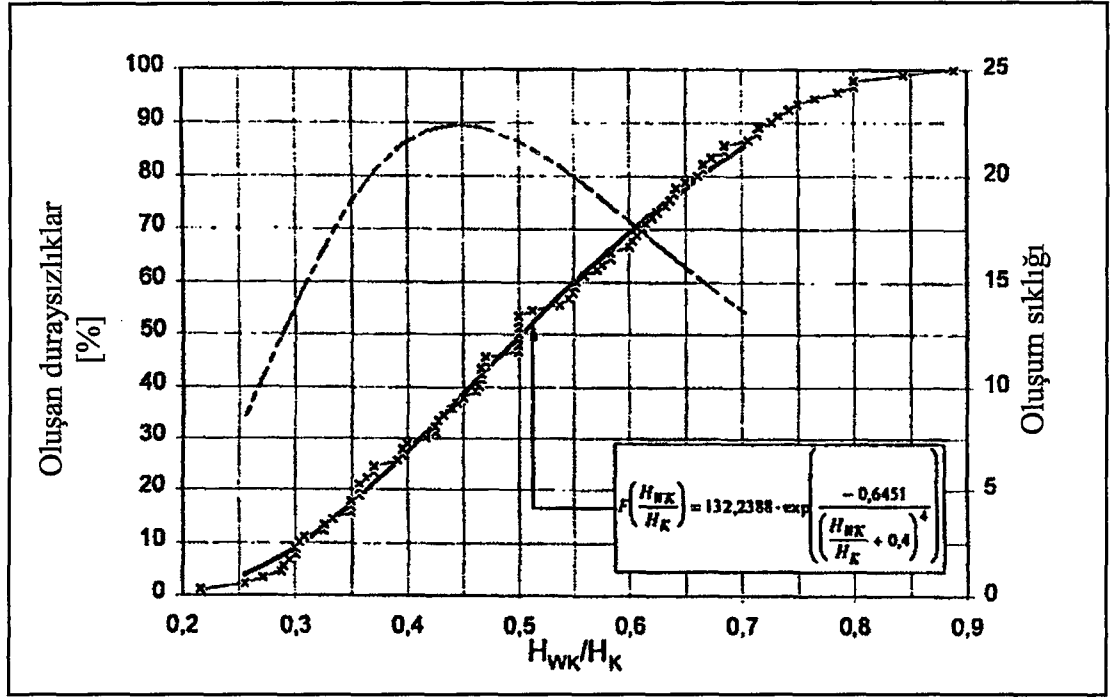
Pasa şev yığınları içerisindeki ve önündeki su durumu, kayma riskinin belirlenmesinde önemli bir kriterdir. Eğer şev önünde veya içerisinde su bulunmuyorsa, kayma riskinden uzak bir yargıya varılabilir. Ancak; su seviyesi hakkında yeterli bilgi sağlanamıyorsa, daima en olumsuz koşullar varsayılmalıdır. Bu yüzden, şev bölgesinde amaca uygun ilk ölçümler mutlaka yapılmalıdır [27].

Bölüm 3.3.1’de belirtilen dane spektrumuna uygun gevşek kayaç ve pasa şev yığınlarında; su seviyesi oranının $\frac{H_{WK}}{H_K} > 0,20$ olması halinde, bir kayma riski beklenmelidir. Burada;

H_{WK} : Şevdeki su seviyesi yüksekliği (m),

H_K : Şev yüksekliğidir (m).

Eğer şev önünde bir su göleti varsa, kayma riski H_{WK}/H_K 0,1 oranında beklenmelidir. Bununla ilgili olarak; oluşan 96 kayma olayının analiz sonuçları, su seviyesi oranının 0,20 H_{WK}/H_K 0,85 aralığında bulunması halinde, bir pasa şev kayma riskinin beklenebileceğini göstermektedir [21]. Oluşacak kaymanın temel değerlendirilmesi ise, şevde kritik su seviyesi oranının ampirik bir fonksiyon ile tespit edilmesi vasıtasıyla olur ve bu oranın aşılması durumunda ani bir kayma tehlikesi meydana gelebilir (şekil 3.6).



Şekil 3.6. Oluşan şev duraysızlıklarının su seviyesine bağlı olarak gelişim sıklığı [20].

Açık işletme pasa şevlerinde kayma şekilleri, aşağıdaki kriterlere göre sınıflandırılır. Beklenen bir kaymanın akma yönü;

ilerleme yönüne göre,

- paralel (p) veya
- dikey (s)

akma koşullarına göre,

- önlemsiz (u) : H_{WK}/H_K 0,20 veya
- önlemlili (b) : 0,20 H_{WK}/H_K 0,50 (0,80 termik santral külü katkılıdır).

Ayrıca; β şev açısına bağlı olarak yığındaki $(H_{WK}/H_K)^*$ kritik su seviyesi oranının belirlenmesi için, kayan şev parametreleri dikkate alınarak yapılan bir regresyon analizi, aşağıda verilen eşitliği doğrular.

$$\left(\frac{H_{WK}}{H_K}\right)^* = a \cdot (\tan \beta)^b \quad (3.3)$$

Buradaki a ve b parametreleri skaler bir büyüklük olup, değişim aralıkları tablo 3.1’de verilmektedir.

Tablo 3.1. $H_{WK}/H_K = f(\tan \beta)$ regresyon analizi sonuçları [20].

Kriter	a	b	r	n	Standart sapma σ_{n-1}	Araştırma sahası
p/b	0,3188	-0,3555	-0,557	23	0,16	12 m H_K 60 m 0,22 H_{WK}/H_K 0,8 5° $\beta \leq 33^\circ$
p/u	0,3005	-0,3207	-0,560	29	0,16	8 m H_K 65 m 0,29 H_{WK}/H_K 0,83 5,7° $\beta \leq 32^\circ$
s/b	0,473	-0,2431	-0,531	27	0,10	8,5 m H_K 56 m 0,35 H_{WK}/H_K 0,78 10° $\beta \leq 40^\circ$
s/u	0,3293	-0,3181	-0,617	17	0,12	6 m H_K 40 m 0,27 H_{WK}/H_K 0,88 9° $\beta \leq 33^\circ$
n: Hesaplanan değer çifti sayısı, r : Regresyon katsayısıdır.						

İlerleme yönüne göre akma yönünün paralel olması halinde, kritik su seviyesi oranı dikey duruma göre daha düşüktür. Ayrıca, önlemsiz akma koşulundaki kritik su seviyesi oranı da önlemlili koşula göre daha düşüktür. Burada çok kesin tespit edilememesi nedeni ile yığın yoğunluğu değişken olarak dikkate alınmamıştır. Ayrıca, yığınların döküm türüne göre (Draglayn, kamyon vb.) sınıflandırılması da stabilite kriterleri için çok iyi bir uyum sağlamamaktadır. Ancak, ilgili koşullarda gevşek yığınlardan hareket edilmelidir. Su seviyesine bağlı olarak kayma tehlikesi taşıyan şevlerin durumu, risk derecesine göre belirlenir (tablo 3.2).

Tablo 3.2 . Pasa şev kayma risk dereceleri [21,28].

Su seviyesi koşulu	Risk derecesi
$(H_{WK}/H_K) < 0,20$	3 – kayma olası değil
$0,20 < (H_{WK}/H_K) < (H_{WK}/H_K)^* \times (1-\delta)$	2 – kayma mümkün
$(H_{WK}/H_K)^* \times (1-\delta) \leq (H_{WK}/H_K)$	1 – ani kayma

δ değeri için; seçilen hesaplama değişkenlerine göre, standart sapma (σ_{n-1}) değeri kullanılabilir.

The figure shows a topographic map of a coastal area. The map includes contour lines, a cross-section line A-A', and a table of elevations. The map is oriented with North at the top. The cross-section A-A' is shown as a profile line across the map. The table below the map provides elevation data for the cross-section.

ÖLÇEK: 1/3500
MART 2001

A - A' KESİTİ

Y. ÖLÇEK: 3500
D. ÖLÇEK: 3500

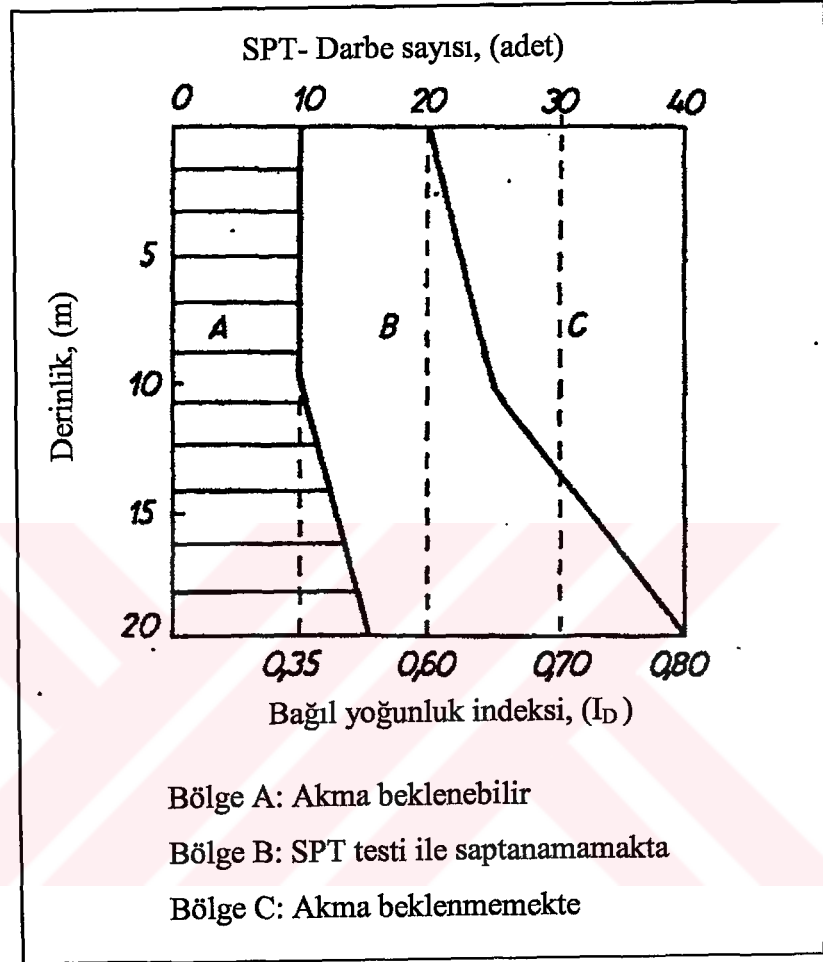
1.HAT / Mesafe	1.HAT / Kot	2.HAT / Mesafe	2.HAT / Kot
0.00	59.00	0.00	59.00
10.00	58.00	10.00	58.00
20.00	57.00	20.00	57.00
30.00	56.00	30.00	56.00
40.00	55.00	40.00	55.00
50.00	54.00	50.00	54.00
60.00	53.00	60.00	53.00
70.00	52.00	70.00	52.00
80.00	51.00	80.00	51.00
90.00	50.00	90.00	50.00
100.00	49.00	100.00	49.00
110.00	48.00	110.00	48.00
120.00	47.00	120.00	47.00
130.00	46.00	130.00	46.00
140.00	45.00	140.00	45.00
150.00	44.00	150.00	44.00
160.00	43.00	160.00	43.00
170.00	42.00	170.00	42.00
180.00	41.00	180.00	41.00
190.00	40.00	190.00	40.00
200.00	39.00	200.00	39.00
210.00	38.00	210.00	38.00
220.00	37.00	220.00	37.00
230.00	36.00	230.00	36.00
240.00	35.00	240.00	35.00
250.00	34.00	250.00	34.00
260.00	33.00	260.00	33.00
270.00	32.00	270.00	32.00
280.00	31.00	280.00	31.00
290.00	30.00	290.00	30.00
300.00	29.00	300.00	29.00
310.00	28.00	310.00	28.00
320.00	27.00	320.00	27.00
330.00	26.00	330.00	26.00
340.00	25.00	340.00	25.00
350.00	24.00	350.00	24.00
360.00	23.00	360.00	23.00
370.00	22.00	370.00	22.00
380.00	21.00	380.00	21.00
390.00	20.00	390.00	20.00
400.00	19.00	400.00	19.00
410.00	18.00	410.00	18.00
420.00	17.00	420.00	17.00
430.00	16.00	430.00	16.00
440.00	15.00	440.00	15.00
450.00	14.00	450.00	14.00
460.00	13.00	460.00	13.00
470.00	12.00	470.00	12.00
480.00	11.00	480.00	11.00
490.00	10.00	490.00	10.00
500.00	9.00	500.00	9.00
510.00	8.00	510.00	8.00
520.00	7.00	520.00	7.00
530.00	6.00	530.00	6.00
540.00	5.00	540.00	5.00
550.00	4.00	550.00	4.00
560.00	3.00	560.00	3.00
570.00	2.00	570.00	2.00
580.00	1.00	580.00	1.00
590.00	0.00	590.00	0.00
600.00	-1.00	600.00	-1.00
610.00	-2.00	610.00	-2.00
620.00	-3.00	620.00	-3.00
630.00	-4.00	630.00	-4.00
640.00	-5.00	640.00	-5.00
650.00	-6.00	650.00	-6.00
660.00	-7.00	660.00	-7.00
670.00	-8.00	670.00	-8.00
680.00	-9.00	680.00	-9.00
690.00	-10.00	690.00	-10.00
700.00	-11.00	700.00	-11.00
710.00	-12.00	710.00	-12.00
720.00	-13.00	720.00	-13.00

3.3.3. Yığın Yoğunluğu ve Malzemenin Dayanım Özellikleri

20

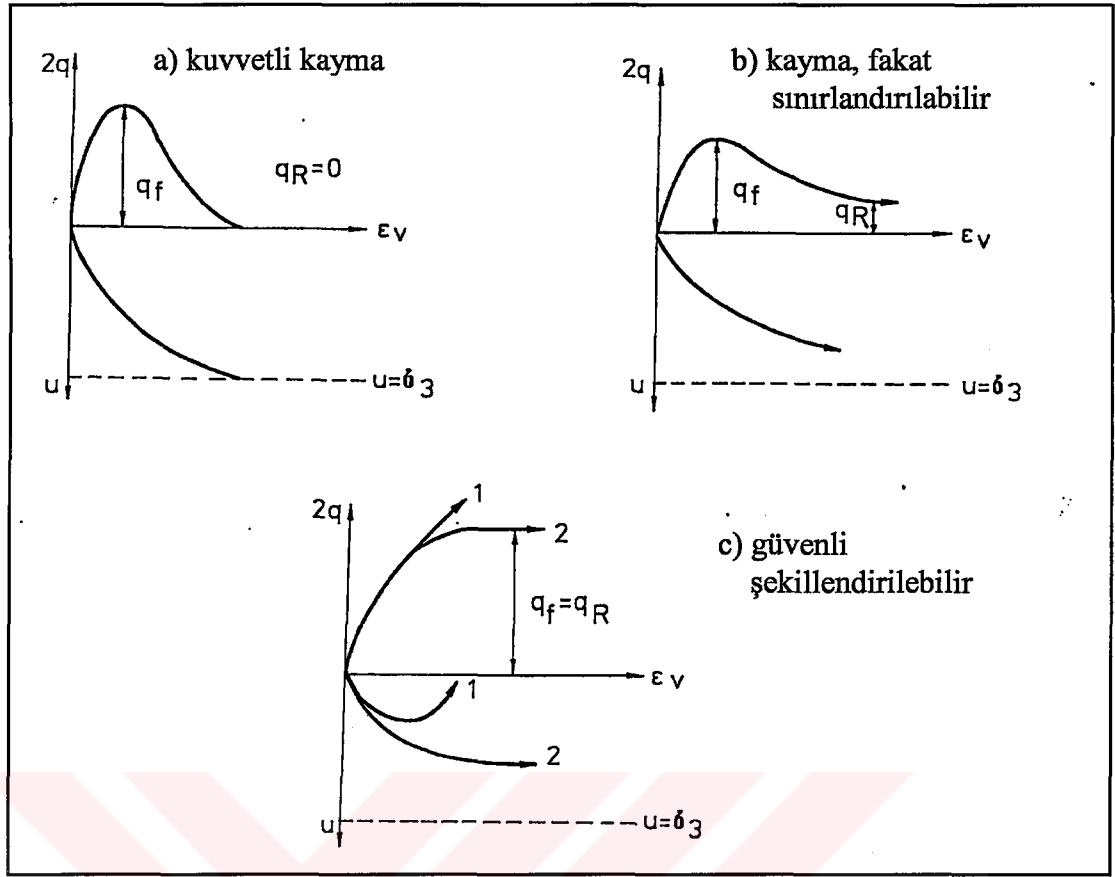
$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad \text{veya} \quad I_p = \frac{e_c - e}{e_c - e_d} \quad (3.4)$$

eşitlikleri ile bulunur. Burada; $e_{\max}$ ve $e_{\min}$ veya e_c , e_d , maksimum ve minimum porozite (boşluk) oranlarıdır (şekil 3.8) [21,25].



Şekil 3.8. SPT- Bağıl yoğunluk indeksi ve kayma eğilimi arasındaki ilişki [25].

Doğal koşullar altında suya doygun bir malzemenin dayanım testi, üç eksenli basınç setinde yapılır. Deney sonucu, deviatör (ortanca) gerilme ($2q$) ile düşey deformasyon (ϵ_v) arasında bir ilişki elde edilir. Kritik içsel sürtünme açısı ve beklenen boşluk suyu basınç büyüklüğüne ve de artık (rezidüel) kırılma bölgesindeki dayanım değerine göre, pasa şevleri için kayma riskinin nitel bir değerlendirilmesi mümkündür. Eğer artık dayanım değeri sıfıra kadar düşüyorsa, özellikle büyük ölçekli ani bir kayma beklenmelidir. Bu durumda, şevin yatay şekillendirilmesi ile bir güvenilirlik (stabilite) sağlanamaz. Eğer artık kırılma bölgesindeki dayanımın düşmediği tespit edilirse ve şev stabilitesi için kesme dayanımı yeterli büyüklükte ise, yaklaşık olarak bir kayma riski önlenebilir (şekil 3.9) [23, 24].



Şekil 3.9. Pasa malzemesinde deviatör gerilme-deformasyon arasındaki ilişki [21].

Deviatör gerilme ($2q$) ve boşluk suyu basıncının (u); kırılma noktasından sonra düşey deformasyona (ϵ_v) bağlı olarak değerlendirilmesi, kayma riskinin derecesini belirlemeye yarar.

$$2q = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_1 - \sigma'_3 \Rightarrow q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad (3.5)$$

1. *Durum* : Deviatör gerilme ($2q = 0$) sifira kadar hızla düşer, boşluk suyu basıncı artarak $u = \sigma_3$ 'e erişir.

$\Rightarrow$ Kuvvetli kayma eğilimi

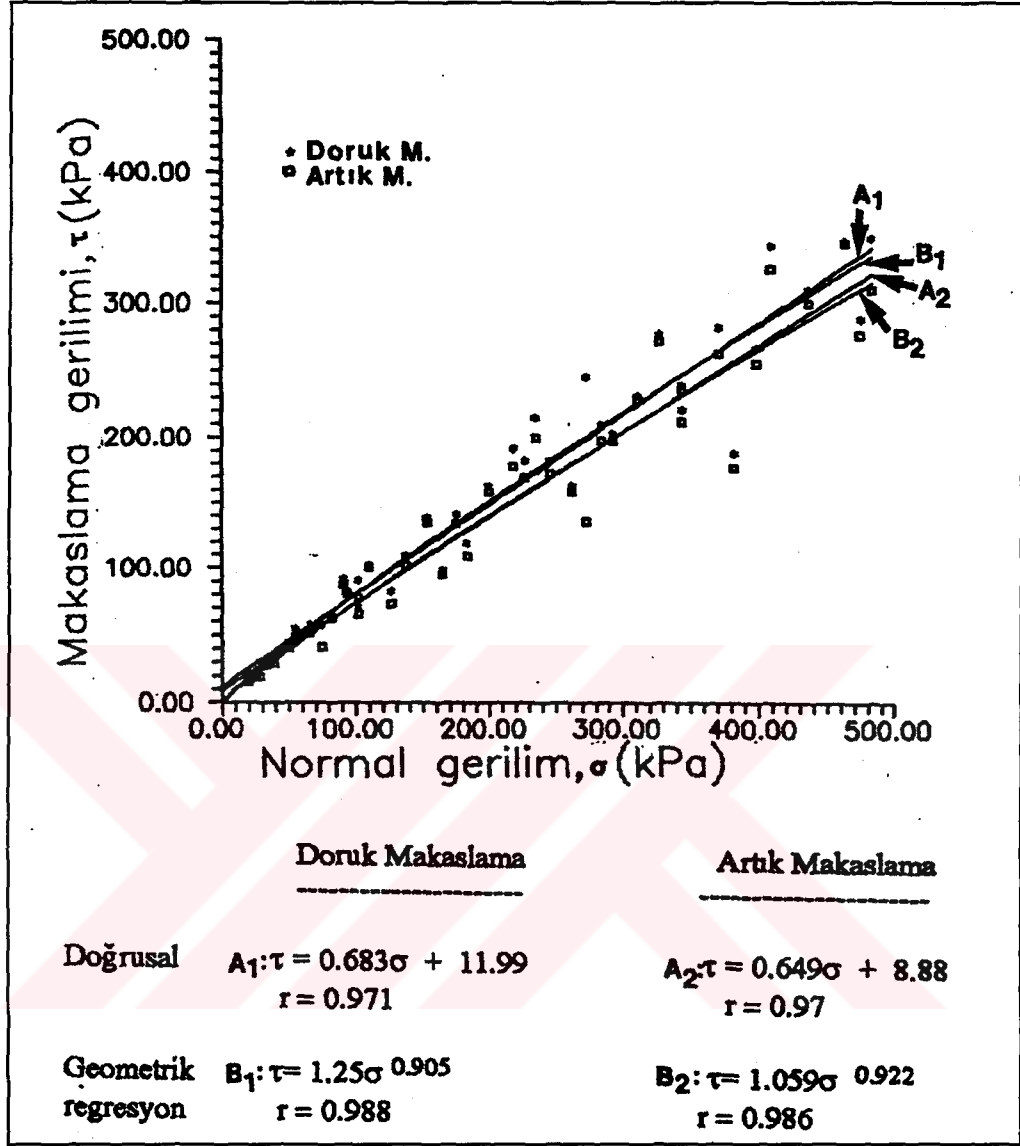
2. *Durum* : Deviatör gerilme düşer, fakat $2q > 0$ dır. Boşluk suyu basıncı artar, fakat $u < \sigma_3$ 'tür.

$\Rightarrow$ Göreceli kayma eğilimi

3. *Durum* : Deviatör gerilme aynı kalır veya artar. Boşluk suyu basıncı aynı kalır veya düşer.

$\Rightarrow$ Kayma eğilimi yoktur [21].

TKİ- GELİ Muğla bölgesindeki pasa malzemelerine ait normal gerilme-kesme (makaslama) gerilmesi ilişkisi ise, şekil 3.10'da verilmektedir.



Şekil 3.10. Zemin makaslama kutusunda test edilen pasa malzemesi örneklerinin normal gerilme-makaslama gerilmesi grafiğindeki dağılımı ile doruk ve artık makaslama dayanımı için genelleştirilmiş yenilme zarfları [9].

3.3.4. Şev Geometrisi ve Dekapaj Sistemi

Bir pasa şev kayma riskinin belirlenmesi için; öncelikle su durumu, yığın yoğunluğu ve bileşimi ağırlık kazansa dahi şev geometrisi de dikkate alınmalıdır. Çünkü şev eğimi (veya şev sisteminin genel eğimi), statik durumdaki gevşek pasa yığın dayanımının belirlenmesinde önemli bir ölçüttür. Eğer diğer tüm koşullar sağlanmış olsa bile, statik olarak bir şev ne kadar düşük dayanıma sahip ise, o kadar çabuk kayma eğiliminde olur. Bu nedenle dik şevler, yatay şevlerden daha tehlikelidir. Bundan dolayı şev geometrisi mutlaka belirlenmelidir. Şayet su altındaki

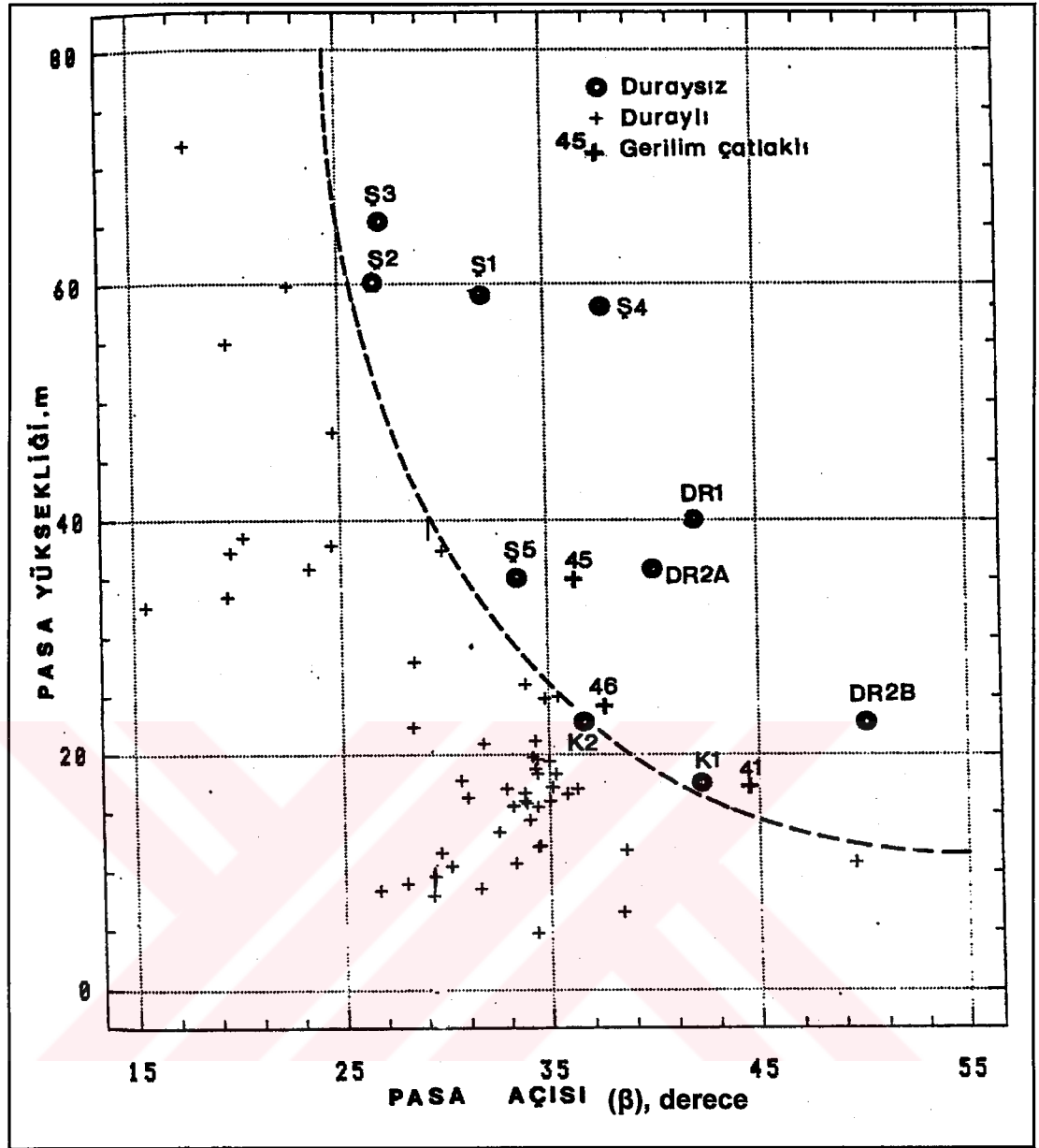
şev geometri için hiçbir açıklama mevcut değil ise, orada eğim oranı 2/3 olan döküm açısı kabul edilebilir. Ayrıca belirli bir şev bölgesinde daha önce kaymalar oluşmuşsa, bu durum yeniden kaymalar olacaktı gibi değerlendirilmelidir. Böylece en azından, kısmen stabilite sınır değerine ulaşılabilir [27]. Pasa döküm şevlerindeki statik bir dengenin korunmasında, içsel sürtünme kuvveti ne kadar çok hareket etme eğilimli ise, kayma riski o kadar büyük ve hızlı olur.

Yatay konumlu ve şev gerilmeleri için geleneksel kabuller doğrultusunda (örneğin aktif statik basınç); β şev eğiminin artmasıyla, kayma riski artar. Yeni dökülmüş, kritik içsel sürtünme açısı (ϕ_c) altında bulunan bir şev, güvenilirlik sınır koşulundadır ve stabilite minimumdur.

Bugünkü bilgilere göre β şev eğimi için “kesin-güvenilir” bir alt sınır belirtilememektedir. Stabilite analizleri de gösteriyor ki, geniş ölçüde β ’dan bağımsız olarak kritik gerilme durumları statik olarak mümkün, fakat en azından lokal duraysızlıklara yönelebilmektedirler. Uygun olmayan koşulların bulunması halinde, çok yatay şevler de kayabilir. TKİ– GELİ Muğla bölgesindeki pasa yığınlarına ait kritik yükseklik-şev açısı ilişkisi, şekil 3.11’de verilmektedir [9].

Ayrıca şev yüksekliği ile; şev hacmi ve buna bağlı olarak kaymayı kolaylaştırıcı etki yapabilen granülometri, yoğunluk, gerilmeler ve drenaj koşullarıyla ilgili heterojenliğin meydana gelme olasılığı da artar. Şev dekapajı sonrasında kısmen ayrılmış, gevşek ve orta sıklıkta birikmiş bir zemin oluşur. Oluşacak gerilme durumunun kuvvetli anizotrop olması kaçınılmazdır [21].

Pasa şev kayma eğilimi üzerine etki eden kriterlerden; yığın yoğunluğu, dane boyut dağılımı ve formu, su durumu ve de şev geometrisi etkileri birbirine bağlıdır ve bir bütün olarak değerlendirilmelidir. Ayrıca; işletme bölgesinin sismik aktivitesi (deprensellik özelliği), zaman etkisi, yeraltı suyu ve kimyasal bileşimi de dikkate alınmalıdır.



Şekil 3.11. TKİ- GELİ pasa yığınlarında kritik yükseklik-şev açısı ilişkisi [9].

3.3.5. Dinamik Etki Büyüklükleri (Sismik Aktivite)

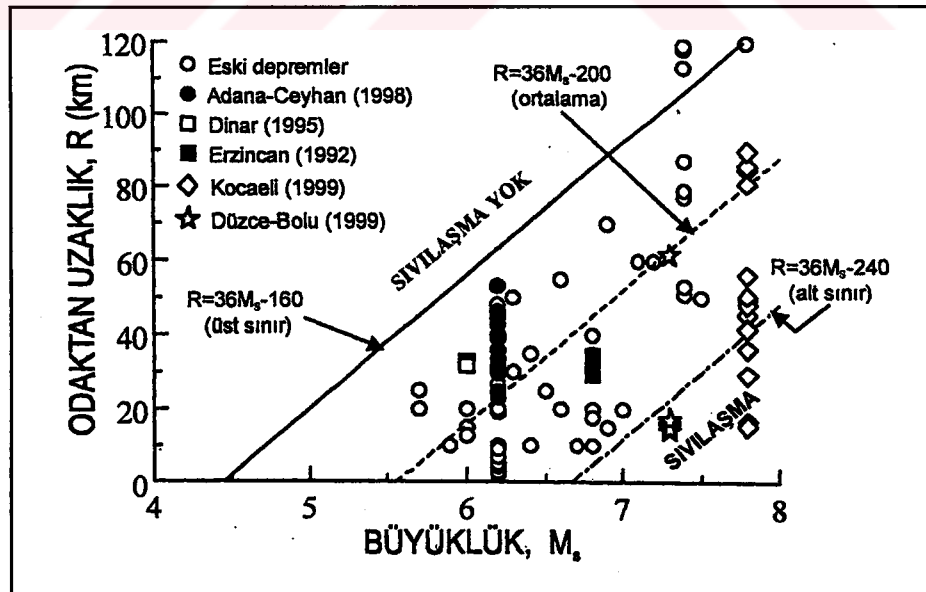
Aktif deprem bölgelerindeki açık işletme pasa şev stabilitesi analizlerinde etkin gerilmeleri hesaplarırken, sismik aktivitelerin de ayrıca göz önünde tutulması gerekir. Çünkü bu kuvvetler, emniyet katsayısının belirlenmesinde kullanılan kaymayı kolaylaştıran kuvvetlerin artmasına neden olur. Sismik kuvvet, kayan dilimin merkezine yatay etkir ve değeri ($C_s \cdot W_i$) ile ölçülür. Burada; C_s : Sismik katsayı, W_i : Dilim ağırlığıdır. Farklı deprem şiddetleri için sismik katsayılar tablo 3.3'te verilmektedir.

Tablo 3.3. Farklı deprem şiddetleri için sismik katsayılar (C_s) [29].

Değiştirilmiş Mercali ölçeği şiddeti	Ortalama sismik katsayı (C_s)	Hasar
-	0	Yok
V ve VI	0,03 – 0,07	Çok az
VII	0,13	Orta
VII ve daha yüksek	0,27	Çok şiddetli

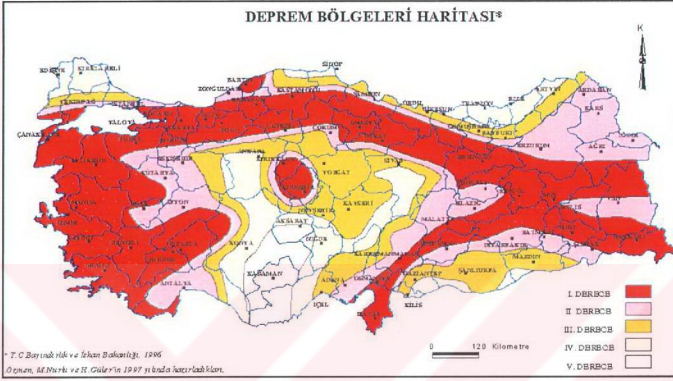
Sismik kuvvetler; emniyet katsayısı hesabındaki kaydırıcı kuvvetlere eklenmeden önce (a_i/R) faktörü kadar küçültülür. Burada (a_i) i'ninci dilimin ağırlık merkezinin kayma dairesinin merkezine olan düşey uzaklığı ve (R) de kayma dairesinin yarıçapıdır [29].

Sıvılaşmanın meydana gelmesinde rol oynayan tekrarlı gerilmelerin bir sismik aktivite (deprem) aracılığıyla üretilmesi gerekir. Dolayısıyla deprem büyüklüğü ve odaktan uzaklık gibi parametreler, sıvılaşma (akma) olgusu açısından önem taşımaktadır. Bu konuda fikir edinilebilmesi amacıyla, Türkiye’de meydana gelen depremlerde gözlenmiş sıvılaşmaları esas alan “sıvılaşma-deprem büyüklüğü-odaktan uzaklık” ilişkisi şekil 3.12’de verilmektedir [30].



Şekil 3.12. Deprem büyüklükleri ve Türkiye’de sıvılaşmanın gözlemlendiği lokasyonların odak noktasına olan uzaklıkları arasındaki ilişki [30].

TKİ- GELİ Muğla bölgesi de depremsellik bakımından birinci derece çok riskli bölgede bulunması nedeniyle, pasa şev stabilitesi hesaplanmasında sismik aktivite belirleyici rol oynar (şekil 3.13) [31]. Sismik aktivitenin etki büyüklükleri, pasa şev stabilitesine etkisi ve kayma riskinin sayısal analizi, ayrıca Bölüm 4.4'te ayrıntılı olarak verilmektedir.

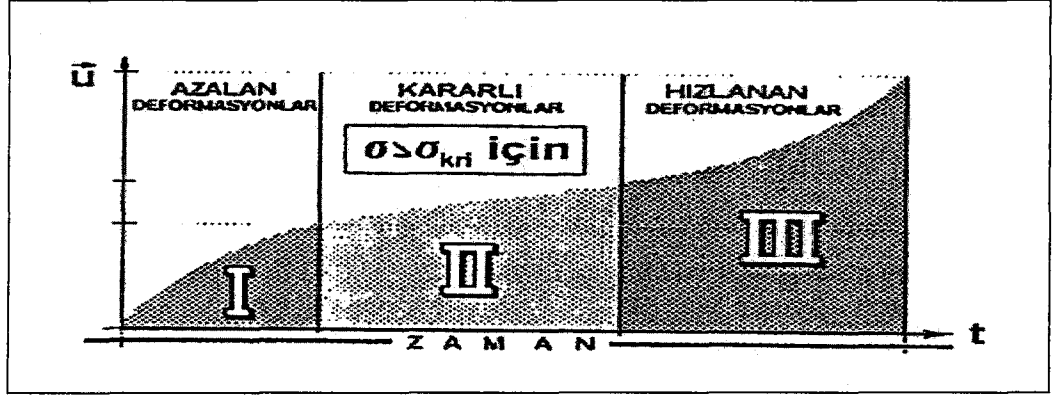


Şekil 3.13. Türkiye deprem bölgeleri haritası ve risk büyüklükleri [31].

3.3.6. Zaman Etkisi

Açık işletmelerde oluşturulan bazı şevlerin kısa süreli, bazılarının da uzun süreli (özellikle nihai şevler) stabil kalması istenir. Araştırmalar bazı şevlerin belirli bir süre stabil kaldıktan sonra, kaymaya başladıklarını göstermektedir. Bu yüzden zaman faktörü oldukça önemlidir. Çünkü, bir şev stabil kaldığı sürece tüm dış etkilere ve dolayısıyla erozyonlara açıktır. Başka bir deyişle; ister zemin, ister kaya niteliğinde olsun ortam kendine etkileyen gerilmelerin büyüklüğüne göre, zamana bağlı gerilme-deformasyon davranışı gösterir. Kayaç ve zeminlerin dokusunu bir arada tutan kuvvetlerin zaman içinde yenilmesine neden olan, her malzeme için belirli bir kritik gerilme düzeyi vardır. Ortama etkileyen gerilmeler bunun altında kalırsa ($\sigma_i < \sigma_{kri}$), deformasyonlar oluşsa dahi bunlar zamanla sorun yaratmaksızın sönümlenir. Buna genelde *pekleşme* adı verilir. Gerilmelerin kritik düzeyde kalması halinde ($\sigma_i = \sigma_{kri}$), ortam önce azalan deformasyonlar gösterse bile, bir süre sonra sabit hızla şekil değiştirmeye başlar ve bu akma kararlı bir şekilde devam eder. Ancak; etkileyen gerilmeler bu kritik gerilmeden büyük ($\sigma_i > \sigma_{kri}$) ise, genelde önce azalan, sonra sabit hızla devam eden ve nihayet giderek hızlanan deformasyonlar

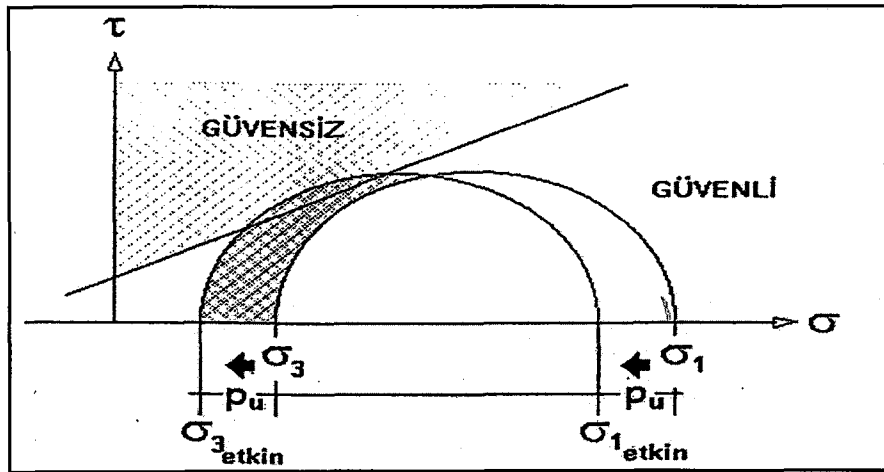
oluşur. Hızlanan deformasyonlar sonunda da ortam dayanımını tümüyle kaybeder ve kaymalar başlar (şekil 3.14). Dolayısıyla; deformasyonların zaman içinde izlenmesi ve değerlendirilmesi ile şev kayma riskinin bulunup bulunmadığı veya varsa, bu riskin sürüp sürmediği, ya da kaymanın hangi aşamada bulunduğu hakkında doğru değerlendirmeler yapılabilir [32,33].



Şekil 3.14. Şevlerin zamana bağlı 3 aşamalı akma davranışı (HÖFER) [33].

3.3.7. Yeraltı Suyu ve Kimyasal Bileşiminin Etkisi

Daneler arasındaki boşluklara giren su, danelerin yüzeylerine su derinliğinin fonksiyonu olarak şiddeti her yönde aynı olan bir hidrostatik basınç (p_u) uygular. Bu şekilde kendi ağırlığı ve dış yüklere bağlı olarak zemin içerisinde oluşmuş bulunan gerilme durumu ($\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$), suyun etkisiyle olumsuz yönde değişir. Gerilme çemberinin çapı ($\Delta\sigma$) değişmeksizin, merkezi (p_u) kadar τ -eksenine doğru kayar. Bu durumda çember Mohr zarfına (yenilme koşuluna) yaklaşır ve sonuçta ortam güvensizleşir. Zarfa değmesi halinde ise zemin kesilerek kayar (şekil 3.15).



Şekil 3.15. Boşluk suyu basıncının gerilme durumuna etkisi [33].

Ayrıca; suların ve su içinde çözünmüş asit oluşturun (CO₂ , SO₂ vb.) gazların etkisi ile kalker, tuz ve jipsin erimesi ve mağmatik minerallerin ayrışması, zemin dokusunun ve dayanım parametrelerinin olumsuz yönde değışmesine neden olur. Erimiş halde kalker, tuz ve jips içeren sular, killi şistler ve kiltaşları içerisine girdikleri takdirde, bu maddeler yüzeye yakın fissür ve çatlaklarda yeniden kristallenir. Bu sırada hacim artar ve geçirimsiz olan kayaç ve zeminler gevşeyerek geçirgen hale gelir. Oluşan yeni boşluk ve çatlaklara dolan su, killi-siltli ortamın dokusunu dağıtarak zeminin dayanımını düşürür ve böylece duraysızlığın gerçek nedeni olur [33-35].

3.4. Şev Duraysızlık Faktörleri ve Kalitatif Değerlendirme

Pasa şev stabilite analizlerinde, kantitatif büyüklükler fazla bilinmiyor ve incelenecek bölgede aşğıdaki koşullar mevcut ise, çok dikkat edilmelidir. Söz konusu faktörler; şev kayma riskinin belirlenmesinde olduğu kadar, bozulan arazilerin rehabilitasyon çalışmaları sırasında da dikkate alınmalıdır. Bunlar;

- Jeolojik ve Teknolojik Faktörler:

- iyi yuvarlaklık, düşük oranda ince dane içeriği ve iyi sınıflanmış (üniform) dane boyutlu malzeme,
- gevşek yığın,
- yüksek ve dik şevler,
- taban eğiminin üretim boşluğuna doğru olması,
- pasa yığın üst yüzeyinde gölet nitelikli çukurluklar,
- kayma riski bulunan malzemenin geniş lokal konsantrasyonu,
- suya doygun yeraltı boşlukları (kalsitik boşluklar, üretim galerileri vb.),
- ilerleme yönü ile şev doğrultusu arasındaki α açısı ($\alpha = 90^\circ$ ise büyük etki uzunluğu),
- sıkıştırılmış yansıtıcı tabakaların bulunması,

- Hidrolojik ve Jeomekanik Faktörler:

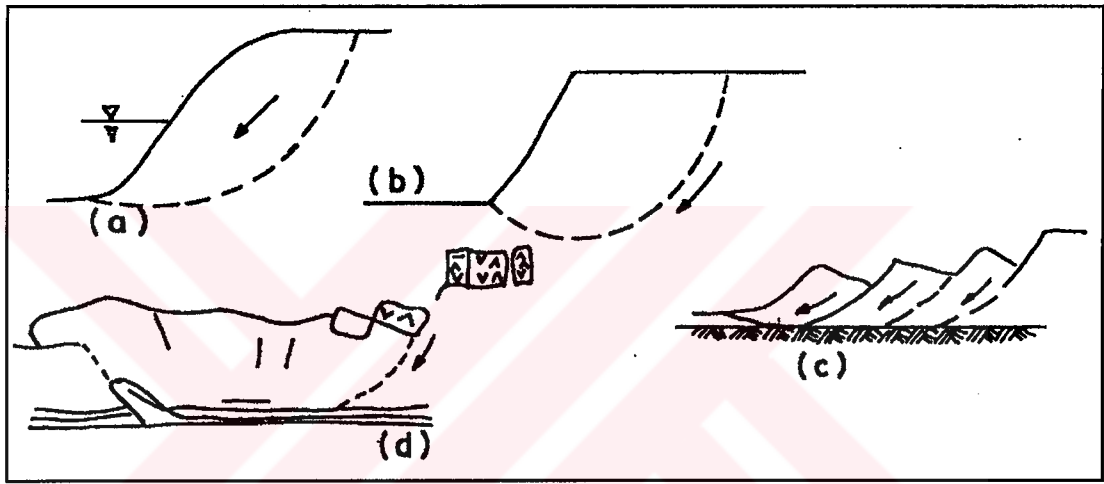
- yüksek yeraltı su seviyesi ve iyi doygunluk,
- yeraltı su akış yönünün kazı boşluğuna doğru olması,
- pasadaki heterojenlik dolayısıyla tercihli akış çizgilerinin oluşması,
- konsolidasyon çalışmaları nedeni ile yapısal bozulmalardır.

Bölüm 3.2 ve 3.3'te belirtilen kriterler, şev stabilitesi için ilk tahminlere hizmet eder ve yapılması gerekli kantitatif değerlendirmelerin temelini oluşturur. Ancak; bir şevin kayma riski, sadece bu esaslara göre tamamlanmış kabul edilemez. Bu nedenle; malzemenin kayma riski taşıyıp taşımadığı, drenajsız koşullarda kritik bir sınır durumu (gerilmeler ve porozite oranı) civarında bulunup bulunmadığı kararına varabilmek için, arazi ve laboratuvar testleri ile belirlenmiş malzeme parametrelerinin stabilite analiz yöntemlerinde sayısal esaslara göre hesaplanması gerekmektedir [21,36]. Bu maksatla; pasa şev stabilite analiz yöntemleri, Bölüm 4'te ayrıntılı olarak verilmektedir.

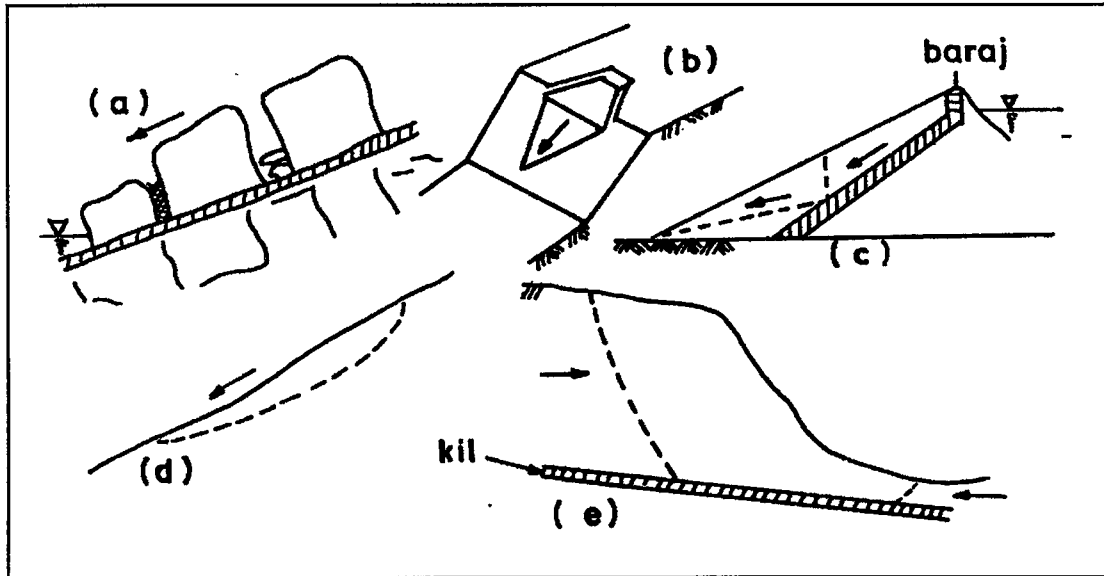


4. PASA ŞEV KAYMA RİSKİNİN SAYISAL ANALİZİ

Statik koşuldaki bir pasa şev kayma riskinin klasik yöntemler ile analizinden; blok, dilim ve kama yöntemlerinin kullanılması anlaşılır. Burada kopan blok, kaymayı kolaylaştıran ve kaymaya karşı koyan kuvvet veya momentler arasında denge koşullarının sağlandığı ideal cisim olarak tasarlanır. Kayma yüzeyleri; dairesel, düzlemsel veya poligonal olarak oluşabilir (şekil 4.1.A,B) [37].



Şekil 4.1.A. Dönel Kayma a-Genel şekilli kayma b-Dairesel kayma c-Ardışık kayma d-Karışık kayma



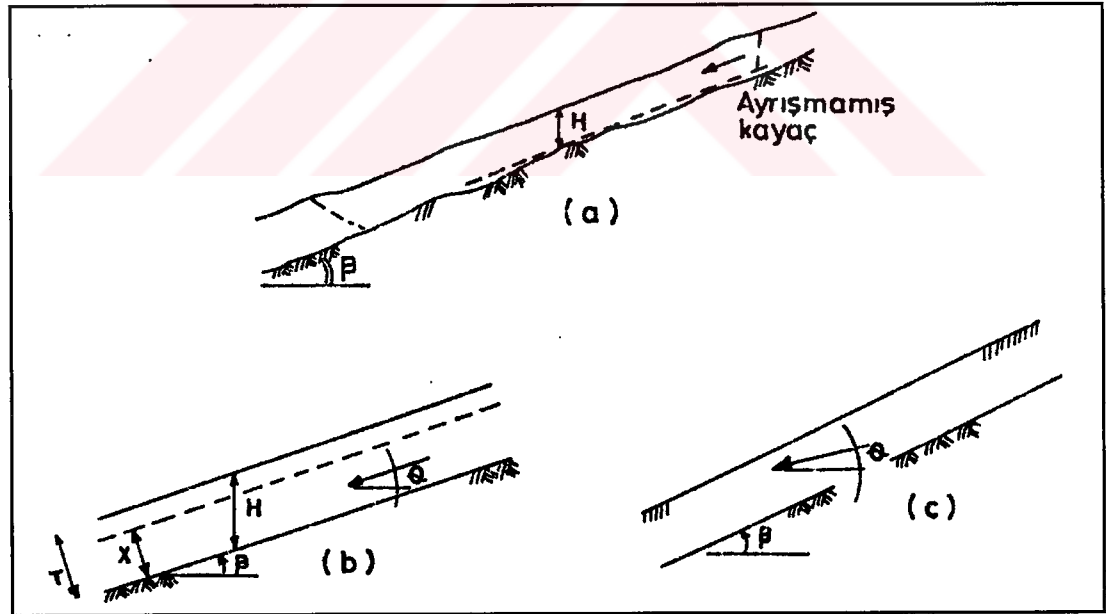
Şekil 4.1.B. Düzlemsel kayma a-Blok kayması b-Kama kayması c-Heterojen yamaçta kayma d-Yüzeysel kayma e-Aktif blok kayması [37].

Esas itibariyle analizlerdeki belirsizlikler, karşılaşılan malzeme davranışının karakterize edilmesinde oluşmaktadır. Klasik yöntemler; kaymanın şev topuğundan başlayarak geriye doğru gelişen değil de, hareketin kaynağı şev gerisinde bulunuyor ise gerçek değerleri yansıtabilirler. Bunun böyle gelişip gelişmeyeceği, benzer yığın ve ayrıntılı veriler üzerinde değerlendirilerek veya ikinci enerji kanunu (2. enerji yasası) vasıtasıyla öğrenilebilir. Ancak; klasik yöntemler ile sınır denge durumunun tespiti özellikle gereklidir, fakat denge koşulunun stabilitesi için yeterli değildir. Bu nedenle, klasik yöntemler ile birlikte diğer analiz yöntemlerini de dikkate almak gerekmektedir (sonlu elemanlar yöntemi-FEM, hypoplastik madde yasası, ayrık elemanlar yöntemi, sonlu farklar yöntemi, stereografik izdüşüm, nümerik, analitik ve uygulamalı grafiksel yöntemler gibi) [21,32-41]. Şev stabilite analiz yöntemlerinin özellikleri ve temel hesaplama kriterleri, aşağıda ayrıntılı olarak verilmektedir.

4.1. Klasik Yöntemler ile Şev Stabilite Analizleri

4.1.1. Sonsuz Yamaçta Duraylılık

Kayan kütlenin derinliği diğer iki boyutuna oranla çok küçük ise, çözüm sonsuz yamaç kabulü ile yapılır (şekil 4.2).



Şekil 4.2. Sonsuz yamaçta özellikler a-Yamaç kesiti b-Sızıntı yamaca paralel c-Sızıntı yamaç dışında (kaynak) [37].

-Kohezyonsuz zeminde

Yamaç üniform boşluk suyu basıncı alacağından, güvenlik katsayısı;

$$F = \frac{\gamma'}{\gamma' + \gamma_w} + \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad (4.1)$$

formülü ile hesaplanır.

γ' : Zeminin tabii birim hacim ağırlığı (kN/m³)

γ_w : Suyun birim hacim ağırlığı (kN/m³)

-Kohezyonlu zeminde

Sızıntı kuvvetleri zemin durumu ve geçirgenlik katsayısına bağlı olarak, yamaç eğimine paralel veya farklı eğimde oluşur.

-Akıntının yamaç yüzeyine paralel olması durumu (şekil 4.2.b)

Bu durumda boşluk suyu basıncı;

$$u_w = \frac{x}{T} \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma} \cdot \cos^2 \beta \quad (4.2)$$

olarak tanımlanır.

-Akıntının farklı eğimde olması durumu (şekil 4.2.c)

Yeraltı suyu yamaç yüzeyinde belirecek biçimde ise (kaynak), boşluk suyu basıncı;

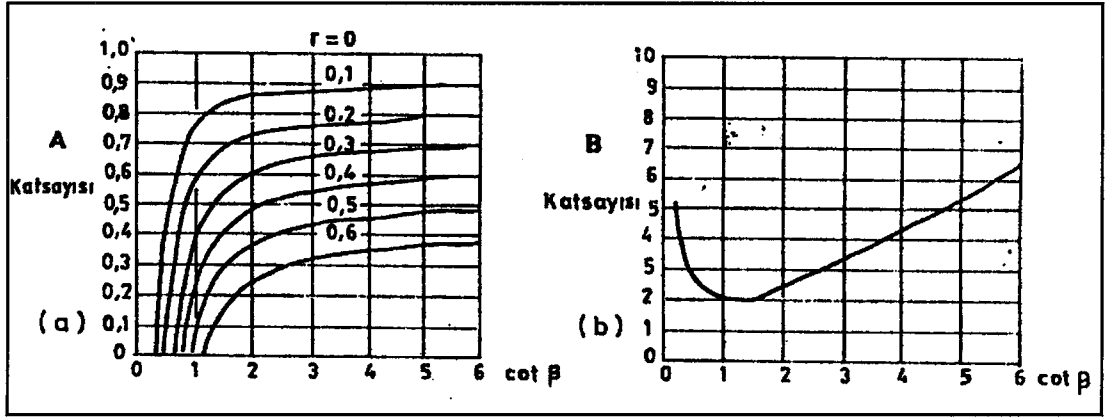
$$u_w = \frac{\gamma_w}{\gamma} \cdot \frac{1}{1 + \tan \beta \tan \phi} \quad (4.3)$$

formülü ile hesaplanır.

Yamaçta efektif gerilme analizi yapılacaksa, şekil 4.3'deki abakların kullanılmasıyla güvenlik katsayısı;

$$F = A \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \beta} + B \cdot \frac{c}{\gamma H} \quad (4.4)$$

olarak hesaplanır.



Şekil 4.3. Sonsuz yamaçta duraylılık hesabı için abaklar, a-A katsayısı abağı b- B katsayısı abağı [37].

Toplam gerilme analizinde boşluk suyu basınçları dikkate alınmadığında, formüle sadece B katsayısı girer ve böylece güvenlik katsayısı;

$$F = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} + B \cdot \frac{c}{\gamma H} \quad (4.5)$$

formülü ile hesaplanır.

4.1.2. Duraylılığın Dilim Yöntemleri ile Hesaplanması

Kayma yüzeyi biçiminin düzlemden bir eğriye yönelmesi durumunda analiz, denge kaybının dairesel bir kesitte olduğu kabulü ile yapılır.

4.1.2.1. Adi Dilim Yöntemi (İsveç Dilim Yöntemi)

Bu yöntemde; yanal kuvvetler bileşkesinin her dilimin tabanına paralel etkidiği kabulü yapıldığından, tabana dikey kuvvetler etkimemekte, böylece güvenlik katsayısı en düşük düzeyde çıkmaktadır. Bu özelliği nedeniyle, diğer yöntemlerin kontrolünde kullanılabilir. Güvenlik katsayısı;

$$F = \frac{\sum (W \cos \alpha - u_w \cdot l) \tan \phi + \sum c_l}{\sum W \sin \alpha} \quad (4.6)$$

formülü ile hesaplanır.

Bu yöntem, kayma direnci açısının değişiklik gösterdiği ortamlarda daha gerçekçi çözüme olanak sağlar. Artan boşluk suyu basınçları hesaplarda hata oranını yükselttiğinden, kuru yamaçlarda uygulanması tercih edilmelidir [33,37].

4.1.2.2. Sadeleştirilmiş Bishop Yöntemi

Bu yöntemde; dilimlere etkiyen yanıl kuvvetlerin yatay olduğu, normal kuvvet ve ağırlığın dilim tabanının ortasına etkiğiği varsayımı yapılır (şekil 4.4). Böylece güvenlik katsayısı;

$$F = \frac{\sum [cb + (W - u_w \cdot b) \tan \phi] / m_\alpha}{\sum W \sin \alpha} \quad (4.7)$$

olarak tanımlanır.

Bishop yöntemi kısmen batık yamaçlara uygulandığında güvenlik katsayısı;

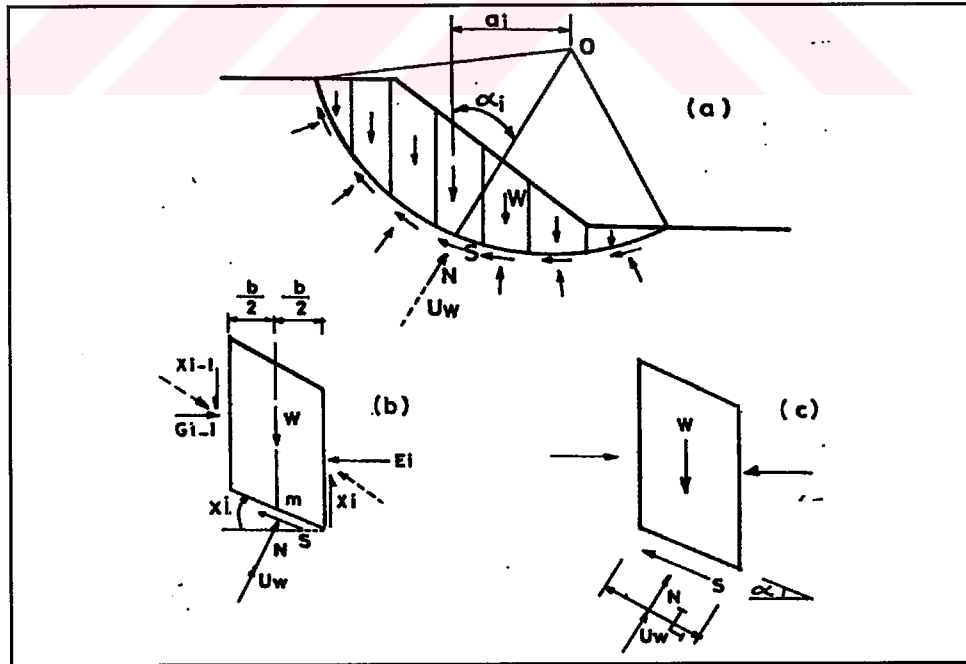
$$F = \frac{\sum [cb + (W_a + W_b - u_w \cdot b) \tan \phi] / m_\alpha}{\sum (W_a + W_b) \sin \alpha} \quad (4.8)$$

formülü ile hesaplanır.

Burada; m_α , geometriden kaynaklanan bir katsayıdır ve

$$m_\alpha = \left(1 + \frac{\tan \phi \tan \alpha}{F}\right) \cdot \cos \alpha \quad (4.9)$$

formülü ile ifade edilir. W_a ve W_b ise, aynı dilimin su üzerinde kalan ve batık kısımlarının ağırlığını göstermektedir.



Şekil 4.4. Dilim analizinde kuvvetler a-Yamaç kesiti b-Dilime etkiyen tüm kuvvetler c-Dilime etkiyen kuvvetler (Sadeleştirilmiş Bishop) [37].

Bishop Yöntemi ile Hesaplamada İzlenecek Yol:

1-Yamaç profili belirli bir ölçekte çizilip, zemin tabakaları ve varsa yeraltı su seviyesi gösterilir.

2-Olası bir kayma yüzeyi belirlenir. Tek kayma yüzeyi ile gerçek güvenlik sayısı bulunamayacağından, kayma dairesi merkezi yeterli sayıda değiştirilerek hesaplanan güvenlik sayılarından minimum olanı alınır.

3-Yamaç duraylılığını etkileyen faktörlerden çekme çatlaklarına biriken sular olduğuna göre, çatlak genişliği ve yüksekliği belirlenmeli ve çatlakın oluşturduğu hidrostatik kuvvet hesaplanarak olası kayma düzlemi de buradan geçirilmelidir.

4-Deneme daireleri, eşit genişlikte ve sayısı 10 civarında dilimlere ayrılır. Yamaç heterojen yapıya sahip ise, dilim tabanlarının tek malzemede kalmasına çalışılmalıdır.

5-Dilimlere ait kohezyon, kayma direnci açısı, birim hacim ağırlığı, boşluk suyu basıncı ve çizim sonucu bulunan dilim ağırlıkları, dilim genişliği ve kayma yüzeyi eğimi, tablo 4.1’de verilen çizelgedeki gibi düzenlenir.

6-Tahmini bir güvenlik sayısı seçilerek her dilim için m_a değeri bulunur. Hesaplanan m_a değeri formülde yerine konularak gerçek güvenlik katsayısı hesaplanır. Bulunan gerçek güvenlik sayısı ile tahmin edilen değer birbirine eşit çıkana kadar işlem tekrarlanır. Ancak; bu tahmin tablo 4.1’de 6. kolon toplamının 8. kolon toplamına bölümüne bakılarak yapılır. m_a değerleri bu F değerleri ile 9. kolonda hesaplandıktan sonra yeni güvenlik sayısı bulunabilir ve yakınsaklık sağlanana kadar işlem sürdürülür.

Tablo 4.1. Bishop yönteminde duraylılık analizi için kullanılan çizelge [37].

Dilim No.	α	W	c	u_w	$\tan \phi$	$c + \left(\frac{W}{b} - u_w \right) \cdot \tan \phi$	(6).b	$W \sin \alpha$	m_a	(7)/(9)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2										
3										

4.1.3. Duraylılığın Kama Analizi ile İncelenmesi

Ortaman süreksizlik yüzeyleri içerdği durumlardan kayma bir veya birkaç düzlemde oluşuyor ise, duraylılık kama analizi ile incelenebilir.

Sonsuz yamaç kabulü ile çözülen problemde kenar etkilerinin ihmal edilmesi, genellikle çözümün gerçekçi olmaması sonucunu getirir. Kayma yüzeyinin düzlem olması, bir ya da iki düzlemle temsil edilmesi durumunda, kayan kitlenin bir ara yüzey ile ayrılmış iki kama olarak analizi, uygun sonuçlar vermektedir.

Şekil 4.5’de kama analizi yönteminde kuvvetler gösterilmekte, tablo 4.2’de ise kuvvetlerin özellikleri verilmektedir.

Bilinmeyen güvenlik katsayısı için bir değer kabul edilerek, bazı kuvvetlerin yönü bazı kuvvetlerin de değeri bilindiğinden, her kama için kuvvetler poligonu çizilerek çözüme gidilir.

Zeminin aktif kayma direnci açısı ϕ_m ve aktif kohezyonu C_m , her kama için;

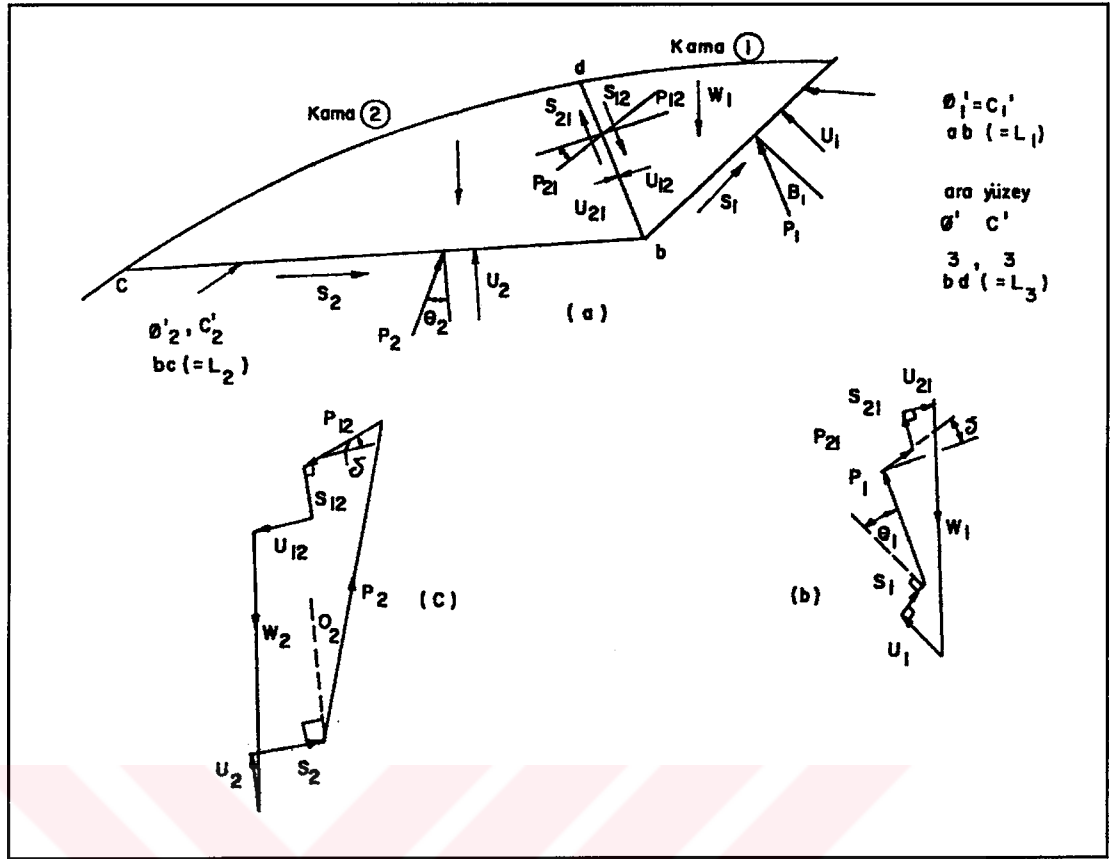
$$\tan \phi_{m1} = \frac{\tan \phi'_1}{F} \text{ ve } \tan \phi_{m2} = \frac{\tan \phi'_2}{F} \quad (4.10)$$

$$C_{m1} = \frac{c'_1}{F} \text{ ve } C_{m2} = \frac{c'_2}{F} \quad (4.11)$$

formülleri ile hesaplanır.

Tablo 4.2. Kama analizinde kuvvetlerin özellikleri [37].

	Kuvvet	Değeri	Yönü
W_1, W_2	Ağırlık	Biliniyor	Düşey
U_1, U_2	Tabanda boşluk suyu basıncı	Biliniyor	Tabana dikcey
P_1, P_2	Tabanda normal kuvvet ve sürtünmenin bileşkesi	Bilinmiyor	F kabul edilirse bilinir
S_1, S_2	Tabanda kohezyon	F kabul edilirse bilinir.	Tabana paralel
S_{12}, S_{21}	Ara yüzeyde kohezyon	Uyanma derecesi biliniyorsa bilinir.	Ara yüzeye paralel
P_{21}, P_{12}	Ara yüzeyde normal kuvvet ve sürtünmenin bileşkesi	Bilinmiyor	Uyanma derecesi biliniyorsa bilinir
U_{21}, U_{12}	Ara yüzeyde boşluk suyu basıncı	Biliniyor	Ara yüzeye dikcey



Şekil 4.5. Kama analizi yöntemi a-Yamaca etkiyen kuvvetler b-Birinci kamaya ait kuvvet poligonu c-İkinci kamaya ait kuvvet poligonu [37].

Tabandaki kohezyon kuvvetleri S_1 ve S_2 ise,

$$S_1 = C_{m1} \cdot L_1 \quad \text{ve} \quad S_2 = C_{m2} \cdot L_2 \quad (4.12)$$

olarak tanımlanır. Burada L_1 ve L_2 , 1 ve 2 numaralı kama taban uzunluklarını göstermektedir. Ara yüzeydeki kohezyon kuvvetleri hesaplanırken, bu yüzeydeki gerilmelerin yenilme limiti altında kalmasından dolayı, zeminin aktif ϕ_m ve C_m değerlerinin kayma yüzeyinde bulunandan daha küçük değerde olduğu kabulü yapılmalıdır.

Bu durumda ara yüzeydeki kohezyon kuvvetleri;

$$S_{12} = S_{21} = \frac{c'_3 \cdot L_3}{0,8.F} \quad (4.13)$$

formülü ile hesaplanır.

Ara yüzeydeki normal kuvvet ve sürtünme kuvvetinin bileşkesi P_{12} ve P_{21} kuvvetleri ise;

$$\tan \delta = \frac{\tan \phi' \cdot C'_3}{0,8 \cdot F} \quad (4.14)$$

formülü ile hesaplanan δ eğiminde etkir. Burada;

ϕ'_3 : Ara yüzeyde kayma direnci açısı,

C'_3 : Ara yüzeyde kohezyon,

L_3 : Ara yüzey uzunluğu,

F : Kabul edilen güvenlik katsayısıdır.

Kama analizi yöntemi ile hesaplamada izlenecek yol:

1-Yamaç kesiti belirli bir ölçekle çizilip, zemin tabakaları, özellikleri, varsa su seviyesi gösterilir.

2-Kayma yüzeyinin yeri, arazinin jeolojik yapısı ve zeminin özelliklerine bağlı olarak belirlenir. Kayma yüzeyinin iki düzlemde belirmesi durumunda kayma yüzeyi, bir ara yüzeyle belirlenmiş iki kamaaya ayrılır. Ara yüzeyin düşey olduğu kabulü, çözümde kolaylık getirse de minimum güvenlik sayısının, yatay olmayan bir ara yüzeyde elde edilmesi olağandır.

3-Tahmin edilen güvenlik katsayısına bağlı olarak zemin tabakalarının aktif kayma direnci parametreleri, yukarıdaki formüllerin kullanılması ile hesaplanır.

4-Tablo 4.2'de verilen kuvvetler daha önce hesaplanmış olan aktif kayma direnci parametreleri yardımıyla hesaplanır ve yönleri belirlenir.

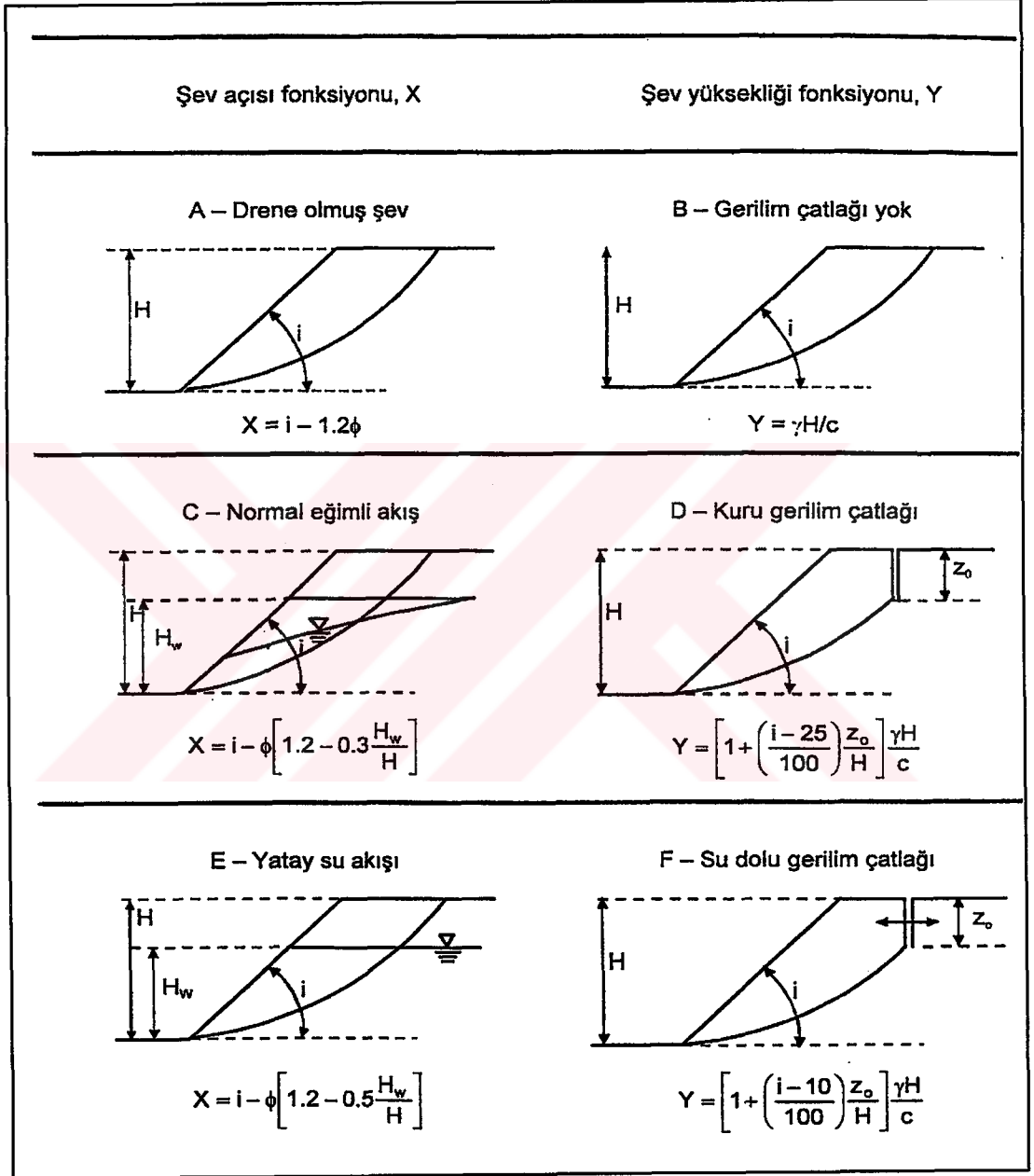
5-Seçilen kuvvet ölçeği ile şekil 4.5.b ve c'de gösterilen her kama için kuvvetler poligonu çizilir.

6-Poligonu kapatması gereken kamalar arası P_{12} ve P_{21} kuvvetlerinin eşit çıkması durumunda, tahmin edilen güvenlik katsayısı, gerçek güvenlik katsayısı olarak alınır. Eğer bu kuvvetler birbirine eşit çıkmıyor ise, bir poligonu kapatması gereken kamalar arası kuvvetin değerine eşit ve ters yönde bulunmasına kadar, güvenlik katsayısı yeter sayıda değiştirilmelidir [30,37].

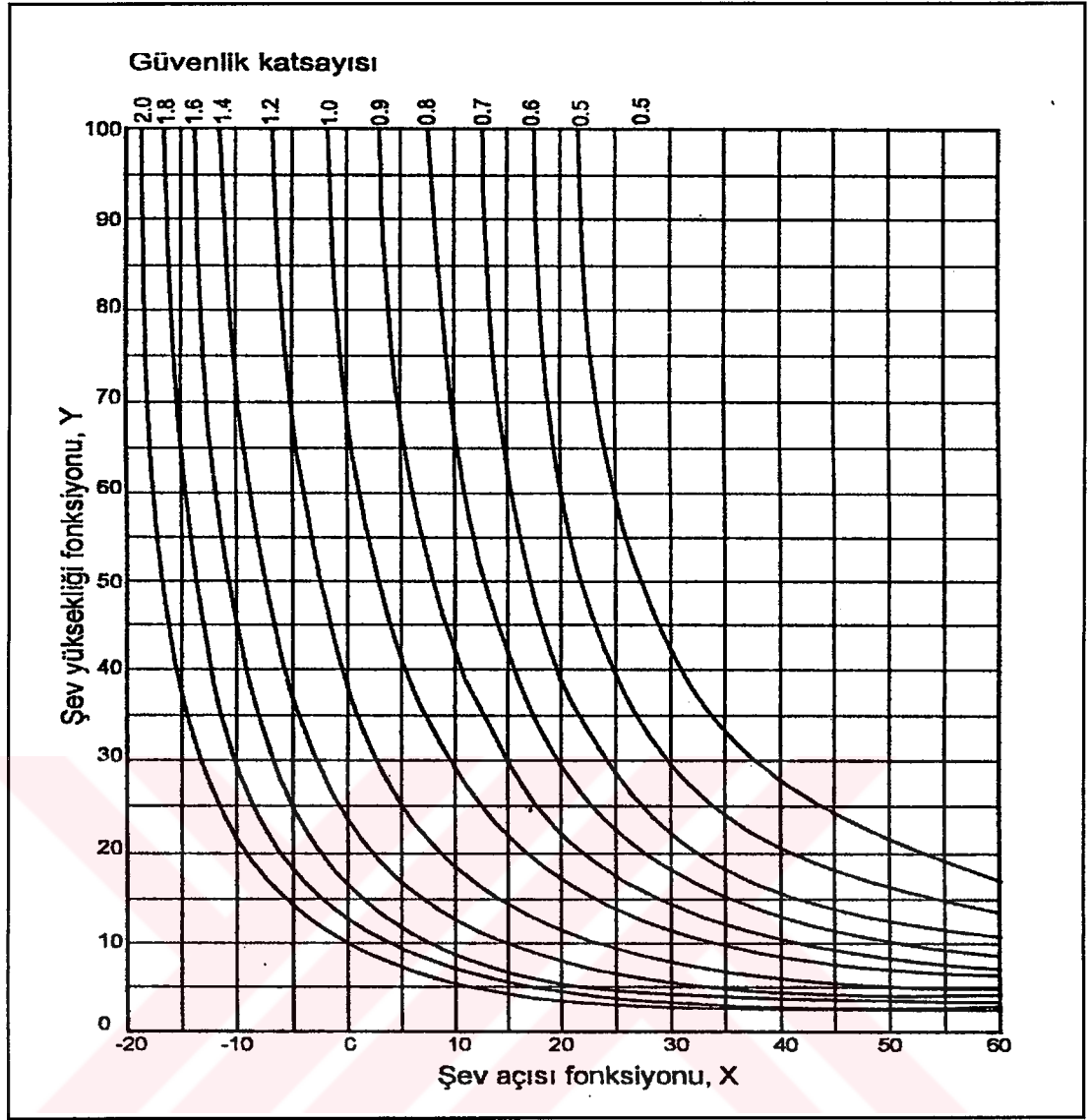
4.1.4. Dairesel Kaymaların Grafikselle Yöntem ile Analizi

Genellikle toprak zemin özelliklerine sahip malzemelerde, ileri derecede bozunmuş, ayrılmış veya çok parçalanmış zayıf kayalarda, pasa yığınlarında ve dolgularda dairesele yüzeyler boyunca gelişen kaymaların analizi için bir ön

değerlendirme yapılmasına olanak sağlayan ve pratik amaçlarla kullanılabilecek şev geometrisi kesitleri, formülleri ve tasarım grafiği şekil 4.6.a ve b’de verilmiştir. Eşitliklerde kullanılan parametreler ve problemin çözümünde güvenlik katsayısı değeri hesaplanabileceği gibi, başlangıçta bir güvenlik katsayısı seçilip, tersi izlenerek şev açısı da hesaplanabilir [30].



Şekil 4.6.a. Dairesel kaymaların grafiksel yöntem ile analizi için şev kesitleri [30].



Şekil 4.6.b. Dairesel kaymaların grafik yöntemiyle analizi için şev tasarım grafiği [30].

4.1.5. Kayma Dairesinin Ampirik Yöntemler ile Belirlenmesi

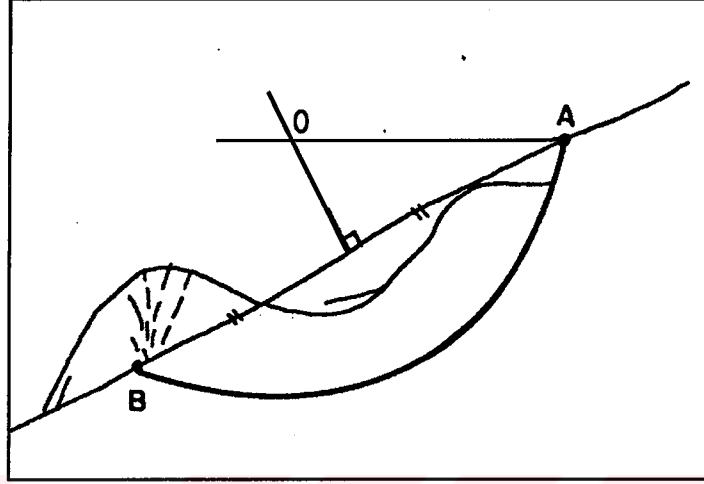
Heyelanlarda kayma dairesi, arazi gözlemleri sonucunda çeşitli yöntemler kullanılarak yaklaşık olarak bulunabilir. Bu yöntemler:

- Kayma dairesi yöntemi,
- Konsantrik daire yöntemi,
- Gerilme çatlakları yöntemidir.

Bu yöntemlerin uygulanmasında heyelanların kayma daireleri, kaymaya ait karakteristik noktaların saptanması ve bu noktaların bir ölçek dahilinde çizimleri ile bulunur.

4.1.5.1. Kayma Dairesi Yöntemi

Bu yöntem ile heyelanın kayma dairesinin belirlenmesi için, heyelanın başlangıç (A) ve topuk (B) noktalarının bulunması gerekir. Bir heyelanda başlangıç noktası açıkça görülür. Topuk noktası ise, heyelanın kabarma bölgesi altındadır (şekil 4.7).

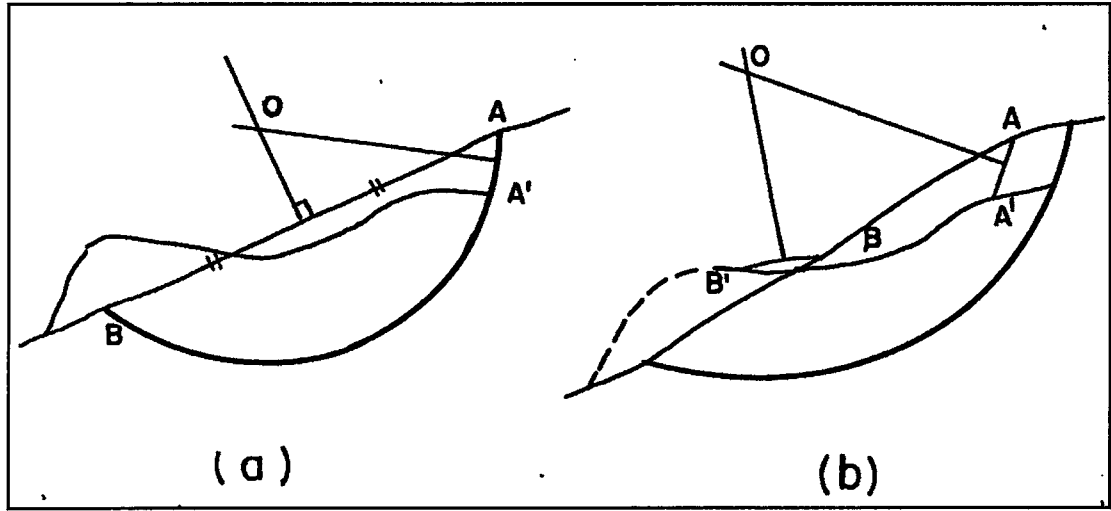


Şekil 4.7. Kayma dairesi yöntemi [37].

Kabarma bölgesindeki enine çatlaklar B noktasında kesişirler. B noktası yamacın hareket etmeden önceki yüzeyi üzerinde bulunur. Bu iki özellikten yararlanarak B noktasının yeri yaklaşık olarak belirlenir. Kayma dairesinin merkezi (O), A ile B noktalarını birleştiren doğrunun orta dikmesi ile A noktasından çizilen yatay doğrunun kesiştiği noktadır. Bu nokta merkez olmak üzere OA doğrusunu yarı çap kabul eden daire, heyelanın yaklaşık kayma dairesidir.

4.1.5.2. Konsantrik Daire Yöntemi

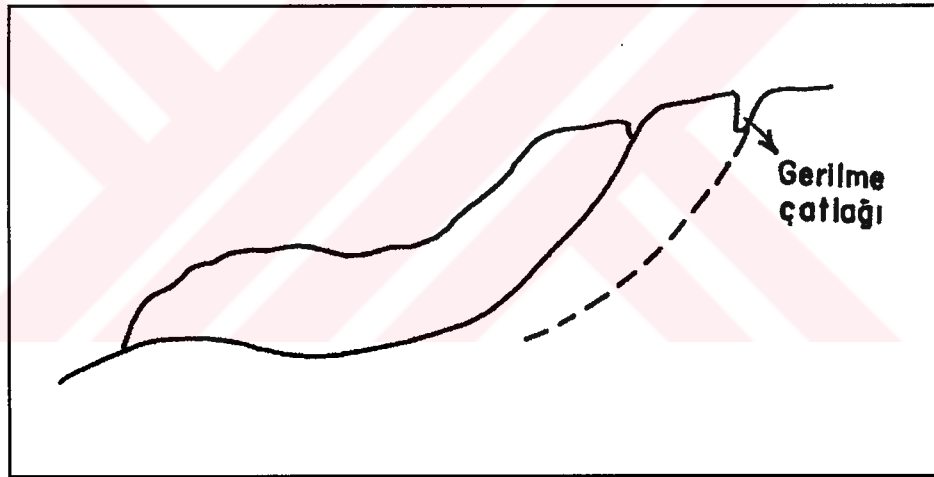
Konsantrik daire yöntemi ile heyelanın kayma dairesinin bulunabilmesi için, kayma oluşumundan önce ve sonraki belirli noktaların saptanması gerekir. Örneğin kayan yollar, çitler veya duvarların sabit ve kaymadan sonraki durumları ortaya konur. Kayan noktalar belirlenir (şekil 4.8). Birinci durumda, kayma dairesi yönteminde olduğu gibi, A ve B noktaları bulunur. Bu noktaların sınırladığı doğru parçası ile kayan noktalar (A-A) arasındaki doğru parçasının orta dikmelerinin kesim noktası (O) kayma dairesinin merkezini verir. OA yarıçaplı daire parçalı kayma dairesini yaklaşık olarak belirler. O noktası ile heyelan başlangıcı arasındaki uzaklığı yarıçap kabul eden daire, yaklaşık kayma dairesini oluşturur.



Şekil 4.8. Konsantrik daire yöntemi [37].

4.1.5.3. Gerilme Çatlakları Yöntemi

Bu yöntemde; hareket eden kütlenin tepe noktası ve gerisinde oluşan gerilme çatlaklarının uzanımı, kayma dairesinin bulunmasına yardımcı olmaktadır (şekil 4.9).



Şekil 4.9. Gerilme çatlakları yöntemi ile kayma dairesinin bulunması [37].

4.1.6. Dairesel Olmayan Kayma Yüzeyleri için Duraylılık Analizi (Janbu Yöntemi)

Herhangi bir seviye oluşturan toprak zeminin, çok zayıf kaya kütlesinin veya pasa malzemesinin özellikleri şev boyunca çok sık aralıklarla değişkenlik gösteriyor ise, ayrıca zemin-kayaç dokanağı gibi yapısal bir zayıflıktan dolayı veya kütle içinde, örneğin çok yumuşak bir kil bandı gibi, düşük makaslama dayanımlı düzlemsel seviyelerin varlığı halinde, dairesel kayma analiz yöntemlerinin uygulanabilirliği ortadan kalkmaktadır. Bu tür koşullarda kaymalar; dairesel olmayan veya şev tepesine yakın kesimlerde dairesel olarak başlayan, derinde düzlemsel olarak devam

eden yüzeyler (birleşik kayma yüzeyleri) boyunca gelişmektedir. Duraysızlıkların bu tür kayma yüzeyleri boyunca geliştiği veya gelişebileceği şevlerin stabilitesinin incelenmesi amacıyla, bir analiz yöntemi önerilmiştir. Janbu yöntemi olarak anılan bu yöntemde, kayan kütle dilimlere bölünür ve bazı grafiklerden de yararlanılarak, aşamalı şekilde güvenlik katsayısı hesaplanır. Analizin esasını oluşturan şev geometrisi ve ilgili eşitlikler şekil 4.10'da, çözüm sırasında izlenen aşamalar ise aşağıda verilmektedir [30,33].

1. *Dilim parametreleri:* Kayan kütle dilimlere bölünür. Dilimler; malzeme özelliklerindeki değişimler, şev geometrisi ve su basıncı dağılımı dikkate alınarak seçilmelidir. Eğer, eşit dilimler kullanılırsa hesaplamalar basitleşir. Ancak, saha gözlemleri ve ortam koşulları eşit olmayan dilimlerin uygun olacağına işaret ediyorsa, kütlenin eşit dilimlere ayrılmasına gerek yoktur. Her dilimin tabanının merkezinde α açısı ölçülür. Dilimler için ayrı ayrı α , Δx ve $\tan\phi$ değerleri hesaplama çizelgesine kaydedilir.

2. *Ağırlık parametreleri:* Dilim ağırlığı Δw ve her dilimin taban alanı için dilimin ortalama ağırlığı p hesaplanır. Eğer dilim geometrisi nispeten düzenli ise, $p=\gamma.h$ olarak alınabilir (h dilimin ortalama yüksekliği) ve dilim ağırlığı, $\Delta w = \gamma.h.\Delta x$ eşitliği ile verilir. Dilim yüksekliği düzensiz ise, dilim ağırlığı; planimetre ile dilim alanının ölçülüp malzemenin yoğunluğu ile çarpılmasıyla hesaplanır. Bu durumda; $p= \Delta w.\Delta x$ olup, p , h ve Δw değerleri çizelgeye kaydedilir.

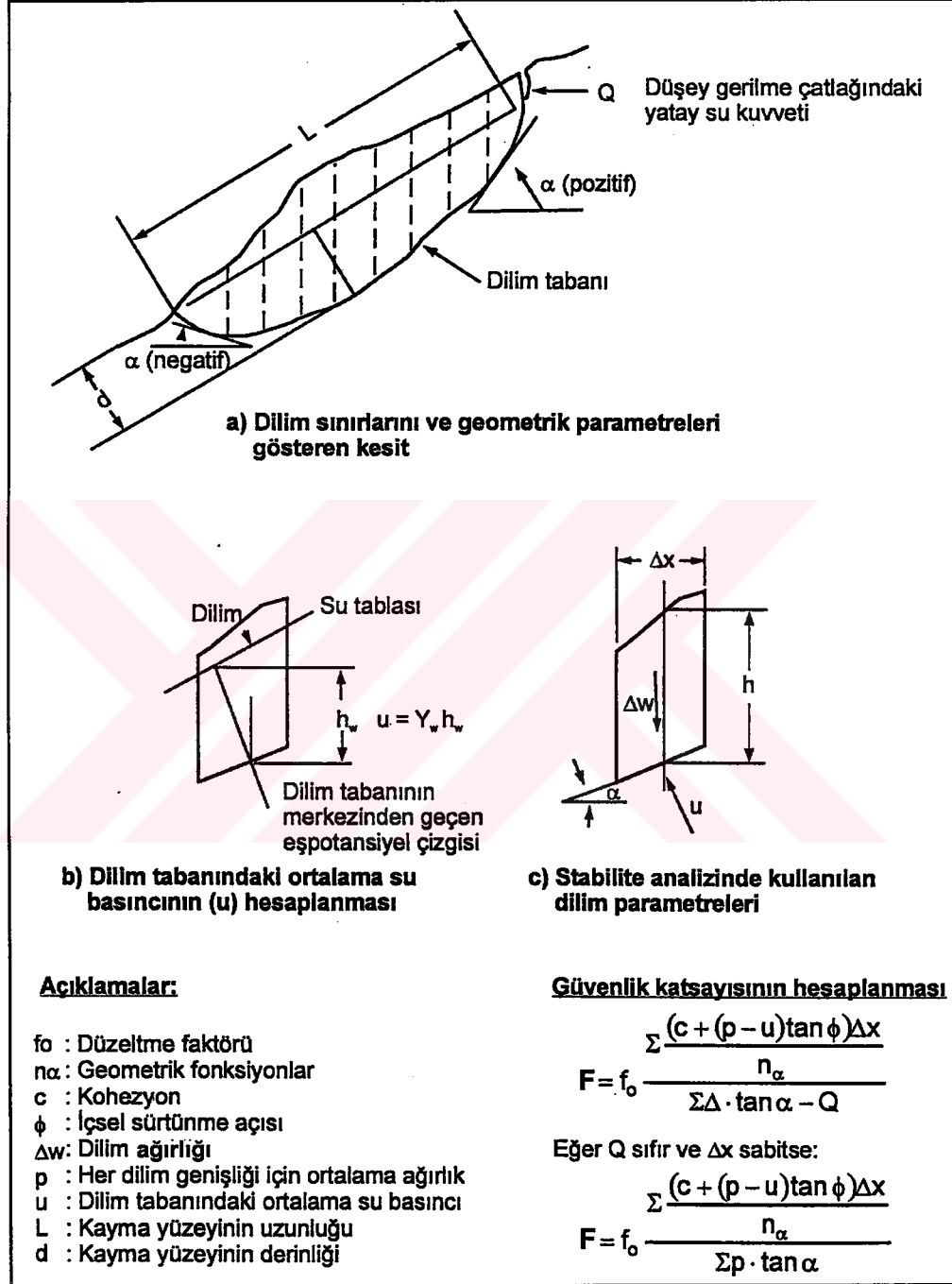
3. *Kayma yüzeyindeki su basıncı:* Her dilimin tabanında etkiyen ortalama su basıncı şekil 4.10'da gösterildiği şekilde hesaplanır ve hesaplama çizelgesine kaydedilir. Eğer kayan kütlenin gerisinde düşey yönlü bir gerilim çatlağı varsa, bu çatlakta yer alan suyun oluşturacağı Q yatay su basıncı da hesaplanmalıdır.

4. *Ayrıntılı hesaplamalar:* Her dilim için $(\Delta w . \tan\alpha)$ ve $x = (c + (p - u) \tan\phi)$. Δx değerleri hesaplanır.

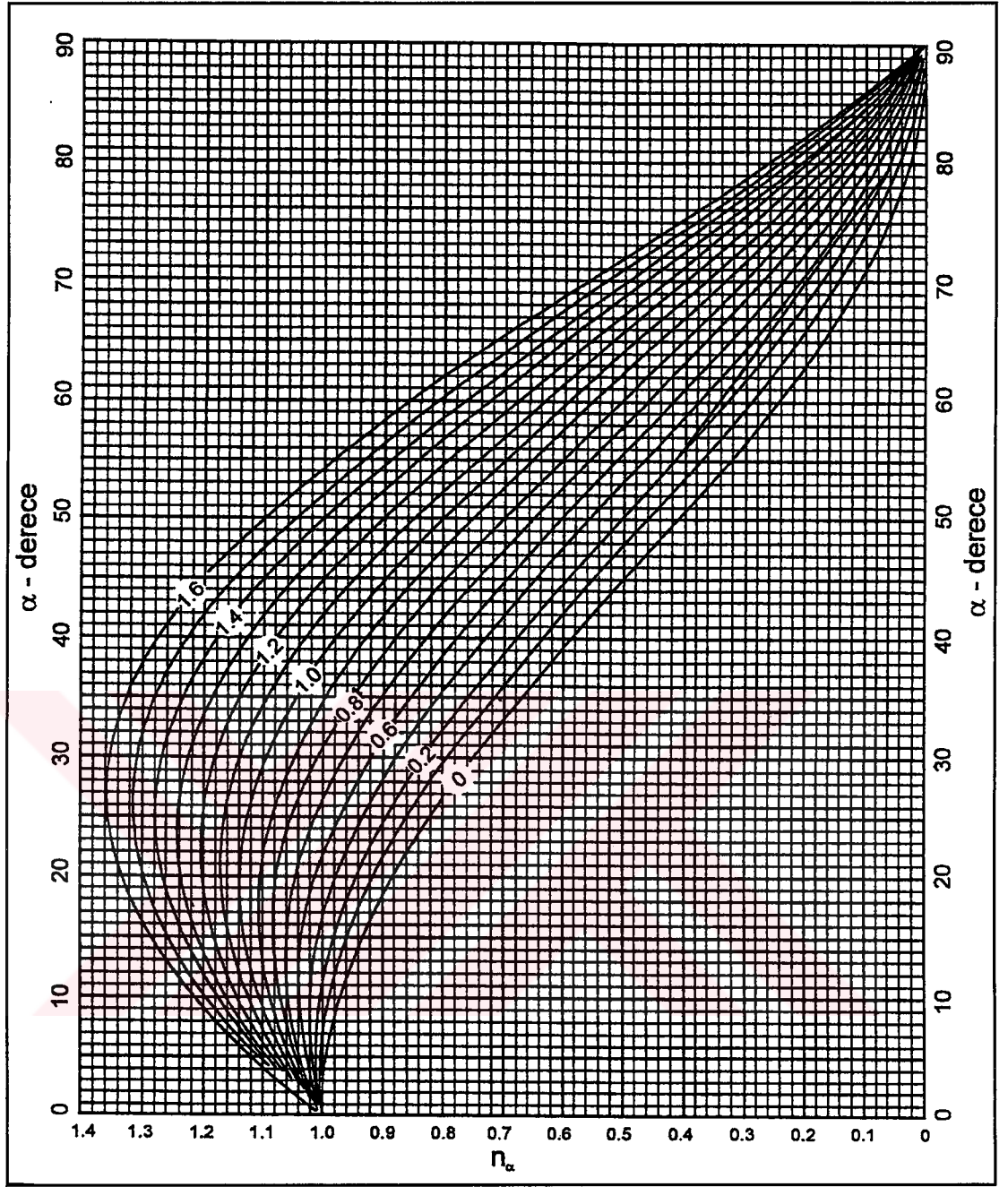
5. *n_a 'nın tayini:* Başlangıçta bir güvenlik katsayısı değeri kabul edilir (genellikle 1 olarak alınır) ve şekil 4.11.a ve b'den her dilim için n_a değeri belirlenir. Buradan x/ n_a hesaplanarak, sonuç tablosundaki yerine konur.

6. Şekil 4.12'den f_0 değeri saptanarak yeni güvenlik katsayısı hesaplanır.

7. Eğer 6. aşamada hesaplanan güvenlik katsayısı 5. aşamada kabul edilen güvenlik katsayısı değerinden farklı ise, yeni bir F kabul edilir (6. aşamada hesaplanan değere yakın bir değer). 5 ve 6. aşamalardaki işlemler, yeni kabul edilen bu değere eşit veya çok yakın bir güvenlik katsayısı bulunana kadar tekrarlanır.

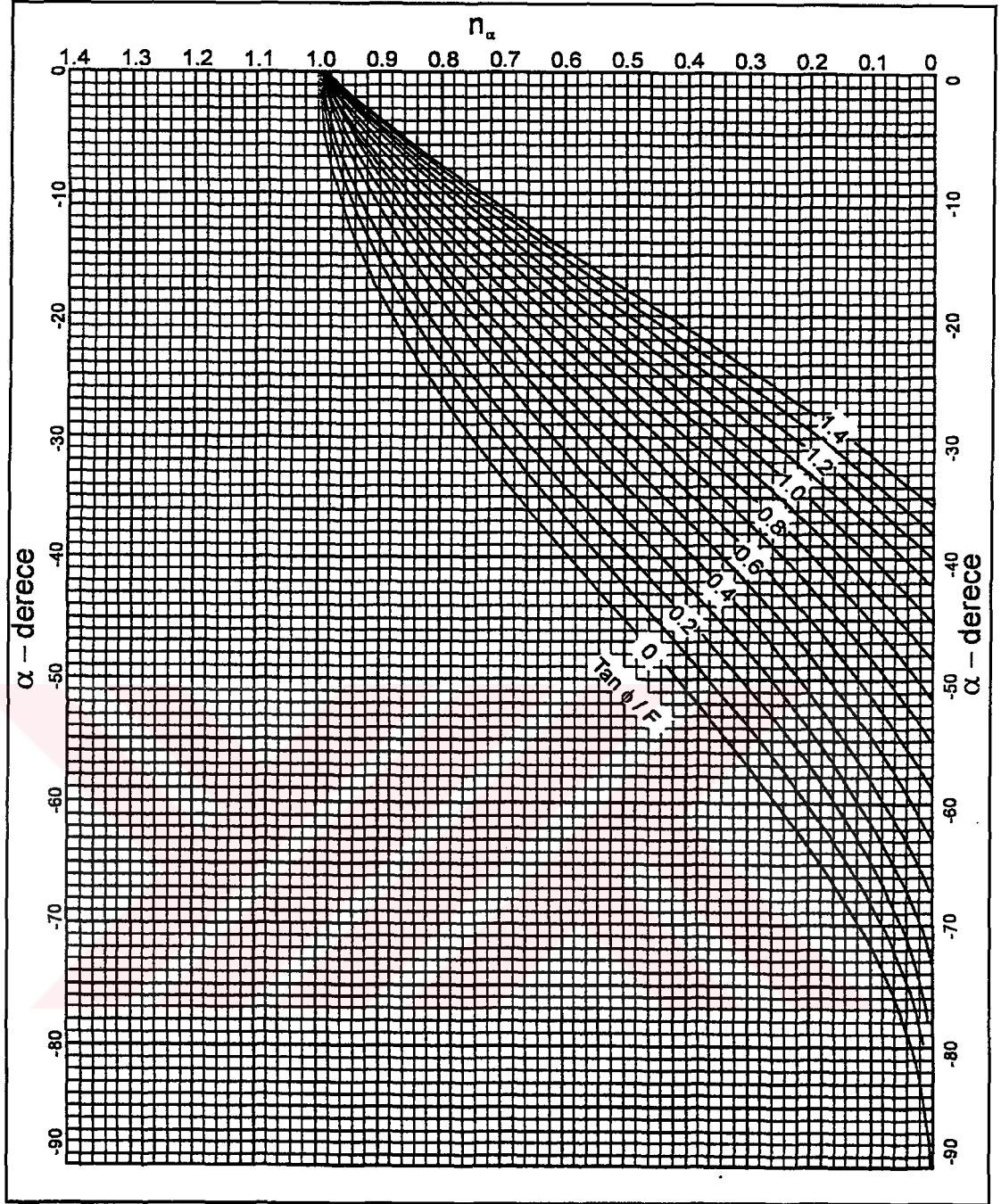


Şekil 4.10. Dairesel olmayan kaymaların analizi için gerekli parametreler ve eşitlikler (Janbu yöntemi) [30].



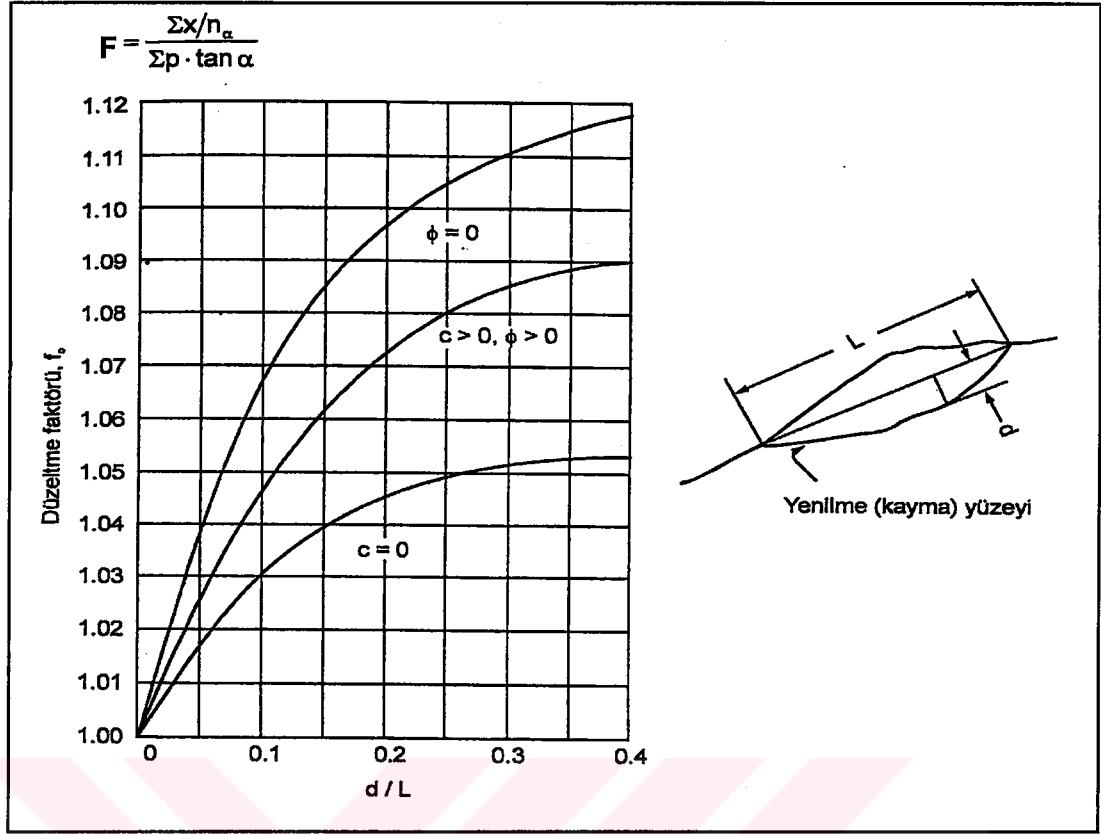
Şekil 4.11.a. Pozitif α açıları için n_α grafiği [30].

Not: Dilim tabanının eğim yönü şevin eğim yönü ile aynı ise, α açısı pozitif alınır.



Şekil 4.11.b.Negatif α açıları için n_α grafiği [30].

Not: Dilim tabanının eğim yönü şevin eğim yönünün tersi yönde olması halinde, α açısı negatif alınır.



Şekil 4.12. Janbu yönteminde f_0 düzeltme faktörü tayin grafiği [30].

Tablo 4.3. Janbu yönteminde duraylılık analizi için kullanılan çizelge

KESİTTEN ÖLÇÜLEN VE HESAPLANAN PARAMETRELER									HESAPLAMALAR		1.AŞAMA		2.AŞAMA		3.AŞAMA	
Dilim No.	α	u	h_m	Δx	p	Δw	c	$\tan \phi$	$\Delta w \cdot \tan \alpha$	x	n_α	x/n_α	n_α	x/n_α	n_α	x/n_α
1																
2																
3																

4.1.7. Φ - Dairesi Yöntemi (Taylor Yöntemi)

İçsel sürtünme açısına sahip ortamlarda, sürtünme kuvveti olan $S = \tan \phi$ denge durumuna $r \cdot \sin \phi$ yarıçaplı bir çembere teğet olacak şekilde etki eder. Başka bir deyişle, kayma yüzeyi üzerindeki R bileşke kuvveti, merkezi kayma yüzeyinin merkezi ile çakışan " $r \cdot \sin \phi$ " yarıçaplı bir daireye teğettir.

Yöntemde kullanılan bağıntılarda; BC yayının uzunluğu L, BC kirişinin boyu ise b ile gösterilmiştir. Kohezyon kuvvetinin (C) bileşkesi, BC doğrultusundadır. Etkime noktası da ip poligonu veya analitik yolla bulunur (şekil 4.13).

olan ϕ -açısı, logaritmik sarmalın merkezinden geçmektedir (şekil 4.14). Moment de bu merkeze göre alındığından, bu kuvvetler moment oluşturmazlar. Böylece, geriye tutucu kuvvet olarak yalnızca kohezyon kalır. Kayma yüzeyinin denklemi;

$$r = r_0 \cdot e^{\alpha \tan \phi} \quad (4.16)$$

Moment; yüzeyden seçilen ds elemanlarının momentleri toplamı olacağından, integrasyon ile bulunur. Yüzeyden seçilen ds elemanı,

$$ds = r \cdot d\alpha / \cos \phi \quad (4.17)$$

ds elemanına ait moment ise;

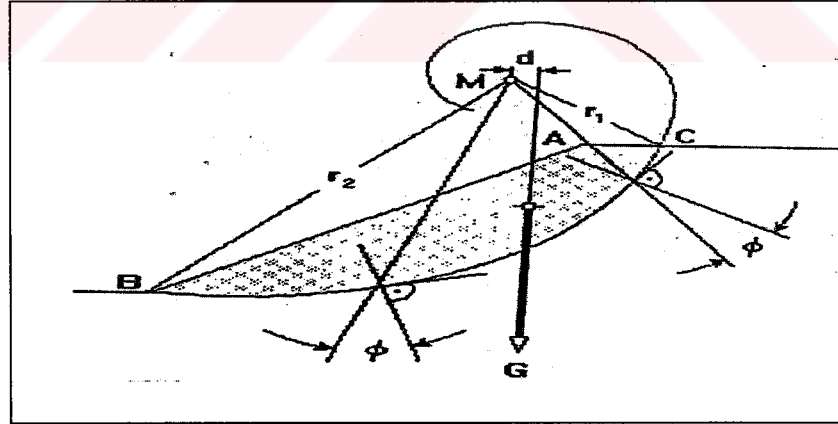
$$dM = C \cdot r_1^2 \cdot e^{2\alpha \tan \phi} \quad (4.18)$$

Toplam moment;

$$M = C \cdot r_1^2 \cdot e^{2\alpha \tan \phi} d\alpha \quad (4.19)$$

olduğu için $M = C \cdot (r_2^2 - r_1^2) / 2 \tan \phi$ dir. Kaydırıcı moment de $G \cdot d$ olduğuna göre, güvenlik katsayısı aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanır.

$$F = (C (r_2^2 - r_1^2) / 2 \tan \phi) / G \cdot d \quad (4.20)$$

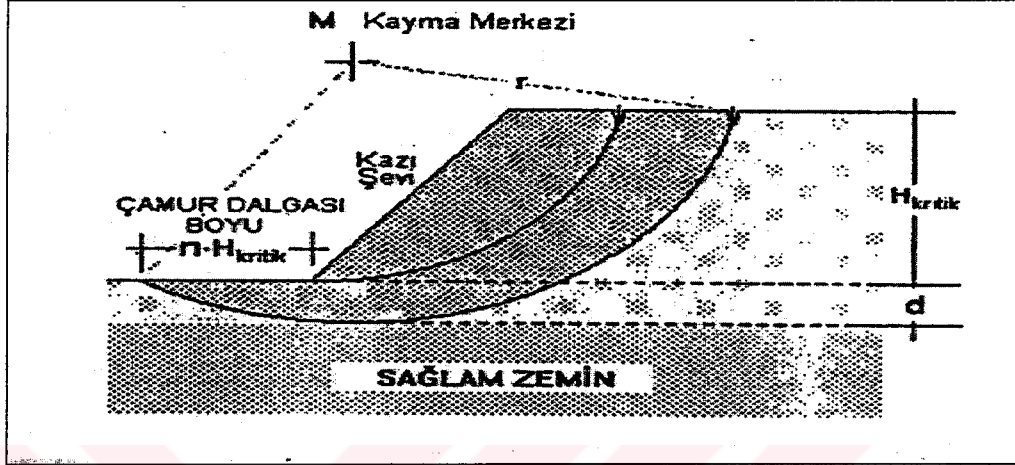


Şekil 4.14. Logaritmik sarmal yöntem (Rendulic yöntemi) [33].

4.1.9. Taban Kaymalarında Duraylılık (Tshebotariof-Taylor Yöntemi)

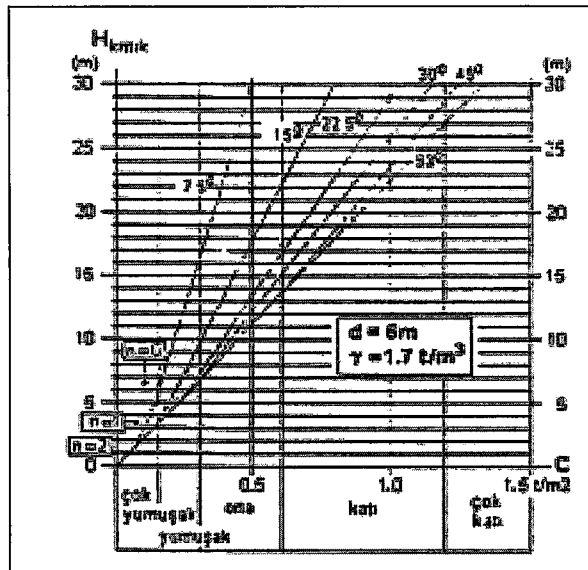
Gregory P. Tshebotariof “ Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures” adlı eserinde, çeşitli killi zeminler içinde oluşturabilecek şevlerin yüksekliğini saptamaya yarayan abaklar verilmektedir. Genelde içsel sürtünmenin bulunmadığı $\phi = 0$ varsayılarak, Taylor’un belirttiği ilkelere göre (bkz. Φ - dairesi yöntemi)

hazırlanan bu abaklarda; kil tabakasının kum veya kaya gibi daha sağlam ortama kadar olan derinliğine (d), şevin eğim açısına (β), kayan ortamın kohezyonuna (C) bağlı olarak, H_{kritik} değerleri belirlenebilmektedir. Fakat burada bulunan değerlerin, ayrıca belirli bir güvenirlilik sayısı ile çarpıldıktan sonra kullanılması da önerilmektedir (şekil 4.15.a).



Şekil 4.15.a. Taban kaymalarında Tshebotariof-Taylor yöntemi [33].

Değişik temel derinliklerinde (d), zeminin birim hacim ağırlığı $\gamma = 1,7 \text{ ton/m}^3$ alınarak, 0 ile $1,5 \text{ ton/m}^2$ arasında (çok yumuşak, yumuşak, orta, katı, çok katı killere karşılık gelecek şekilde) değişen kohezyonlar için, farklı şev açılarında ulaşılabilecek güvenli şev yüksekliklerini veren, 4 adet abaktan biri burada örnek olarak verilmiştir (şekil 4.15.b).



Şekil 4.15.b. Tshebotariof-Taylor yönteminde kritik şev yüksekliği abağı [33].

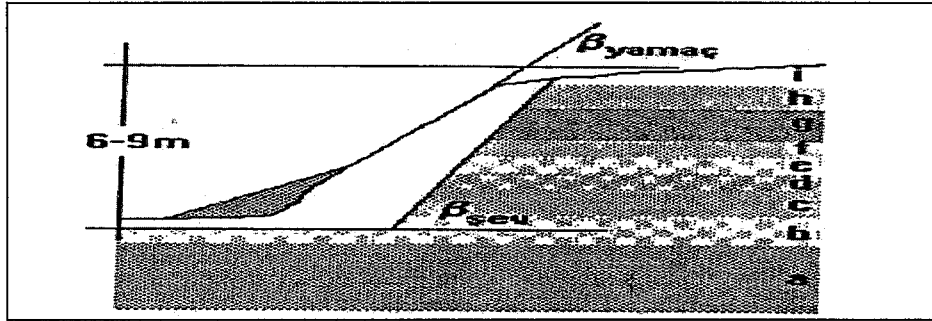
4.1.10. Tabakalı Ortamlarda Yamaç ve Şev Stabilitesi

Kayacın üniform ayrışma karakterli, benzer özellik ve nitelikli tabakalardan oluşması ve süreklilik göstermesi halinde, genelde homojen ortamlar için geçerli olan kabuller yapılır ve daha önceki bölümlerde tanıtılan duraylılık analiz yöntemleri kullanılır. Fakat; tabakaların rijitlikleri, jeolojik yapıları, dokuları ve nihayet yoğunlukları birbirinden çok farklı ise, katmanlardaki bu fiziksel ve mekanik değişimlerin dikkate alındığı, daha farklı yöntemlerden yararlanılması kaçınılmaz olur. Ardalanmalı tabaka koşullarına göre, iki farklı durum söz konusudur.

4.1.10.1. Ardalanmalı Yatay Tabakalı Ortamlarda Şev Stabilitesi

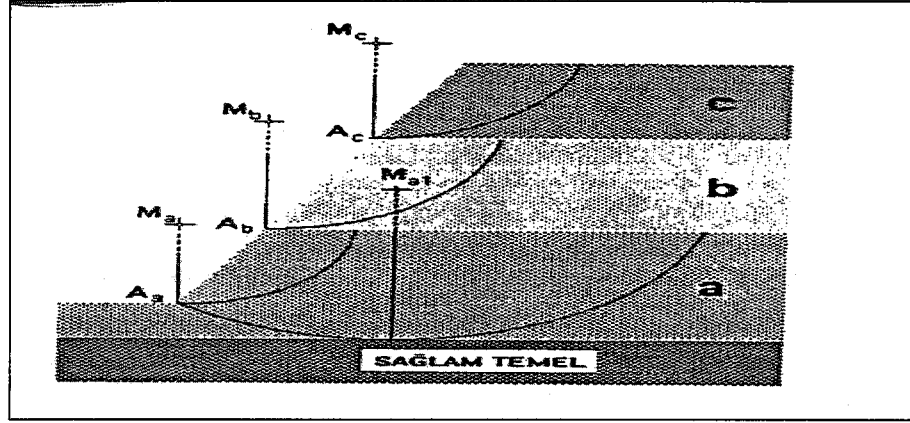
Yamaç morfolojisi, tabakaların mekanik davranışı ve özellikleri hakkında önemli ipuçları vermektedir. Yamaçta tabakaların göreceli olarak değişik eğim açıları alması, bunların kısa ve uzun vadede alabilecekleri kritik eğim açılarının belirlenmesi bakımından çok önemlidir. Yüksek şevlerin genel eğime uygun şekilde kademelendirilmesi sırasında, tabakaların mekanik ve fiziksel parametrelerine bağlı olan bu özelliklerinden de yararlanmak gerekir. Aksi halde, en zayıf tabakaya göre saptanmış olan eğim açısının kullanıldığı şev düzenlemeleri yapılabilir ki, bu da şevlerin aşırı yatmasına ve dolayısıyla kazı miktarının artmasına neden olabilir.

İlke olarak; ancak belirgin morfolojik bozukluk göstermeyen tabakalı yamaçlarda, tüm katmanlar için geçerli olabilecek uygun bir şev açısının bulunması halinde, 6-9m'yi aşmayan düşük şevler oluşturulabilir (şekil 4.16).



Şekil 4.16. Ardalanmalı yatay tabakalı ortamlarda şev stabilitesi [33].

Katmanların kalın, yatay veya şev dışına doğru az eğimli olması halinde, her tabaka üzerine oturduğu tabakanın sınırladığı eğrisel bir yüzey boyunca kayar. Şevin dışa doğru gelişen bu harekette, kayma çemberi tabaka yüzeyine teğettir (şekil 4.17). Bu nedenle, dairenin merkezi tabakanın şev'i kestiği noktadan çıkılan doğru üzerinde yer alır.



Şekil 4.17. Ardalanmalı yatay tabakalı ortamlarda kayma dairesi merkezleri [33].

4.1.10.2. Ardalanmalı Eğik Tabakalı Ortamlarda Şev Stabilitesi

Tabakaların yatay olmaması durumunda, iki farklı durum ile karşılaşılabılır.

- Tabakaların yamaç (şev) içerisine eğimli olması,
- Tabakaların yamaç (şev) dışına eğimli olması halidir.

Yamaç içerisine eğimli tabakalı yapılarda, tabaka yüzeylerine kinematik serbestlik getirilemeyeceği için, bu yüzeylerde mekanik yenilme de gerçekleştirilemez. Dolayısıyla; duraysızlıklar ancak tabakaları oluşturan kayacın maddesel niteliklerinin aşılması ile oluşabilecektir. Bu nedenle böyle durumlarda, genel olarak ortama zemin parametrelerine göre irdelenen ve tüm tabakaları kesen tek bir kayma dairesi ile çalışılmaktadır.

Tabakaların dışa doğru eğimli olması durumunda ise, tabakalar arası sürtünmenin de aşılabileceği kinematik serbestlik sağlanmış olmaktadır. Yenilme tabaka içinde dairesel bir yüzey ile başlamakta ve daha sonra tabaka yüzeyini izlemektedir. Bu durumda; kayma dairesinin merkezi A'dan çizilen doğru üzerinde bulunmakta ve BA yayına θ açısıyla bakmaktadır. Başka bir deyişle M noktası, tabakaya B'de çizilen dikme ile BA doğru parçasının orta dikmesinin kesim noktasıdır. Ancak, bilinmeyenler A ve B noktalarının yerleridir. Bu amaçla A noktasının QC tabaka yüzeyinden olan yüksekliğinden yararlanılır. Şekil 4.18'de gösterilen ölü kütle dengede olduğuna göre, $\Sigma K = 0$ olmalıdır.

Denge denklemi:

Tutucu kuvvetler = Kaydırıcı kuvvetler olduğuna göre;

$$C_k + S = K + (\text{su etkisi}) \quad (4.21)$$

$$\text{Kohezyon kuvveti: } C_k = C \cdot \underline{BC} \quad (4.22)$$

$$\text{Sürtünme kuvveti: } S = G \cdot \cos\beta \cdot \tan\phi \quad (4.23)$$

$$\text{Kaydırıcı kuvvet: } K = G \cdot \sin\beta \quad (\text{su etkisi ihmal edilmiştir}) \quad (4.24)$$

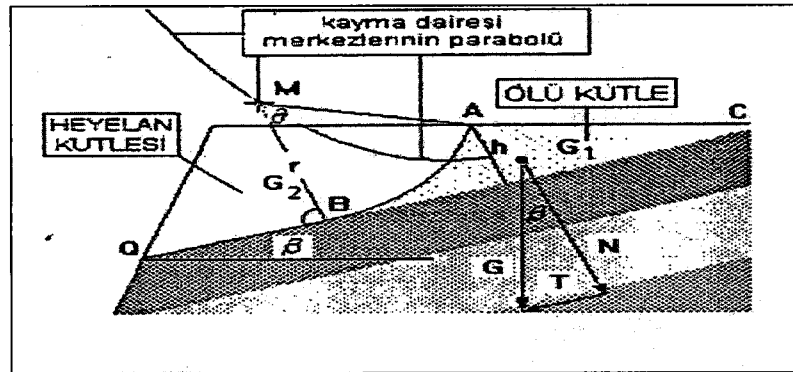
Ölü kütlenin ağırlığı $G = \gamma \cdot \underline{BC} \cdot d \cdot h/2$ dir. $d = 1$ için denge denkleminde G yerine konulur ise; $C \cdot \underline{BC} + \tan\phi \cdot \gamma \cdot \underline{BC} \cdot h \cdot \cos\beta / 2 = \gamma \cdot \underline{BC} \cdot h / 2$ eşitliği ve buradan da,

$$h = 2 C \cdot \cos\beta / \gamma \cdot (\tan\beta - \tan\phi) \quad (4.25)$$

bağıntısı elde edilir. Daha sonra tabaka yüzeyine çizilen h uzaklıktaki paralelin, topografik yüzey ile kesiştiği A noktası bulunur. B noktasının bulunması ise, denge koşullarının araştırılması ile belirlenir. Çünkü; A' 'dan geçen ve tabakaya teğet olan sonsuz çember vardır. Bunların merkezleri, tabaka yüzeyinden ve A noktasından eşit uzaklıkta olduğundan, h parametrelili bir parabol üzerindedir. Dolayısıyla, B en olumsuz durum için saptanan nokta olmak zorundadır.

Heyelan kütlesinin ölü kütleden ayrılması sonrasında, ayrıca tabaka üstündeki kaymanın da genel kayma koşulları denklemini kullanarak irdelenmesi gerekir. Burada; kohezyonun bulunduğu hallerde, QB kayma yüzeyindeki kohezyon kuvveti de dikkate alınır. Ancak; genelde tabaka yüzeyinin mevcut kohezyonu ortadan kaldıracak şekilde sudan etkilenmiş, ayrılmış ve örselenmiş olduğu kabul edilebileceğinden, $C = 0$ analizinin yapılması uygun olur. Böylece; gerilme çatlağının da su ile dolu olacağı varsayılarak, kayan kütle için yaklaşık sonuç veren aşağıdaki bağıntının kullanılması yeterli olur.

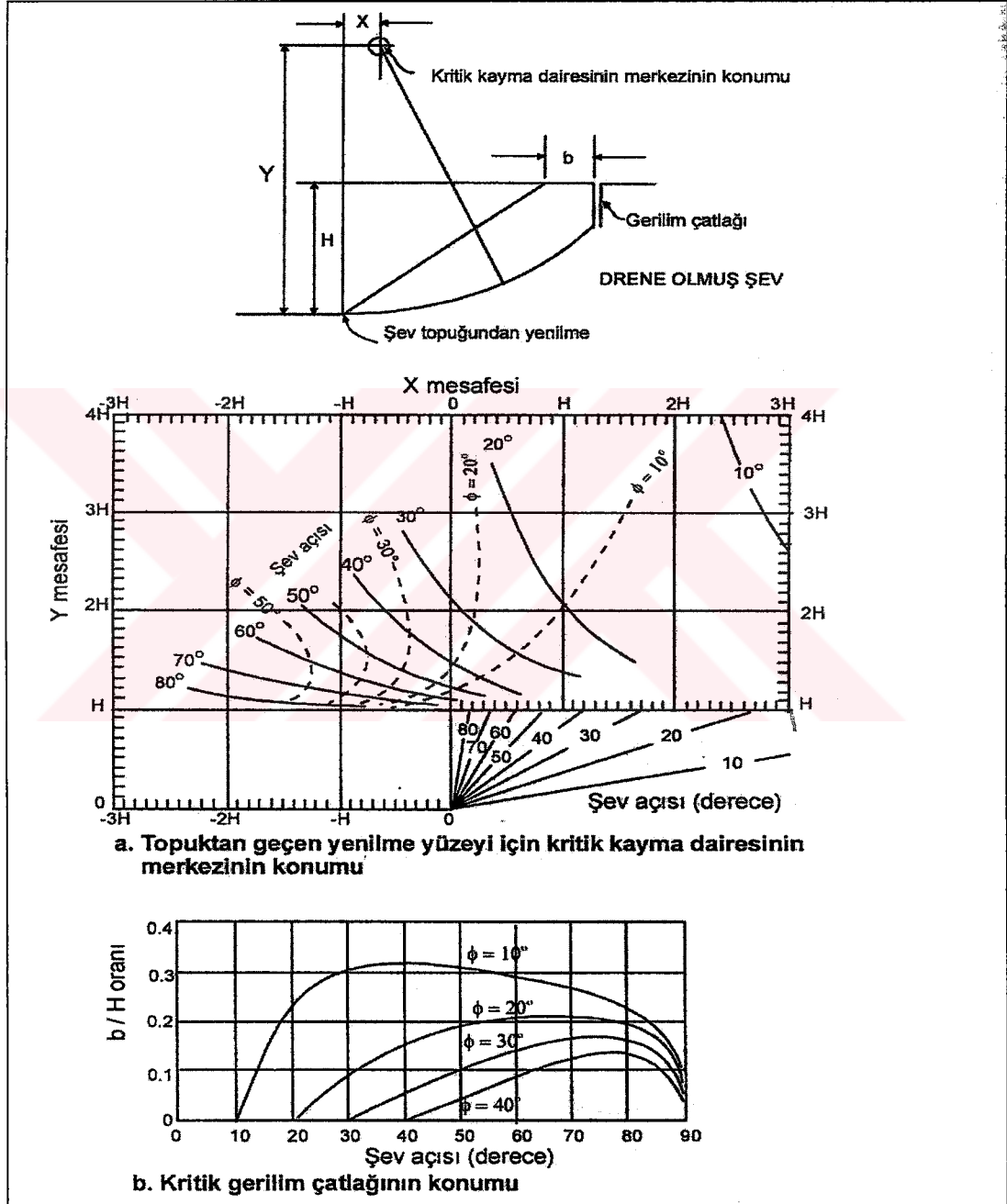
$$F = G_2 \cdot \cos\beta \cdot \tan\phi / (G_2 \cdot \sin\beta + h/2) \quad (4.26)$$



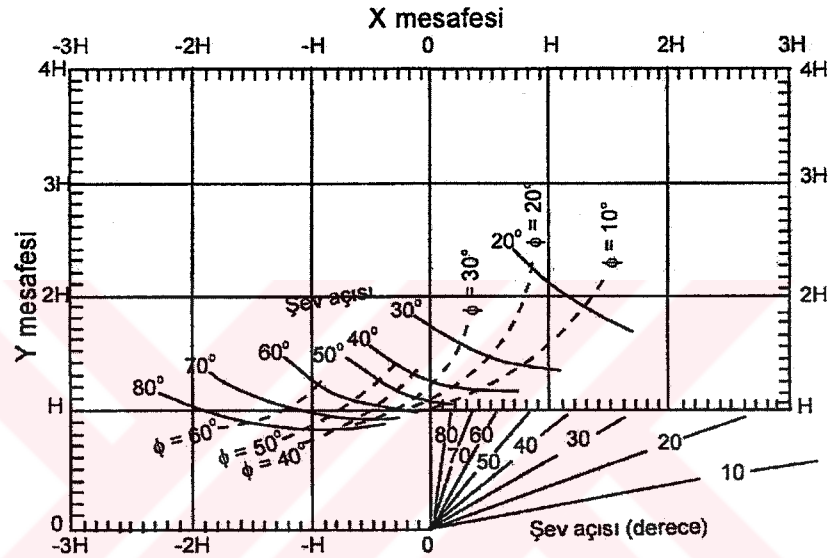
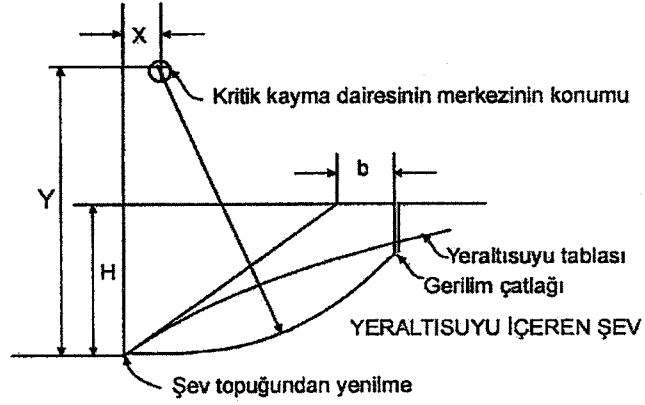
Şekil 4.18. Ardalanmalı eğik tabakalı ortamlarda şev stabilitesi [33].

4.1.11. Hoek ve Bary Yöntemi

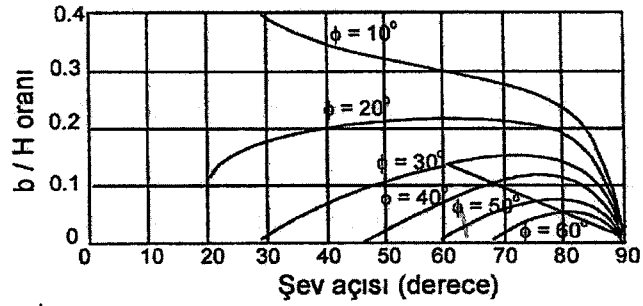
Bu yöntem ile, homojen zeminlerde açılan şevlerde kritik dairenin merkezi ve kritik gerilme çatlağının konumu tayin edilebilir. Zeminin içsel sürtünme açısı (ϕ) ve şev açısı (i) veri olarak kullanılır ve yöntem abaklar yardımı ile drene olmuş (şekil 4.19) ve su içeren (şekil 4.20) şevlerde, her iki parametrenin hesaplanmasına olanak sağlar [30].



Şekil 4.19. Kuru (drene olmuş) bir şevde kritik kayma yüzeyinin ve gerilme çatlağının lokasyonlarını tayin grafikleri [30].



a. Topuktan geçen yenilme yüzeyi için kritik kayma dairesinin merkezinin konumu



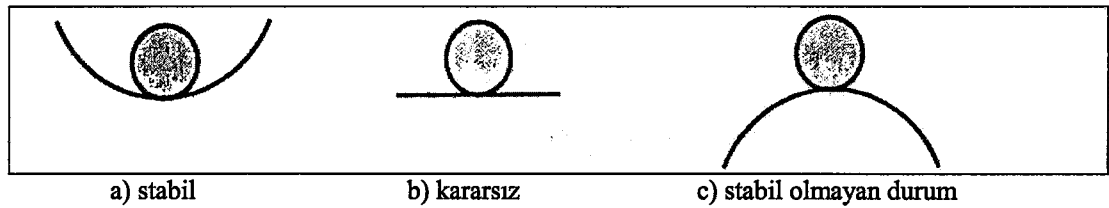
b. Kritik gerilim çatlağının konumu

Şekil 4.20. Yeraltı suyunun bulunduğu bir şevde kritik kayma yüzeyinin ve gerilme çatlağının lokasyonlarını tayin grafikleri [30].

4.2. Yöntem Seçimi ve Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi

Klasik yöntemler ile şevlerin stabilite analizinde, kaymayı kolaylaştıran ve kaymaya karşı koyan kuvvetlerin karşılaştırılması yapılır ve bununla denge koşulu kontrol edilir. Bu; günümüzde kayma koşulu bulunan şevlerin stabilite analizi için, standart bir yöntemdir. Bu yöntemde sistemin denge koşulu için, malzemenin kesme (kayma) dayanımı hesaplanır ve mevcut değerler ile karşılaştırılır. Oysa, zeminlerin mevcut kayma dayanımının belirlenmesi büyük bir problem oluşturmaktadır. Bu; özellikle çok gevşek yığın halindeki malzemeler için geçerli olup, zemin araştırmalarının bütün işlevlerini (numune alma, numune hazırlama ve laboratuvar deneyleri vb. gibi) önemli ölçüde zorlaştırmaktadır. Bu yüzden böylesi deneylerin sonuçları göreceli olarak hata payı içerir ve özellikle porozite oranı yüksek olduğunda açığa çıkar. Eğer çok küçük kohezyon değeri tespit edilirse ki, genellikle sıfır'a eşittir, şev stabilitesi beklenenden düşük bulunur ve arazi rehabilitasyon çalışmaları ekonomik olmaz. Bu yüzden; etkiyen kuvvetlerin karşılaştırılması ile bir stabilite analizi, şevin duraylılık kontrolünü (stabil, kararsız, stabil olmayan koşul) tam olarak yansıtmayabilir.

Ayrıca, ani pasa şev duraysızlıkları bir denge koşulu değil, bilakis bir stabilite problemidir. Sistem; bir etki sonrası kısmen açığa çıkabilecek, potansiyel enerjiye sahiptir. Daha iyi anlayabilmek için, şekil 4.21'de verilen basit stabilite problemini inceleyebiliriz. Gözlenen üç bilye denge koşulunda bulunuyor. Şekil 4.21.a'daki sistemde, örneğin bilye üzerine bir kuvvet uygulanarak küçük bir etki ve ötelenme hareketi yaratılır. Sistemden enerji açığa çıkmaz. Bilye ve konkav yüzeyden oluşan sistem, stabil olarak tanımlanır. Şekil 4.21.b'ye göre, sistemde bilye üzerine küçük bir etki ile dışı doğru büyük bir ötelenme oluşur, ancak hiçbir enerji açığa çıkmaz. Bu sistem kararsız olarak adlandırılır. Şekil 4.21.c'de küçük bir etki, büyük bir ötelenme ve sistemde depolanmış potansiyel enerjiyi kısmen kinetik enerji olarak açığa çıkarır. Diğer bir ifade ile, sistemden enerji dışarıya verilir. Bu sistem stabil olmayarak tanımlanır.



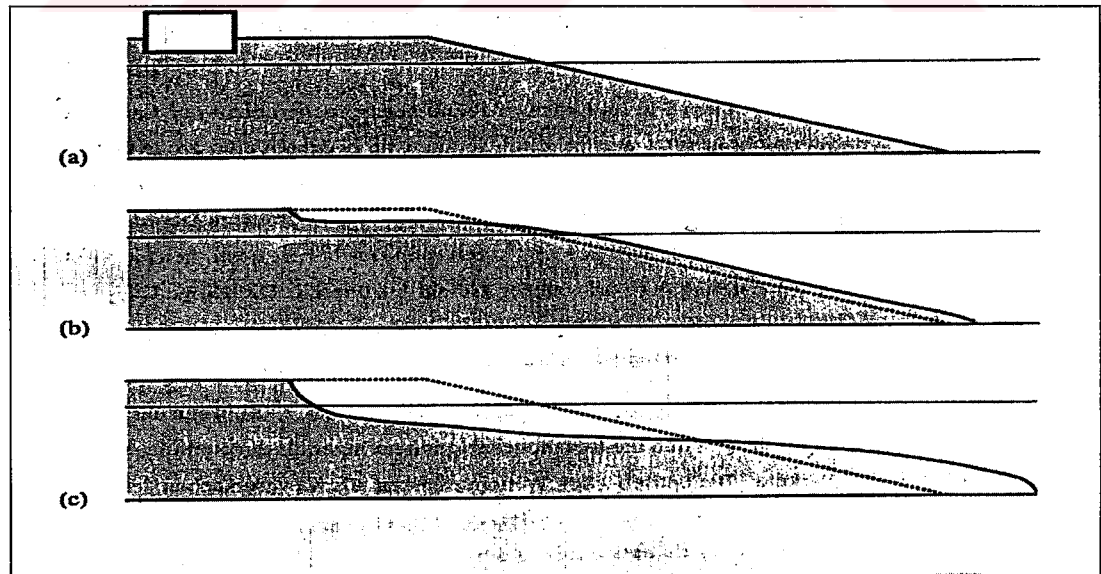
Şekil 4.21. Stabilite analizinde denge koşulunun üç farklı durumu [44].

Artık stabilite probleminin kantitatif tanımı yapılabilir. Eğer uygulanan küçük bir etki üzerine tepki de aynı küçüklükte oluyor ise, o zaman sistem stabildir. Buna göre; denge durumunda bulunan bir sistem kinematik olarak mümkün bir hız alanına maruz kalırsa, yapılan net işe dayalı bir stabilite kriteri HILL tarafından önerilmektedir.

$$\text{Net iş} = \text{İç enerjideki artış} - \text{Dış kuvvetlerin yaptığı iş} \quad (4.27)$$

Eğer yapılan iş tüm hız alanları için pozitif ise, sistem stabil olarak tanımlanır. Eğer net iş sıfıra eşit ise, sistem kararsızdır. Net iş en az olası bir hız alanı için negatif ise, sistem stabil olmayarak tanımlanır.

Pasa şevleri de bir iç veya dış etki vasıtasıyla kayabilir. Burada şevler stabil, karasız ve stabil olmayan denge koşullarına göre düzenlenir. Eğer zemin en azından orta sıkılıkta biriktirilmiş ve şev eğimi içsel sürtünme açısından daha küçük ise, şev stabildir (şekil 4.22.a). Bu durumda; ulaşım, inşaat çalışmaları veya meteorolojik etkiler, ancak çok küçük deformasyonlara neden olur. Zemin gevşek yığılmış ise, şev kararsız denge durumunda bulunur (şekil 4.22.b). Küçük tekrarlı etkiler, sevi adım adım artarak, fakat yıkıcı olmayan değişime yöneltir. Bu etkiler vasıtasıyla tekrarlı bir sınır denge koşuluna erişilebilir. Çok gevşek yığınlarda ise, stabil olmayan bir denge durumu söz konusudur (şekil 4.22.c). Kaçınılmaz küçük etkiler vasıtasıyla, denge koşulu yapısal olarak bozulabilir.



Şekil 4.22. Şevlerde stabil(a), kararsız(b) ve stabil olmayan(c) denge koşulları [44].

Pasa malzemesi etkileşimli ve suya doymun olduğunda ise, boşluk suyu basıncı aniden artar. Zemin tıpkı bir viskoz akışkan gibi davranır ve kayma (akma) başlar. Bunu takiben büyük oturmalar ve yatay hareketler oluşur. Diğer bir ifade ile, sistem bir etki vasıtasıyla kinetik enerji açığa çıkarabilir. Kayma; boşluk suyu basıncının kaybolması ve sistemin yeni bir denge durumuna erişmesine kadar devam eder. Genellikle kaymalar metrelerce süreceğinden, pasa bölgeleri yeniden kullanım için tamamen imkansız ve hatta yaşam tehlikesi oluşturlar. Bu nedenle, dekapaj döküm sahsındaki pasa şevlerinin stabilitesi son derece önemlidir [42-45].

Burada; yeter derecede stabilite analizi için, araştırılan bölgede doğal porozitenin, suya doymunluk derecesinin, birincil gerilme durumlarının ve malzeme bileşim değerlerinin belirlenmesi temel koşuldur. Bu amaçla;

- in-situ (yerinde) incelemeler değerlendirilir,
- gerilmeler arasındaki ilişki bulunur,

$$\sigma'_1 = \sigma'_v = \gamma \cdot z \quad ; \quad \sigma'_3 = \sigma'_h = K_0 \cdot \gamma \cdot z \quad (4.28)$$

$$\tau = c + \sigma'_1 \cdot \tan \phi \quad (\text{genel}) \quad (4.29)$$

- konsolidasyon gerilmesi belirlenir,

$$s' = \frac{(\sigma'_{h10} + \sigma'_{u10})}{2} = f(z) \quad (4.30)$$

- temsilli malzemenin dane boyut dağılım spektrumu araştırılır,
- malzemenin dayanım parametreleri belirlenir.

Pasa şev stabilite analiz yöntemlerinde, bu tanım büyüklüklerinin kullanımı koşullara bağlıdır. İncelemeler sonucu emniyet katsayısı $F = 1,3$ veya $F > 1,3$ bulunuyor ise, yeterli stabilite sağlanmış olur. Emniyet katsayısının risk değeri, zemin mekaniği parametrelerinin belirginliği ve araştırılan bölgenin önemine göre tespit edilir [21]. Araştırma koşullarına uygunluğu ve yukarıda belirtilen gerekçeler nedeni ile, pasa şev stabilite analizlerinin hypoplastik madde yasasına göre yapılması öngörülmüştür.

4.3. Hypoplastik Madde Yasasına Göre Stabilité Analizi

Burada tarif edilen stabilité analizi, 2.enerji yasasına dayanmaktadır [42-45]. Bir şev alanında statik denge koşullarından hareketle, sonsuz küçük ayrışımli temsili bir deformasyon alanı kabul edilir. Bu deformasyon veya hareketli alan; kinematik bakımından mümkün olabilen, ayrıca keyfi ve amaca uygun olarak mümkün olduğunca basit seçilir. Kullanılan yasaya uygun olarak gelişen deformasyon, bütün gerilme bileşenlerinin (=gerilme oranlarının) değişmesine neden olur. Deformasyon gradyenlerinden oluşan söz konusu ikinci enerji yasasının (2E) negatif değeri, sisteminde kinetik enerji olarak açığa çıkar ve bununla başlamış deformasyon frenlenir $^2E > 0$ (=Konraktanz, duraylı, stabil) veya hızlanır $^2E < 0$ (=Dilatanz, duraysız, stabil olmayan durum).

Bir kaymanın etkenleri veya kaynakları olarak söz konusu kuvvetler, dane yapısında gerilme değişimlerine, deformasyonlara ve de boşluk suyu basınç artışlarına (doğgunluk derecesi $S_r < 1$) neden olurlar. Ayrıca bu etkiler, zeminde bir kaynaktan çıkarak dalgasal olarak yayılırlar. Yukarıda sözü edilen temsili deformasyon alanında, sonlu deformasyonlar oluşur ve kritik koşullara erişebilir. Fakat burada bulunan hız vektörleri, sadece stabilité analizinde kullanılır ve gerçek koşulları temsil etmezler. Bu nedenle salt stabilité analizinde, kendiliğinden herhangi bir küçük başlangıç etkisinin gelişip gelişmeyeceğini gösterirler. Sonuç temsili ayrışma hızının büyüklüğünden bağımsızdır. Gerçek etkilere kıyasla, sonsuz etki (kinematik zincir) bütün noktalarda eş zamanlı oluşacak gibi tasarlanır. Söz konusu yasanın temel özellikleri ise aşağıda verilmektedir.

4.3.1. Hypoplastik Madde Yasası

Genel olarak malzemenin gerilme-deformasyon davranışını tarif eden bir yasadır. Bir madde yasası; gevşek yığılmış granüle malzemelerin özelliklerini kapsayabilmesi için,

- küçük ve büyük plastik deformasyonları,
- malzeme davranışının basınç bağımlı olmasını (Barotropi),
- malzeme davranışının yığın sıkılığına bağımlı olmasını (Pyknotropi),

tanımlayabilmelidir. Belirtilen özellikleri taşıması nedeniyle, çalışmada hypoplastik yasanın kullanımı öngörülmüştür. Yasa; KOLYMBAS tarafından 1977 yılında, Karlsruhe üniversitesi zemin ve kaya mekaniği enstitüsünde geliştirilmiştir.

Hypoplastik madde yasası oransal biçimde, yani gerilme ve deformasyonlar arasındaki oranla ilişkilidir. Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi sonlu değil, bilakis diferansiyel bir eşitlikle verildiğinden, çok daha doğru sonuçlar sunar. Elasto-plastik yasaya kıyasla yükleme-boşaltma, akış yüzeyi ve şekli gibi kavramlar kullanılmaz. Hypoplastik madde yasası, tüm deformasyon yönleri için tek bir eşitlik ile verilir. Bu yasaya göre malzemenin mekanik davranışı dört temel büyüklük ile tanımlanır.

- Granüle malzeme sertliği h_g (yüksek basınçlı konsolidasyon deneyi ile belirlenir),
- Granüle malzeme içsel sürtünme açısı ϕ_g (kesme deneyi ile belirlenir, yaklaşık bunun için gevşek malzemenin şev açısı kullanılabilir),
- Düzgün akış sıfır basınçta porozite oranı e_{f0} (yaklaşık gevşek yığındaki e_{max} alınabilir),
- Sıfır basınçta kesme gerilmesine göre porozite oranı e_{c0} (yaklaşık sıkı yığındaki e_{min} alınabilir).

Ayrıca; konsolidasyon ve üç eksenli basınç deneyleri ile, α , β ve h_0 parametrik büyüklükleri de belirlenebilir. Fakat, bunlar değişik kumlar için yaklaşık aynı değerleri alabilirler [44,45].

4.3.2. Hypoplastik Madde Yasasının Kullanım Özellikleri

Hypoplastik madde yasası; fiziksel esaslara dayalı, durum değişkenlerinin açık bir matematiksel ifadesi, basit tasarlanabilir ve geniş ölçüde bağımsız malzeme parametreleri vasıtasıyla tanımlanır. Akma yüzeyleri ve şekline gereksinim olmaksızın, elastik ve plastik deformasyonlar arasında da fark gözetilmez. Eşitlik; oransal tiptedir ve deformasyon oranları, dane gerilmeleri ve porozite oranı vasıtasıyla tanımladığından, objektif bir gerilme değerini ifade eder. Zemin davranışı üzerine basınç düzeyinin ve sıklığın etkisi dikkate alınır. Duraylılık, duraysızlık ve kritik içsel sürtünme açısı ise, zemin durumu ve deformasyon yönlerinden belirlenir. Hypoplastik madde yasası; dane temas kuvvetleri ve rölatif ötelenmelerin ortalama değeriyle karakterize edilebilen, basit çimentolanmamış dane yapılarının mekanik davranışını tanımlar. Buna göre, hypoplastik yasanın kullanım özellikleri:

- Zemin durumu yalnız dane gerilme tansörü ve porozite oranı ile tanımlanır,
- Daneler granülometrik olarak ayrışık, yani topaklanma ve dane bölünmeleri ihmal edilir,

- Porozite oranının bir üst ve alt sınırı vardır, her ikisi de basınçla azalır,
- Ortalama basınç ile azalan bir kritik porozite oranı vardır,
- Dane yapısı oran ve yön bağımsız davranır (anizotrop durum),
- Etkin gerilmeler prensibi vardır,
- Fiziko-kimyasal etkiler ve katı cisim ayrışmaları ihmal edilir,
- Gerilme eğrileri; başlangıç durumundan bağımsız olarak, orantılı gerilme eğrilerinde asimtotik olarak meydana gelirler.

Hypoplastik madde, toplam sekiz malzeme parametresi ile karakterize edilir:

ϕ_g , h_g , n , e_{io} , e_{co} , e_{fo} , α ve β . Bunlar, malzemenin granülometre özellikleri ile çok sıkı ilişkilidir ve basit indeks deneyleri ile belirlenebilirler. Hypoplastik eşitliğin kullanılabilmesi için, ek olarak iki büyüklüğe daha gereksinim vardır: İn-situ porozite oranı ve dane gerilme bileşenleri. Gerilme ve dayanımlar hypoplastik yasa yardımıyla malzeme özellikleri, durum değişkenleri ve deformasyon yönlerinden belirlenir.

Bu yasa; elesto – plastik yasaya karşın elastik ve plastik kısımlardaki deformasyonların keyfi dağılmadığını kabul eder ve ilk defa GUDEHUS ve RAJU tarafından gevşek yığılmış, ayrışık daneli zemin üzerinde, özellikle pasa şevlerinde kullanılmıştır. Burada, önemli bir etkiye sahip olan zeminin sıkılığı da göz önünde bulundurulur [21]. Bunun için şev geometrisi ve başlangıç gerilme durumlarının laboratuvarında belirlenmiş hypoplastik zemin parametreleri yanında, şevde porozite daha doğrusu sıkılık dağılımı tespit edilmelidir. Özellikle tanıtılan yasanın prensipleri:

- Hypoplastik yasa; makro boşluklar, organik kısımlar ve yabancı daneler içermeyen basit bir dane yapısının davranışını tanımlar.
- Aşırı gevşek yığınlardaki doğal pasa yığınlarının mekanik davranışı bundan tamamen farklı olabilir. Bu nedenle, makro boşlukların ve ayrık yapıların su ile dolmasıyla oturması sonrasında dane yapısı tanımlanır.
- Hypoplastik yasanın basit dane yapısı üzerine sınırlı olması nedeni ile, sedimantasyon etkisi de dikkate alınmaz.

- 2. Enerji yasasının hesapla sonuçlanacak dağılımının değerlendirilmesi henüz tamamen açıklık kazanmamıştır. Geniş ölçüde bir integral alma durumu, uygun olmayan ayırık noktaların dikkate alınmasıyla giderilebilir.
- Ani bir kayma sadece lokal olarak ortaya çıksa ve kısa süre sonra dursa dahi, yeni bir denge koşulu sınır denge durumuna çok yakın davranabilir. Örneğin aşırı boşluk suyu basıncının yapılanması sırasında, klasik kayma mekanizması, tıpkı kademeli kayma gibi, bu yöntemin karşısı olmaz.
- Yasa, tek malzeme parametrelerini ve ortalama değer olarak tam tanımlanmış koşul büyüklüklerini şev'e tatbik eder. Başlangıç koşulunun ve malzeme dağılımının heterojenliği ve de duraysız şev alanlarının sınırlandırılmasında, prensip olarak bir belirsizlik görülür.
- Stabilité analizinin sözü edilen nedenlerden dolayı, öncelikle örneklemelerde kullanımı önerilir [21].

4.3.3. Hypoplastik Parametre Büyüklükleri ve Etki Faktörleri

Hypoplastik malzeme parametrelerinin tespiti; elemanter deneyleri yani homojen özellikteki numuneleri gerektirir ve örselenmiş numunede uygulanır. Araştırılmış zeminlere ait hypoplastik parametrelerin bir listesi, tablo 4.4'te verilmektedir.

Tablo 4.4. İncelenmiş zeminlerin hypoplastik parametre büyüklükleri [21,45].

Kum	h_g (MPa)	n (-)	e_{fo} (-)	e_{co} (-)	e_{io} (-)	ϕ_g (°)	α (-)	β (-)
Ticiono	250	0,68	0,938	0,59	1,105	31	0,11	1,00
Toyoura	120	0,69	0,98	0,61	1,127	32	0,12	1,00
L.Buzzard	6400	0,45	0,79	0,49	0,934	31	0,16	1,00
Hokksund	150	0,70	0,874	0,533	1,01	31	0,09	1,00
Monterey	8000	0,35	0,834	0,54	0,90	32	0,07	1,00
Berlin	3730	0,20	0,75	0,46	0,90	32	0,14	1,00
Kleinkoschen	7450	0,11	0,90	0,45	1,04	34	0,14	1,0
Schlabendorf	1000	0,20	0,85	0,48	1,00	31	0,25	1,0
Quiou	75	0,45	1,281	0,831	1,41	36	0,05	1,0
Dogs Bay	30	0,72	1,827	0,981	2,192	40,6	0,05	1,0
Zwenkau	42	0,22	1,14	0,60	1,31	32	0,10	3,0
TKİ-Muğla	162	0,72	0,94	0,52	1,128	41	1,63	13,2

Hypoplastik parametre büyüklükleri, malzeme granülometresi ile ilişkili olarak değişkenlik gösterirler. Bunlardan;

- ϕ_g , keskin köşelilik ve dane büyüklüğü ile artar,
- h_g , mineralin sertliği, eş şekilliği ve yuvarlaklığı ile artar,
- n , yuvarlaklık ve dane büyüklüğü ile artar, eş şekillilik ile azalır,
- e_{co} ve e_{fo} , yuvarlaklık ve dane büyüklüğü ile azalır,
- e_{io} , yuvarlaklık, eş şekillilik ve dane büyüklüğü ile azalır.

Ayrıca söz konusu parametreler, stabilite analiz sonuçları üzerine farklı büyüklüklerde etki eder. Bu yüzden bazı parametreler tahmin edilebilirken, bazıları daha güvenilir belirlenmek zorundadır. Özellikle sıfır basınçtaki kritik boşluk oranı için porozite değeri belirleyicidir, çünkü zemin davranışı küçük basınç değişiminde doğrudan büyük etkilere sahip olabilmektedir. Buna göre; analiz sonuçları üzerine,

Büyük etkiler:

- şev geometrisi,
 - şev açısı β (yatay gerilme oranı K_o ile ilişkili olarak)
- koşul büyüklükleri,
 - in-situ porozite oranı e
 - ilerleme yönüne dikey etkiyen yatay gerilme oranı K_o
- hypoplastik malzeme parametreleri,
 - sıfır basınçtaki porozite oranı e_{fo} ve çok gevşek yığın
 - konsolidasyon basıncı için üstel değer n

Etkiler:

- şev geometrisi,
 - baraj oranı H_{WK}/H_K
- koşul büyüklükleri,
 - doyumluk derecesi S_r
- hypoplastik malzeme parametreleri,
 - sıfır basınçtaki kritik içsel sürtünme açısı ϕ_g
 - sıfır basınçtaki porozite oranı e_{co} ve en sıkı yığın
 - granüle malzeme sertliği h_g

Düşük etkiler:

- şev geometrisi,
 - şev yüksekliği H_K
- hypoplastik malzeme parametreleri,
 - e_{i0}/e_{f0} oranı
 - içsel sürtünme açısının yükselmesi için üstel değer α
 - konsolidasyon katsayısının artması için üstel değer β

Şimdiye kadar sadece ampirik değer olarak, örneğin kritik baraj oranı (H_{WK}/H_K) 0,2-0,8 aralığında olduğu kabul görmüştür. En büyük etki, in-situ porozite oranıdır. Fakat bu tek başına kullanılmaz, bilakis sınır porozite oranı e_c ve e_d oranı, yani basınç bağımlı rölatif sıkılık indeksi (I_D , I_p) ile birlikte dikkate alınır [21,44].

4.3.4. Başlangıç Gerilme Durumunun Belirlenmesi

Ana gerilme ekseninin büyüyerek dönmesi ile kinetik enerjinin açığa çıktığı şev yüzeyinin eğimi artacağından, stabilite analizi için başlangıç gerilme durumunun gerçek tahmini önemlidir. Genel olarak güvenilir gerilme ölçümleri bulunamıyorsa, aşağıdaki kabuller yapılır:

- Döküm faaliyetleri sırasında şevde aktif sınır koşulu oluşur (RANKIN'e göre),
- Şev yüzeyinde sonradan yapılan eğim azaltma çalışmaları olmazsa, aktif yüzey basıncı daneli zeminlerde yaklaşık aynı kalır,
- Şev gerisinde yaklaşık olarak statik yüzey basıncı etkindir. Yatay arazide statik basınç katsayısı $K_0 = 1 - \sin\phi$ 'dir (JAKY'a göre),
- Oluşum nedeni ile ayırık bölgesel değişken basınçlar ihmal edilir,
- Şev topuğundaki gerilme koşullarının belirlenmesi şekil 4.23'de verilmiştir,
- Şev'in şekillendirilmesinden sonra (eğim azaltma, sıkıştırma vb.) tekrarlanan küçük dökümler ve diğer etkiler (su seviyesindeki dalgalanmalar) uzun zaman sonra da şev kenarında aktif ve statik basınç arasında bir gerilme farkı yaratabilir,
- Şev yüzeyi ve gerisi arasındaki geçiş bölgesi lineer olarak değişir,
- Aktif ve statik yüzey basıncı arasında şev'in ilerleme yönüne paralel bir gerilme oluşur ve yaklaşık diğer iki ana gerilmenin ortalama değeri olarak kabul edilir.

Pasa şev kayma riskinin belirlenmesi için, değişik şev noktalarında gerilme oranının $\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = K_c$ bilinmesi gereklidir. Aranan gerilme oranı, $K_c = \frac{1}{K_0}$ ve $K_c = \frac{1}{K_a}$ aralığında bulunur. Tam olarak aşağıdaki ampirik eşitliğe göre hesaplanabilir [19].

$$\frac{1}{K_c} = K_0 + (K_a - K_0) \cdot \left[2 \cdot \frac{\beta}{\phi} - \left(\frac{\beta}{\phi} \right)^2 \right] \cdot \left[\frac{90^\circ - \Psi}{90^\circ - \beta} \right]^2 \quad (4.31)$$

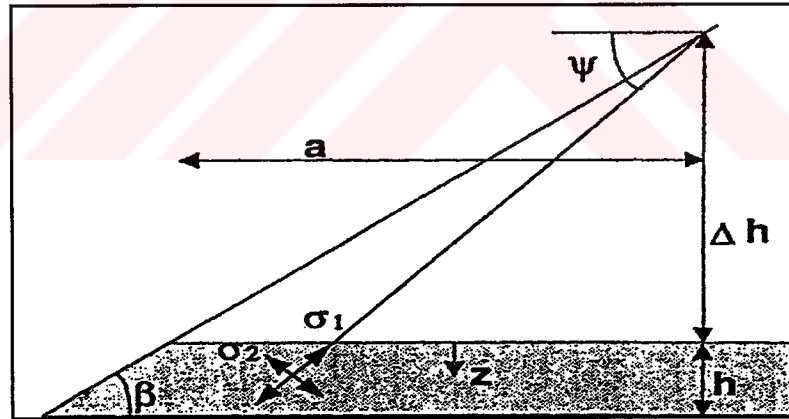
Geometrik büyüklükler ve sınır koşulları ise;

$$a = 5h, \quad \Delta h = a \cdot \tan \beta \quad (4.32)$$

$$\frac{1}{K_c} = K_0; \quad \Psi = 90^\circ \quad (4.33)$$

ve herhangi bir β açısı için,

$$\frac{1}{K_c} = K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right); \quad \Psi = \beta = \phi \quad (4.34)$$



Şekil 4.23. Yüksüz bir şev için gerilme bileşenleri [46].

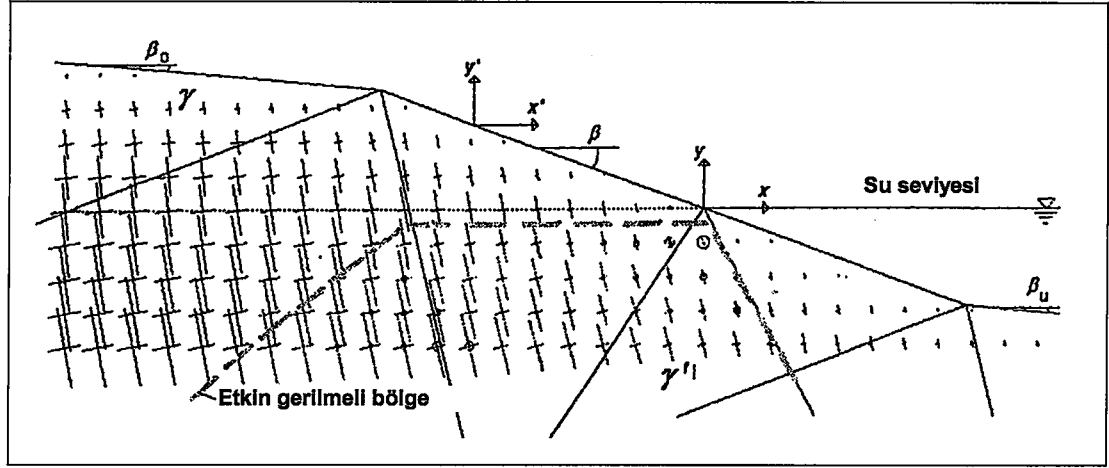
Şev yüzeyindeki herhangi bir (x /y) koordinat noktasına göre, yüksüz bir şev için gerilme bileşenleri:

$$\sigma_{xx} = \gamma \cdot K \cdot (y' + x' \cdot \tan \beta) \quad (4.35)$$

$$\sigma_{yy} = \gamma \cdot (K \cdot \tan^2 \beta + 1) \cdot (y' + x' \cdot \tan \beta) \quad (4.36)$$

$$\sigma_{xy} = \gamma \cdot K \cdot \tan \beta \cdot (y' + x' \cdot \tan \beta) \quad (4.37)$$

Ana gerilme değişimleri ve bununla şev genelinde kayma gerilmeleri doğrudan bir ifade bulduğundan, stabilite hesaplamaları için bu kullanım çok iyi bir uyum sağlamaktadır (şekil 4.24).



Şekil 4.24. Pasa şev geometrik büyüklükleri ve sınır koşulları [21].

Burada, yanal basınç katsayısı K ; aktif basınç katsayısı,

$$K_a = \frac{\sigma_{xx}}{-\gamma \cdot h} = \frac{1}{\cos^2 \phi} (\sin \phi \cdot \cos(2\Psi) + 1)^2 \quad (4.38)$$

$$2\Psi = \pi + \beta - \arcsin\left(\frac{\sin \beta}{\sin \phi}\right) \quad (4.39)$$

ve statik basınç katsayısı,

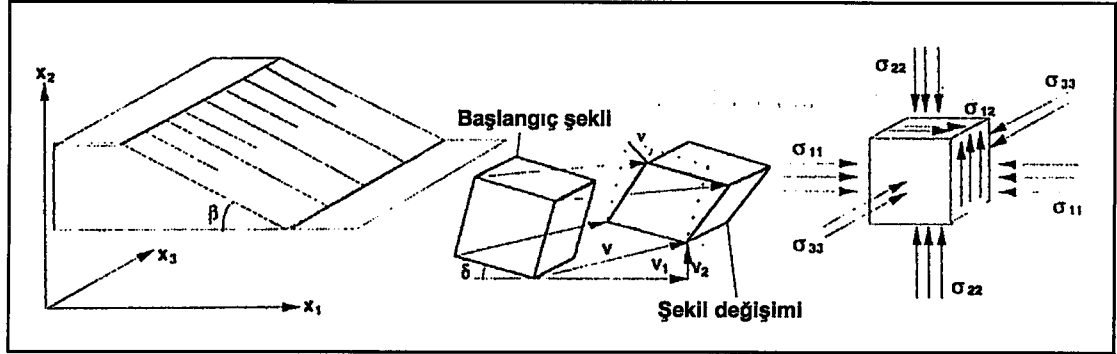
$$K_0 = \frac{\sigma_{xx}}{-\gamma \cdot h} = 1 - \sin \phi + (\cos \phi + \sin \gamma - 1) \cdot \frac{\beta}{\phi} \quad (4.40)$$

$$2\Psi = \arctan\left(\frac{2 \cdot K_0 \cdot \tan \phi}{K_0 \cdot (1 - \tan^2 \phi) - 1}\right) \quad (4.41)$$

arasında, ayrıca pasif yüzey basınç katsayısına (K_p) kadar değişebilir. Muhtemel maksimum ana gerilme eğimi (Ψ açısı yatay ve en büyük gerilme arasında) ve bununla en yüksek kayma gerilmesi oranı $\beta < \phi$ için aktif sınır koşulu belirlenir. Ancak şev yüzeyine yakın yığılmış sonsuz uzunluklu bir şevin kabulü ile gerilme oranları yaklaşımsal olarak tanımlanır. Gerçek durumda, şev gerisindeki ve şev topuğundaki gerilme oranları ve de su seviyesi değişimleri, gerilme bileşenleri üzerine etki eder. Böylece, sınır koşulunun korunup korunmayacağı kontrol edilir.

4.3.5. Stabilité Hesaplaması

İkinci enerji yasası, bir şevin yatay deformasyonunda ilgili birim hacim elemanı üzerine hesaplanır (şekil 4.25).



Şekil 4.25. Bir şev elemanında gerilme yönleri ve şekil değiştirme tasarımı [21].

$$\begin{aligned} \Delta^2 E = & \dot{\sigma}'_{11} \cdot g_{11} + \dot{\sigma}'_{12} \cdot g_{21} + \dot{\sigma}'_{22} \cdot g_{22} + \dot{\sigma}'_{21} \cdot g_{12} + \sigma'_{12} \cdot (g_{11} \cdot (g_{12} - g_{21}) - g_{22} \cdot (g_{12} - g_{21})) + \\ & \sigma'_{11} \cdot \left(g_{11} \cdot g_{12} - g_{12} \cdot g_{21} - \frac{g_{12}^2}{2} - \frac{g_{21}^2}{2} \right) + \sigma'_{22} \cdot \left(g_{11} \cdot g_{22} - g_{12} \cdot g_{21} + \frac{g_{12}^2}{2} - \frac{g_{21}^2}{2} \right) - \\ & P_w \cdot \left(\frac{1+e}{3(S_r-1)} \cdot (g_{11} + g_{22})^2 + 2 \cdot g_{11} \cdot g_{22} - 2 \cdot g_{12} \cdot g_{21} \right) - \gamma_w \left(\frac{1+e}{e} \cdot (g_{11} + g_{22}) \right) v_2 \end{aligned} \quad (4.42)$$

Şekil 4.25'e göre burada; σ'_{11} efektif yatay gerilme, σ'_{22} efektif düşey gerilme ve σ_{12} ise x_1 - x_2 düzlemindeki kayma gerilmesidir. g_{ij} şekil değiştirme ivmeleri için $\frac{\partial V_i}{\partial X_j}$ ve dikkate alınan hız bölgesindeki malzemenin özelliğine göre belirlenir. $\dot{\sigma}'_{ij}$ efektif gerilme oranlarını tanımlar. P_w büyüklüğü ise boşluk suyu basıncını (pozitif basınç) tanımlar. γ_w su yoğunluğu (negatif, v_2 yukarı doğru yapılarak pozitif gösterilmiştir), e in-situ porozite oranı ve S_r başlangıç konfigürasyonundaki suya doygunluk derecesidir.

Dikkate alınan her ayrı nokta için $\Delta^2 E = 0$ stabil, $\Delta^2 E < 0$ stabil olmayan durumu tanımlar. $\Delta^2 E$ 'nin değeri, gerçek koşullar için bir şey ifade etmese de, stabilite analizinde öngösterge bakımından önemlidir. $\Delta^2 E$ 'nin belirlenmesinde tasarlanmış herhangi bir küçük deformasyon bölgesi için sistemin bir momentini almak yeterlidir. Böylece madde yasasının külfetli bir zaman integrasyonu azalır.

Şekil değiştirme bileşenleri g_{11} , g_{12} , g_{22} ve g_{21} ; kesme açısına (δ) ve dilatanz açısına (v) bağlı olarak öyle değişir ki, çok büyük serbest enerji açığa çıkar. Özellikle toplam düşey gerilmenin ($\sigma_{22}=0$) sabit kaldığı, şekil değiştirme bileşenlerinin böyle

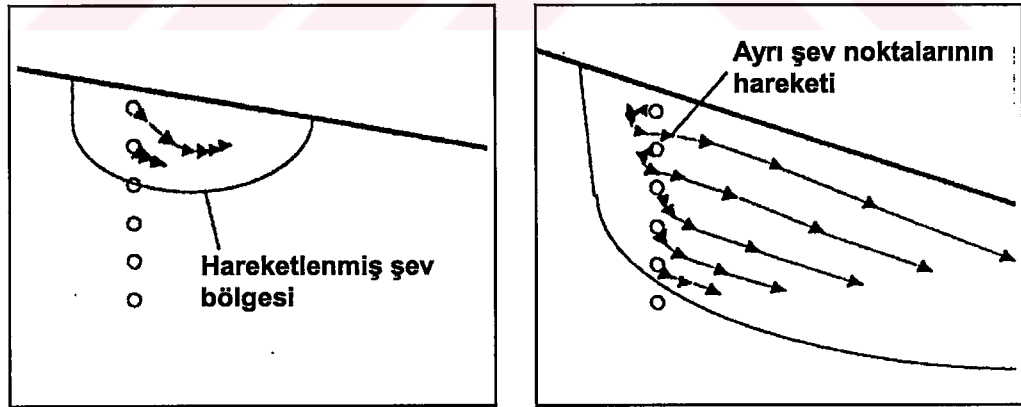
kombinasyonları araştırılır. Bu; doğal yığınların ölü yük altında deforme olmuş şev alanının korumasız yanal duraysızlığına uygundur. Burada; aşırı gevşek yığınlardaki pasa malzemeleri etkileşimli bir davranış gösterirler ($v < 0$). Şekil 4.26'a göre şevler için iki durum ayırt edilir:

1-Lokal duraysızlık oluşur ve yalnız dar kapsamlı şev bölgesinde kabul edilir. Bir deformasyon alanı, kinetik enerji artışı yarattığında ($\Delta^2 E < 0$) bu duraysızlık;

- lokal bir bölgeyle sınırlı kalabilir, eğer akma hareketi başlangıç ivmesinden sonra büyük alansal kinematik etkiler vasıtasıyla ($\Delta^2 E > 0$) farklı bir yöne çevrilirse, bu deformasyon sınırlı hareketlerden sonra tekrar durabilir.
- akmaya yönelebilir, eğer serbest kalan kinetik enerji vasıtasıyla hızlanan deformasyon, yerel olarak engellenmesi mümkün değilse (bir şev bölgesinin akması $\delta < \beta$) gelişir.

2-Global duraysızlık ve bununla geniş alanlı akmalar beklenebilir, eğer diğer bir alan üzerine vasıtalı olarak $\Delta^2 E < 0$ iletilerek olası bir kinematik deformasyon alanı yaratılıyorsa, sonuç tüm noktaların $\Delta^2 E$ toplam değeriyle verilir (integral alma).

Eğer $\Delta^2 E < 0$ olacak şekilde bir mekanizma oluşursa, şev'in akmasına ($\delta < \beta$) yönelten duraysızlık gerçekleşir, çünkü başlangıç deformasyon yönü ivmelenerek, kinematik bakımdan global kayma mümkün olur.

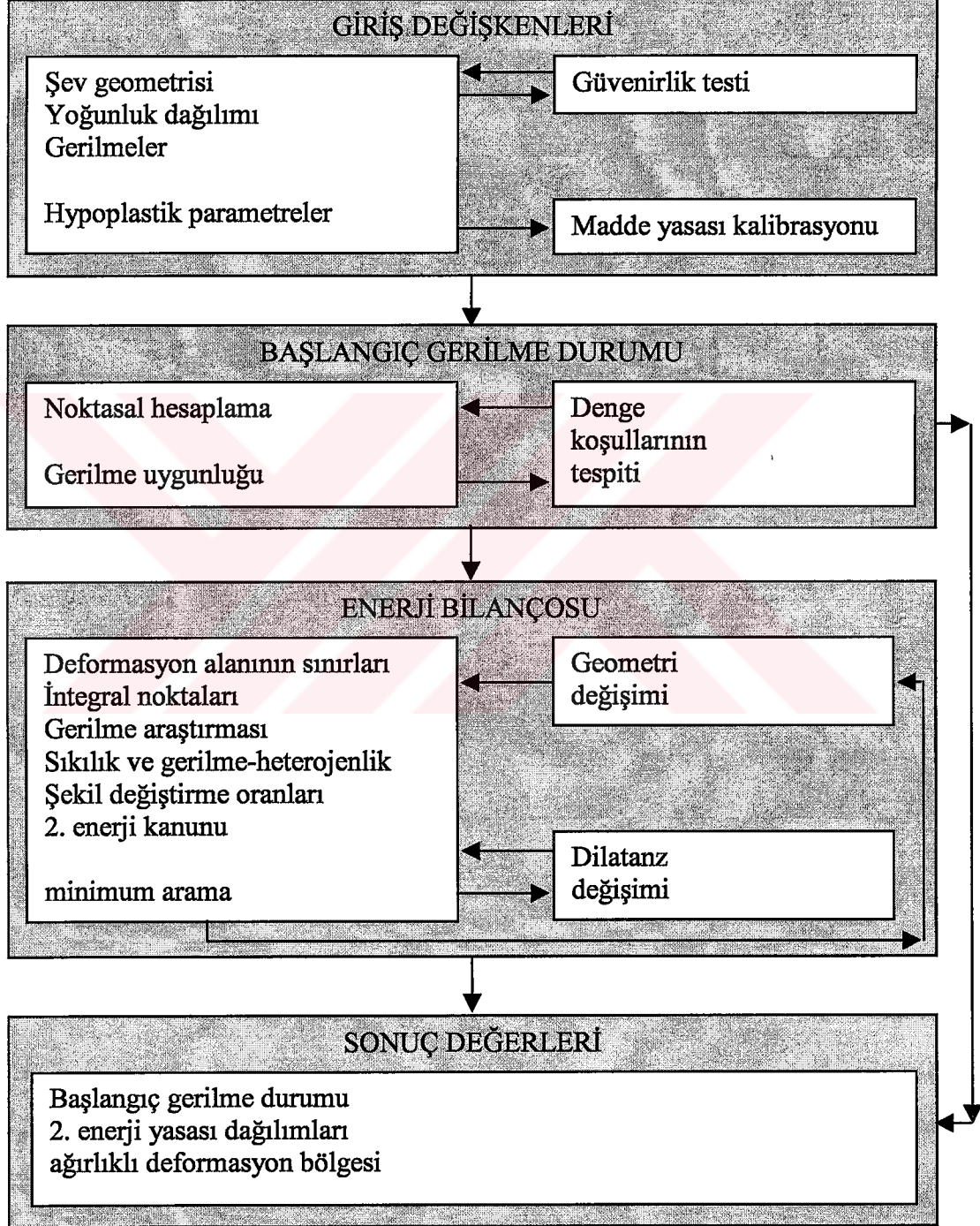


Şekil 4.26. Şev bölgesinde lokal (sol) ve global (sağ) duraysızlıkların şematik oluşumu [21].

Böylece; pasa şev stabilite analiz sonuçları, herşeyden önce şevdeki aktüel koşul büyüklüklerine, yani in-situ porozite oranı ve başlangıç gerilme durumlarına bağlıdır [21,44].

4.3.6. Bilgisayar Algoritması ve Model Deneyler

Bölüm 4.3.2’de açıklanan kriterler farklı bilgisayar programlama dillerinde düzenlenebilir. Algoritması verilen program; şevdeki yatay bir kesiti araştırır ve şekil 4.27’de gösterilen adımlardan oluşur. Algoritma, değişik şev tasarımları için de kullanılabilir ve geliştirilebilir.

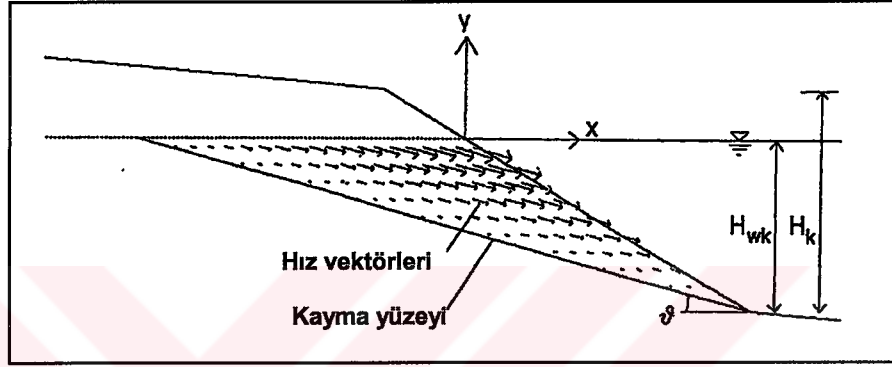


Şekil 4.27. Pasa şev stabilitesi analizi için genel algoritma akış diyagramı [21].

Burada tasarlanan büyük bir şev alanı için, hız gradyenlerinin integrasyon noktalarından sağlanan deformasyon hızlarının temsili bir alanı hesaplanır. Öyle ki; deformasyon alanları, kinematik olarak mümkün Durum (a) ve (b), kinematik mümkün olmayan Durum (c) şeklindeki üç durum arasında seçilebilir.

- **Kama Şekilli Kayma Alanı (Durum (a))**

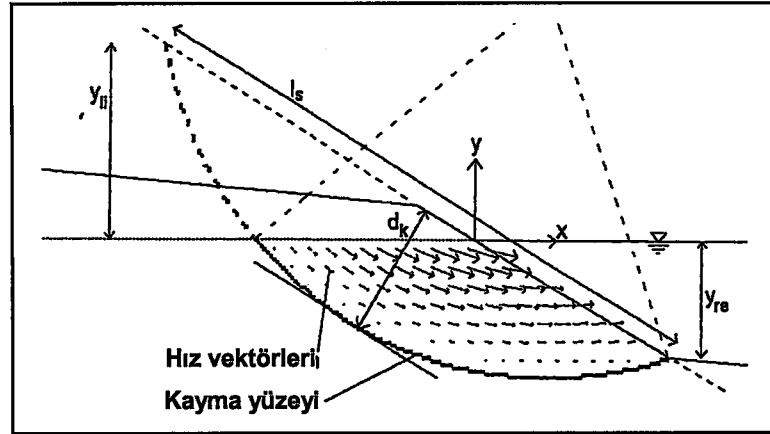
Tepe noktasında bir maksimumdan başlayarak kayma yüzeyinde sıfıra kadar düşen kamada, kesme hızının lineer bir dağılımı kullanılır. Kama; şev topuğundan su seviyesine kadar uzanır ve bu bir yüzey açısı ile belirlenir ($0 < \alpha < \beta$) (şekil 4.28).



Şekil 4.28. Hız vektörleriyle kama hareket bölgesi [21].

- **Dairesel Kayma Alanı (Durum (b))**

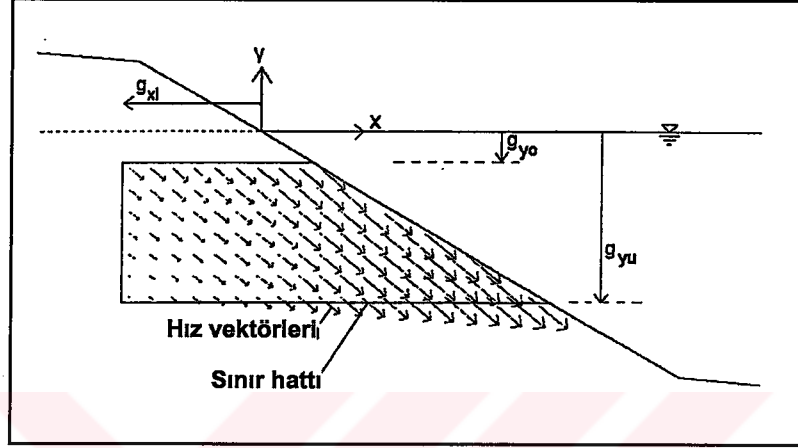
Şev bir dairesel çanak kesitlidir. Bu daire; kesit uzunluğu l_a , daire kesit kalınlığı d_k ve (y_{li} , y_{re} üst/sol ve alt/sağ kesit noktalarının) y koordinatlarıyla ana şevde net olarak belirlenir. Kayma hızı; şev kenarında bir maksimumdan başlar, daire kemerine kadar lineer olarak azalarak sıfıra düşer (şekil 4.29).



Şekil 4.29. Hız vektörleri ile dairesel değişim bölgesi [21].

- **Bireysel Noktaların Dikkate Alınması (Durum (c))**

Bir dikdörtgen şev alanı sınırlandırılır ve deformasyon yönü δ , bölüm 4.3.2'ye uygun olarak her ayrı integral noktası için özel olarak temin edilir. Bunun için genellikle uygun global bir hız alanı bulunmaz. Bu kullanım yalnız lokal bir duraysızlık bilgisi verir. Ancak dik şevlerde lokal duraysızlıklar, global şev kaymasına dönüşebilir ($\delta < \beta$) (şekil 4.30).

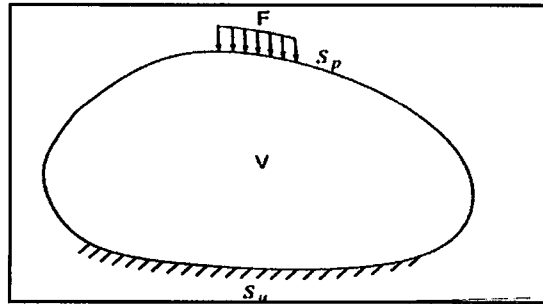


Şekil 4.30. Bireysel noktaların deformasyon alanı [21].

4.3.6.1. Stabilité Kriterleri

Sabit yükler etkisindeki bir katı cisim için HILL tarafından kullanılan matematiksel formülasyonlar aşağıda verilmektedir. Suyu doymun, gevşek granüle malzemelerin stabilitesi için bu kriterlerin kullanımı GUDEHUS tarafından önerilmiştir [46].

Şekil 4.31'de gösterilen cisim, t zaman noktasında gözetlenir. V hacmindeki cismin bir kısmı S_u alanıyla çevrilmiş ve S_p alanına F kuvveti etkidiği varsayılmaktadır. B hacimsel tepki kuvveti ve T_g gerilme alanı ile bir denge koşulunun oluştuğu kabul edilmektedir.



Şekil 4.31. Kinematik ve statik sınır koşullarıyla bir cisimdeki yük davranışları [45].

Cisimde kinematik olarak $\delta u = v \cdot \delta t$ sonsuz küçük bir kayma alanı gözlenir. δt sonsuz küçük zamanda yapılan net iş;

$$\begin{aligned} \delta E &= \Delta E \cdot \delta t + \Delta^2 E \cdot (\delta t)^2 \\ &= \int_v \left(T_g + \frac{1}{2} \dot{T}_g \cdot \delta t \right) \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \delta t \cdot dV - \int_{s_p} F_v \cdot \delta t \cdot ds - \int_v B_v \cdot \delta t \cdot dV \end{aligned} \quad (4.43)$$

Virtürel iş prensibine göre;

$$\Delta E = \int_v T_g \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \delta t \cdot dV - \int_{s_p} F_v \cdot \delta t \cdot ds - \int_v B_v \cdot \delta t \cdot dV = 0 \quad (4.44)$$

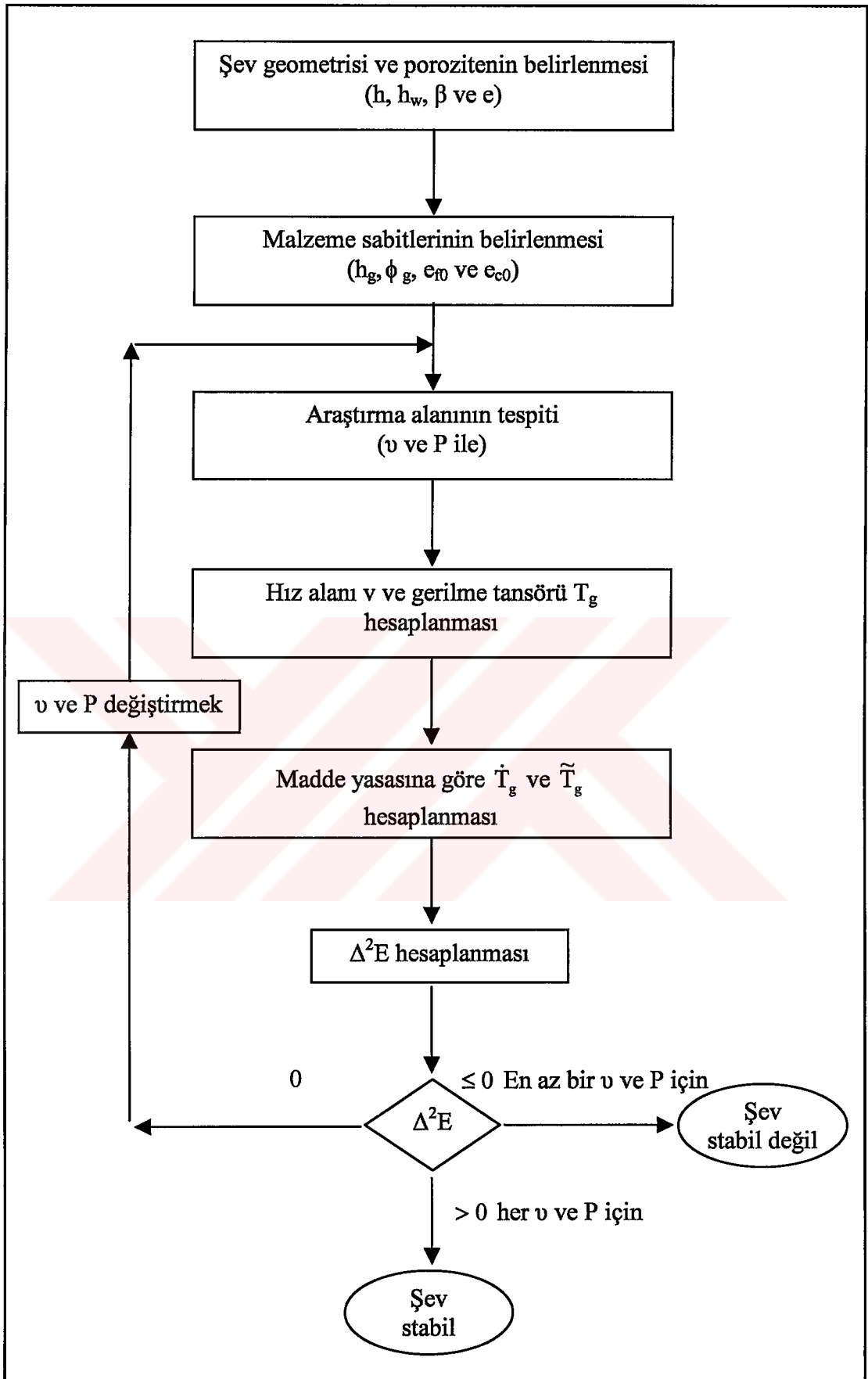
$$\delta E = \Delta^2 E \cdot (\delta t)^2 = \frac{1}{2} \cdot (\delta t)^2 \cdot \int_v \dot{T}_g \frac{\partial V}{\partial x} \cdot dV \quad (4.45)$$

Sabit yük altında stabilite için yeterli bir koşul;

$$\Delta^2 E = \int_v \dot{T}_g \frac{\partial V}{\partial x} \cdot dV > 0 \quad (4.46)$$

kinematik her hız alanı (v) için sağlanmalıdır. $\dot{T}_g$, birinci Piola – Kirchhoff gerilme tansörüdür. Eğer $\Delta^2 E \geq 0$ ise şev stabil, $\Delta^2 E < 0$ ise stabil olmayan denge koşulunu göstermektedir. Şev stabilitesi için hesaplama algoritması şekil 4.32’de verilmektedir. Aynı algoritma MATLAB 6.0 bilgisayar programı ile hazırlanmış, arazi ve laboratuvar deney sonuçlarına göre stabilite analizleri yapılmıştır.

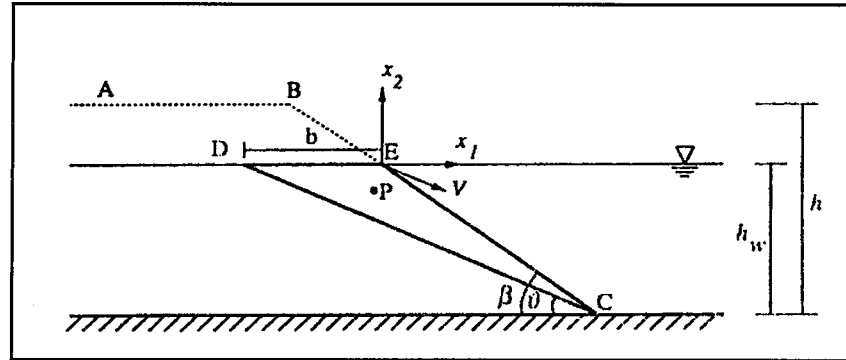
Şekil 4.32’de verilen şev stabilitesi hesap algoritmasına göre, ilk önce geometrik parametreler ve in-situ porozite oranı belirlenir. Daha sonra laboratuvarla belirlenen malzeme parametreleri tespit edilir. Stabilitesi araştırılacak bölge (v) açısı vasıtasıyla belirlenir (şekil 4.33). $\Delta^2 E$ eşitliği alana integre edilir. Daha basit olarak noktasal hesap yapılabilir (örneğin P noktası gibi). Böylece kinematik hız alanı v belirlenir ve gerilme tansörü T_g hesaplanır. Granüle malzemenin mekanik davranışı $\tilde{T}_g$ Jaumannsch gerilme eşitliği ile belirlenir. Böylece, $\dot{T}_g$ birinci Piola–Kirchoff gerilme tansörü hesaplanabilir. Hesaplama adımları, olası her (v) açısı ve P noktası için tekrarlanır.



Şekil 4.32. Pasa şev stabilitesi için MATLAB bilgisayar programı algoritması [44].

Hız Alanı :

v hız alanının belirlenmesi için DEC üçgeni gözetilir (şekil 4.33). $\overline{DC}$ uzunluğu değişmez kabul edilir. E noktası V sabit hızıyla DC'ye paralel hareket eder. Hız bölgesi, ABC alanında lineer dağıldığı varsayılır. Hareket sadece şekil düzleminde oluşur ve ayrıca hacim değişimi oluşmaz.



Şekil 4.33. Şev geometrisi ve parametrik büyüklükler [44].

Buna göre hız bileşenleri ;

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1 &= \mathbf{a}_{10} + \mathbf{a}_{11} \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{a}_{12} \cdot \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{v}_2 &= \mathbf{a}_{20} + \mathbf{a}_{21} \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{a}_{22} \cdot \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{v}_3 &= 0 \end{aligned} \quad (4.47)$$

sınır koşulları ile verilecek olursa,

$$\begin{array}{ll} \mathbf{v}_1|E = \mathbf{v}.\cos(\mathbf{v}) & \mathbf{v}_2|E = \mathbf{v}.\sin(\mathbf{v}) \\ \mathbf{v}_1|D = 0 & \mathbf{v}_2|D = 0 \\ \mathbf{v}_1|C = 0 & \mathbf{v}_2|C = 0 \end{array} \quad (4.48)$$

$$\begin{aligned} v_1 &= \cos(v) + \frac{\cos(v)}{b} \cdot x_1 + \frac{\cos(v)}{h_w} \cdot \left(1 + \frac{h_w \cdot \cot(\beta)}{b}\right) \cdot x_2 \\ v_2 &= \sin(v) + \frac{\sin(v)}{b} \cdot x_1 + \frac{\sin(v)}{h_w} \cdot \left(1 + \frac{h_w \cdot \cot(\beta)}{b}\right) \cdot x_2 \end{aligned} \quad (4.49)$$

$$\mathbf{v}_3 = \mathbf{0}$$

Burada; b $\overline{DE}$ uzunluğudur ve aşağıdaki eşitlik ile bulunur.

$$b = h_w \left(\frac{1}{\tan \psi} - \frac{1}{\tan \beta} \right) \quad (4.50)$$

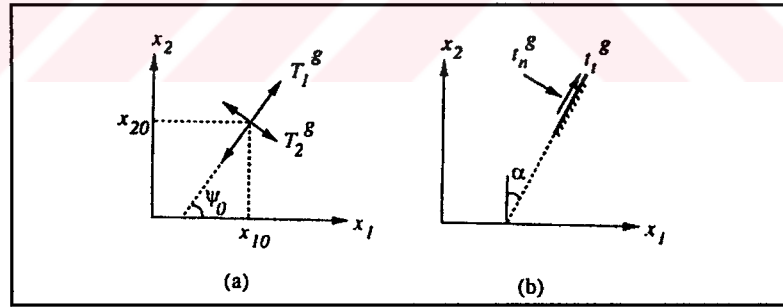
Hız alanının gradyenti ise;

$$\text{grad}V = \frac{\partial V}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\nu)}{b} & \frac{\cos(\nu)}{h_w} \cdot \left(1 + \frac{h_w \cdot \cot(\beta)}{b}\right) & 0 \\ \frac{\sin(\nu)}{b} & \frac{\sin(\nu)}{h_w} \cdot \left(1 + \frac{h_w \cdot \cot(\beta)}{b}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

Farklı hız alanlarını araştırmak için (ν) açısı değiştirilir. Lineer dağılmış hız alanının kabulü ile, hız alanı gradyentinin tüm üçgen alanda eşit olması sağlanır. Gerilme bileşenlerinin oranı da her yerde eşit alınabileceğinden, DEC üçgeninde herhangi bir noktanın dikkate alınması, stabilite analizi için yeterlidir.

Gerilme Alanı :

Bir gerilme alanı, statik koşulları sağlayan ve malzemenin sınır koşullarını aşmayacak şekilde verilmelidir. T_g 'nin tam bir temini mümkün değildir, çünkü oluşumu net olarak bilinmemektedir. Ancak; Rankine gerilme alanının lineer dağılmasından hareket ederek, herhangi bir doğrultu boyunca çözümler üretilebilir. İzlenen Rankine gerilme alanı şekil 4.34'te verilmiştir.



Şekil 4.34. Rankine gerilme alanı için tansörel büyüklükler [44].

Büyük asal gerilme T_1^g ile herhangi bir noktadan (x_{10}, x_{20}) hareketle, ana gerilmenin ortalama değeri;

$$T_m^g = \frac{1}{2} \cdot (T_1^g + T_2^g) \quad (4.52)$$

$$T_m^g - T_{m0}^g = \frac{\gamma}{\cos^2 \phi} \cdot [(x_1 - x_{10}) \sin 2\psi_0 \cdot \sin \phi + (x_2 - x_{20}) (1 + \sin \phi \cdot \cos 2\psi_0)] \quad (4.53)$$

Tasarlanan herhangi bir α açısı için gerilmeler ;

$$t_n^g = T_m^g [1 + \sin \phi \cdot \cos 2(\psi_o + \alpha)] \quad (4.54)$$

$$t_t^g = T_m^g [\sin \phi \cdot \sin 2(\psi_o + \alpha)] \quad (4.55)$$

Yüksüz şev başlangıç koşullarına göre $T_{m0} = 0$ ve;

$$2\psi_o = -\arcsin(\sin \beta / \cos \phi) + \beta + \pi \quad (4.56)$$

Buna göre gerilme bileşenleri ;

$$T_{11}^g = T_m^g (1 + \sin \phi \cdot \cos 2\psi_o) \quad (4.57)$$

$$T_{22}^g = T_m^g (1 - \sin \phi \cdot \cos 2\psi_o) \quad (4.58)$$

$$T_{12}^g = T_{21}^g = T_m^g (\sin \phi \cdot \cos 2\psi_o) \quad (4.59)$$

$$T_{33}^g = K \cdot T_{22}^g \quad (4.60)$$

$$K = 1 - \sin \phi \quad (4.61)$$

$$T_{13}^g = T_{23}^g = 0 \quad (4.62)$$

g : Gronüle malzeme gerilme indisi demektir.

Böylece, T_g Cauchy gerilme tansörü belirlenmiş olur.

Gerilme Oranı :

Eğer gerilme alanı T_g ve hız alanı v belirlenmiş ise, $\Delta^2 E = \int_v \dot{T}_g \cdot \frac{\partial V}{\partial X} \cdot dV$

eşitliğindeki $\dot{T}_g$ gerilme oranı, hypoplastik madde yasasına göre hesaplanır. Piola-Kirchoff gerilme oranına göre;

$$\dot{T}_g = \tilde{T}_g + W \cdot T_g - T_g \cdot D + T_g \cdot \text{tr} D \quad (4.63)$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot ((\text{grad} v) + (\text{grad} v)^T) \quad (4.64)$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot ((\text{grad} v) - (\text{grad} v)^T) \quad (4.65)$$

D : Dağılma hız tansörü,
 W : Dönme hız tansörüdür.

Temel eşitlikteki son üç terim çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. Buna göre; $W \cdot T_g - T_g \cdot D + T_g \cdot \text{tr} D = 0$ olup, $\dot{T}_g = \tilde{T}_g$ yazılabilir.

GUDEHUS ve BAUER'e göre ;

$$\tilde{T}_g = -a_1 \cdot f_b \cdot f_e \cdot \text{tr} T_g [L(\hat{T}_g \cdot D) + f_d \cdot N(\hat{T}_g) \|D\|] \quad (4.66)$$

$$\hat{T}_g = \frac{T_g}{\text{tr} T_g} \quad (\text{boyutsuz}) \quad (4.67)$$

$\text{tr} T_g$: Standart gerilme tansörü,

$$\text{tr} T_g = hg \cdot \ln \left(\frac{e_o}{e_\infty} \right) \quad (4.68)$$

hg : Granüle malzemenin sertliği (MPa),

e_∞ : Sıfır basınçtaki başlangıç porozite oranı (-),

$\|D\|$: Dağılma hız tansörü D'nin normu,

L ve N : Lineer ve lineer olmayan tansörel büyüklüklerdir. Eşitlikleri ise;

$$L = D + a_2 \cdot \hat{T}_g \text{tr} (\hat{T}_g, D) \quad (4.69)$$

$$N = a_3 \cdot \hat{T}_g^2 - a_4 \cdot \hat{T}_g^{*2} \quad (4.70)$$

$$T_g^* = \hat{T}_g - \frac{1}{3} \cdot 1, \quad \hat{T}_g \text{ 'nin deviatorüdür.} \quad (4.71)$$

a_1 : Eğilme sabiti,

f_b : Barotropi faktörü (basınca bağlı sabit),

f_e, f_d : Pyknotropi faktörleri (malzeme özelliklerine bağlı sabit),

a_2, a_3 ve a_4 : Granüle malzemenin içsel sürtünme açısına bağlı sabitler. Eşitlik olarak;

$$a_2 = \frac{S_1 \cdot (a+2)^2}{2 \cdot (aS_2 - S_1)} \quad (4.72)$$

$$a_3 = \frac{a^3 \cdot S_1 - 3a^2 \cdot (S_1 - 2S_2) - 6/\sqrt{6}a \cdot (2b_E - 1) - 4S_1}{\sqrt{6} \cdot (a-2) \cdot (aS_2 - S_1)} \quad (4.73)$$

$$a_4 = \frac{9(a+2) [a^2 S_1 - a^3 \sqrt{3/2} \cdot (2b_E - 1) - a \cdot (S_1 - 2S_2) - 2S_1]}{\sqrt{6} \cdot (a-1)^2 \cdot (a-2) \cdot (aS_2 - S_1)} \quad (4.74)$$

kullanılan diğer terimlerin eşitlikleri ise;

$$b_E = -\frac{1}{2} \cdot [1 + \tan \phi_g] \quad (4.75)$$

$$a = \frac{1 + \sin \phi_g}{1 - \sin \phi_g} \quad (4.76)$$

$$S_1 = \sqrt{6}.b_E + \sqrt{1+2b_E^2} \quad (4.77)$$

$$S_2 = \sqrt{3/2} + \sqrt{1+2b_E^2} \quad (4.78)$$

$$\vartheta_g = \frac{2}{3}.\phi_g \text{ (başlangıç koşulundaki duraylılık açısı),}$$

$$\partial_1.f_b = -\left(\frac{1+e_o}{e_o}\right) \cdot \frac{1}{f_e^* . h_o . \ell_n \left(\frac{e_o}{e_{oo}}\right)} = -\left(\frac{1-e_o}{e_o}\right) \cdot \frac{h_g}{f_u^* . h_o . t_r . T_g} \quad (4.79)$$

$$f_d = \left(\frac{e-e_c}{e_f-e_c}\right)^\alpha \quad (4.80)$$

$$f_e = \left(\frac{e_f}{e}\right)^\beta \quad (4.81)$$

$$f_e^* = \left(\frac{e_{fo}}{e_{oo}}\right)^\beta \quad (4.82)$$

$$e_o = e_{\infty} . \exp(trT_g / h_g) \quad (4.83)$$

$$e_f = e_{fo} . \exp(trT_g / h_g) \quad (4.84)$$

$$e_c = e_{\infty} . \exp(trT_g / h_g) \quad (4.85)$$

$e_c < e < e_f$ aralığında değerler alır.

$t_r T_g = 0$ ise, $e_{fo} = e_{\max}$ ve $e_{co} = e_{\min}$ alınabilir.

α ve β üstel değerleri ise,

$$\alpha = \ln \left(\frac{(1+2K_o)^2}{a_3.(1-K_o) - a_4 \cdot \frac{1}{g} (1-K_o)^2 . (4-1/K_o)} \right) / \ln \left(\frac{e_{\infty} - e_{co}}{e_{fo} - e_{co}} \right) \quad (4.86)$$

$$\beta = \ln \left(\frac{c_c (1+\bar{e}) e_o . h_o . (1+2K_o)^2}{(1+e_o) hg . \left\{ (1+2\bar{K}_o)^2 + a_2 + f_d . \left[-a_3 + a_4 \cdot \frac{4}{9} . (1-K_o)^2 \right] \right\}} \right) / \ln \left(\frac{e_{\infty} . e_f}{e_{fo} . e} \right) \quad (4.87)$$

$$\tilde{T}_g = \left(\frac{1+e_o}{e_o} \right) \cdot \frac{hg}{h_o} . [L.(\hat{T}_g . D) + f_d . N.(\hat{T}_g) \| D \|] \quad (4.88)$$

$$h_o = \left(\frac{1}{1+2K_o} \right) \cdot \left\{ (1+2K_o)^2 + a_2 + \left(\frac{e_\infty - e_{co}}{e_{fo} - e_{co}} \right)^\alpha \left[-a_3 + a_4 \cdot \frac{4}{9} (1-K_o)^2 \right] \right\} \quad (4.89)$$

$$K_o = \tan^2 (45 - \phi / 2) \quad (4.90)$$

Hypoplastik madde yasasının temel eşitliklerini oluşturan bu bağıntılar, algoritması verilen akış diyagramına göre MATLAB 6.0 bilgisayar programında yazılmıştır (EK 3). Ayrıca, pasa malzemesinin mekanik davranışını belirleyen parametreler için; arazi, laboratuvar ve model deneyler yapılmıştır.

4.3.6.2. Arazi ve Laboratuvar Testleri

Pasa yığınlarının stabilitesinin araştırılması için; gerek pasa malzemesinin, gerekse işletme tabanını oluşturan zemin niteliğindeki birimlerin jeoteknik değerlendirmeler ve gereksinim duyulan jeomekanik parametreleri ile bunların mühendislik davranışlarının bir göstergesi olan indeks değerleri, arazi ve laboratuvar testleri ile belirlenmiştir. Bu amaçla, işletmede daha önce yapılan stabilite analizleri sonuçlarından ve işletmenin değişik kesimlerinden alınan örselenmiş ve örselenmemiş örnekler ile sondaj numunelerinin tamamına yakın bir bölümünden yararlanılmıştır [8,9].

a) X- Işınları Kırınım Analizleri

Gerek pasa yığınları tabanlarındaki zemin türü birimlerde, gerekse pasa malzemesinde bulunabilecek kil minerallerinin tür ve yüzdelerinin tayini, bu malzemelerin indeks özelliklerinin belirlenmesinde yararlı bilgiler sağlayabileceği gibi, yüksek şişme potansiyeline sahip kil minerallerinin varlığının belirlenmesi açısından da önem taşımaktadır. Bu amaçla çalışma alanından alınan ve taban malzemesini, pasayı ve ana dekapaj kayacını temsil eden örnekler üzerinde x-ışınları kırınım analizleri yapılmıştır. Analizlerde kil minerallerinin yanı sıra, örneklerde bulunan diğer minerallerde tayin edilmiş ve minerallerin her örnekteki yaklaşık % bulunma oranları değerlendirilmiştir. Analizler, MTA x-ışınları mikro analiz laboratuvarında 12'si taban malzemesi (killi silt), 9'u pasa malzemesi ve 5'i çalışma basamaklarından alınmış taze marn olmak üzere, toplam 26 örnek üzerinde yapılmıştır.

Analiz sonuçlarına göre tabanı oluşturan siltli ve killi zeminlerde en fazla bulunan mineral illit türü kil minerali olup, %25 ile %45 arasında değişmektedir.

İkinci derecede bulunan ve oranı %20 civarında olan kil minerali kaolinittir ve bununla birlikte kuvars ve feldispat da saptanmıştır. Montmorillonit %10 civarında olup, bazı örneklerde az- çok az miktarda montmorillonit-illit, ara tabaka minerali rektorit ve ayrıca vermikülite de rastlanılmıştır. Bu zeminlerde montmorillonitin çok az miktarda bulunuyor olması, zeminin şişme potansiyelinin çok düşük olacağına işaret etmektedir ve mühendislik davranışı açısından olumlu bir gösterge olarak değerlendirilmiştir.

İncelenen pasa malzemesi marn kayacından oluştuğu için, analizlerde de karbonat ve kil türü minerallerin varlığı saptanmıştır. Bunun göre en fazla bulunan mineral aragonit olup, bunu ortalama %20 civarındaki illit kil minerali izlemektedir. Ayrıca, az ve orta miktarlarda kalsit ve dolomit gibi karbonat mineralleri ve kaolinit belirlenmiştir. Montmorillonit ve rektorit gibi şişme potansiyeli yüksek olan kil mineralleri ise yok denecek kadar azdır.

Çalışma basamaklarından alınan pasa yığınlarının ana malzemesini oluşturan taze lamine ve kompakt marn örneklerinde belirlenen mineral türleri ve bunların bulunma yüzdeleri, pasa malzemesi için elde edilen sonuçlar ile uyumludur [8,9].

b) Birim Ağırlık Testleri

Saha çalışmaları sırasında pasa malzemesinin çok sayıdaki yoğunluk çukurlarında tayin edilen birim ağırlığı yanı sıra, gerek bu malzemenin gerekse taban kilinin birim ağırlığı, ayrıca laboratuvar testleri ile de belirlenmiştir.

Pasa malzemesine ait birim ağırlık değerleri, genellikle 14,0 kN/m³ ve 16,0 kN/m³ arasında değişmekte olup, ortalama olarak 14,8 kN/m³'tür. Yoğunluk çukurlarında tayin edilen ortalama birim ağırlık değeri ise 14,0 kN/m³ olup, bu iki ortalama değer arasında 0,8 kN/m³ gibi küçük bir farklılık olduğu görülmektedir. Pasa malzemesinin kesici kalıplar ve ince çeperli tüpler ile alınması sırasında dağılmayı-örselenmeyi önlemek için pasanın bir miktar ıslatılmış olması, örneklerin yerinde nem miktarının artmasına neden olmuş, dolayısıyla bu yöntemle alınmış örnekler için elde edilen değerler yerinde (arazide) tayin edilen değerlerden biraz daha yüksek çıkmıştır. Ancak bu fark çok düşük olup, yoğunluk çukurlarında tayin edilen ortalama tabii birim ağırlık değerinin stabilite analizlerinde esas alınmasının pasayı daha doğru temsil edeceği düşünülmektedir.

Riperlenmiş ve içerisinde küçük kömür parçalarının da bulunduğu taban zemin örneklerinde birim ağırlık değerleri, genellikle 16,0 kN/m³ civarında olup, killi

silt şeklinde tanımlanan taban örneklerinin birim ağırlığı da $19,0 \text{ kN/m}^3$ 'e yakındır. Tüm örnekler için yapılan istatistiksel değerlendirmede, bu zeminler için ortalama birim ağırlık değerinin $17,8 \text{ kN/m}^3$ olduğu ve bu değer inşaatte daha önce yapılan jeoteknik etüd sırasında aynı zeminler için belirlenen ortalama değer ile ($17,4 \text{ kN/m}^3$) uyumlu olduğunu göstermektedir [8,9].

c) Zemin Sınıflama Testleri

Zemin türü birimlerin ve zemin gibi davranan malzemelerin dane boyut dağılımları ve kıvamlılık limitleri (likit ve plastik limit), bu malzemelerin sınıflandırılması amacıyla kullanılabileceği gibi, aynı zamanda mühendislik davranışlarının tahmininde birer gösterge olarak da yararlanılan indeks özellikleridir. Gerek pasa yığınlarını oluşturan malzemenin, gerekse işletme tabanındaki zemin birimlerin muhtemel mühendislik davranışlarını tahmin etmek, bunların mühendislik sınıflandırmasını yapmak ve kesme deneylerinin türü hakkında karar verebilmek amacıyla, bu malzemeler üzerinde elek ve hidrometre analizlerinden oluşan dane boyut dağılım testleri yapılmış, kıvam (Atterberg) limitleri ve nem içerikleri tayin edilmiştir.

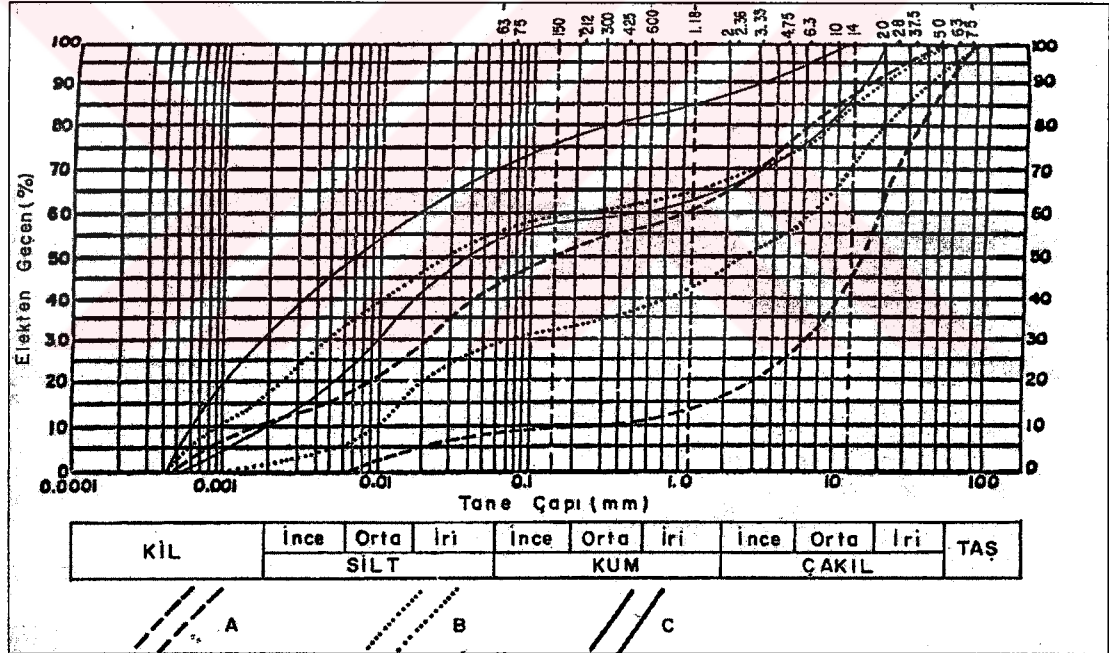
i.Dane Boyut Dağılım Analizleri

Zemin mekaniği prensiplerine göre davrandığı gözlenen nispeten gevşek konumdaki ve değişik dane boyutunda malzemedan oluşan pasa yığınlarını temsil eden 33 örnek ile taban malzemesi olarak değerlendirilen 16 örnek üzerinde, ASTM test standartlarına göre dane boyut dağılımı analizleri yapılmıştır (şekil 4.35). Ancak, laboratuvar elek boyutlarını aşan çok iri parçalar örneklerden ayıklanmıştır.

Pasa malzemesi örnekleri ince ve iri daneleri birlikte içerdiği için ve ayrıca taban birimlerinden de yer yer kil boyutunu aşan danelerin bulunabileceği dikkate alınarak, dane boyut analizleri ıslak elek analizi ve hidrometre analizleri olmak üzere iki aşamalı birleşik çözümleme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

Pasa malzemesindeki değişik dane boyutlarının istatistiksel dağılımı araştırılmış ve bulunan sonuçlara göre; çakıl boyutundaki danelerin miktarı %10-67, kum boyutundakilerin ise %8-41 arasında değiştiği ve ortalama olarak iri dane (çakıl ve kum) oranının %56, dolayısıyla ince danelerin de %44 civarında olduğu belirlenmiştir. Bu belirleme, pasa malzemesi içinde iri ve ince danelerin yaklaşık aynı oranda temsil edildiğini ve pasayı oluşturan kısmen killi ana dekapaj malzemesinin yığma ve sıkışma süreçleri sırasında ve atmosferik koşullar altında

ayrıştığını ve tamamen bloklu durumda kalmadığını göstermektedir. Eş şekillilik ve eğrisellik katsayılarına göre yapılan değerlendirmede pasa malzemesinin mühendislik açısından kötü derecelenmiş bir malzeme ve ince taneli fraksiyon içinde silt dane boyutunun egemen olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte çok eski dökümlerde, ince malzemenin özellikle kil boyutundaki danelerin (%10-30) yüzdesinin arttığı da belirlenmiştir. Bu belirlemeler esas alınarak, eski dökümlerde yeni dökümlere oranla ince dane miktarının daha fazla olacağı ve malzeme davranışında ince fraksiyonun da rol oynayacağı kanaatine varılmıştır. Bu husus kesme dayanımının tayini ve geçirgenliğin belirlenmesinde gözönünde bulundurulmuştur. İşletme (kömür) tabanında egemen olan malzeme silt ve kil olmakla birlikte bu seviyenin altında bir miktarda kum bulunmaktadır. Buna göre, taban malzemesi killi silt veya kil-silt karışımından oluşan plastik özellikte, düşük geçirgenliğe sahip bir zemin olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.35. TKİ-GELİ (Muğla) bölgesi pasa yığınlarında dane boyut dağılımı alt ve üst sınırları (A: Draglayn dökümü, B: Eski pasa yığınları, C: Kayma yüzeyleri örnekleri) [9].

ii. Nem İçeriği ve Kıvam (Atterberg) Limitleri Tespiti

Pasa ve taban malzemesinden alınan örnekler üzerinde ASTM D318-84 test standartlarına uygun olarak nem içeriği ve Atterberg limitleri (likit limit, plastik limit ve plastisite indeksi) tayinleri yapılmış, ayrıca ince daneli malzemenin indeks değeri kullanılarak aktivite ve şişme potansiyeli değerlendirilmiştir.

Nem içeriği: Tüm pasa örnekleri dikkate alındığında nem içeriği değerlerinin %25,6 ile %52 arasında değiştiği ve bu değerlerin genellikle %40 civarında yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Ancak, bu örneklerden 16 tanesi kesici kaplar ve tüplerle alınmış ve örnekleme sırasında dağılmayı önlemek için pasaya su verilmiştir. Dolayısıyla söz konusu örnekler için belirlenen değerler doğal nem içeriğini yansıtmamaktadır. Bu nedenle doğal içeriğinin değerlendirilmesinde, sadece yoğunluk çukurlarından örneklenen 15 numune dikkate alınmıştır. Bu değerlendirme sonucunda doğal nem içerikleri %28 ile %49 arasında değişmekte olup, ortalama nem içeriği %37'dir.

Doğal nem içeriği ve pasa malzemesi içerisindeki ince dane (kil ve silt) yüzdeleri arasındaki ilişki araştırılmış ve nispeten dikkate alınabilecek pozitif bir ilişkinin varlığı saptanmıştır. Buna göre, pasa içerisinde ince danelerin yüzdesi arttıkça genel olarak nem içeriği de artmaktadır. Örneğin draglayn dilimine komşu konumlu yeni dökülmüş pasa yığnında yeterli sıkışma ve ufalanma henüz meydana gelmemiş olması nedeniyle, ince dane ve nem içeriği miktarları eski pasa yığınlarından alınmış örneklere oranla daha düşüktür. Bu belirleme, pasa içerisindeki dekapaj malzemesinin parçalanıp ayrışmasında ve ince daneye dönüşmesinde suyun önemli bir rol oynadığının bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

Kıvam (Atterberg) limitleri: Kömür tabanından alınan 13 adet ince daneli zemin örneği üzerinde yapılan Atterberg limitleri tayinleri sonucunda bu zeminlerin likit limitlerinin %40 ile %82 (ortalama %60), plastik limitlerinin %25- %53 (ortalama %35) ve plastisite indekslerinin de %15- %31 (ortalama %25) arasında değiştiği belirlenmiştir. Likit limit değerlerinin genellikle %50'den yüksek olması, bu zeminlerde muhtemelen montmorillonitin varlığına işaret etmektedir. X-ışınları kırınım analiz sonuçları dikkate alındığında, bu belirlemenin doğru olduğu anlaşılmaktadır.

Dane boyut dağılım analizlerine göre pasa malzemesinde iri ve ince danelerin yaklaşık olarak yarı yarıya bulundukları, dolayısıyla bu malzemelerin taban zeminlerinde olduğu gibi tamamen ince dane ile temsil edilemeyeceği bilinmektedir. Bu nedenle pasa örneklerinde Atterberg limitleri tayinleri her örnek için 40 no'lu eleğin altına geçen malzeme üzerinde yapılmıştır. Pasa malzemesindeki ince fraksiyonun aktivite sayıları ise en az %10 oranında kil içeren örnekler için belirlenmiştir. 16 örnek için hesaplanan aktivite sayıları 0,67 ile 1,91 arasında değişmekte olup, ortalama değer 1,3'tür. Ayrıca pasa örneklerine ait ince fraksiyonun

düşük şişme bölgesinde yoğunlaştığı görülmekte ve bunun yanı sıra, pasa malzemesi içerisinde kil yüzdesinin silte oranla daha az olduğu dikkate alındığında şişme yönünden pasa içerisinde herhangi bir sorunla karşılaşılmayacağı anlaşılmaktadır.

iii. Zemin Sınıflaması

İşletme genelinde pasa malzemesi ve taban zeminleri hakkında gereksinim duyulabilecek bazı sistematik bilgilerin elde edilmesi amacıyla iri ve ince daneli zeminlerin mühendislik sınıflaması yapılmıştır. Bu amaçla “Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması” esas alınmıştır. Bu sınıflamaya göre zemin örnekleri iri daneli (çakıl ve kum) ve ince daneli (silt ve kil) zeminler şeklinde iki gruba ayrılarak, örnekler sınıflama sisteminin önerdiği ölçütlere göre belirlenmiştir. İnce dane miktarı %50’den fazla olan örnekler likit limit ve plastisite indeksi değerleri esas alınarak bunların plastisite abağındaki dağılımı şekil 4.36’da gösterilmiştir. Ancak, bu abakta gösterilen ve pasa malzemesini temsil eden noktalar, bu malzemelerin esas sınıflaması olmayıp, sadece malzeme içindeki ince danelerin sınıfını temsil etmektedir. Bu nedenle, ince ve iri daneleri birlikte içeren pasa örneklerinde iri dalerin sınıfı ile plastisite abağındaki sınıflar birlikte değerlendirilmiştir.

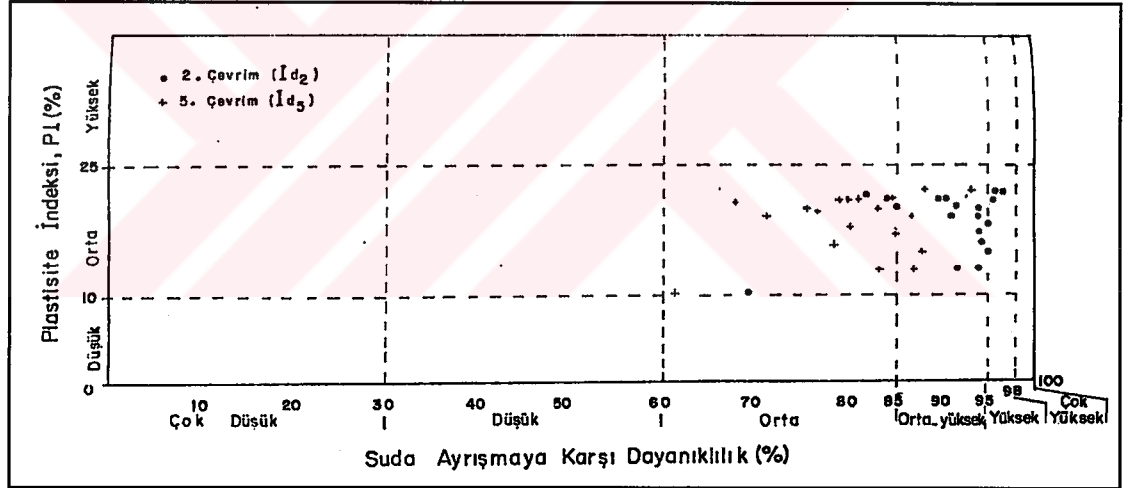
Tabanı oluşturan zeminlerin tamamına yakın bir bölümü, OH-MH simgesi ile gösterilen plastik, organik ve inorganik ince kumlu, killi silt grubunu temsil etmektedir. Genel olarak orta-zayıf veya geçirimsiz drenaj özelliklerine sahip bu zeminler, suya doymun halde kesme dayanımları düşük ve sıkışabilirlikleri de oldukça yüksektir. Bu zeminler arsında yer alan kum örnekleri ise drenaj özellikleri iyi olan, suya doymun halde çok az sıkışan, kötü boylanmış hemen hemen hiç ince malzeme içermeyen SP grubu zemin sınıfında yer almaktadır.

Pasa malzemesi ise, genellikle zemin grubu simgesi GM-MH olan çakıl-kum-silt karışımı ve inorganik elastik siltlerin bir arada bulunduğu zemin sınıfında yer almaktadır. Bu tür zeminler kompaksiyon sonucunda orta-düşük geçirgenliğe ve orta derecede kesme dayanımına sahip olmaktadır. İnce dane miktarının egemen olduğu (%50’den fazla) pasa örnekleri ise ince kumlu organik siltleri temsil eden MH grubunda yer almaktadır. Dolayısıyla pasa malzemesi, yer yer plastik özellikte silt ve kil içeren, aynı zamanda iri blokların da bulunduğu bir malzeme olarak tanımlanmıştır [9].

d) Suda Dağılmaya Karşı Dayanıklılık İndeksi Tespiti

Kayaçların, özellikle kil içeren yumuşak kayaçların suda dağılmaya karşı gösterdikleri dayanıklılık, diğer bir ifadeyle fiziko-kimyasal ayrışma/ dağılma potansiyeli önemli bir indeks özelliğidir. Kayacın su ile temasında ve pasa yığma işlemi sırasındaki mekanik etkilerle dağılması sonucu nispeten ince daneli malzeme miktarı artabileceği gibi, malzemenin dayanımında da azalma olmaktadır.

Pasa yığınlarından alınan marn ile çalışma basamaklarından alınan taze kompakt, laminalı marn örnekleri üzerinde, ISRM test standartlarına göre suda ayrışmaya karşı dayanıklılık testleri yapılmıştır. Standart indeks değeri I_{d2} esas alındığında, gerek pasa malzemesinin gerekse taze marnların %90 ile %100 arasında değişen I_{d2} değerine sahip olduğu ve suda dağılmaya karşı dayanıklılık sınıflamasında, yüksek-ileri derecede yüksek grupta yer aldıkları anlaşılmaktadır. Ancak, çevrim sayısı arttıkça dağılan malzeme miktarı da artmaktadır. Dolayısıyla indeks değerleri de giderek azalmakta ve bazı örnekler suda ayrışmaya karşı orta derecede dayanıklı malzeme sınıfına düşmektedir (şekil 4.36).



Şekil 4.36. Pasa malzemesi ile taze dekapaj kayacı örneklerinin plastisite indeksi ve suda ayrışmaya karşı dayanıklılık parametrelerine göre sınıflandırılması ve sınıflandırmada çevrim sayısının etkisi [9].

Gerek deney sonuçları, gerekse dane boyut dağılım analizleri birlikte değerlendirildiğinde, pasa yığınlarının genel olarak yarı yarıya iri ve ince daneli malzeme ile temsil edildiği, dolayısıyla bünyelerine su almaları koşulunda yeterli drenajın killere oranla göreceli olarak daha kısa sürede sağlanabileceği sonucuna varılmıştır. Dikkat çeken diğer bir husus, inceltme basamaklarından alınan taze marn örnekleri arasında laminalı olanların dağılmaya karşı dayanıklılığının kompakt marnlara oranla daha düşük olduğudur [8,9].

e) Pasa Malzemesinin Kesme Dayanımı ve Permeabilitesi

Klasik şev stabilitesi analizlerinin en önemli parametrelerinden biri de, malzemenin kesme (makaslama) dayanımıdır. Kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) parametreleri ile tanımlanan kesme dayanımının hassas bir şekilde tespit edilmesi, gerek şev tasarımı gerekse duraysızlık sırasında kayma yüzeyi boyunca etkin olan kesme dayanımı parametrelerinin belirlenmesi açısından önemlidir.

Gerek saha gözlemleri, gerekse sınıflama testleri pasa yığınlarını oluşturan malzemelerin ayrık danelerden oluştuğunu ve zemin malzemesi gibi davrandığını göstermektedir. Bu nedenle pasa malzemesinin kesme dayanımı, zemin mekaniğinde kullanılan yöntemler esas alınarak belirlenmiştir. Bu amaçla araziden alınan nispeten daha ince malzeme üzerinde zemin kesme kutusunda konsolidasyonlu-drenajlı zemin kesme testleri yapılmıştır. Buna karşın, daha iri malzemeyi de içeren pasa örneklerinde ise, konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli testler yapılarak kesme dayanımı belirlenmiştir.

İri daneler ile birlikte ince danelerin de yer aldığı ve zemin sınıflaması göz önünde tutularak, uzun süreli stabilite koşulu esas alınmış ve testler drenaja izin verilerek efektif kesme dayanımı parametrelerini belirleyecek şekilde gerçekleştirilmiştir.

Doruk kesme dayanımını izleyen düşük miktarlardaki deformasyonlardan sonra malzeme kısa sürede artık değerlere ulaşmaktadır. Malzemenin örselenmiş bir nitelik taşıyor olması, artık kesme değerlerine kısa sürede ulaşmasında önemli rol oynamaktadır.

İki farklı yenilme zarfı için hesaplanan kesme dayanımları birlikte değerlendirildiğinde doruk ve artık kesme dayanımı değerleri, dolayısıyla kohezyon ve içsel sürtünme açıları arasında her iki yenilme zarfına göre önemli bir farklılık olmadığı ve bunların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Yerindeki kayacın kazılması ve yığılması işlemleri sırasında örselenmiş olmasının bu sonucun elde edilmesinde önemli rol oynadığı açıktır. Doğrusal yenilme zarflarına göre doruk içsel sürtünme açısı değeri 24° ile 40° arasında (ortalama $33,6^\circ$) değişmekte ve bu değerler 30° 'nin üzerinde yoğunlaşmaktadır. Doruk kohezyon değerleri ise 0-24 kPa arasında olup, ortalama 13,8 kPa'dır. Artık kesme parametreleri de ($\phi_r = 22,3^\circ - 38,7^\circ$ ve $c_r = 0-22$ kPa) bu değerlere oldukça yakındır. Bu sonuçlar, ayrıca pasa malzemesinin

standart penetrasyon testleriyle yerinde tespit edilen içsel sürtünme açısı değerlerinin (31° - 38°) değişim aralığında yer almakta ve bu değerler ile uyum sağlamaktadır.

DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı laboratuvarlarında üç eksenli hücrelerde test edilen örneklerin boyutları büyük olup, daha fazla miktarda orta ve iri daneli malzeme (GH-MH sınıfı) örselenmiş ve dolayısıyla dane boyutunun artmasına bağlı olarak malzeme kohezyonsuz olarak davranmıştır. Üç eksenli testler ile kesme kutusu testleri karşılaştırıldığında, kesme kutusunda elde edilen ϕ değerlerinin üç eksenli testlerde elde edilen değerlere oranla biraz daha yüksek olduğu görülmektedir.

DSİ laboratuvarlarında ASTM standartlarına göre su geçirgenlik katsayısı (permeabilite) testleri yapılmıştır. Bu testler sonucunda, örneklerin birbirine oldukça yakın $8,7.10^{-5}$ m/s ve $8,4.10^{-5}$ m/s geçirgenlik katsayılarına sahip olduğu belirlenmiştir. Bulunan geçirgenlik katsayı değerleri TERZAGHI ve PECK geçirgenlik sınıflamasına göre pasa malzemesinin orta derecede geçirgenliğe sahip olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, incelenen pasa malzemesi dane boyutu bakımından homojen olmayıp, GM-MH zemin grubunda yer almasından dolayı, pasa malzemesinin yerindeki gerçek geçirgenlik katsayısının laboratuvar ölçeğinde tespit edilen değerlerden biraz daha düşük olması ($1,0.10^{-6}$ m/s civarında) beklenmelidir. Dolayısıyla pasa malzemesi geçirgenliğinin orta-zayıf geçirgenlik sınıfına dahil edilmesi, daha doğru bir değerlendirme olacaktır [8,9].

4.3.6.3. Model Deneyler ve Sonuçları

Tanıtılan sonuçların kontrolü için model deneyler yapılmıştır. Burada ağırlık noktasını;

- yığın sıkılığı (konsolidasyon) ve şev geometrisi etkisinde şev stabilitesi,
- muhtemel duraysızlıkta şevin deformasyon modülünün araştırılması, oluşturmaktadır.

a) Model Yasalar

Model deneyler için aşağıdaki model yasalar varsayılmıştır.

i. Geometri

Hem prototip hem de model deneyler için, su seviyesi (h_w) ve şev yüksekliği (h) oranları sabit tutulmuştur.

$$\left(\frac{h_w}{h}\right)_M = \left(\frac{h_w}{h}\right)_P \quad (4.91)$$

20-50 metre olan gerçek şev yüksekliği 0,32 metre alınmıştır. Bunun anlamı, gerçek yükseklik, 140-150 skaler faktör ile küçültülmüştür. Model şev açısı ise, in-situ şev açısına uygun alınmıştır.

$$(\beta)_M = (\beta)_P \quad (4.92)$$

ii. Zemin

Model deneyde, arazide karşılaşılan benzer zemin kullanılmıştır. Aynı akışkan yani su kullanıldığı için, modelde arazi koşullarındaki geçirgenlik katsayısı kabul edilmiştir. Fakat; uzunluk 150 küçültme faktörüyle alındığından, boşluk suyu basıncının eşitlenmesi için gerekli zamana bağlı kayma süresi, aşağıdaki eşitlik ile verilmiştir.

$$(t)_M = \left(\frac{l_M}{l_P}\right)^2 \cdot (t)_P \quad (4.93)$$

iii. Gerilmeler

Zemin kohezyonsuz olduğundan,

$$\left(\frac{C_u}{\gamma \cdot h}\right)_M = \left(\frac{C_u}{\gamma \cdot h}\right)_P \quad (4.94)$$

şeklindeki model yasa eşitliği kullanılmıştır. Arazi koşullarına oranla, model deneyde çok çok küçük gerilme düzeyleri geçerlidir.

iv. Malzeme sertliği (h_g) ve Konsolidasyon exponenti (n)

Zemin malzemesinin sertliği (h_g) ve konsolidasyon üstel değeri (n), en gevşek yığın (e_{max}) durumundaki numune üzerinde ödometer (konsolidasyon) deneyi ile belirlenir. Yükleme, küçük başlangıç basınç kuvvetinin (örneğin ilk yükleme 50 kPa) adım adım arttırılması ve her aşamada en az iki katı olacak şekilde gerçekleştirilebilir (tablo 4.5) [21,47,48]. Burada kullanılan eşitlikler ise;

Üstel (exponent) değer (n),

$$n = \frac{\ln\left(\frac{e_1 \cdot c_{c2}}{e_2 \cdot c_{c1}}\right)}{\ln\left(\frac{\sigma_2'}{\sigma_1}\right)} \quad (4.95)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Konsolidasyon sıkılık indisi (C_c),

$$c_c = \frac{-\Delta e}{\ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma_0}\right)} \quad (4.96)$$

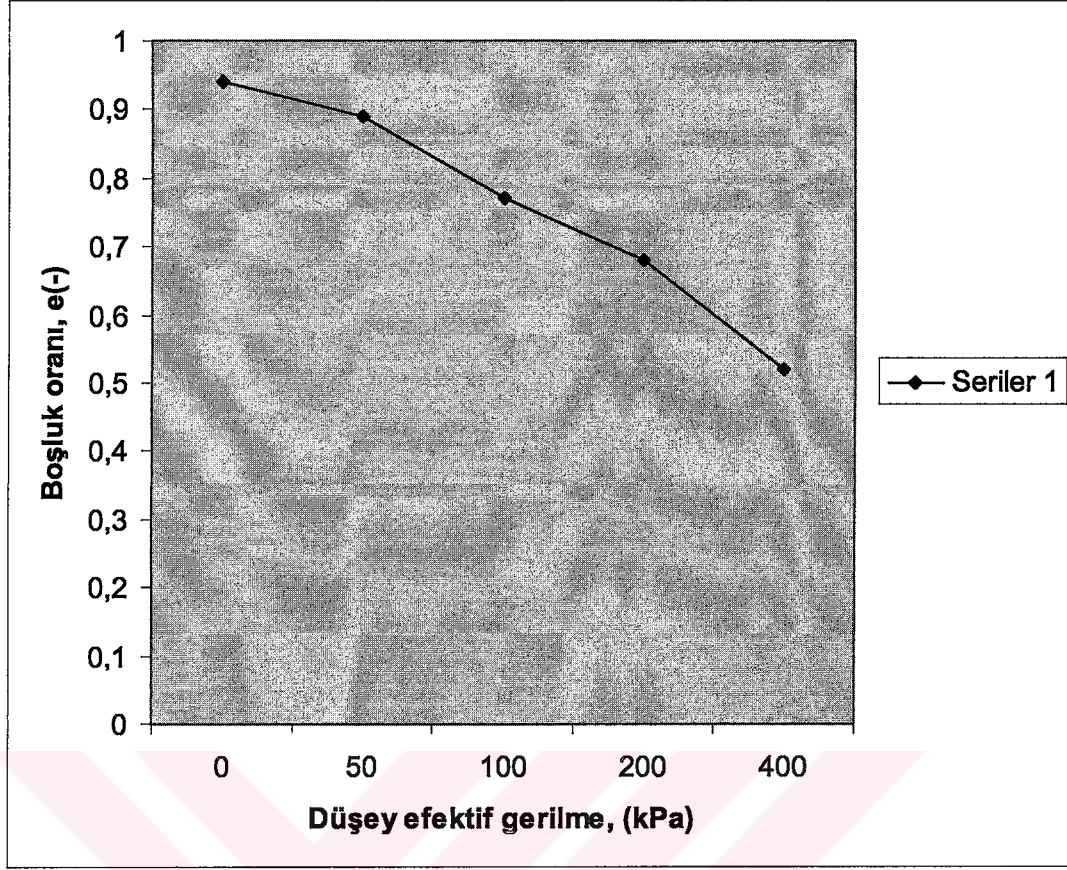
eşitliği ile bulunur. C_c ve n değerlerinin belirlenmesinden sonra (h_g) malzeme sertliği,

$$h_g = (1 + 2K_0) \cdot \sigma' \cdot \left(\frac{n \cdot e}{c_c}\right)^{1/n} \quad (4.97)$$

bağıntısı ile bulunur. σ' , e ve C_c değerleri, üstel değer (n)'in belirlendiği konsolidasyon eğrisinin herhangi bir noktasına göre belirlenebilir (şekil 4.37).

Tablo 4.5. Model deneye ait konsolidasyon basınç-deformasyon oranları

Basınç, σ (kPa)	Deformasyon, ε_v (mm)	Boşluk oranı, e (-)
0	0,00	0,94
50	0,44	0,89
100	0,61	0,77
200	0,83	0,68
400	1,22	0,52



Şekil 4.37. Model deneye ait konsolidasyon boşluk oranı- basınç (log) eğrisi

Şekil 4.37’de önkonsolidasyon gerilmesi (σ'_v), boşluk oranları e_1 , e_2 ve konsolidasyon sıkışma indisleri C_{c1} , C_{c2} değerleri CASAGRANDE grafik yöntemi kullanılarak belirlenmiştir [21,47,48]. Bu sonuçlara göre; (4.95) ve (4.97) eşitlikleri kullanılarak hypoplastik malzeme parametreleri hesaplanabilir.

$$n = \frac{\ln\left(\frac{e_1 \cdot C_{c2}}{e_2 \cdot C_{c1}}\right)}{\ln\left(\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{(0,90) \cdot (0,67)}{(0,68) \cdot (0,89)}\right)}{\ln\left(\frac{200,2}{50,1}\right)} = \frac{0,996}{1,386} = 0,72$$

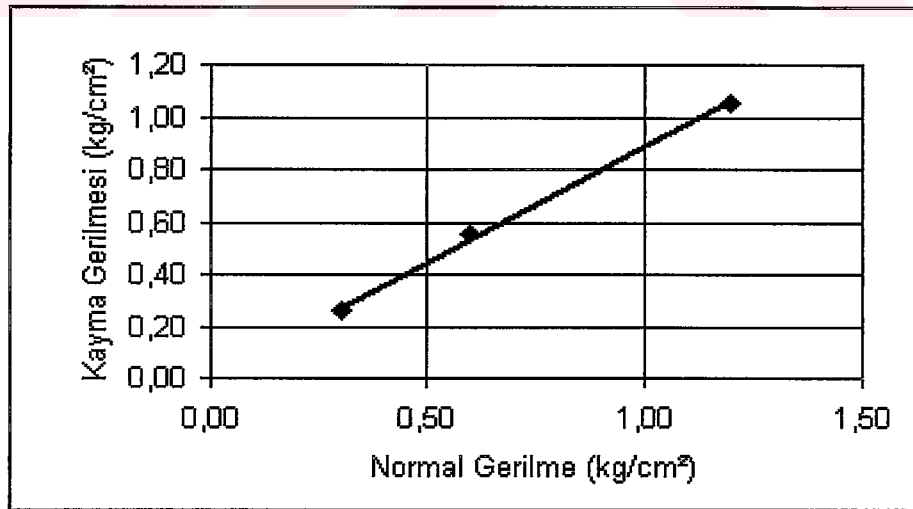
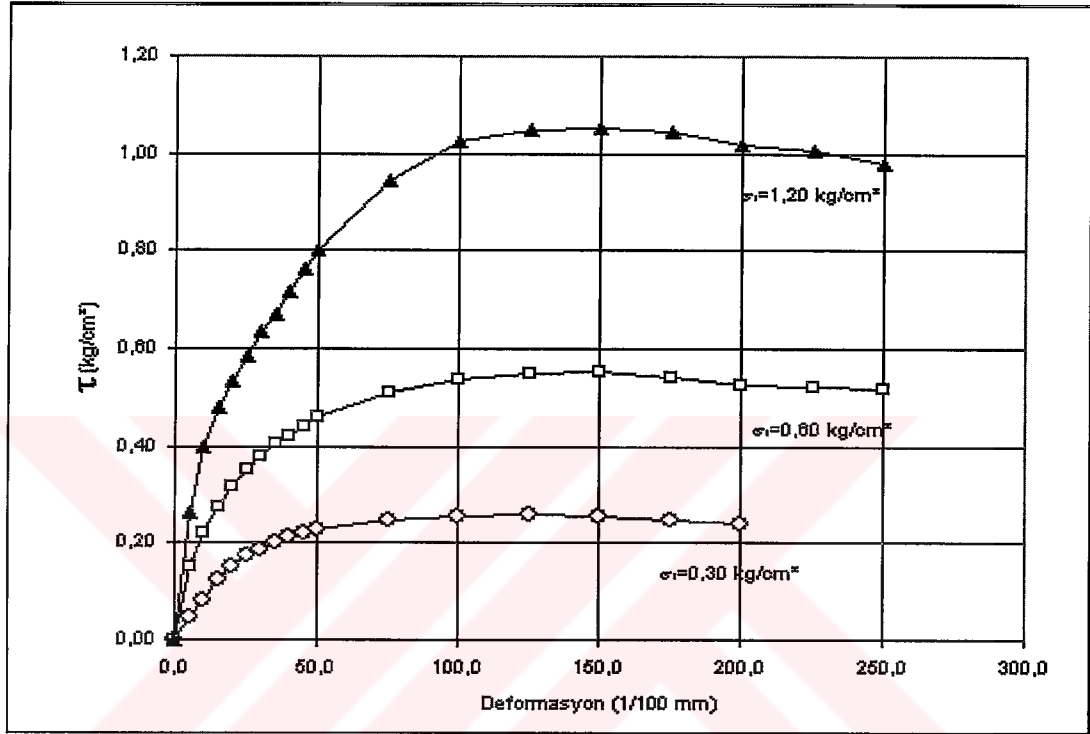
$$h_g = (1 + 2K_0) \cdot \sigma'_v \left(\frac{n \cdot e}{C_c} \right)^{1/n} = (1 + 2 \cdot (0,34)) \cdot (94,4) \cdot \left(\frac{(0,91) \cdot (0,87)}{(0,78)} \right)^{1/0,72}$$

$$h_g = 161,9 \cong 162 \text{ MPa}$$

b) Deneysel Uygulamalar

Deneysel arazi koşullarına uygun, kötü derecelenmiş SP kum numunesi ile yapılmıştır. Seçilen zemin %8,2 ince dane boyutuna, esas itibariyle silt ve ince kum boyutuna sahiptir. Şev eğiminin hazırlanması için, zemin tamamen suya doygun

yapılmıştır. Burada görülen o ki, silt kısmı (%1,1) dane yapısından ayrılarak yukarı doğru hareket etme eğilimindedir. Deney sonuçlarının yenilenebilmesi için, silt kısmı önceden deney numunesinden yıkanmıştır. Kullanılan numuneye ait; kesme kutusu deneyi, elek analiz dataları ve dane boyut dağılım eğrisi şekil 4.38 ve 4.39’da verilmiştir. En sıkı ve en gevşek yığın porozite oranları ($e_{\min}$: 0,52; $e_{\max}$: 0,94) yapılan piknometre deney sonuçlarına göre belirlenmiştir.



$$c = 0 \text{ kg/cm}^2$$

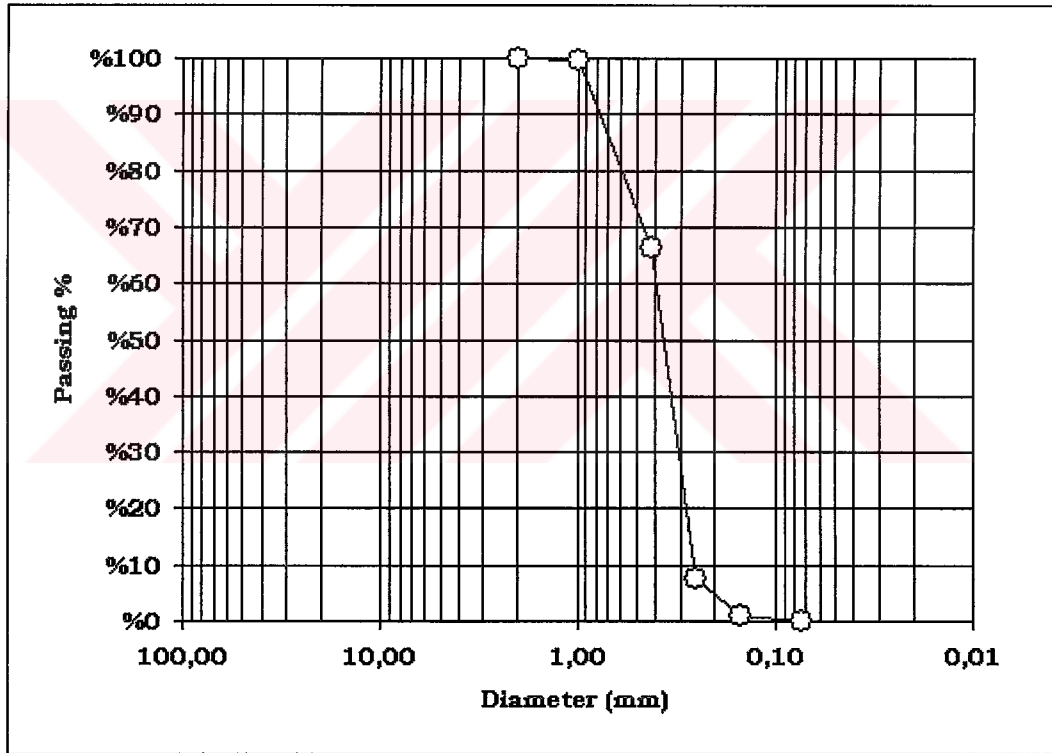
$$\phi = 41 \text{ derece}$$

Şekil 4.38. Deney numunesine ait kesme kutusu deney sonuçları

Deney No : 1
Zemin Tipi : Deney Kumu

Zemin Ağırlığı (gr) : 1000

ASTM Elek No	ASTM-D422 Elek Çapı (mm)	Kalan Ağırlık (gr)	Toplam Geçen Ağırlık (gr)	Geçen Yüzde (%)
No. 10	2,00	0	1000	%100
No. 18	1,00	4,65	995,35	%99,5
No. 40	0,42	332,68	662,67	%66,3
No. 60	0,25	587,22	75,45	%7,5
No. 100	0,15	65,3	10,15	%1,0
No. 200	0,07	9,44	0,71	%0,1



$d_{60}=0,4$
 $d_{30}=0,3$
 $d_{10}=0,27$

$C_u = 1,48$
 $C_c = 0,83$
Zemin Cinsi : SP
SP = Kötü Derecelenmiş Kum

Şekil 4.39. Deney numunesine ait elek analizi ve granülometre eğrisi

Malzeme mekanik parametrelerinin belirlenmesinden sonra, deneyler 60x40x10cm ölçülerinden oluşan Plexiglas kap içerisinde, aşağıda belirtilen metotla hazırlanmış şev sisteminde gerçekleştirilmiştir.

Su dolu kap içerisinde kum tabana çöktürülmüştür. Kum daneleri kap yüzeyine eşit şartlarda dağılmıştır, öyle ki homojen bir yığın yüzeyi sağlanmıştır. Su ortamında süzülerek çöken kum daneleri gevşek bir yığın oluşturmuştur. Çöken kum toplam ağırlığı, kum yoğunluğu ve hacmi ölçülerek in-situ porozite değeri hesaplanmıştır. Burada tam bir doygunluk varsayılmaktadır, çünkü yavaş yavaş çökme sırasında kumdaki hava kabarcıkları oluşmakta ve yüzeye çıkmaktadır. Ancak tam bir doygunluk sağlanamamış olabilir. Eğer kum eşit oranda çökmüş ve kap sarsılmamış ise 0,87'lik bir porozite oranı bulunur.

Arzulanan sıklığa erişinceye kadar kap yüzeyine hafifçe ve eşit şekilde vurulur. Bunun için daha önceden yerleştirilen malzemenin toplam hacmi, tasarlanan porozite oranına göre hesaplanmalıdır. Kap dar olduğundan (10cm), zemin deney numunesi içerisinde de aynı şekilde sıkıştırılmış varsayılır.

Tasarlanan şev açısı, kap içerisine yerleştirilen önceden hazırlanmış özel kalıplar yardımıyla hazırlanmıştır. Bu esnada dinamik bir etkidten özellikle kaçınılmıştır. Plexiglas kap içerisinde hazırlanan şev yüzeyine çelik bir bilye ile vurularak (m:1100g, v: 2 m/s) tetikleyici kuvvet yaratılmıştır.

Kayan şev yüzeyinin izlenmesi, kap yüzeyine yapılan milimetrik baskı yardımıyla ölçülmüştür. Böylece yatay ve düşey deformasyonlar tespit edilmiştir. Şevin hassas etkileşimi nedeniyle, mekanik kayıt ediciler kullanılmamıştır. Şekil 4.40, kayma öncesi ve sonrası şev geometrisini göstermektedir. Kayma nedeniyle zeminin yatay (5,8cm) ve düşey (4,2cm) deformasyonları net olarak görülebilir. Ayrıca; farklı şev koşullarında kayma davranışları, EK 4, 5 ve 6'da verilmektedir.



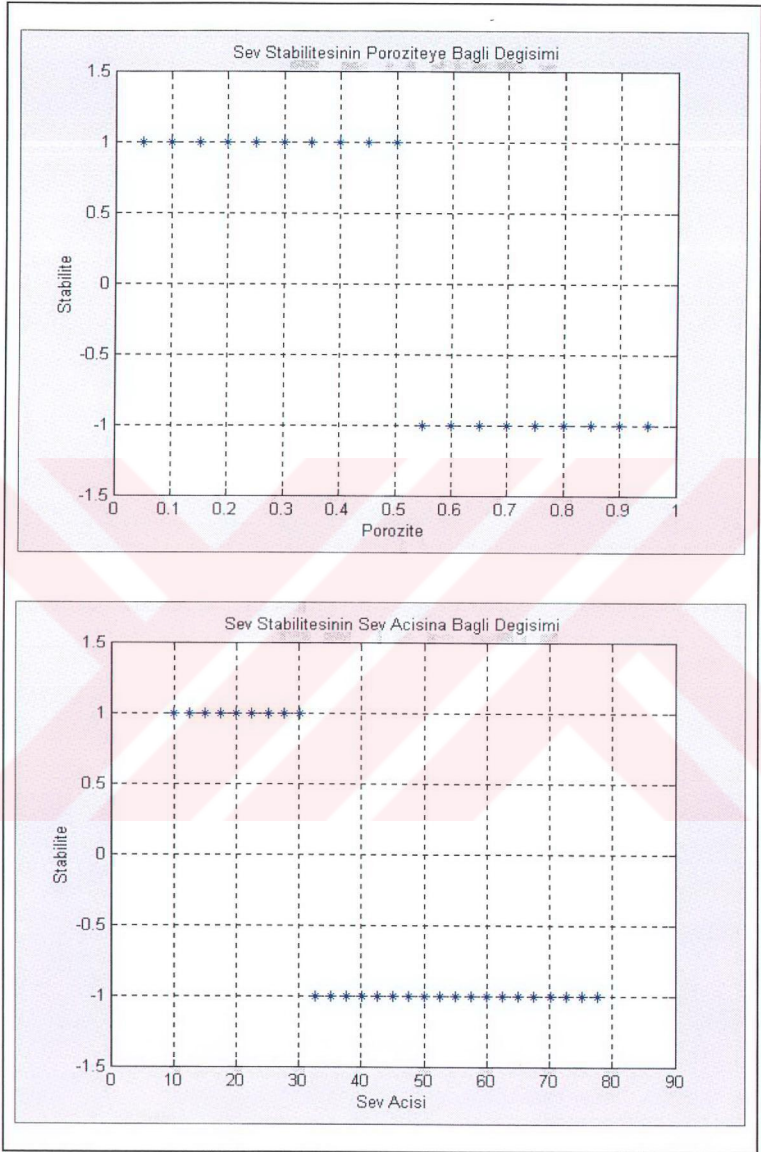
Şekil 4.40. Suya doymuş şev sisteminde yanal etki durumunda stabilite analizi
a) Kayma öncesi, b) Kayma sonrası

İlk deney serisi sabit şev geometrisi esasıyla yapılmıştır ($h=32\text{cm}$, $h_w=22\text{cm}$ ve $\beta=35^\circ$). Porozite oranı 0,52- 0,94 arasında değişmektedir. Şekil 4.41, MATLAB bilgisayar programında gerçekleştirilen şev stabilitesi analiz sonuçlarına göre, sistemin enerji değeri (Δ^2E) ile porozite oranı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Burada da açıkça görülüyor ki; 0,53'den büyük porozite oranlarında şevin duraysız; 0,53'den küçük porozite oranlarında ise pratik olarak hiçbir kayma oluşmayacaktır. Bu gözlemlerden sonuç olarak, deney kumu için kritik porozite oranı ($e_{kr} = 0,53$) olarak belirlenir. Buradaki kritik porozite değeri Δ^2E 'nin sıfır olduğunu gösterir.

İkinci deney serisinde, şev açısı 25° - 45° arasında değiştirilmiştir (ilk geometrik değerler ve gevşek yığın halinde $e = 0,87 > e_{kr}$). Burada, kayma düzeyinin kullanılan tetikleme kuvvetine göre şev açısından bağımsız olduğu tespit edilebilir. Şev yüzeyinin kayması $33^\circ < \beta$ şev açıları için mümkündür ve daha yüksek şev açıları ile bu miktar artmaktadır. Şekil 4.41, şev stabilitesinin şev açısına bağlı değişimini göstermektedir.

Bu sonuçlara göre;

- Şev, büyük bir boşluk suyu basıncı oluştuğu sürece kayar.
- Laboratuvar deneyleri, kritik bir porozite oranının (e_{kr}) var olduğunu doğrular. Araştırılan zemin için bu değer $e_{kr}=0,53$ dir. Eğer şev bölgesindeki porozite oranı, kritik poroziteden daha büyük ise ani bir kayma oluşabilir.
- Tüm şev yüzeyine etkiyen seçilmiş tetikleme kuvveti koşullarında şev açısı, şevin stabilitesi için ikinci derecede önemli rol oynar.
- Yuvarlak danelerde içsel sürtünme açısı (ϕ_g), köşelilerden daha düşüktür. Buna göre küçük içsel sürtünme açısına sahip zeminlerde, yani yuvarlak daneli zeminlerde bir kayma daha çabuk oluşur.
- Eğer oluşan bir kayma sıkı bir bölgeye veya yüksek konsolidasyonlu kısma ulaşırsa, o zaman zemin hareketi duracaktır.



Şekil 4.41. Malzeme parametrelerine bağlı olarak şev stabilitesi analiz sonuçları

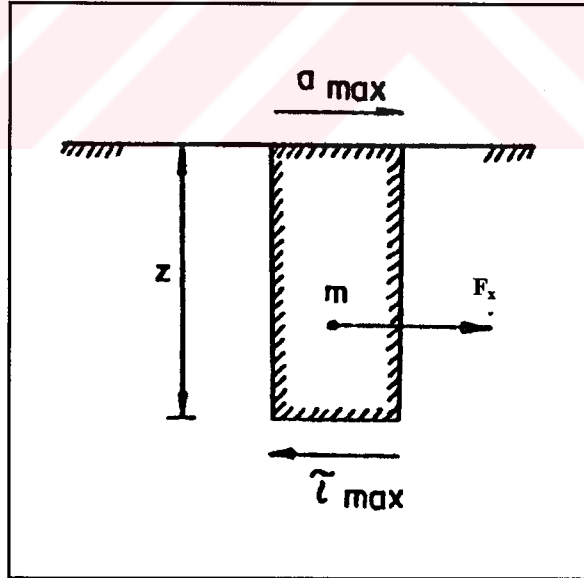
4.4. Depremsellik Etkisinde Pasa Şev Stabilite Analizi

Değişken dinamik yükler altında pasa şev kayma riskinin belirlenmesi için, bu yüklerin etki büyüklüklerinin ve mevcut malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Bu çok kapsamlı süreçte kayma tehlikesi, deprem sırasında indüklenen ilave gerilmeler esasına göre belirlenir [49,50].

Deprem mühendisliğindeki basitleştirilmiş yöntemlerden hareketle etkin yük makaslama gerilmeleri tarafından aktarılır ve normal gerilme değişimleri ihmal edilebilir. Temel yüzeyden düşey yönde artan bu makaslama kuvvetleri yatay düzlemde (daha doğrusu düşey düzlemde) kayma gerilmesi çevriminin maksimum değerine yönelir. Zemin burada basit kayma kuvvetleri taşıyıcısı olarak dikkate alınır (şekil 4.42).

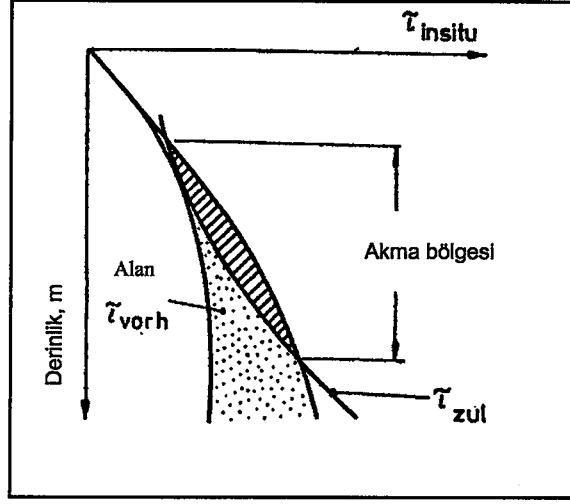
İndüklenen kayma gerilmeleri, eşitlik 4.98'e göre hesaplanır. Burada; r_d zemin kolonunun şekil değişim faktörü olarak hesaba katılır. a_{max}/g oranı, deprem şiddetine uygun olarak seçilir.

$$\tau_{max} = \gamma \cdot z \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot r_d \quad (4.98)$$



Şekil 4.42. Gerilme yüklenici olarak kolon zemin taslağı [49].

$r_d = f(z, I_d \text{ ve malzeme özellikleri})$ (şekil 4.43)



Şekil 4.45. Akma (kayma) bölgesinin belirlenmesi [49].

Deprem etkisindeki bir bölgede kayma riskinin belirlenmesi için diğer bir metot, yerinde (in-situ) yöntemler oluşturmaktır. Bu yöntemlerden bir kaçı deprem etkisi nedeniyle oluşan periyodik gerilme oranlarını, diğerleri ise magnitud, odak derinliği ve odak'tan uzaklık gibi tanım büyüklüklerine göre karar verirler. Genellikle in-situ yöntemler; laboratuvar ve nümerik yöntemlerle birleştirilir. Bunlar, kayma riskinin hesaplanabilmesi için ön bilgiler verirler. Tüm tanım büyüklükleri kullanılırken ilgili bölge verilerinin dikkate alınmasına özen gösterilmelidir. Son olarak ilgili sahada sismogram tesis edililerek, geniş ölçüde kontrol hesaplamaları ve gerektiğinde gelecekteki depremler için envanter oluşturmakta kullanılabilir.

Eğer bütün gerilme bileşenleri biliniyorsa, üç boyutlu gerilme bölgesinin sabit büyüklükleri kullanılarak, kayma koşulları maksimum yük ve geriye dönük kayma gerilmeleri analizlerine göre formülize edilebilir.

-Maksimum yüke göre analiz

Deprem esnasında oluşan kayma gerilmeleri bir eksen üzerinde aktarıldığı kabul edilerek, aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{22} &= \sigma_{33} \\ \sigma_{11} &= K_c \cdot \sigma_{33} \\ \sigma_{12} &= \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0 \text{ (yatay bölgeler)} \end{aligned} \right\} \text{Başlangıç koşulu} \quad (4.100)$$

$$\Delta \sigma_{11} = \Delta \sigma_{22} = \Delta \sigma_{33} = 0 \quad (4.101)$$

$$\Delta \sigma_{12} = \Delta \tau \quad (4.102)$$

$$\Delta\sigma_{13} = \Delta\sigma_{23} = 0 \quad (4.103)$$

Bununla sabit büyüklükler belirlenir;

$$I_{1\sigma} = \sigma_{33} \cdot (K_c + 2) \quad (4.104)$$

$$I_{2\sigma} = \sigma_{33} \cdot (2K_c + 1) \quad (4.105)$$

$$I_{2\sigma Dp} = \Delta\tau^2 \quad (4.106)$$

Kayma koşulu;

$$N_B = e^{\alpha \cdot k} \cdot \left(\frac{\sqrt{2K_c + 1}}{K_c + 2} \right)^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{\Delta\tau}{\sigma_{33} \cdot (K_c + 2)} \right)^{\alpha_2} \quad (4.107)$$

-Geriye dönük kayma gerilmesine göre analiz

Tekrar paralel bir eksen üzerinde aktarılan kayma gerilmelerinden hareketle, aşağıdaki ilişkiler kurulur.

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} \quad (4.108)$$

$$\sigma_{31} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0 \quad (4.109)$$

$$\Delta\sigma_{11} = \Delta\sigma_{22} = \Delta\sigma_{33} = 0 \quad (4.110)$$

$$\Delta\sigma_{12} = \Delta\tau \quad (4.111)$$

$$\Delta\sigma_{13} = \Delta\sigma_{23} = 0 \quad (4.112)$$

Bununla sabit büyüklükler belirlenir;

$$I_{1\sigma} = 3 \cdot \sigma_{33} \quad (4.113)$$

$$I_{2\sigma} = 3 \cdot \sigma_{33}^2 \quad (4.114)$$

$$I_{2\sigma Dp} = \Delta\tau^2 \quad (4.115)$$

Kayma koşulu;

$$N_B = e^{\alpha \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{\Delta\tau}{3 \cdot \sigma_{33}} \right)^{\alpha_2} \quad (4.116)$$

İlk iki terim sabit bir katsayı ile gösterilerek, eşitlik kısaltılabilir.

$$N_B = e^{\beta_k} \cdot \left(\frac{\Delta\tau}{3 \cdot \sigma_{33}} \right)^{\beta_1} \quad (4.117)$$

$$\beta_1 = \alpha_2 \quad (4.118)$$

N_B : Yük değişim değeridir.

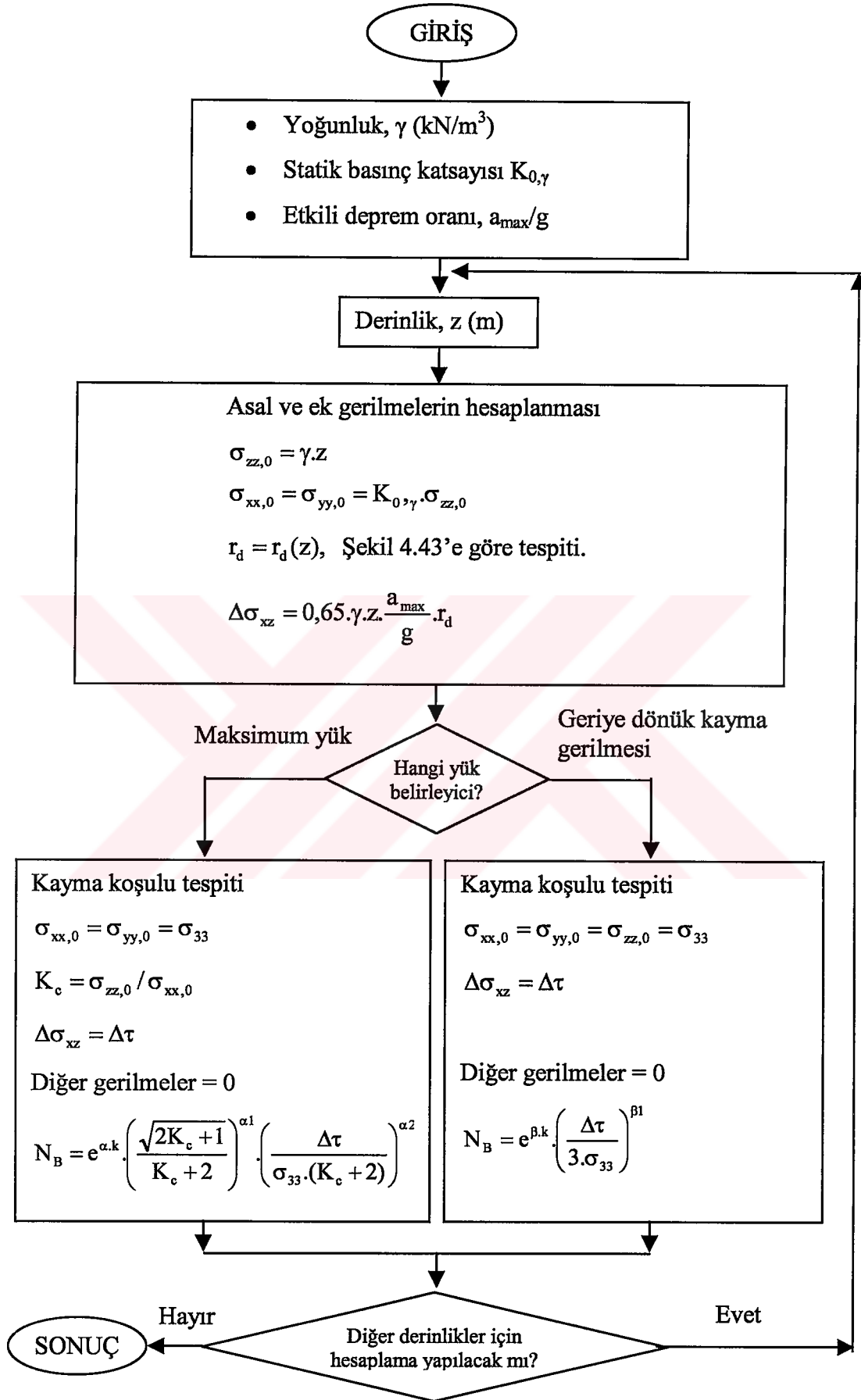
α_k , α_1 ve α_2 katsayıları; regresyon analizi kullanılarak farklı porozite içeren malzemeler için tespit edilebilir (tablo 4.6).

Tablo 4.6. Farklı poroziteli malzemeler için α_k , α_1 ve α_2 katsayıları [49].

Ort. Porozite $\bar{n}$	α_k	α_1	α_2	Korelasyon katsayısı (r)	Standart sapma (s)
40	267,139	519,105	-5,190	0,9976	0,198
36	17,604	58,236	-5,249	1,000	$8,55 \cdot 10^{-3}$
33	-44,927	-60,285	-5,736	0,9499	0,893

$$\beta_k = 2,5 \cdot \beta_1 \quad (4.119)$$

Eşitlik 4.98’de kullanılan $\frac{a_{max}}{g}$ oranı için, bölgesel depremsellik koşulları ve yapı türüne göre değerler seçilebilir [29,51]. Fakat sıkça kullanılan sınır değeri, $\frac{a_{max}}{g} = 0,08$ dir. Farklı deprem şiddetlerine göre alınabilecek değerler için, tablo 3.3’e bakınız. Şekil 4.46’da verilen algoritma, depremsellik etkisinde şev stabilite analizi akış diyagramının kolay kullanımını sağlar [49].



Şekil 4.46. Deprem etkisinde kayma riskinin belirlenmesi için algoritma [49].

4.5. Şev Stabilite Analiz Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Bir bloğa etkiyen kaydırıcı ve tutucu kuvvetlerin karşılaştırılması ile geleneksel duraylılık ve güvenirlilik tespiti, denge koşulunun stabilitesi için gereklidir (1.yasa). Fakat bu sadece tasarımsal sistemlerde, yani tutucu ve kaydırıcı kuvvetlerin deformasyonlara neden olmaması halinde geçerlidir. Kayabilir pasa şevlerinde klasik stabilite analizi, ancak göreceli sonuçlar verebilir. Sistemin sınırlı tasarımı, bir emniyet faktörünün gerçekleşme ihtimalini tam olarak açıklayamaz. Yeter derecede stabilite için, ikinci enerji yasası devreye girer ve hiçbir araştırma bölgesinde (lokal veya global) $\Delta^2 E < 0$ olmamalıdır. Malzeme için olası gerilmeler ile herhangi bir blokta stabilite koşullarının yerine getirilmesi, bu yöntem ile daha doğru belirlenebilir. Söz konusu ikinci yasa, alınan enerjinin ön belirtisi üzerine ($\Delta^2 E$), bir yığında lokal veya global kayma olup olmayacağını açıklar. Bu, malzeme bileşenleri ve durum değişkenlerinin net tanımlanmış bir alanını gerektirir. Bu alan, basit ampirik olarak belirlenir ve esas itibariyle gerçek bir kaymanın hareket alanı ile hiçbir ilişkisi yoktur.

Ancak; mekanik etkiler vasıtasıyla kayan pasa şevleri için stabilite koşulu, söz konusu her iki yöntem ile çok sınırlı olarak sağlanabilir. Eğer hareketler dış etki kuvvetleri kalktıktan sonra kendiliğinden dursaydı, o zaman kesin tespit edilebilirdi. Bundan dolayı hareket eşitlikleri; herhangi bir zaman dilimi için dane yapısına bağlı olarak tanımlanmış, başlangıç ve kenar koşulları malzeme yasaları ile belirlenmiş, danecik akışları (yani partikül diferansiyel eşitlikler) ile çözümlenmelidir. Bu uygulanabilir zamanda çok pratik olmayabilir, ancak kaba basitleştirmeler ile örneğin, düz veya dairesel dar bölgelere konsantre olmuş ve belirli bölgelere aynı oranda dağılmış kesme kuvvetleri (kinematik metot) ile sık sık hız dağılımları zamansal olarak değişmez kabul edilerek, faydalı bilgiler kazanılabilir. Hız değerinin zamansal gelişimi, hareket eşitliğinin integrasyonundan izlenir. Esas itibariyle bu; hypoplastik madde yasası, gaz eşitlikleri ve permeabilite yasaları vasıtasıyla malzeme sabitleri ve başlangıç durum değişkenlerinden belirlenir. Etkiler, hacim ve yüzey kuvvetleri olarak açığa çıkar. Böylece; mekanik etkiler önemli ölçüde belirlenmiş olur ve statik denge koşulunun kaybı, $\Delta^2 E$ vasıtasıyla tanımlanır ve de spesifik başlangıç koşulu olarak alınır.

Klasik stabilite analizinde; karşılaşılan taşıyıcı kuvvetler, ağırlık oranları, su basınçları ve malzeme parametreleri ile daima denge korunmalıdır. Ancak, arazi ölçümleri vasıtasıyla belirlenen taşıyıcı kuvvetlerin temininde (maksimum etkiler her yerde eşit olmayabileceğinden) dikkatli olunmalıdır. Geleneksel stabilite analizinde dayanımların kullanımı daha da problemlidir, çünkü pasa yığınlarında zamansal ve yerel çok büyük değişken dirençler (anizotropi) söz konusudur.

Ayrıca dinamik etkiler vasıtasıyla oluşan aşırı boşluk suyu basınçlarının belirlenmesi, etkilerin esaslı bir tanımlanmasını gerektirir. Arazi ölçümlerine dayalı korelasyonlar ile bir tahmin, günümüz verilerine göre çok sağlıklı değil, fakat bir takım ölçmeler ile kontroller daha da iyileştirilebilir. Bu tür aşırı boşluk suyu basınçları, birinci ve ikinci yasa teorilerine göre stabilite analizinde göz önünde bulundurulur. İkinci yasada ($\Delta^2 E$) durum değişkeni olarak hidrostatik basınca karşın, değişken su basıncı alanından hareket edilir. Birinci yasada (geleneksel statik yöntemler) basınç artışına uygun olarak bir dayanım azalması varsayılır, fakat kaymaya başlamada su basıncının gelişimi tam olarak açıklanmaz.

Dinamik stabilite kaybına derinlemesine bir bakış, mekanik kuvvetler gelişiminin nümerik analizi ile sağlanabilir. Gaz partikülleri vasıtasıyla gerçekleşen hacim değişimi, basınç ve kesme kuvvetlerinin lineer olmayan bir birlikteliğine yönelir. Ancak yeterli yoğunluktaki basınç kuvvetleri, dağılmaktaki gaz partikülleri vasıtasıyla tam kaymayı gerçekleştirir. Ayrıca yeterli büyüklükteki kesme kuvvetlerinin oluşumu da kaymaya yönelir (dane yapısının bozulması, süspansiyona geçiş). Burada gaz partikülleri sönümleyici etki yapar. Tüm bunlar, lineer elastik dalgalar (kuvvetler) teorisi ile açıklanamayabilir.

Önceki bölümlerde de vurgulandığı gibi, pasa yığınlarının heterojenliğinin önemi artık kanıtlanabilir. Stabilite analizinde geniş ölçüde basitleştirilerek alınan hız ve basınç dağılımları, bölgesel etkileşimin bir denkliğini gerektirir. Bu yüzden tasarımsal sistemlerde stabilite gerçeğe yakın tahmin edilemez, çünkü direnç farklılıkları kendiliğinden oluşur. Bununla birlikte kayma riski bulunan pasa yığınlarında, zayıf bölgeler daha yüksek kayma riski bulunan bölgelerde odaklanabilir, öyle ki sağlam bölgeler de birlikte kayabilir. Böylesi mekanizmalar; tanıtılan metotlar ile şimdiye kadar yeterince incelenmediğinden, doğru ve yüksek maliyetli uygulamalarda dahi az da olsa bir risk bulunmaktadır.

4.6. Kalitatif Değerlendirme

Daha önceki bölümlerde tanıtılan şev stabilitesi analiz yöntemlerinde -hangi tür olursa fark etmez- iki tespit mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır:

- Kayma riski bulunan bir pasa yığın malzemesi, drenajsız durumda akmaya yani kaymaya karşı düşük deformasyonlu olması, genellikle jeoteknik'te karşılaşılan malzemelere kıyasla çok daha hassas durumdadır. Zeminin heterojenliği, tasarımsal sistemlerdeki gibi eşit varsayılmaz.
- Daha önce açıklanan heterojenlik için; morfolojik, jeoteknik (jeolojik, hidrolojik, zemin mekaniği) ve teknolojik koşullar (döküm türü, pasalar arasındaki sınırlar, pasa yığın doğrultusu) ve gerektiğinde diğer bir çok özellik etkilidir. Bu nedenle kayma riski için araştırmalar, sadece çok sınırlandırılmış lokal bir geçerlilik alanına tatbik edilir. Geniş şevlerin kısmi incelenmesi ve genel'e uygulaması, stabilite için belirleyici tüm faktörleri içermesinden dolayı, mutlaka dikkate alınmalı ve önem verilmelidir.

Bu koşullarda, şimdiye kadar geliştirilmiş kayma riski analizlerinin tümü bir tahmin niteliğindedir. Kayma sürecinin belirlenmesi için, pasa yığınlarında mekanik etkilerin dağılımı detaylı izlenmelidir. Bu; ancak kaba basitleştirmeler ile başarılı, öyle ki sonuçlar sadece kalitatif ve gerektiğinde büyük düzenlemeler ile kantitatif olarak realize edilebilir. Basınç ve yatay bir kesme kuvveti, drenajsız gevşek bir zeminde dane yapısının bozulmasına ve böylece kaymaya yöneltebilir. Ancak, dane yapısının bozulmasıyla oluşan bir süspansiyonda, kesme ve basınç kuvvetleri arasında lineer olmayan ilişki, gaz partiküllerinin toplanması ve sonrasında kayma, akma veya sedimentasyonlar, gerçek bir zemin davranış analizini zorlaştırmakta veya tamamen olanaksız hale getirmektedir.

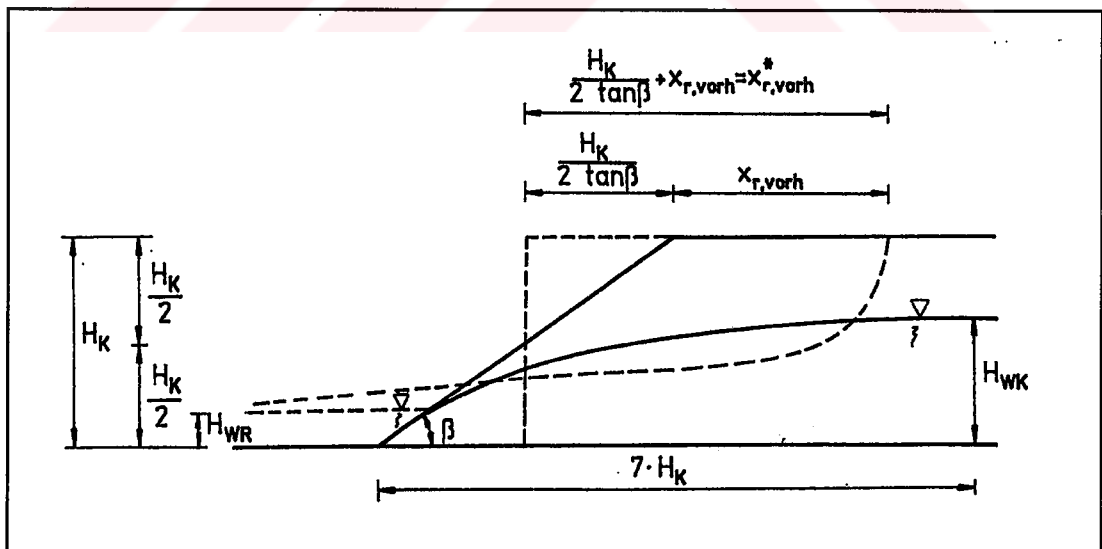
Ancak; kayma başlangıcı olarak kabul edilen bir mekanizma ile statik dengenin kaybolması ve kaymanın başlaması, açığa çıkan kinetik enerji vasıtasıyla (kinematik zincir) gerçeğe yakın tahmin edilebilir. Göreceli büyük enerji açığa çıkaran hesaplanmış alanlar, ani bir kaymanın olası başlangıcını bildirir. Fakat burada, kaymanın zamansal gelişimi ve miktarı ortaya konulmaz. Ancak kesinlikle bir kayma bekleniyor mu, evet veya hayır? sorusuna, Bölüm 4.3'te açıklanan hypoplastik model ile daha doğru cevap verilebilir [21,44,45].

5. MUHTEMEL BİR PASA ŞEV KAYMA ETKİ SAHASININ BELİRLENMESİ

Kayma riski bulunan pasa şev alanlarında, emniyet tedbirleri olarak girişe yasak bölgelerin ve bunların tarımsal veya regreasyon amaçlar için kullanılıp kullanılmayacağının belirlenmesi gereklidir. Bu amaçla; olası bir kaymanın şev gerisine doğru etki sahasının belirlenmesi ve bununla riskli bölgenin sayısal esaslara göre boyutlandırılması gerekmektedir. Pek çok etki büyüklüğüne bağlı bu problemin çözümü için pratik düşünceler;

- gözlenmiş etki uzunlukları ve buna dayalı ilgili veriler bakımından bir kaymanın değerlendirilmesi,
- teorik bir modelleme ile etki uzunluğu üzerine yönelik araştırmanın, analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmasıdır.

Burada; gerçek etki uzunluğu $X_{r,vorh.}$ (şekil 5.1), bulunan teorik etki uzunluğuyla ilişkilendirilir ve bu oran önemli etki büyüklüklerine bağlı olarak ifade edilir.



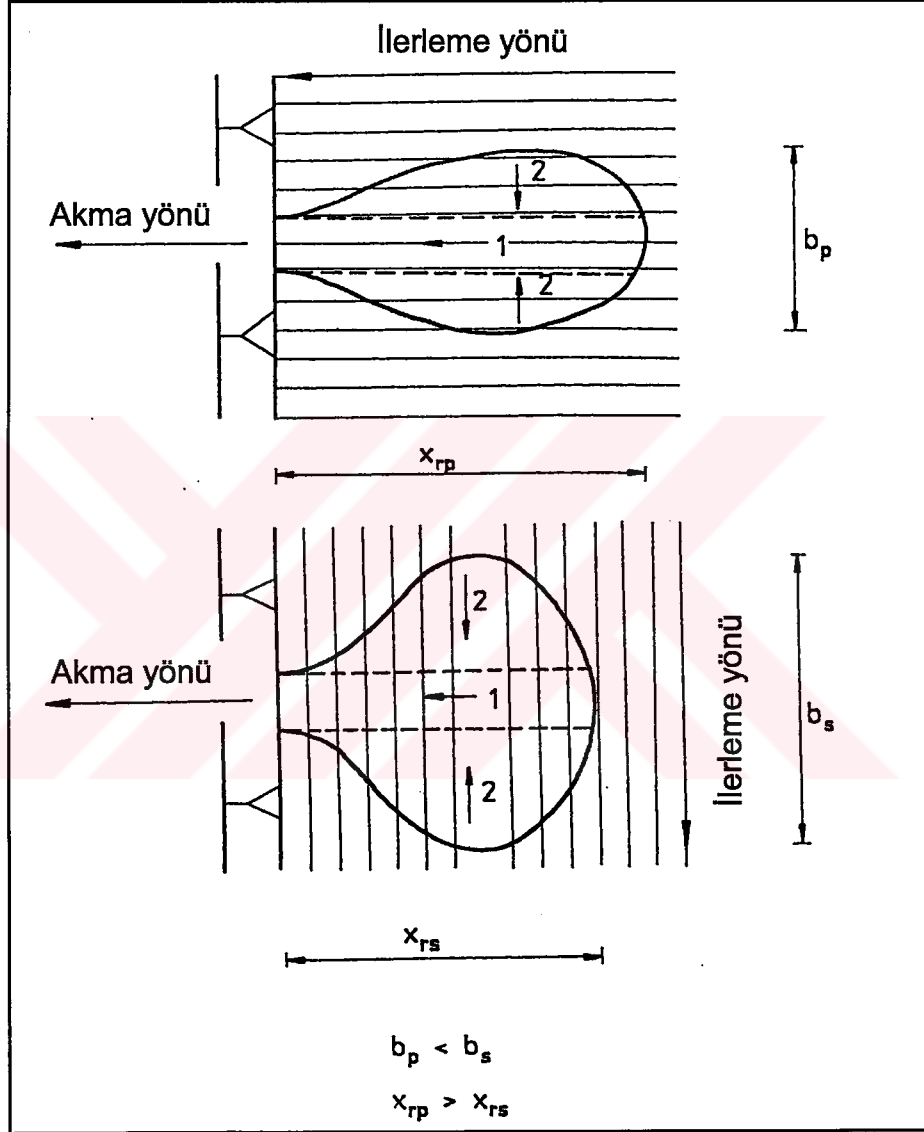
Şekil 5.1. Mevcut etki sahasının ($X^*_{r,vorh}$) belirlenmesi için tanım büyüklükleri [21].

Önemli etki büyüklükleri:

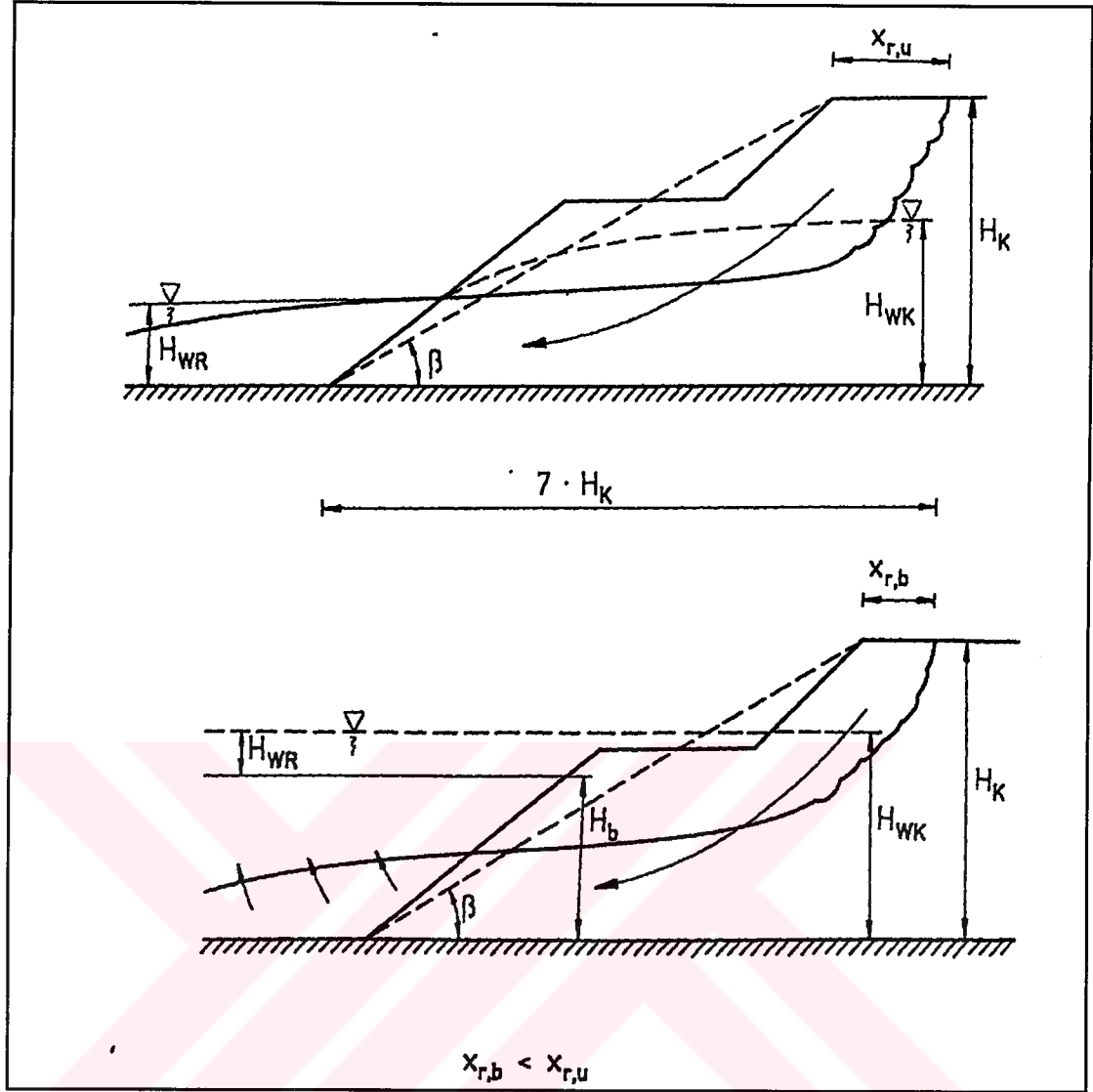
-Etkinin tür ve yoğunluğu,

-Döküm teknolojisi (ilerleme yönüne göre kayma yönünün durumu; paralel veya dikey (şekil 5.2),

-Kayma koşulları {önlemsiz (u), önlemlili (b); şekil 5.3}.



Şekil 5.2. Akma yönünün ilerleme yönüne göre etki genişliği (X_r); (p) paralel, (s) dikey [21].



Şekil 5.3. Etki sahasının belirlenmesinde kayma koşulları (u) önlemsiz, (b) önlemlili [21].

Diğer etki büyüklükleri; küçük belirsizlikler içermesi, net bir korelasyon sağlamaması veya sonucun daha da iyileşmesine yöneltmediğinden dolayı dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle ilgili parametreler, daha çok geometrik büyüklükler ve teknolojik faktörlerden oluşmaktadır.

Riskli bölgelerin belirlenmesi ve beklenen bir kaymanın etki sahasının tespiti için, iki farklı hesaplama alternatifi tanıtılacak ve bunların kullanım prensipleri açıklanacaktır.

5.1. Hesaplama Alternatifi I

Bu hesaplama alternatifi; oluşmuş 96 şev kayma olayının değerlendirilmesine dayanmakta ve beklenen etki uzunluğunun basit bir tahminini sağlamaktadır. Farklı materyal ve etkilere rağmen bütün koşullar ortak dikkate alınır ve teknolojik parametreler ile kayma koşulları kombinasyonundan oluşan dört temel birimle özetlenir. Normlaştırılmış mevcut etki uzunluğunun ($X_{r,vorh}^*/H_K$) belirlenmesi için regresyon analizi, aşağıdaki eşitlik doğrultusunda yapılır.

$$\frac{X_{r,vorh}^*}{H_K} = a_1 \cdot e^{\left[b_1 \left(\frac{H_{WK}}{H_K} - 1 \right)^2 \right]} \quad (5.1)$$

İlgili parametre değerleri, tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Regresyon analizi sonuçları $\frac{X_{r,vorh}^*}{H_K} = f\left(\frac{H_{WK}}{H_K}\right)$ [21].

Kriter	a_1	b_1	r	n	Araştırma sahası
p/b	14,366	-3,785	-0,955	23	12 m H_K 56 m 0,22 H_{WK}/H_K 0,83 5° $\beta \leq 33^\circ$
p/u	23,24	-3,314	-0,883	29	8 m H_K 65 m 0,29 H_{WK}/H_K 0,83 5,7° $\beta \leq 32^\circ$
s/b	5,759	-4,340	-0,795 (-0,864)	27	8,5 m H_K 56 m 0,35 H_{WK}/H_K 0,78 10° $\beta \leq 40^\circ$
s/u	7,891	-2,785	-0,86	17	6 m H_K 40 m 0,27 H_{WK}/H_K 0,88 9° $\beta \leq 33^\circ$

Korelasyon katsayıları (r), istatistik güvenirlilik koşullarını doğrulamaktadır (n değer çifti sayısı). Sağlanacak etki uzunluğu, aşağıdaki eşitliğe göre belirlenir.

$$X_r = \delta_1 \cdot \left(X_{r,vorh}^* - \frac{H_K}{2 \tan \beta} \right) \quad (5.2)$$

$$X_r = \delta_1 \cdot H_K \left[a_1 \cdot e^{b_1 \left(\frac{H_{WK}}{H_K} - 1 \right)^2} - \frac{1}{2 \tan \beta} \right] \quad (5.3)$$

δ_1 katsayısı, regresyon eşitliği vasıtasıyla belirli değerin özellikle bir etkinin büyüklüğüyle ilgili sapmalar olarak dikkate alınır ve aşağıdaki değerler önerilir:

- Normal etki kuvvetleri için; $\delta_1 = 1.0$
- Geçirgen pasa barajlar ve hızlı yeraltı su seviyesinin yükselmesi halinde; $\delta_1 = 1.2 \sim 1.8$
- Özellikle şiddetli, dinamik etkiler için; $\delta_1 = 2.0 \sim 2.4$

$\left(\frac{H_{WK}}{H_K} \right)$ oranı saptanmamış alanlar için, bir ekstrapolasyon uygun bulunur.

5.2. Hesaplama Alternatifi II

Örtü dekapaj malzemelerinden oluşan pasa yığınlarında kayma koşullarının değerlendirilmesi sonucu, belirlenen normlandırılmış mevcut etki uzunlukları ($X_{r,vorh.}^*/H_K$), lohsaer kumunda teorik ve deneysel araştırmalarla elde edilen normlaştırılmış teorik değerler ile ($X_{r,theor.}^*/H_K$) ilişkilendirilir.

$$\alpha = \frac{\frac{X_{r,vorh.}^*}{H_K}}{\frac{X_{r,theor.}^*}{H_K}} \quad (5.4)$$

$$\frac{X_{r,theor.}^*}{H_K} = 27,65 \cdot \left(\frac{H_{WK}}{H_K} \right)^{3,27} \text{ olup eşitliğin temelinde,} \quad (5.5)$$

$$\alpha = a_2 \cdot e^{b_2 \left(\frac{H_{WK}}{H_K} \right)} \quad (5.6)$$

ilişki bulunur ve α oranının elde edilmesi için pasa yığınındaki $\left(\frac{H_{WK}}{H_K} \right)$ su koşuluna bağlı bir regresyon analizi uygulanır. Burada, özellikle kuvvetli etkilerle oluşmuş kaymalar değerlendirmeye tabii tutulmamıştır. Sağlanan parametreler, tablo 5.2’de özetlenmiştir.

Tablo 5.2. Regresyon analizi sonuçları $\frac{X_{r,vorh.}^*}{H_K} = f\left(\frac{H_{WK}}{H_K}\right)$ [21].

Kriter	a_2	b_2	r	n	Araştırma sahası
p/b	14,20	-3,91	-0,96 (-0,98)	16 (9)	12 m H_K 56 m 0,22 H_{WK}/H_K 0,8 6° $\beta \leq 33^\circ$
p/u	19,923	-3,44	-0,893	17	8 m H_K 40 m 0,29 H_{WK}/H_K 0,83 5,7° $\beta \leq 30^\circ$
s/b	3,865	-3,12	-0,861	17	12 m H_K 56 m 0,35 H_{WK}/H_K 0,75 9° $\beta \leq 33^\circ$
s/u	15,308	-4,81	-0,991	9	6 m H_K 40 m 0,27 H_{WK}/H_K 0,88 9° $\beta \leq 33^\circ$

Şekil 5.1 ve eşitlik (5.3)'ün dikkate alınmasıyla beklenen bir pasa şev kayma etki sahası uzunluğu;

$$X_r = \delta_2 \cdot H_K \left[a_2 \cdot e^{b_2 \left(\frac{H_{WK}}{H_K} \right)} \cdot 27,65 \cdot \left(\frac{H_{WK}}{H_K} \right)^{3,27} - \frac{1}{2 \tan \beta} \right] \quad (5.7)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Bu yöntemin, $\left(\frac{H_{WK}}{H_K} \right)$ oranının belirlenmediği alanlar üzerine bir ekstrapolasyonu uygun bulunmaz. δ_2 katsayısı aşağıdaki gibi uygulanır:

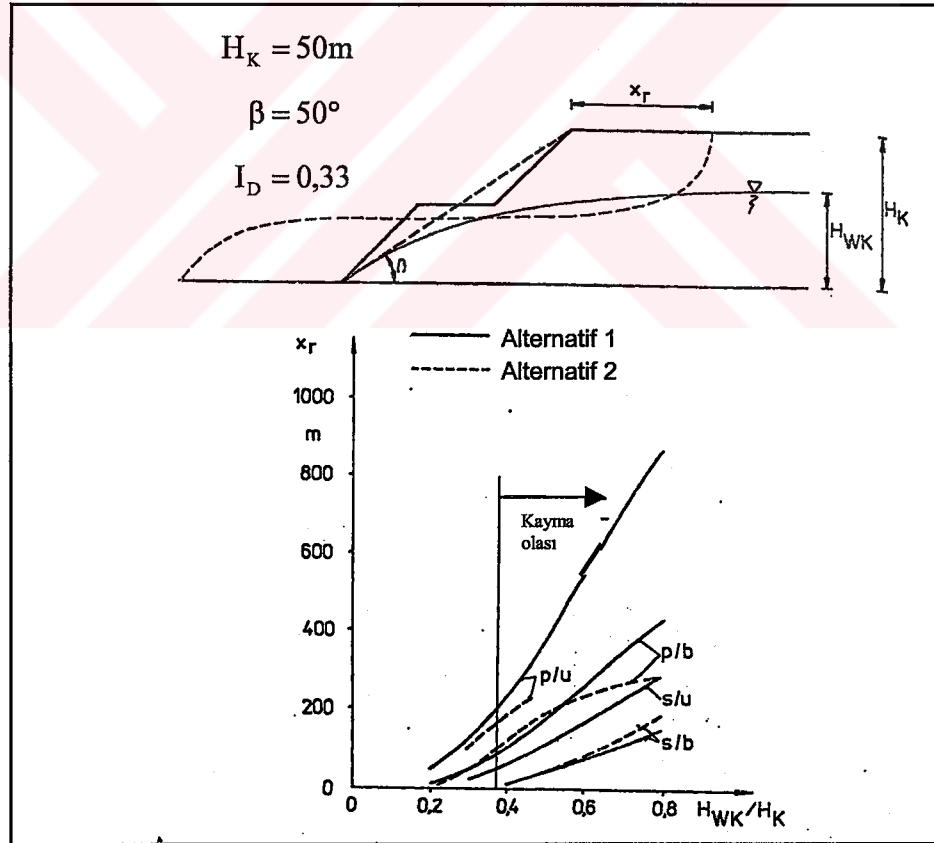
- Normal etki kuvvetleri için; $\delta_2 = 1.0$
- Geçirgen pasa barajlar, yeraltı su seviyesinin ani yükselmesi halinde;
 $\delta_2 = 1.2 \sim 2.5$

Özellikle şiddetli etkilerle oluşmuş kaymalar dikkate alınmadığından, önceki eşitlikler bu durum için kullanılmaz. II. hesaplama alternatifi yerinde gevşek kayaçların özelliklerini de kapsar. Eşitlik (5.6) ve tablo 5.2, $\left(\frac{H_{WK}}{H_K} \right)$ oranının geçerlilik sınırlarında genel olarak geçerlidir. Eşitlik (5.7) sadece lohsaer kumundan oluşan materyaller için geçerlidir. Diğer materyaller için ve eşitlik (5.5)'deki parametrelerin laboratuvar testleri ile belirlenmesi gereklidir.

Hesaplama alternatifleri I ve II sonuçlarına göre kayma riski taşıyan bölgenin esaslı bir tespiti mümkündür. Negatif etki uzunluklarının anlamı (şekil 5.1'e göre), kayma yüzeyin eğimli şev bölgesinde bulunduğunu gösterir. Böyle durumlar değerlendirmeye esas teşkil etmediğinden, bunlar için δ değeri kullanılmayabilir. Bu durumda hesaplama daha yüksek su seviyesi koşuluyla ve şev açısıyla tekrar edilmelidir. Tehlike sınırları her defasında gerçek su koşulları oranının ($\frac{H_{WK}}{H_K}$) ölçüsüne göre belirlenir. Bu nedenle, bir şev kaymasından sonra yeni durum değerlendirmeleri yapmak gerekmektedir [21,28].

5.3. TKİ-GELİ Muğla Bölgesinde Bir Uygulama

Şekil 5.4'te örnek bir pasa şev geometrik koşulları ve yükselen yeraltı su seviyesi etkisinde, şev duraysızlık etki sınırlarının belirlenmesi amacı ile, ölçüm sonuçları verilmektedir.



Şekil 5.4. $\left(\frac{H_{WK}}{H_K}\right)$ Su koşullarına göre şev kayma etki sahasının (X_r) belirlenmesi için bir uygulama [28].

Kritik su seviyesi oranının bir tahmini, aşağıda önerilen ampirik bağıntıya göre bulunabilir:

$$\eta = 0,8 \cdot \left(\frac{H_{WK}}{H_K} \right)^* = 0,8 \cdot 0,403 \cdot I_D^{0,195} \cdot \left(\frac{1}{\tan \beta} \right)^{0,439} \quad (5.8)$$

Öngörülen durum için;

$$\eta = 0,8 \cdot \left(\frac{H_{WK}}{H_K} \right)^* = 0,26 \text{ 'dan itibaren bir kayma söz konusudur (şekil 5.4) [28].}$$

6. PASA ŞEV DURAYSIZLIKLARINA KARŞI ALINABİLECEK ÖNLEMLER

Açık işletme dekapaj döküm şevlerinin kayma koşullarını belirleyen kriterlerden (bkz. Bölüm 3.3) hareketle, bir kaymanın önlenmesi için olası tedbirler:

- Dekapaj döküm yığın özelliklerini değiştirmek (konsolidasyon ile dayanım özelliklerini arttırmak ve yapısal değişiklikler),
- Hızlı bir işletme yöntemiyle oluşacak boşluk suyu basınçlarını önlemek (drenajların yapılması),
- Olumsuz etki kuvvetlerinden sakınmak ve koruyucu olmak,
- Teknolojik planlamada önlemler almak (daha az üretim çukuru ve şev yüzeyine izin vermek),
- Kuvvetli geçirgen, iri daneli veya özel durumlarda bağlayıcı pasa malzemesini nihai şev önüne selektif olarak dökmek,
- Açık işletmenin tamamlanmasından sonra, yeraltı su seviyesi yükselmeden önce şevlerin kaymaya karşı güvenli şekillendirilmesiyle gerçekleştirilebilir.

Bütün tedbirler; bilinen oluşum şekli ve risk etkileriyle bir kaymanın meydana gelmesinde, kayma eğilimindeki pasa malzemesini yeterli güvenilirlikle durduracak, şev yığını boyunca bu tedbirlerin bir kombinasyonu veya koruyucu bir bloğun yerleştirilmesine kadar uzanır. Söz konusu en önemli arazi rehabilitasyon yöntemleri ve jeoteknik sınır koşullarına bağlı olarak kullanım özellikleri, aşağıda verilmektedir [21,53,54].

6.1. Arazi Rehabilitasyon Yöntemleri

Açık işletme sırasında ve sonrasında oluşan üretim boşlukları ve kayma eğilimli pasa şev yüzeylerinin iyileştirilmesi için bir yöntem seçilmesinde, mevcut durumun;

- daha önceden tamamen su ile dolu olması,
- kısmen su ile dolu olması,
- susuz olması arasında farklılıklar olur.

Son bahsedilen durumda, işletme planı kapsamındaki pasa şevleri öyle planlanmalı, şekillendirmeli ve stabil hale getirmelidir ki, daha sonraki kullanımlar için su seviyesinin yükselmesine rağmen gerekli stabilite korunabilsin.

Suya doymun fakat kayma eğiliminde olmayan nihai ve kenar pasa şevlerinde, gevşek kayacın selektif dökümü dikkate alınır veya aynı amaçla, örneğin uygun bir konsolidasyonla zemin mekaniği özellikleri iyileştirilir. Ayrıca boşluk suyu basıncının sürekli kontrolünü sağlamak için drenaj elemanları tesis etmek diğer bir olanaktır.

Suya doymun pasa şevlerinde kayma riski nedeniyle, patlatmayla dinamik stabilite sağlamak ve özel durumlarda bir güvenlik barajının hazırlanmasıyla titreşimli/vibrasyonlu-basınçlı sıkıştırma dikkate alınabilir.

Şayet üretim boşluğu henüz susuz ise, pek çok yöntem arasında seçim yapılabilir. Bunlar;

- Harmanlanmış pasanın yerleştirilmesiyle koruyucu blok oluşturmak,
- Kaya blokları, moloz, çakıl ve kumlardan oluşan temel inşaat konumundaki bir yapının, koruyucu blok olarak şev önünde tesis edilmesi,
- Koruyucu blok olarak kayma tehlikesi bulunmayan malzemenin dökülmesi,
- Ağırlıkla dinamik sıkıştırma,
- Titreşimli/vibrasyonlu-basınçlı sıkıştırma,
- Sulu yüksek basınç enjeksiyonu,
- Kritik boşluk suyu basınç değerini azaltıcı eleman olarak boşluk suyu basınç bariyerleri tesis etmektir.

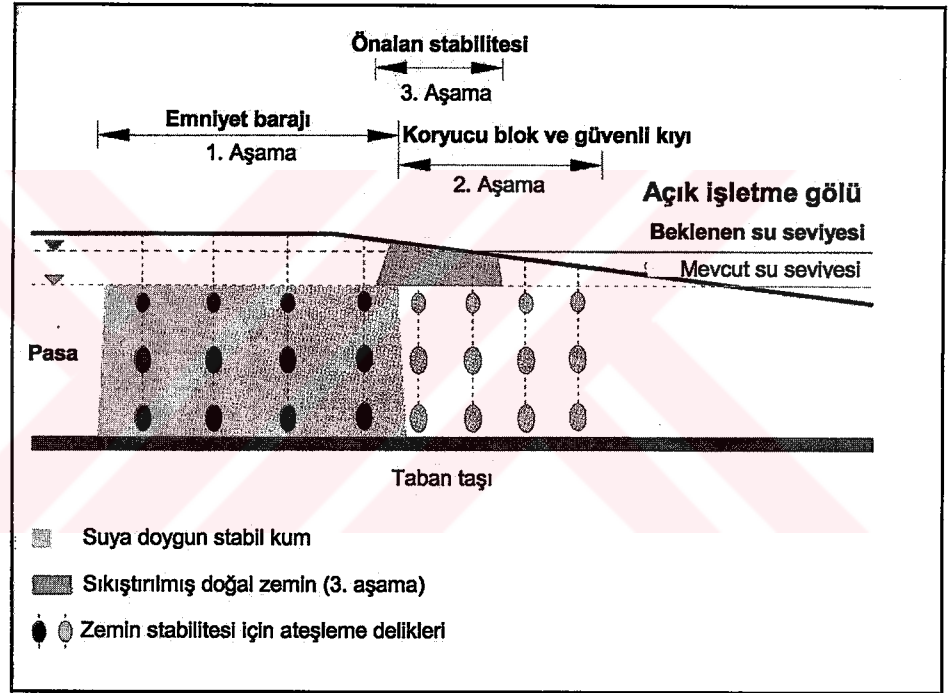
Eğer su geliri veya bölgesel ve de jeoteknik nedenler kısıtlıyorsa, bir üretim boşluğunun/çukurunun suyla doldurulması uzun yıllar (on yıllarca) sürebilir. Bu durumda; iyileştirme yöntemi seçiminde, su seviyesinin sürekli yükselip yükselmediği veya uzun zaman aynı seviyede kalıp kalmadığı dikkate alınmalıdır.

Burada; zamanla periyodik olarak pek çok defa tekrarlanan patlatma yöntemiyle dinamik stabilite sağlamak tek başına veya vibrasyonlu sıkıştırma ya da yüksek basınç enjeksiyonunun bir kombinasyonu şeklinde uygulanabilir [55-57].

6.1.1. Patlatmayla Dinamik Pasa Stabilitesi

Bu stabilite çalışmaları genellikle üç etaptan oluşur:

- 1-Şev kıyısı boyunca patlatmayla bir emniyet barajının hazırlanması,
- 2-Emniyet barajı denetiminde patlatmayla ön alan stabilitesi ve
- 3-Karıştırıcı veya vibratör silindir ile kalıcı nihai şev'in şekillendirilmesi (şekil 6.1 a,b,c) [58].

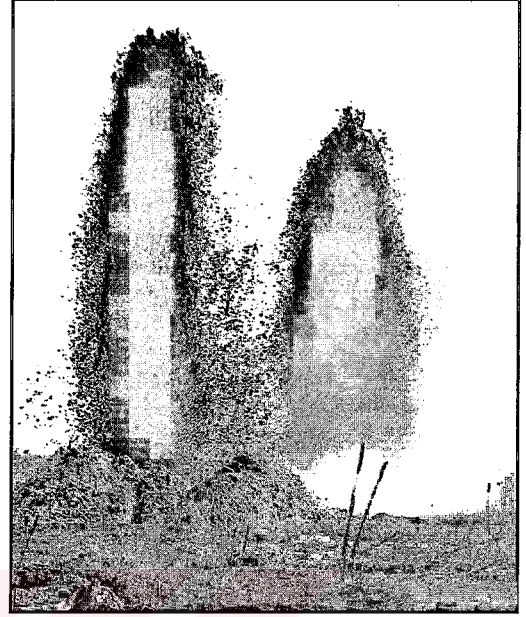


Şekil 6.1.a. Patlatmayla dinamik pasa şev stabilitesi [58].

Yöntemin kullanımı için sınır koşulları:

- Dekapaj döküm yığının suya doygunluğu,
- Kayma bölgesinde hiçbir koruyucu bloğun olmaması,
- Şev gerisi için koruyucu blok olarak emniyet barajının yer statğine göre boyutlandırılması,
- Kayma etki uzunluğunun saptanması (bkz. Bölüm 5) dikkate alınarak emniyet barajı durumunun tespiti,

- Mevcut pasa şev geometrisi (dik şev → dinamik stabilitenin başlamasından önce meyil azaltma ateşlemeleri uygulanır, yatay şev → kaymadan sakınmak için koruyucu ateşlemeler yapılır).



Şekil 6.1.b,c. Patlayıcı maddenin yerleştirilmesi ve ateşleme durumu [58].

Patlatma yönteminin tercih nedenleri:

- Ulaşılabilir yüksek etki derinliği,
- Göreceli büyük etki genişliği,
- Porozitenin azaltılması ve doğal dayanım parametrelerinin yükseltilmesi ile doğal yapının değişimi,
- Patlamayla sıkıştırmanın selektif etkisi (homojen sıkılık),
- Patlatma sonrası yaklaşık düz arazi yüzeyi içermesi,
- Göreceli düşük maliyet,
- Çabuk uygulanabilirliktir [21, 59-61].

6.1.2. Titreşimli/Vibrasyonlu Dinamik Pasa Stabilitesi (RDV)

Bu yöntem, yeraltı su seviyesi yükselmeden önce, artık kayma tehlikesi bulunmayan pasa yığınlarının hazırlanması için kullanılır. Fakat suya doymun pasa yığınlarında da kullanılabilir. Bu koşullarda, tıpkı patlatmayla sıkıştırmadaki gibi bir emniyet barajı hazırlanır. Belirli bir rizikoya bağlı koruyucu patlatmaların olduğu pasa döküm sahasında bu yöntem kullanılır.

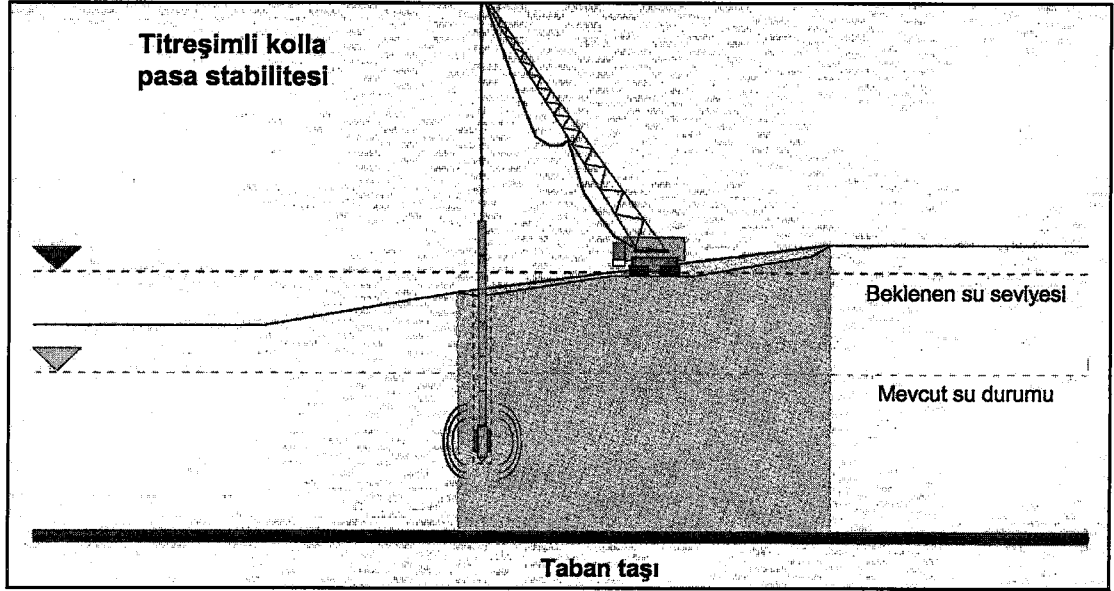
İlk önce kendi ağırlığıyla karıştırıcı, vibrasyon yardımıyla desteklenir ve karıştırıcı ucundaki tazyikli su veya basınçlı su-hava karışımı belirlenen derinliğe kadar indirilerek sıkıştırma yapılır. Esas sıkıştırma işi, karıştırıcının adım adım geri çekilmesiyle gerçekleştirilir. Dane yapısının yer değiştirmesiyle boşluk hacmi azalır ve yığın yüzeyinde uygun gevşek kayacın sonradan doldurulacağı bir huni oluşur.

Bölgesel heterojenliğe sahip pasa yığınlarında yöntemin iyi bir uyum göstermesi ve ani tepkinin temsil edilmesiyle sıkıştırma işleminin sürekli bir kontrolü sağlandığından, bu teknoloji avantajlar sağlar. İlk defa 1990 yılında Niederlausitzer (Almanya) linyit kömür işletmesi pasa yığınlarında uygulanan vibrasyonlu karıştırıcı, olumlu uygulama sonuçları göstermiştir.

Eğer bir üretim boşluğunun/ çukurunun suyla dolması zamanla aşamalı olarak gerçekleşiyorsa, suya doymuş pasa şev kısmının patlatma yöntemiyle konsolidasyonu ve henüz doğal nemli pasa şev kısmının ise vibrasyonla sıkıştırılması arasında bir kombinasyon, iki stabilite tedbirinin bağlantılı olarak etaplar halinde kullanımını gerektirir. Basınçlı karıştırıcı kol ile sıkıştırmanın (RDV) prensibi şekil 6.2.a ve b'de gösterilmektedir [58,62].



Şekil 6.2.a. Titreşimli kol [58].



Şekil 6.2.b. Titreşimli/vibrasyonlu dinamik pasa şev stabilitesi [58].

6.1.3. Şev Önünde Bir Destek Bloğu Oluşturmak

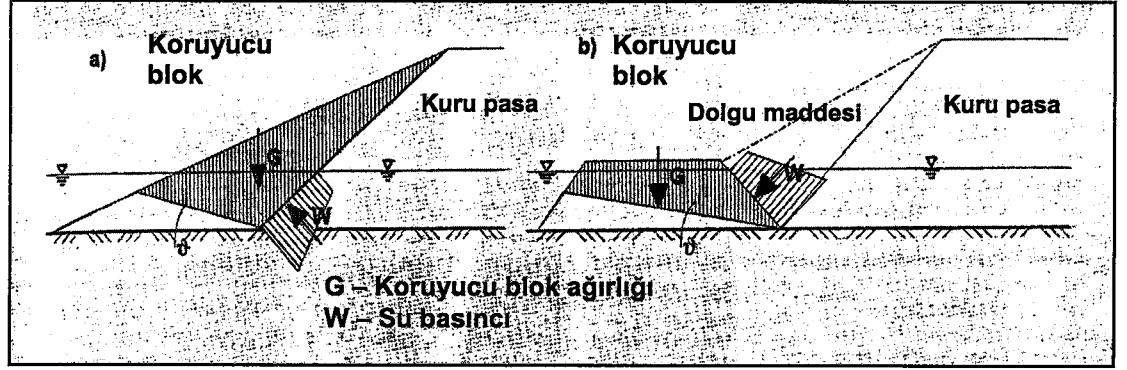
Destek bloğu;

- harmanlanmış yığın olarak katkılı malzemeden,
- mevcut yapının karıştırılmasıyla,
- taşınmış veya yerinde oluşturulmuş ve sıkıştırılmış malzeme ile inşa edilebilir.

Şekil 6.3’de uygun bir destek bloğunun hazırlanması için prensip olarak iki örnek verilmiştir. Burada ayrıca;

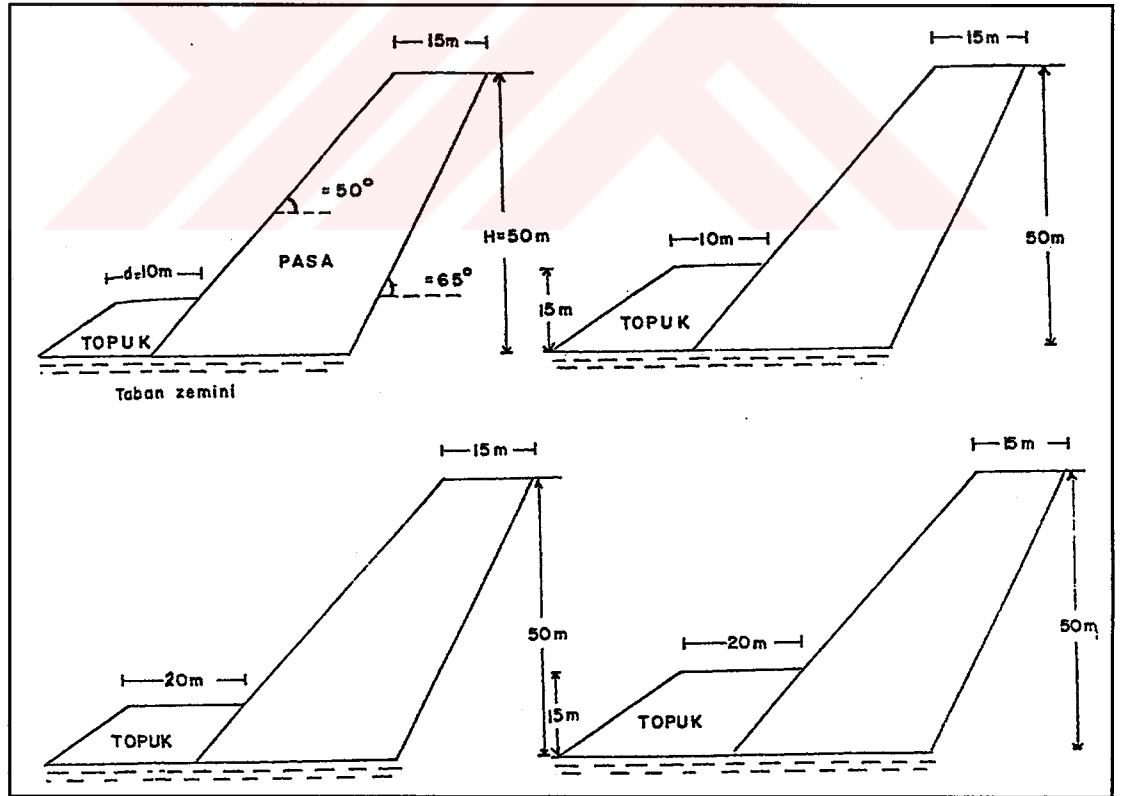
- destek bloğunun emniyetli boyutlandırılmış olması ve gelişen veya akıcı olmayan temel üzerinde bulunması,
- yerleştirilen destek bloğu malzemesinin kendiliğinden akıcı olmaması ve baraj etkisinden sakınmak için yüksek bir geçirgenlik göstermesi,
- karma yığın ve karıştırma işleminde suda sedimantasyon olmaması (karma yığın ve karıştırma topuğu sudan arındırılmış olmalı),
- zemin mekaniği bakımından kombine davranmayan uygun malzemelerin kullanılması,

- karma yığının minimum yüksekliği, beklenen maksimum su seviyesine bağlı olarak belirlenmesi önemlidir.



Şekil 6.3. Koruyucu bloğun oluşturulması a) Karma malzeme, b) Temel inşası [58].

Destek bloğunun yerleştirilmesiyle pasa şev stabilitesi, genellikle üretim boşluğunda su seviyesinin yükselmesinden önce olur. Uygun sınır koşulları altında; inşaat molozları, kaya veya harfiyat malzemelerinden oluşan bir destek bloğu daha önce suyla dolmuş üretim çukurlarında da yapılabilir [24,58]. TKİ-GELİ Muğla bölgesinde de benzer yöntem denenmiştir (şekil 6.4) [9].

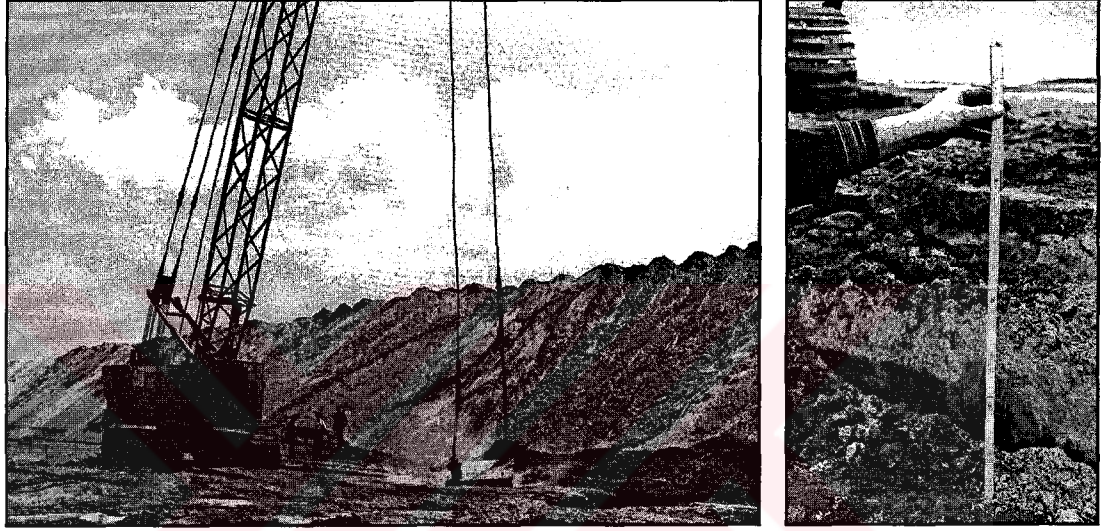


Şekil 6.4. TKİ-GELİ Muğla bölgesinde uygulanan pasa şev stabilitesi önlemleri [9].

6.1.4. Ağırlıkla Dinamik Sıkıştırma (DYNIV)

Ağırlıkla dinamik sıkıştırma (DYNIV); yukarıdan düşürülen bir ağırlık vasıtasıyla yüzeye yakın tabakaların sağlamlaştırılmasıdır. 1930'lu yıllarda otoban inşası amacıyla ve 1970'li yıllardan itibaren pek çok ülkede zemin iyileştirmede kullanılmıştır. Son yıllarda ise, kömür açık işletme sahalarında kayma riski taşıyan yığınların rehabilitasyonunda kullanılmaktadır.

En önemli teknolojik büyüklükler; düşürülen ağırlığın yüzey alanı, kütlesi, düşme yüksekliği ve vuruş sayısıdır (şekil 6.5).



Şekil 6.5. Ağırlıkla dinamik sıkıştırma (a) ve oluşan konsolidasyon (b) [58].

Çarpmadan kısa bir süre sonra yüzeyde %100 kayma derecesine ulaşılır, fakat tekrar hızla yavaşlar. Yavaşlama safhası tekrarlanan vuruşa kadar uzanır. Aynı sıkıştırma noktası üzerine tekrarlanan düşmelerle zeminin sıkıştırılması ve yer değiştirilmesi sağlanır. Çarpma hunileri bağlayıcı olmayan zeminle doldurulur. Daha sonraki zaman diliminde (birkaç hafta) sıkıştırma süreci tekrarlanır, sonra tekrar bağlayıcı olmayan malzeme ile doldurulur ve süreç birkaç kez yenilenir.

Yöntemin avantajları:

- DYNIV kolay gerçekleştirilebilir ve çevre uyumludur. Yöntem karşılaştırmalı olarak düşük sarsıntılıdır (çarpmada etki dağılımı büyük oranda düşey, sadece çok az yatay yönde olur).
- Gerekli ek çalışmalar, çarpma sonrası oluşan hunilerin doldurulmasından ibarettir. Bu amaçla bağlayıcı olmayan malzemeler kullanılır.
- Araç kullanımına göre günde 300-800m² alan sıkıştırılabilir.

Yöntemin dezavantajları ve sınırları:

- DYNIV sadece sınırlı bir derinliğe kadar etkir (max. 12 ~15m) ve bu yüzden yüzeye yakın tabakaların sıkıştırılmasında kullanılır (eğer tabanda bulunan tabakalar olası kayma riski içermiyorsa),
- Yöntemin kullanılması için sınırlar:
 - İnce dane oranı ($<0,002\text{mm}$) ağırlıkça %10-15,
 - Akma sınırının %100 ~110 su içeriği,
 - 10^{-7}m/s geçirgenlik katsayısı olarak bildirilir [21, 58].

6.1.5. Maden Reçinesi Enjeksiyonu ile Sıkıştırma

Dinamik zemin sıkıştırma yöntemiyle kayma belirtilerinin ortaya çıktığı, daha doğrusu kontrol edilemez kaymaların meydana gelebileceği alanlarda; kayma eğilimindeki zeminlerin stabilitesi için enjeksiyon yöntemleri uygulamak doğru olur.

Yöntemin kullanımı aşağıdaki durumlarda tercih edilir:

- Bina, yol ve köprü gibi yapıların stabilitesi,
- Altyapı sistemlerinin korunması,
- Şev ve gerisindeki alanlarda tamamlanmış yeşil sahaların korunması.

Enjeksiyon basıncının tespitinde; geçirgenlik, gözenek dağılımı ve büyüklüğü ve de derinliğe bağlı gerilme gradyentleri gibi zeminin petro-fiziksel parametreleri, enjeksiyon yöntemlerinin kullanımını belirler.

Genellikle dökülmüş karma zeminler; farklı geçirgenlik ve gözenek dağılımlı geniş bir dane spektrumu gösterirler, öyle ki iyi enjekte edilebilir ve pratikte yatay ve düşey yönde kısa mesafede sıkıştırılmış alanlar yaratabilirler.

Enjeksiyon işlevinin amacına ve pasa yığının enjekte edilebilirliğine bağlı olarak, aşağıdaki enjeksiyon sıvıları seçilebilir:

- Yaklaşık %30 bağlayıcı içerikli maden reçinesi dispersiyonu, düşük viskoziteli (5-8cp) sulu bir sıvıdır. Pasa yığınları iyi enjekte edilebilir ($k_f = 10^{-6}\text{m/s}$). Enjeksiyon basıncı hidrostatik basınçtan daha büyüktür. Yüksek permabilite daha doğrusu gevşek yıgınlı alanlar akış yönü olarak tercih edilir ve kohezyon artışıyla stabilite kazanılır.

- Katkılı maden reçinesi dispersiyonu (%2-8 çimento veya karma bentonit), yüksek permabilite (10^{-4} m/s) daha doğrusu gevşek yığınlı alanlar içerirler. Sıkıştırma veya konsolidasyon, enjeksiyon sıvısıyla boşluklar doldurulduktan sonra enjeksiyon hattının yük enjeksiyon basıncıyla yapılır. Enjeksiyon çalışmasının başlangıcından önce, doğrusu böyle sıkıştırılmış bölgenin kesin geometrik tasarımı güçtür.
- Yüksek basınç enjeksiyonlarında; özel kovanlar veya kolonlar olarak silindir ve lamel gibi geometrik şekiller hazırlanır. Yöntem vasıtasıyla farklı petro-fiziksel karakteristikli pasa yığınları yüksek basınç dolayısıyla (15-300 bar) yapısal olarak yeniden dizilir, enjeksiyon sıvısında yataklanır ve sağlamlaşır. Enjeksiyon reçinesi olarak aşağıdaki karışım uygundur:

%30 securan (%30 maden reçinesi dispersiyonu),

%30 su, %33,5 portlant çimento, %6,5 tixoton (kil minerali)

Bu tür enjeksiyon sıvısı ile, dayanım $>10 \text{ kp/cm}^2$ 'ye kadar erişir.

Pasa yığınlarının stabilitesi için enjeksiyon yönteminin avantajları her şeyden önce, kayma belirtileri olmaksızın zemin sıkıştırması yapılabilmesinde görülür. Diğer bir avantajı teknolojiye görülür, öyle ki enjeksiyon işlemleri ayarlanabilir, noktasal uyumlu deliklerde güvenilir bölgelerin yüksek derinliği (~1000m) mümkündür.

Dezavantajları her şeyden önce, bu tür stabilitenin toplam maliyetinde görülür ($10-25 \text{ €/m}^3$). Enjeksiyon ve sondajlar için teknik teçhizatlar yanında, enjeksiyon malzemeleri için sarf masraflar ortaya çıkar [21].

6.1.6. Müller Resonans Sıkıştırması (MRC)

Çok yeni bu yöntem, Almanya'da henüz az kullanılmaktadır. Çalışma şekli; titreşimli/vibrasyonlu sıkıştırmaya (RDV) benzemekte, sadece karıştırıcı kol yerine kendi ağırlığı nedeni ile zemine baskı uygulayan sıkıştırıcı bir kol kullanılır. Sıkıştırma süreci; dikey yönde kolun vibrasyonu ile başlar ve bu esnada kol ile zemin arasında kayma hareketi oluşur. Çalışma sırasında sıkıştırılan gevşek kayacın kayma frekansı bir veya birden fazla yüzeydeki alıcı ile ölçülür. Değişken frekanslı vibratör, ölçülen kaymalara öyle uyumludur ki; sıkıştırılan zemin tabakasının kendi frekansındaki (resonans) kaymaya kadar erişir. Böylece sıkıştırma süreci; dane

yapısının yer değiştirmesi ve danenin yeni dñzen kazanmasıyla daha sıkı yuğın haline gelmesinden ibarettir. Sıkıştırma normal olarak ortak davranış gñsteren bir malzemeyi en fazla etkilediğinden, prensip olarak yñntem avantajlıdır. Fakat aynı zamanda gñçlük, kol boyunca enerji aktarımı ve optimum sıkıştırma için spesifik enerjinin yeterli olmamasında gñrñlebilir (yñksek sñrtñnme kayıpları).

MRC-Yñnteminin kullanım alanları; yapısı kolay değişebilen zeminler, yani yñksek benzerlik boyutundaki dñřñk ince dane oranlı, doğal fakat daha çok suya doygun kum zeminlerdir.

Avantajları; yabancı malzemeye gereksinim olmaması. Ek alışmalar sadece oluşan oturma hunilerinin doldurulmasından ibarettir. Dezavantajları; yñntem yñzeeye yakın tabakaların sıkıştırılmasında kullanılır. 20m < derinliklere kadar etkilidir [21].

6.1.7. Boşluk Suyu Basıncı Bariyerleri

Tamamlayıcı veya alternatif yñntem olarak boşluk suyu basınç bariyerleri, kayma riski bulunan pasa alanlarında stabilite veya destek için kullanılabilir. şayet bir kayma sonucu gelişen boşluk suyu basınç artışı sınırlandırılır ise, ilgili pasa yuğınlarında tamamen kesme dayanımı kaybına değil, bilakis bñyñklñęñ boşluk suyu basıncı ùzerine etki edebilen, en dñřñk kesme dayanımının sağlanması kadar erişilebilir. Boşluk suyu basınç bariyerlerinin henñz iki tñrñ modellenmiş ve pilot çapta denenmiştir. Bunlar;

- boşluk suyu basınç etkisinin azaltılması için hava yastığı,
- hızla boşluk suyu basıncının azaltılması için drenaj tesisidir.

Hava yastığının avantajları; sondaj ve hava basıncı için basit bir teknik teçhizat, dñřñk malzeme gereksinimi ve bununla gñreceli dñřñk maliyet içermesidir. Hava katkısının desteklenmesinde yñzey aktif maddelerin kullanımı; hava doygunluk derecesini ve bununla boşluk suyu basınç bariyerlerinin sıkıştırıcılığını arttırır. Yñzey aktif madde enjeksiyonu ile boşluk suyu basınç bariyerinde hava uzun zaman lokal olarak sabitlenebilir.

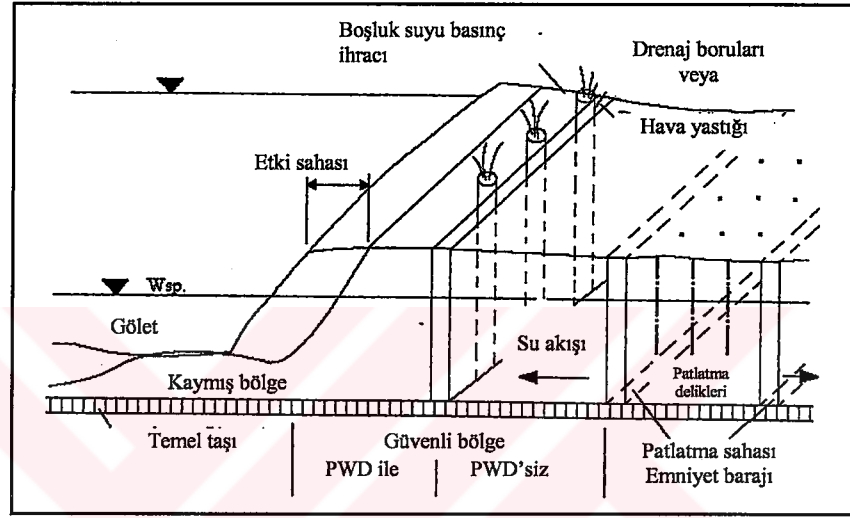
Drenajların avantajları; boşluk suyu basıncının azaltılmasında sñrekli bir ñzñm oluşturmaları, artan işletme maliyetlerine neden olmamalarıdır. Dñřey drenajlar bir pasanın dñkñmñnden sonra dñzenlenebilir. Buna karşın yatay drenajlar, ilerleyen açık işletmede teknolojik planlama ile eş zamanlı olarak hazırlanır.

Boşluk suyu basınç bariyerlerinin tesisinde genel ve yöneme bağlı bir avantajı; sondajlarda yığının korunan gerilmesi ve sıkıştırmada kaçınılmaz olan kuvvetli etkilerin bulunmayışıdır.

Bu tespitlere göre yöntemin tercih edilen kullanım alanları:

- Sıkıştırılmış bölge (emniyet barajı) ve pasa şevi arasındaki alanda,

Patlatma veya vibrasyonla sıkıştırma yöntemlerinin kullanılmasında, emniyet barajı ile şev arasındaki mesafe kısaltılabilir (şekil 6.6).



Şekil 6.6. Boşluk suyu basınç bariyerleri uygulama prensibi [63].

- Yüksek boşluk suyu basınç oluşum bölgeleri yakınında (örneğin patlatma yönteminde) sönmülemeye hızlı işletme veya drenajlarla ani dağılımı ve gevşemeyi sağlamada,
- Yığın içerisindeki boşluk suyu basınç kontrolünde, öyle ki kaymayı kolaylaştıran etki kuvvetlerden boşluk suyu basınçları, direkt çevrede kısa sürede kayıp olur,
- Rehabilitasyon bölgesinde sürdürülecek ağaçlandırma faaliyetleri ile sınırlandırılmış alanlarda, boşluk suyu basınçlarının hızlı tahliyesi veya ani dağılımını sağlamak için,
- Daha önce patlatma ile sıkıştırılmış yığınların üst bölgesinde yeniden yeraltı su seviyesinin yükselmesinden sonra uygulanmasıdır.

Boşluk suyu basınç bariyerleri, şimdiye kadar tanıtılan rehabilitasyon yöntemlerinin tamamlayıcısı ve sadece özel durumlarda kullanılan bir yöntem olarak görülebilir.

6.2. Arazi Rehabilitasyon Yöntemlerinin Değerlendirilmesi

Farklı arazi rehabilitasyon yöntemlerinin kullanım alanları, güvenirliliğin (stabilitenin) amacına bağlı olarak;

- şevin kendi kendine güvenilir konuma gelmesi,
- imara uygun kullanım için kaymadan uzak bölgenin sağlanması veya

mevcut yeraltı su seviyesine bağlı olarak;

- yeraltı su seviyesinin yükselmesinden önce,
- daha önce oluşmuş yeraltı su seviyesi yükselmesinden sonra stabilize sağlanmalıdır.

Tablo 6.1 olası iyileştirme yöntemleri ve kullanım olanakları üzerine genel bir bilgi vermektedir.

Her defasında kullanıma giren iyileştirme yöntemi (tablo 6.1); bulunulan jeolojik, hidrolojik ve zemin mekaniği koşullarına, üretim boşluğunun durumuna ve de öngörülen arazi kullanım planına bağlıdır. Özellikle ileriki arazi kullanım planı (Biyotop, dinlenme, ulaşım yolları, bayındırlık vb. gibi) yapılacak rehabilitasyonun kapsam ve yoğunluğunu belirler. Genel olarak gerekli iyileştirme etkisine yalnız bir yöntemle değil, bilakis birden fazla yöntemin uygun bir kombinasyonu ile erişilebilir.

Tablo 6.1. Arazi iyileştirme yöntemlerinin kullanılabilirliği [28,59].

Yöntemler	Uygulanabilirlik			
	Şev stabilitesinde yeraltı su seviyesinin yükselmesinden		İmar alanı hazırlanması yeraltı su seviyesinin yükselmesinden	
	Önce	Sonra	Önce	Sonra
Sellektif döküm	+ o	-	+	-
Statik sıkıştırma	+ ! o	-	+ ! o	-
Vibrasyon silindir	+ ! o	-	+ ! o	+ !
Karıştırıcı plaka	-	-	-	-
Derin titreşimli karıştırıcı (RDV)	+ !	X	+ !	+ !
Vibro flotasyon	-	X	+ !	+ !
Dinamik sıkıştırma (DYNIV)	-	-	-	+
Şok etki sıkıştırması	+ o	-	+	+
Patlatma ile dinamik sıkıştırma	+ !	-	+ !	+
Zemin kaplama	+ !	X	+ !	+ !
Karma destek bloğu	+	+	-	-
Dökme destek bloğu	+	X	-	-
Filtre düzenleme	+	X	+ !	!

Sembollerin anlamı - : Yöntem uygun değildir, + : Yöntem sınırlama olmadan kullanılabilir, X : Yöntem sadece kayma eğiliminde malzeme bulunmuyorsa kullanılabilir, ! : Yöntem yüksek maliyeti nedeniyle sadece özel durumlarda kullanılabilir, o : Pasa döküm yığın özelliklerine göre geçerlidir.

7. AÇIK İŞLETME SONRASI BOZULAN ARAZİLERİN YENİDEN KULLANIM ALTERNATİFLERİ

Madencilik sektöründe çevre; üretim faaliyetleri sırasında:

- Gürültü (iş makinaları ve patlayıcı madde kullanımı),
- Toz,
- Gaz (özellikle açık işletmelerde),
- Arazi bozulması;
 - Rölyefi,
 - Jeolojik yapısı,
 - Su rejimi,
 - Yerel iklimi,
 - Peyzajı

şeklinde etkilenirken, işleme aşamasında:

- Atık sular,
- Atık maddeler,
- Baca gazları vb.

şeklinde çevreyi kirletmektedir [64,65].

Madencilik faaliyetleri sonucu bozulan arazilerin yeniden düzenlenmesi ve iyileştirilmesinde başlıca amaç; bu arazilerin eski ekolojik ve ekonomik değerine kavuşturulması veya daha da geliştirmesidir. Bu ise;

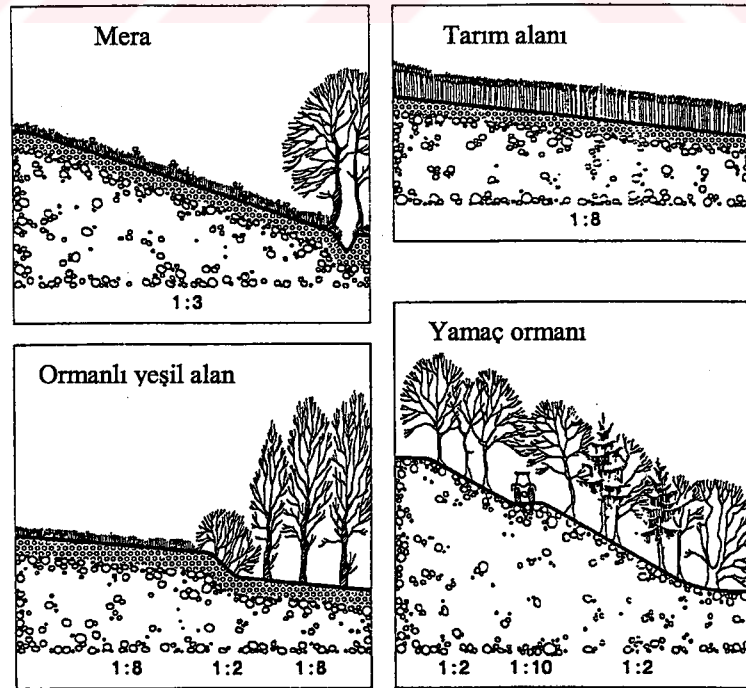
- 1- Madencilik sonrası alan kullanım planlaması,
- 2- Alan kullanım planlaması doğrultusunda yeniden düzenleme (kazı, döküm, su rejimi kontrolü, üst örtünün selektif değerlendirilmesi),
- 3- İyileştirme (biyolojik reklamasyon),
- 4- İzleme ve bakım-kontrol faaliyetleri ile sağlanabilir [66].

Alan kullanım planlanması; mevcut hukuksal, ekonomik ve zamansal olanaklar çerçevesinde yapılabilir. Ön görülen kullanım şekli ve arazi şartları (işletme koşulları) uygulanacak rehabilitasyon programının seçimini etkiler. Ayrıca arazi kullanım planlaması ve iyileştirme faaliyetleri, çevre bilimlerini de içeren uygulamalı bilimsel multi disiplinler çalışmaları gerektirir [67,68].

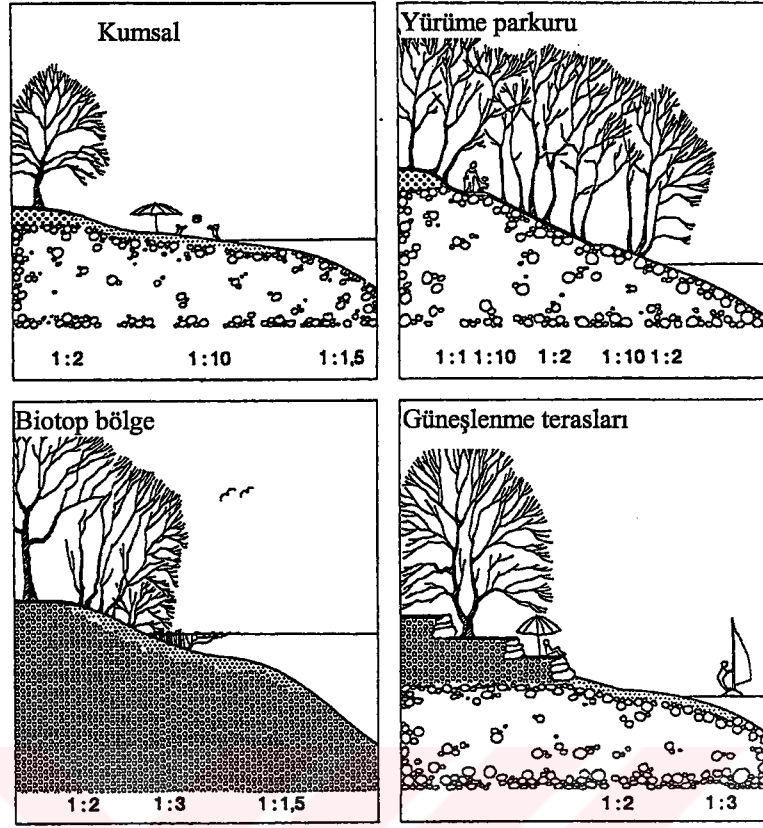
Aynı zamanda bozulan arazilerin yeniden kazanılmasında, güzel bir peyzaj görünümüne sahip olması kadar, buradan ekonomik olarak yararlanmak da hedeflenir. Bu maksatla geri kazanım çalışmaları:

- Ziraat (tarım, bahçe, mera vb),
- Orman (ticari ve ticari olmayan) (şekil 7.1),
- Rekreasyon (eğlence ve dinlence yerleri, parklar, halka açık alanlar vb) (şekil 7.2),
- Su kullanımı (balıkçılık, toplumsal ihtiyaçlar için),
- İnşaat (hafif endüstriyel binalar, konut ve hizmet binaları, yol vb),
- Yaban hayatı (doğal koruma alanları olarak vb) (şekil 7.3)

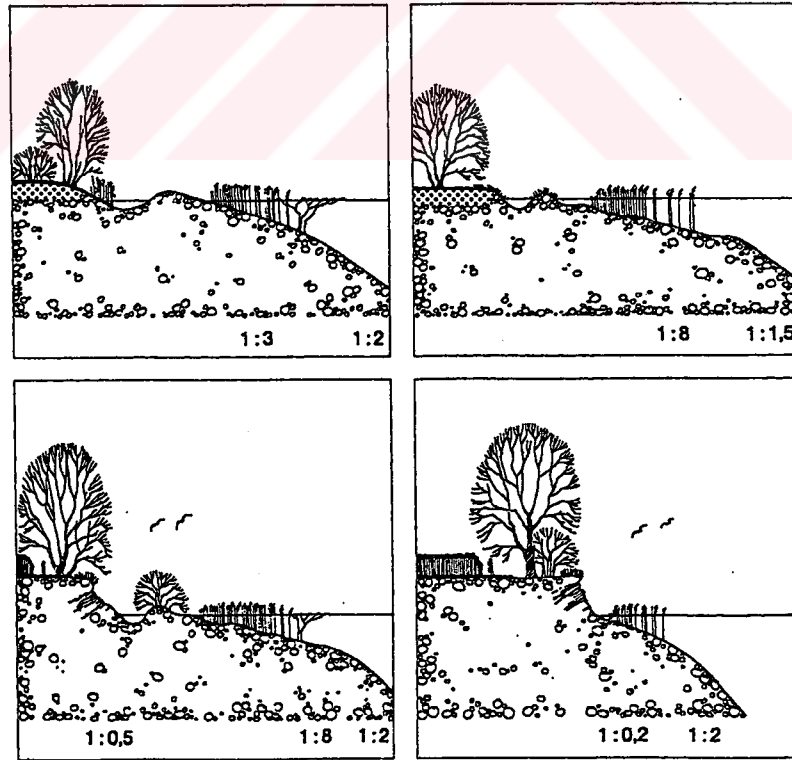
gibi amaçlar için kullanılabilir [69,70]. Farklı kullanım alternatifleri ve doğal gelişimin zamansal evreleri, şekil 7.1, 7.2 ve 7.3'te verilmektedir [71-75].



Şekil 7.1. Tarımsal ve ormansal arazi kullanımı için şev tasarımı [71].



Şekil 7.2. Dinlenme alanları için şev tasarımı [71].



Şekil 7.3. Doğal çevre için şev tasarımı [71].

Arazinin düzenlenmesi, iyileştirilmesi ve işletme sonrası arazi planlamada genel bilgiler ise, tablo 7.1’de özetlenmiştir.

Tablo 7.1. Arazi düzenlenme ve iyileştirilmesi ile işletme sonrası arazi planlamasında genel faktörler [5].

I. DOĞAL FAKTÖRLER	
A. Topoğrafya	e) Eğim
1. Yükseklik	f) Yük taşıma kapasitesi
2. Eğim	g) Organik tabakalar
B. İklim	H. Yersel Ekoloji
1. Yağış	1. Doğal bitkilerin karakterleri, büyüme gereksinimlerinin belirlenmesi
2. Rüzgar, hava akımları düzeni, şiddeti	2. Hububat
3. Nem	3. Av hayvanları
4. Isı	4. Kalıcı ve göçmen kuşlar
5. İklim türü	5. Bol ve tükenmekte olan cinsler
6. Büyüme mevsimi (bitki)	I. Su Ekolojisi
7. Mikroiklimsel yapı	1. Su hayvanları
C. Deniz yüzeyinden yükseklik (Rakım)	2. Su bitkileri
D. Görünüş	3. Suda yaşayan canlıların özellikleri, kullanımı ve yaşam özelliklerinin belirlenmesi
E. Hidroloji	II. KÜLTÜREL FAKTÖRLER
1. Yüzey hidrolojisi	A. Lokasyon (Yer)
a) Su havzalarının durumu	B. Ulaşılabilirlik
b) Sel baskınları durumu	1. Mesafe
c) Yüzey drenaj düzeni	2. Zaman
d) Yağış miktarı ve kalitesi	3. Ulaşım vasıtaları
2. Yeraltı suyu hidrolojisi	C. Yerin boyutları ve şekli
a) Yeraltı su tablası	D. Civardaki arazi kullanımları
b) Akifer	1. Mevcut
c) Yeraltı Suyu akış miktarı ve kalitesi	2. Geçmişte
d) Tekrar dolma potansiyeli	3. Arazi kullanım planları
F. Jeoloji	4. Bölgesel talimatnameler
1. Stratigrafi	E. Arazi mülkiyeti
2. Yapı	1. Kamu
3. Jeomorfoloji	2. Endüstri
4. Örtü tabakasının kimyasal yapısı	3. Özel
5. Kömür özelliklerinin belirlenmesi	F. Kullanım şekli, yoğunluğu ve değeri
G. Toprak	1. Zirai 2. Orman 3. Dinlenme
1. Zirai özellikler	4. Yerleşim (Konut) 5. Ticari
a) Doku	6. Endüstriyel 7. Kurumsal
b) Yapı	8. Ulaşım/taşıma (yol) 9. Su
c) Organik madde oranı	G. Nüfus özellikleri
d) Nem oranı	1. Nüfus
e) Geçirgenliği	2. Nüfus değişimi
f) pH	3. Nüfus yoğunluğu
g) Alt kayacın derinliği	4. Yaş dağılımı
h) Renk	5. Aile sayısı
2. Mühendislik özellikleri	6. Ailedeki insan sayısı
a) Çekme-kabarma potansiyeli	7. Ortalama gelir
b) Islaklık	8. İşgücü, işsizlik
c) Alt kayacın derinliği	9. Eğitim düzeyi
d) Aşınabilirlik (erozyon)	

Yukarıda verilen açıklamalardan hareketle, açık işletme sonrası bozulan arazilerin yeniden düzenlenmesi bakımından teknolojik süreçte kullanılan ekskavatörler, nakliyat araçları ve dökücüler, uygulanacak arazi rehabilitasyon yöntemini geniş ölçüde belirleyebilmektedir (tablo 7.2).

Tablo 7.2 Teknolojik sürecin arazi rehabilitasyonu üzerine etkileri [76,77].

Teknolojik Süreç			Arazi Rehabilitasyon Değerlendirmeleri			
Üretim	Nakliyat	Döküm	Selektif		Yığın Formu	Röliyef Şekli
			Üretim	Döküm		
Döner kepçeli ekskavatör	Nakil köprüleri		+	O	-	O
	Dökücü		+	O	O	O
	Band/Demiryolu	Dökücü	+	+	+	+
	Demiryolu	Grayder	+	+	+	O
	Demiryolu	Hidrolik	+	-	O	-
Zincirli ekskavatör	Nakil Köprüsü		O	O	-	O
	Band/Demiryolu	Dökücü	0	+	+	+
	Demiryolu	Grayder	O	+	+	O
	Demiryolu	Hidrolik	O	-	O	-
Draglayn	Demiryolu	Grayder	+	+	+	O
	Kamyon		+	+	+	+
Açıklamalar: - : Uygun değil, O: Koşullu uygun, + : Çok uygun						

Bu nedenle bir açık işletme nakliyat sisteminin seçimi ve ekipman planlamasında, madencilik sonrası arazilerin kullanım talepleri de göz önünde tutulmalıdır. Arazi düzenlenmesi bakımından aşağıdaki talepler oluşur:

- Mümkün olduğunca hızlı yeniden kullanım koşulları yaratılmalıdır. Yani kömür üretiminden hemen sonra güvenli pasa sahaları hazırlanmalı,
- Çukur/ boşluk alan oluşumlarından ve ikinci bir pasa nakliyatından kaçınmak,

- Masraflı ikincil düzenlemelerden sakınmak ve yüzey erozyonlarını önlemek için, geniş ölçüde esas döküm sırasında rölyefin şekillendirilmesi,
- İleride kullanım için uygun zeminin selektif kazısı, nakliyatı ve dökümü (en iyi zemin en üstte),
- Kısmi olarak homojen bir pasanın en az iki metre kalınlıkta dökümü,
- Tarım arazisi olarak kullanılacak sahalarda, ağır tonajlı araçlarla pasa üzerinde gezinmek veya büyük döküm yükseklği nedeniyle zeminin sıkıştırılmasından sakınmaktır.

Bu taleplerin işletme aşamasında geçerlilik kazanabilmesi için, jeoteknik koşulların ve tasarlanan arazi yeniden kullanım hedeflerinin önceden planlanması gerekmektedir.

TKİ- GELİ (Muğla) kömür açık işletmesi üretim sisteminde “Kepçeli Ekskavatör + Draglayn + Kamyon” ekipmanları kullanıldığı için, arazi rehabilitasyonu bakımından uygun koşullar sağlanabilir (bkz. tablo 7.2).

Uygulanan rehabilitasyon yöntemlerinden sonra da arazide ilgili denetim, ölçüm ve kontroller sürdürülmelidir. Böylece, olası risklere karşı alınacak önlemler daha hızlı gerçekleştirilerek, hasarlar en az seviyeye indirgenebilir [78-80].

8. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Madencilik sektörü diğer endüstriyel işletmelerden farklı olarak, doğal çevre ile çok sıkı ilişki halindedir. Dolayısıyla kömür açık işletmelerinde; gerek üretim, gerekse dekapaj faaliyetleri sırasında ve sonrasında pek çok üretim çukurları/boşlukları ve şev yüzeyleri oluşmaktadır. Geometrilere; örtü kalınlığına, işletme büyüklüğüne ve seçilen açık işletme yöntemine bağlı olan bu alanların yeniden kullanımı, çevresel etki bakımından büyük önem taşımaktadır.

Ülkemizdeki toplam linyit üretiminin yaklaşık % 90'nın açık işletme yöntemiyle gerçekleştirildiği dikkate alınırsa, madencilik faaliyetleri nedeniyle bozulan arazilerin oldukça önemli boyutlara ulaştığı açıkça görülecektir. Gerek işletme, gerekse doğal çevrenin korunması bakımından bu arazilerin yeniden düzenlenmesi ve kullanıma sunulması yasal bir zorunluluktur. Farklı kullanım alternatiflerinin tasarlanabileceği bu arazilerin, başta jeoteknik bakımdan duraylı (stabil) ortam koşullarına sahip olması gerekmektedir.

Pasa malzemesinin gevşek yapısal ve oluşum özellikleri nedeni ile önemli bir kısmı kayma veya akma eğiliminde olmaktadır. Bunun en önemli koşulu; boşluk suyu basıncının artmasıyla kayma gerilmesinin azalması ve statik denge durumunu bozacak yeterli büyüklükteki bir iç veya dış kuvvetin yüzeye etkimesidir. Çok kısa zaman dilimi (birkaç saniye veya dakika) içerisinde ani hızlara ulaşan ve büyük bir enerji boşalmasıyla sonuçlanan bu tür şev duraysızlıkları, önemli tehlike potansiyelleri içermektedir. Ayrıca bu tür şev kaymaların özel bir tehlike potansiyeli içermesi, kayma öncesi belirtiler olarak yorumlanan;

- şev yüzeyindeki hareketlerin yavaş yavaş ilerleyerek artması,
- şev'in göbek oluşturması,
- şev gerisinde gerilme çatlaklarının oluşması gibi alışıla gelmiş belirtiler göstermemesi ve
- ani meydana gelen bir kaymanın zaman diliminin tam olarak tahmin edilememesinden kaynaklanmaktadır.

Bu nedenle açık işletme pasa yığınlarında oluşacak kayma riskinin göreceli bir tahmini için öncelikle;

- yığının dane boyut dağılımı ve formu,
- erişilen su seviyesinin pasa yüksekliğine göre oransal değişimi,
- dinamik etki büyüklükleri (sismik aktivite),
- ilgili yığın yoğunluğu (kompaksiyon) ve malzemenin dayanım özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Ayrıca kayma riskinin; işletme koşulları ve ortam büyüklüklerine (geometri, dekapaj sistemi, in-situ durum vb.) bağlı olarak, nitel ve ampirik bağıntılar ile bir tahmini mümkündür. Bu maksatla, pasa şev stabilitesi için sayısal analiz yöntemleri tanıtılmıştır.

Araştırılacak zeminin üniform ayrışma karakterli, benzer özellik ve nitelikli tabakalardan oluşması ve süreklilik göstermesi halinde, genelde homojen ortamlar için geçerli olan kabuller yapılır ve klasik stabilite analiz yöntemleri kullanılır. Fakat; tabakaların rijitlikleri, jeolojik yapıları, dokuları ve nihayet yoğunlukları birbirinden çok farklı ise, katmanlardaki bu fiziksel ve mekanik değişimlerin dikkate alındığı daha farklı yöntemlerden yararlanmak kaçınılmaz olur. Bu yüzden; etkiyen kuvvetlerin karşılaştırılması ile bir stabilite analizi, pasa şev duraylılık kontrolünü (stabil, kararsız, stabil olmayan koşul) tam olarak yansıtmayabilir. Ayrıca, ani pasa şev duraysızlıkları bir denge koşulu değil, bilakis bir stabilite problemidir. Sistem, bir etki sonrası kısmen açığa çıkabilecek potansiyel enerjiye sahiptir. Bu nedenle pasa şev stabilite analizi için, 2.enerji yasasına (Δ^2E) bağlı olarak geliştirilen hypoplastik madde yasasının kullanımı öngörülmüştür. İlk kez GUDEHUS ve RAJU tarafından kullanılan bu yasa, elasto-plastik yasaya karşın elastik ve plastik kısımlardaki deformasyonların keyfi dağılmadığını kabul eder ve yeter derecede stabilite sağlamak için, hiçbir şev bölgesinde (lokal veya global) $\Delta^2E < 0$ olmamalıdır.

İkinci enerji yasası çerçevesinde geliştirilen MATLAB bilgisayar programı hazırlanarak, şev geometrisi ve zemin parametrelerine bağlı olarak sayısal analizler yapabilmek için, arazi, laboratuvar ve model deneyler yapılmıştır. Araştırma sonuçları hypoplastik madde yasasının uygun çözümler sunduğunu doğrulamaktadır. Buna göre;

- şev, ancak yüksek bir boşluk suyu basıncı oluştuğu sürece kayar.
- laboratuvar deneyleri, kritik bir porozite değerinin (e_{kr}) var olduğunu doğrular. Deney kumu için bu değer, $e_{kr} = 0,53$ 'dir. Eğer şev bölgesindeki porozite değeri kritik poroziteden daha büyük ise, ani bir kayma oluşabilir.
- tüm şev yüzeyine etkiyen seçilmiş tetikleme kuvveti koşullarında şev açısı, şevin stabilitesi için ikinci derecede önemli rol oynar. Şev yüzeyinin kayması $33^\circ < \beta$ şev açıları için mümkündür ve daha yüksek şev açıları ile bu miktar artmaktadır.
- yuvarlak danelerde içsel sürtünme açısı (Φ_g), köşelilerden daha düşüktür. Buna göre küçük içsel sürtünme açısına sahip zeminlerde, yani yuvarlak daneli zeminlerde bir kayma daha çabuk oluşur.

Oluşacak bir duraysızlığın şev gerisine doğru etki sahasının belirlenmesi ve buna bağlı olarak riskli bölgenin boyutlandırılması ise, iki alternatif hesaplama yöntemine göre yapılmıştır. Örnek bir uygulama ile sonuçlar irdelenmiştir.

Ayrıca; pilot bölge olarak seçilen TKİ- GELİ kömür açık işletmelerinde bu ve benzeri problemlerle karşılaşmamak için, madencilik faaliyetleri sonrası bozulan arazilerin yeniden düzenlenmesi ve jeoteknik bakımdan stabil ortam koşullarının sağlanması ve de gerekli arazi rehabilitasyon yöntemleri ayrıntılı olarak tanıtılmıştır. Bunlar:

- Patlatma ile dinamik pasa stabilitesi,
- Titreşimli/ vibrasyonlu dinamik pasa stabilitesi (RDV),
- Ağırlıkla dinamik pasa stabilitesi (DYNIV),
- Müller rezonans sıkıştırması (MRC),
- Maden reçinesi ile yüksek basınç enjeksiyonu,
- Kritik boşluk suyu basınç değerini azaltıcı elaman olarak boşluk suyu basınç bariyerleri,
- Harmanlanmış pasanın şev önüne yerleştirilmesi ile koruyucu blok oluşturmak,
- Kaya blokları, moloz, çakıl ve kumlardan oluşan temel inşaat konumundaki bir yapının koruyucu blok olarak şev önüne tesis edilmesi ve

- Koruyucu blok olarak kayma riski bulunmayan malzemelerin şev tabanına dökülmesi şeklinde gerçekleştirilebilir.

Üretim çukurunun geometrik boyutu, öngörülen arazi kullanım planlaması ve işletme bölgesindeki jeolojik, hidrolojik ve de zemin mekaniği koşulları, uygulanacak arazi rehabilitasyon yönteminin seçimini etkiler. Ancak; gerekli arazi rehabilitasyon hedefine yalnız bir yöntem ile değil, bilakis birden fazla yöntemin uygun bir kombinasyonu ile erişilebilir.

Sonuç olarak madencilik faaliyetleri sonucu bozulan arazilerin yeniden düzenlenmesi ve iyileştirilmesinde temel amaç; bu arazilerin güzel bir peyzaj görünümü kazanması yanında, eski ekolojik ve ekonomik değerine kavuşturulması veya daha da geliştirilmesi olmalıdır. Bu ise;

- madencilik sonrası alan kullanım planlaması,
- alan kullanım planlaması doğrultusunda yeniden düzenleme (tarım, orman ve regreasyon alanları vb. gibi),
- iyileştirme (biyolojik reklamasyon),
- izleme, bakım ve kontrol faaliyetleri ile sağlanabilir.

Çok yönlü disiplinler arası çalışmayı gerektiren bu faaliyetler; ülke kaynaklarına verilen önem, mevcut hukuksal, ekonomik ve zamansal olanaklar ölçüsünde gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Saltoğlu, S., 1992. Açık İşletmeler, İTÜ Kütüphanesi, Sayı: 1472, İstanbul
- [2] Förster, W. & Jennrich, C., 1998. Sanierung und Sicherung setzungfließgefährdeter Kippenböschungen, TU Bergakademie Freiberg, *Institut für Geotechnik*, Abteilung Bodenmechanik, Freiberg
- [3] Pierschke, K-J. & Boehm, B., 1996. Geotechnische und wasserwirtschaftliche Aspekte bei der Restseegestaltung im Rheinischen Braunkohlenrevier, *Braunkohle* 48, 647-653
- [4] Pierschke, K-J., 1992. Standfestigkeit von Böschungen in Tagebau-Restlöchern, *VDI-Tagungsbericht*, Bergbau- Bücherei, Essen
- [5] Ünal, E., Kara, D. ve Aydoğan, O., 1994. Türkiye Madencilik Endüstrisinde İleri Teknoloji Uygulamaları, TÜBİTAK MAG-987/ YBAG-0028, Ankara
- [6] Akın, Y. ve Akıncı, E., 2002. TKİ-GELİ Bölge Müdürlüğü Brifing Notu, Yatağan- Muğla
- [7] Yıldırım, N., 1988. TKİ-GELİ Müessesesinde Linyit Üretim Faaliyetleri, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, *Madencilik*, XXVII, 3, 11-18, Ankara
- [8] Ulusay, R. ve Yoleri, F., 1990. TKİ-GELİ Yatağan(Muğla)- Eskişehir Açık İşletmesi Şev Stabilitesi Etüdü Raporu, MTA Fizibilite Etüdüleri Dairesi, Ankara
- [9] Yoleri, F., Çağlan, D., Arıkan, F. ve Ulusay, R., 1994. TKİ-GELİ Eskişehir Linyit Açık İşletmesi Pasa Yığınlarının Şev Stabilitesi ve Tasarımı, MTA Fizibilite Etüdüleri Dairesi, Ankara
- [10] Delibalta, M.S., 2001. TKİ-GELİ (Muğla) Açık İşletmeler Teknik Gezi Notları, Yatağan- Muğla
- [11] Bozoğlu, M., 1994. TKİ Kurumu Bünyesindeki Çevresel Önlemler ve Bu Önlemlerin Maliyet Analizi, TKİ Genel Müdürlüğü, Ankara
- [12] Ünver, Ö. ve Kara, D., 1994. Türkiye’de Kömür Madenciliği ve Çevre, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, *Madencilik*, XXXIII, 2, 3 -9, Ankara

- [13] **Bozoğlan, M. ve Yörükoğlu, M.**, 1994. TKİ Kurumu İşletmelerinde Çevre Sorunları ve Önlemleri, TKİ Genel Müdürlüğü, Ankara
- [14] **Ünal, E., Kara, D. ve Vatan, B.**, 1992. Açık Ocak Kömür Madenciliği Sırasında Bozulan İşletme Sahalarının Yeniden Düzenlenmesi ve İyileştirilmesi, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, *Madencilik*, XXXI, 1, 5-12, Ankara
- [15] **LMBV mbH** , 1999. Forstwirtschaftliche Rekultivierung und Naturschutz in den Bergbaufolgelandschaften ein Widerspruch?, Presse-Öffentlichkeitsarbeit, Berlin
- [16] **Förster, W. & Jennrich, C.**, 1999. Sanierung und Sicherung setzungfließgefährdeter Kippen und Kippenböschungen, TU Bergakademie Freiberg, *Institut für Geotechnik*, Abteilung Bodenmechanik, Freiberg
- [17] **Förster, W. & Walde, M.**, 1994. Überlegungen zur Sanierung von Tagebau-Restlöchern an Beispielen, Vortrag zum Tagebautechnischen Kolloquium, Freiberg
- [18] **Dierichs, D.**, 1988. Untersuchungen zum Verhalten locker gelagerter wassergesättigter Sande als Basis für die Bewertung der Standsicherheit von Kippenböschungen, *Freiberger Forschungshefte A 758*, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg
- [19] **Stock, U.**, 1989. Beitrag zur Modellierung des Setzungfließens, *Freiberger Forschungshefte A 791*, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg
- [20] **Jennrich, C.**, 1999. Dynamik von Setzungfließbrutschungen und Bildung von Schwallwellen, TU Bergakademie Freiberg, *Institut für Geotechnik*, 99/3, Freiberg
- [21] **Förster, W. & Gudehus, G.**, 1998. Beurteilung der Setzungfließgefahr und Schutz von Kippen gegen Setzungfließen, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg
- [22] **Klahn, H-E.**, 1972. Rutschungen in Böschungssystemen- Ursachen-Maßnahmen, *Neue Bergbautechnik*, 2. Jg., 2, 92-94
- [23] **Förster, W. & Vogt, A.**, 1992. Rutschung Sedlitz- Beispiel für ein Setzungfließen in Niederlausitzer Braunkohlenkippen, *Vorträge zur Baugrundtagung*, Dresden
- [24] **Warmbold, U. & Vogt, A.**, 1994. Geotechnische Probleme und technische Möglichkeiten der Sanierung und Sicherung setzungfließgefährdeter Kippen und Restlochböschungen in der Niederlausitz, *Braunkohle* 7, 22-28
- [25] **Walde, M.**, 1980. Zur Verflüssigungsgefahr von Kippen, *Neue Bergbautechnik*, 10.Jg., 3, 147-149

- [26] **Förster, W.**, 1996. Mechanische Eigenschaften der Lockergesteine, Teubner Studienbücher Bauwesen, B.G. Teubner Stuttgart, Leipzig
- [27] **Förster, W., Hagen, C. & Philipp, H.**, 1984. Hinweise der Obersten Bergbehörde zur Beurteilung der Setzungfließgefährdung von Böschungen an Halden und Restlöchern, *Neue Bergbautechnik*, 14. Jg., 5, 167-169
- [28] **Vogt, A. & Förster, W.**, 1991. Abschätzung der Rückgriffweite von Setzungfließbrutschungen, *Neue Bergbautechnik*, 21. Jg., 10/11, 366-371
- [29] **Sevim, H., Nasuf, E. ve Kuzu, C.**, 1998. Kömür Atıklarının Depolanması, Kömür Kullanımı ve Teknolojisi, C 34, 603-621, Özgün Ofset A.Ş. İstanbul
- [30] **Ulusay, R.**, 2001. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası yayınları: 38, Ankara
- [31] **Boğaziçi Üniversitesi**, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Jeofizik Anabilim Dalı, İstanbul, www.korei.boun.edu.tr
- [32] **Kızıl, M.S. ve Köse, H.**, 1995. Açık İşletmelerde Şev Stabilitesi, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 254, İzmir
- [33] **Vardar, M.**, 1996. Heyelanlar, Yamaç ve Şevlerde Duraylılık İrdelemeleri, İTÜ Maden Fakültesi, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı, Ders Notları, İstanbul
- [34] **Reik, G.**, 1993. Ingenieurgeologisch-geotechnische Aspekte des Erd-und Felsbaues Übertage, *Skriptum zu Ingenieurgeologie IV*, TU Clausthal, Deutschland
- [35] **Reik, G.**, 1998. Skriptum zu Ingenieurgeologie I, Institut für Geologie und Paläontologie, Abteilung Ingenieurgeologie, TU Clausthal, Deutschland
- [36] **Völtz, H.**, 1980. Faktoren der Standsicherheit von Tagebau-und Kippenböschungen, *Braunkohle*, 8, 252-258, August
- [37] **Şekercioğlu, E.**, 1993. Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası yayınları:28, Ankara
- [38] **Nasuf, E. ve Avşar, S.**, 2000. Kaya Mekaniği ve Şev Duraylılık Analizlerinde Bilgisayar Uygulamaları, İTÜ Maden Fakültesi, Ders Notları, İstanbul
- [39] **Özsoy, C.**, 1998. Kohezyonlu ve Kohezyonsuz Zeminlerde Şev Stabilitesi ve Uygulama Yöntemleri, Dumlupınar Üniversitesi, FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya
- [40] **Tuncay, E.**, 1999. TKİ- Himmetoğlu Linyit Açık İşletmesindeki Şevlerin Duraylılığının Deterministik ve Olasılığa Dayalı Yöntemlerle Değerlendirilmesi, Hacettepe Üniversitesi, FBE Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara

- [41] **Haliloğlu, S.B.**, 1997. Heyelan Analizinde Kullanılan Yöntemler ve Sayısal Çözümleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi, FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon
- [42] **Hill, R.**, 1958. A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids, *Journal Mech. Phys. Solids*, 6, 236-249
- [43] **Drucker, D.C.**, 1964. On the postulate of stability of material in the mechanics of continua, *Journal de Mecanique*, 3, 236-249
- [44] **Raju, V.R.**, 1994. Spontane Verflüssigung lockerer, granularer Körper-Phänomene, Ursachen, Vermeidung, Universität Karlsruhe, *Institut für Boden- und Felsmechanik*, 134, Karlsruhe
- [45] **Kudella, P.**, 1995. Stabilitätsberechnung von setzungsfließgefährdeten Kippenrandböschungen, *Geotechnik* 19, 7-15, Stuttgart
- [46] **Gudehus, G. & Huber, G.**, 1998. Standsicherheitsbewertung von Kippen und Kippenböschungen- Prognose von Setzungsfließen, Universität Karlsruhe, *Institut für Boden- und Felsmechanik*, Karlsruhe
- [47] **Özaydın, K.**, 1999. Zemin Mekaniği, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı, Birsen Yayınevi, İstanbul
- [48] **Kayabalı, K.**, 2002. Geoteknik Mühendisliğine Giriş (Robert D. Holtz & William D. Kovacs'dan çeviri), Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Gazi Kitapevi, Ankara
- [49] **Leonhardt, A. & Förster, W.**, 1989. Das Verflüssigungsverhalten von Sand unter Einwirkung dynamischer Lasten, TU Bergakademie Freiberg, *Intitut für Geotechnik*, Freiberg
- [50] **Siyahi, B.G.**, 1994. Deprem Etkisindeki Şevlerde Stabilitenin İncelenmesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul
- [51]**Vorschrift 208/88**, 1988. Bauwerke unter Erdbebeneinwirkung, Bauinformation StBA 12, 8/9, Bauakademie der DDR
- [52] **Özüdoğru, K., Tan, O. ve Aksoy, İ.H.**, 1996. Çözümlü Problemlerle Zemin Mekaniği, 130-131, Birsen Yayınevi, İstanbul
- [53] **Novy, A., Reichel, G., Warmbold, U. & Vogt, A.**, 1999. Geotechnische Untersuchungen und Verfahren bei der Sicherung setzungsfließgefährdeter Tagebaukippen der Niederlausitz, *Braunkohle*, 4, 465-478
- [54] **Fritz, W. & Benthau, F-C.**, 1997. Aufgaben der LMBV bei der Stilllegung und Sanierung von Tagebauen und Veredlungsanlagen- Herausforderungen und Lösungen, *VDI-Berichte* 1358, 21-39

- [55] Kuntze, W. & Warmbold, U., 1994. Sicherung böschungsnaher setzungfließgefährdeter Kippenbereiche an Tagebau- Restseen, Vorträge der Baugrundtagung 1994 in Köln, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., 331-348
- [56] Bechler, A., Gehrisch, M. & Voigt, P., 1972. Beitrag zur Standsicherheit von Kippen aus nicht bindigem Lockergestein in Restlöchern, *Neue Bergbautechnik*, 2. Jg., 2, 104-111
- [57] Dähnert, R. & Vogt, A., 1998. Die Bedeutung der Bodenmechanik im Braunkohlen- und Sanierungsbergbau, *BrachFlächenRecycling* 1/1998, 35-42
- [58] LMBV mbH , 1996. Sichere Gestaltung setzungfließgefährdeter Kippenbereiche, Öffentlichkeitsarbeit, Berlin
- [59] Förster, W. & Warmbold, U., 1992. Sicherung von Kippen an Tagebaurestlöchern in der Niederlausitz, *VDI-Tagungsbericht* "Beherrschung bergbaulicher Altlasten", TU Bergakademie Freiberg, 47-67
- [60] Kessler, J. & Förster, W., 1992. Sprengverdichtung zur Verbesserung von setzungfließgefährdeten Kippen, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
- [61] Dähnert, R. & Vogt, A., 1997. Probleme und Lösungen zur Bodenmechanik im Sanierungsbergbau, *VDI- Berichte* 1358, 77-97
- [62] Novy, A., 1999. Standsicherheitseinschätzungen für die Durchführung der Rütteldruckverdichtung Skadodamm Südböschung und gekippte Ostböschung RL Skado, Ingeniurbüro für Geotechnik, Hoyerswerda
- [63] Walde, M. & Nigang, L. R., 1999. Porenwasserdruckbarrieren zur Sicherung von Tagebaukippen gegen Setzungfließen bei der Sicherung von Tagebaurestlöchern, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau, Freiberg
- [64] Vardar, M., Özmen, M. ve Eriş, İ., 1990. Uygulamalı Jeoloji Ders Notları, İTÜ Maden Fakültesi, Kaya Mekaniği ve Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı, İstanbul
- [65] Steinmetz, R., 1992. Grundsätze der Wiedernutzbarmachung von Tagebaulandschaften, *VDI-Tagungsbericht* "Beherrschung bergbaulicher Altlasten", TU Bergakademie Freiberg, 13-26
- [66] Akpınar, N., Kara, D. ve Ünal, E., 1993. Açık Ocak Madenciliği Sonrası Alan Kullanım Planlaması, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, *Türkiye XIII. Madencilik Kongresi*, 327-340, Ankara

- [67] **Förster ,W. & Walde, M.,** 1995. Gestaltung von Kippenböschungen an Tagebaurestlöchern- Ostdeutsche Erfahrungen, *Braunkohle* 1-2, 24-29
- [68] **Winter, K.,** 1990. Bodenmechanische und technische Einflüsse auf die Qualität von Neulandflächen, *Braunkohle* 10, 15-23
- [69] **Delibalta, M.S.,** 2001. Geotechnische und Bergmännische Aspekte der Restlochgestaltung des Braunkohlentagebaus TKİ/Muğla (Türkei), Raumbezogene Informationssystem und Simulationswerkzeuge in Geowissenschaft und Geo-Engineering, *FIS-Forum Clausthal 2000*, ISBN 3-89720-486-X, 51-56, TU Clausthal, Deutschland
- [70] **Evirgen, M. ve Onacak, T.,** 1987. Madencilik faaliyetlerinden Sonra Çevrenin Düzenlenmesi ve İyileştirilmesi, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları: 21, Ankara
- [71] **Dingethal, F. J., Jürging, P., Kaule, G. & Weinzierl, W.,** 1985. Kiesgrube und Landschaft, Verlag Paul Parey , Hamburg und Berlin
- [72] **Stümer, A. ,** 1990. Planung von Oberflächengestaltung und Rekultivierung im Rheinischen Braunkohlenrevier, *Braunkohle* 12, 4-11
- [73] **Häge, K. & Schönherr, D.,** 1999. Umweltmanagment im Bergbau- Widerspruch oder Integration, *Braunkohle* 5, 581-587
- [74] **Einhorn, W. & Moewes, K.,** 1983. Zum Einfluß der Wiederurbarmachungsqualität im Braunkohlenbergbau auf die Effektivität der landschaftlichen Folgenutzung , *Neue Bergbautechnik*, 13. Jg., 8, 434-437
- [75] **Wittig, H.,** 1997. Ziele der Raumordnung und Landesplanung in den Braunkohlesanierungsgebieten des Landes Brandenburg, *VDI- Berichte* 1358, 41-52
- [76] **Brauer, H.,** 1997. Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik, TU Berlin, *Institut für Verfahrenstechnik*, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York
- [77] **Derbenstedt, C.,** 1996. Braunkohlenbergbau und Naturschutz, *Braunkohle* 5, 517-526
- [78] **Pohl, W. & Carstensen, A.,** 1999. Statischer und dynamischer Wasserhaushalt von Kippen und dessen Auswirkungen auf die Langzeitstandsicherheit von Kippenböschungen, TU Braunschweig, *Institut für Geowissenschaften*, Braunschweig, Deutschland
- [79] **Prinz, H.,** 1997. Abriß der Ingenieurgeologie, Ferdinand Enke Verlag, ISBN:3-432-92333-3, Stuttgart, Deutschland

- [80] **Köse, H., Şimşir, F. ve Güney, A., 1993. Açık Maden İşletmelerinde Rekültivasyon ve Regreasyon, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 236, İzmir**



EKLER



EK-1. TKİ-GELİ (Muğla) Açık işletme sonrası bozulan arazi ve oluşan gölet



EK-1. TKI-GELİ (Mugla) Açık işletme sonrası bozulmuş arazi ve oluşan gölet

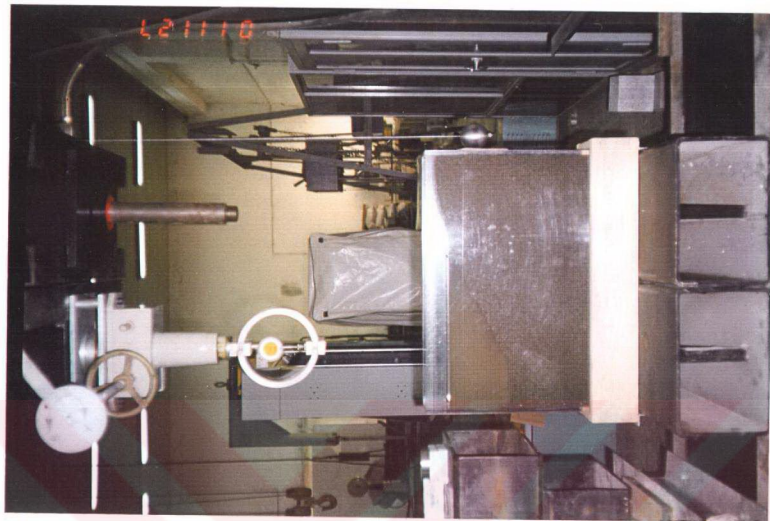
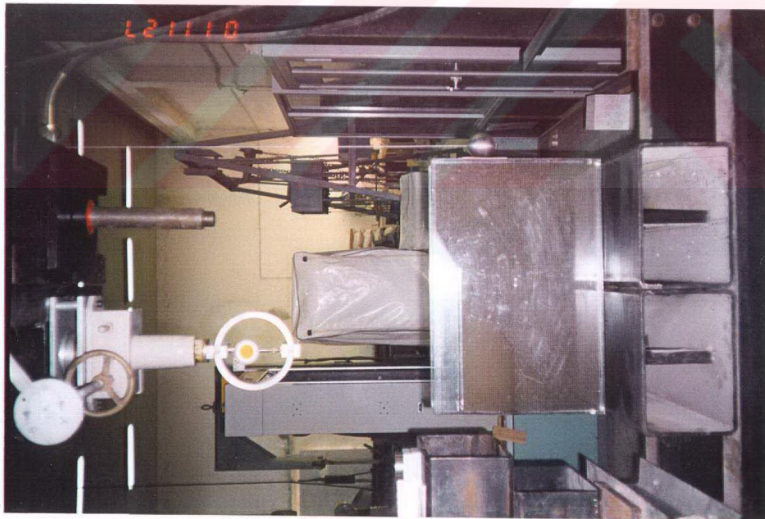


EK-2. TKİ-GELİ Muğla Bölgesinde açık işletme sonrası bozulan araziler ve çevre düzenlenmesi

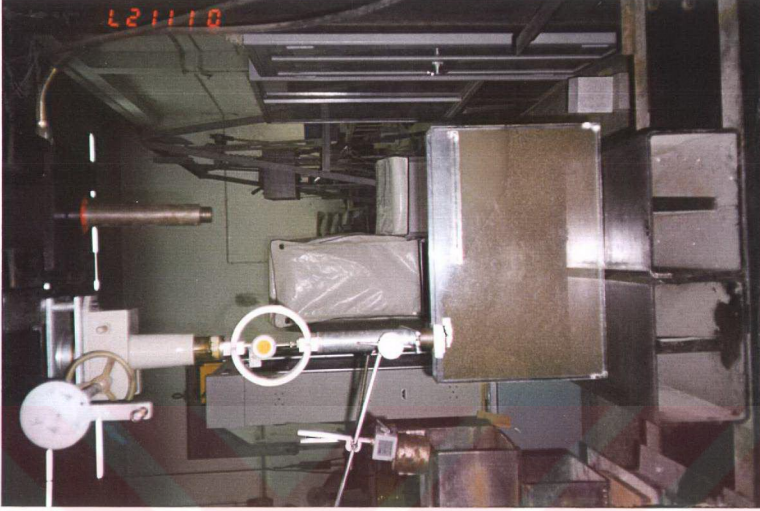
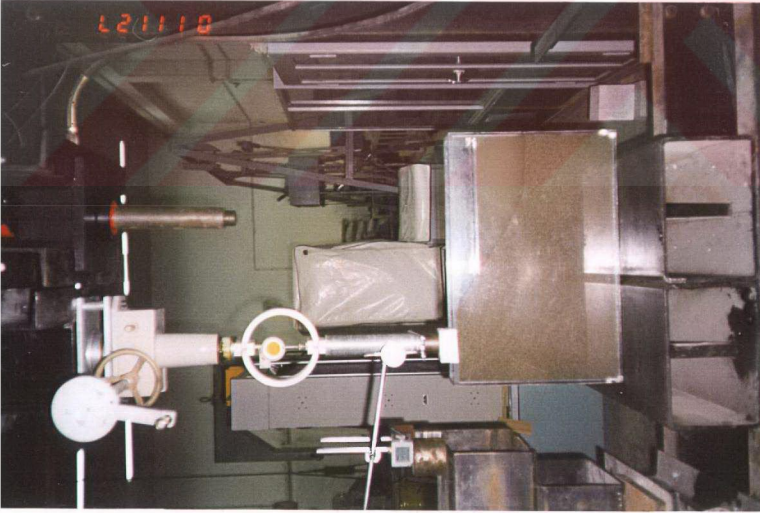
EK-3.

MATLAB 6.0 Programı ile şev stabilitesi analizi bilgisayar program disketi

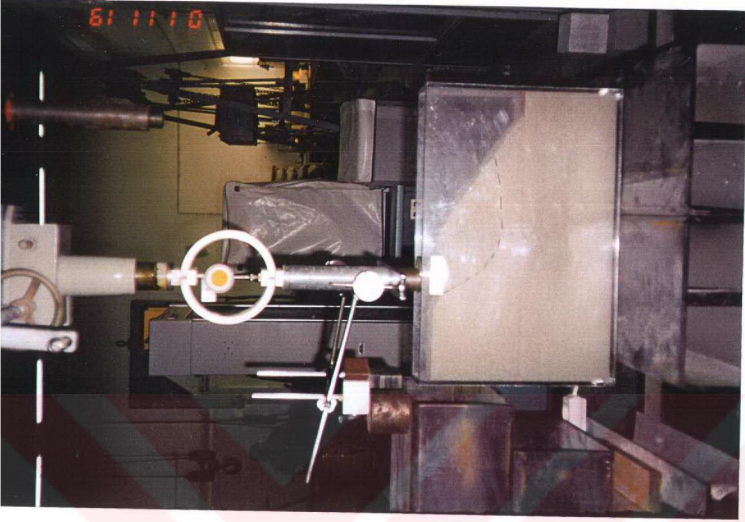
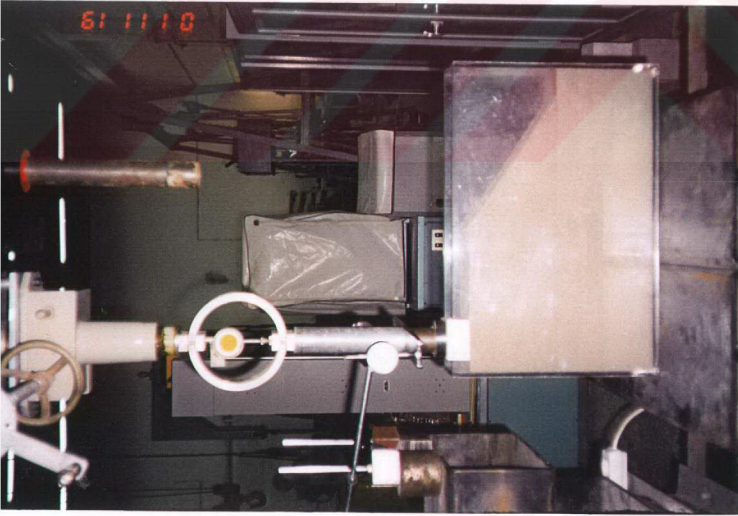




EK-4. Yanal etki kuvveti ile suya doaygun halde şev stabilitesi analizi
a) Kayma öncesi, b) Kayma sonrası



EK-5. Üniform yük dağılımlı şev stabilitesi analizi (sulu sistem)
a) Kayma öncesi, b) Kayma sonrası



EK-6. Üniform yük dağılımlı şev stabilitesi analizi (kuru sistem)
a) Kayma öncesi, b) Kayma sonrası

ÖZGEÇMİŞ

Mahmut Suat Delibalta, 01.04.1967 yılında Adıyaman'da doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini aynı ilde tamamladıktan sonra, 1987 yılında ÖSYM sınavını kazanarak İTÜ Maden Fakültesi Maden Mühendisliği bölümünden 1991-Haziran döneminde “iyi derece” ile mezun oldu. Aynı yıl başladığı İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Maden Üretimi ve Teknolojisi kısmen Almanca programındaki yüksek lisans eğitimini, 1995-Şubat döneminde “pekiyi derece” ile tamamladı. Aynı yıl İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi Programında doktora çalışmalarına başlayan M. Suat Delibalta; İTÜ Vakfı, Gesellschaftliche und Technische Zusammenarbeit (GTZ- Toplumsal ve Teknik İşbirliği- TU Berlin-İTÜ) ve Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD- Alman Akademik Değişim Servisi) bursları kazanmıştır. Özel sektöre ait yeraltı kömür işletmesinde iki yıl emniyet mühendisi olarak çalışan Delibalta, halen Çukurova Üniversitesi Adana Meslek Yüksekokulu Teknik Programlar Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.

12. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ