

Hipoplastik model ile pasa şev stabilite analizi ve rehabilitasyonu

Mahmut Suat DELİBALTA*, Erkin NASUF

İTÜ Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 34469 Maslak, İstanbul

Özet

Gerek üretim, gerekse dekapaj faaliyetleri sırasında ve sonrasında kömür açık işletmelerinde pek çok üretim çukurları/boşlukları ve şev yüzeyleri oluşmaktadır. Gevşek kayaç ve zemin özelliği gösteren açık işletme 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. Kömür açık işletmelerinde bu ve benzeri problemler ile karşılaşmamak için, konu detaylı araştırılarak modern teknoloji uygulamaları, farklı bakış açıları ve alternatif çözüm önerileri sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Açık işletmeler, pasa şev stabilitesi, hipoplastik model, arazi rehabilitasyonu.*

The rehabilitation and analysis of slope stability with hypoplastic model

Abstract

Mining sector, is closely related to natural environment, is different from other industrial operations. Many production open-spaces and slopes are occurred during or after production and overburden stripping in open coal pits. Geometry of these open-spaces and slopes depend on overburden thickness, greatness of operation area and selected open pit technology. Under these different conditions sometimes slope stability problems in pit embankments may occur resulting loss of money. 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. This, use and reclamation of the area, is very significant for environmental assessment. The alternatives of different use for the area may be designed. Firstly, however, the area must be stable for geotechnical characteristics. In this article the design principles and range of instability of such embankments are introduced. The purpose of this study is to exhibit the methods of field rehabilitation and measures taking into consideration against possible slope instability.

Keywords: *Open pit mines, slope stability, hypoplastic model, field rehabilitation.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: M. Suat DELİBALTA. msuat@cu.edu.tr, Tel: (0322) 226 41 60.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Maden Fakültesi'nde tamamlanmış olan "TKİ-GELİ Muğla Bölgesinde dekapaj döküm sahasındaki şev duraysızlıklarının incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 29.05.2003 tarihinde dergiye ulaşmış, 18.07.2003 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2005 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Madencilik sektörü, diğer endüstriyel işletmelerden farklı olarak doğal çevre ile çok sıkı ilişki halindedir. 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 (Ünal vd. 1994; Ünver ve Kara, 1994). Gerek işletme, gerekse doğal çevrenin korunması bakımından bu arazilerin yeniden düzenlenmesi ve kullanıma sunulması yasal bir zorunluluktur. Farklı kullanım alternatiflerinin tasarlanabileceği bu arazilerin, başta geoteknik ve zemin mekaniği bakımından duraylı (stabil) ortam koşullarına sahip olması gerekmektedir (Pierschke ve Boehm, 1996).

Pasa malzemesinin gevşek yapısal ve oluşum özellikleri nedeniyle önemli bir kısmı kayma veya akma eğiliminde olmaktadır. Bunun en önemli koşulu; boşluk suyu basıncının artması ile 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 duraysızlıkların 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 alışlagelmiş belirtiler göstermemesi ve
- ani meydana gelen bir kaymanın zaman diliminin tam olarak tahmin edilememesinden kaynaklanmaktadır.

Bu nedenle, pasa yığınlarında oluşabilecek duraysızlıkların göreceli bir tahmini için öncelikle;

- yığının dane boyut dağılımı ve formu,
- erişilen su seviyesinin pasa yüksekliğine göre oransal değişimi,

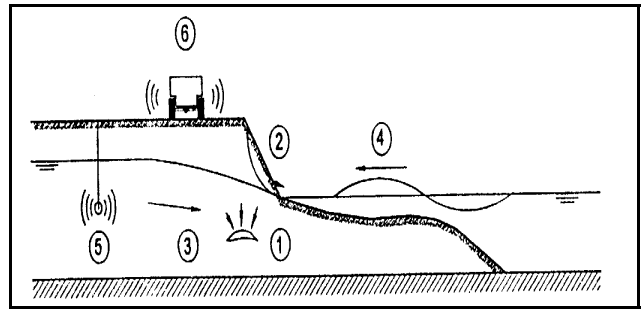
- dinamik etki kuvvetleri (sismik aktivite),
- ilgili yığın yoğunluğu ve malzemenin dayanım özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir (Förster ve Walde, 1994).

Pasa şev duraysızlıklarının oluşum koşulları

Kömür açık işletmelerinde muhtemel bir pasa şev duraysızlığının oluşabilmesi, aşağıda belirtilen koşulların açığa çıkmasıyla mümkündür:

- Dane boyut dağılım eğrisinde bir dane büyüklüğünün baskın olarak gözükmesi,
- Yığındaki danelerin büyük bir kısmının iyi yuvarlaklık ve kaygan yüzey özellikleri göstermesi,
- Gevşek/ çok gevşek yığın halinde bulunması,
- Boşluk ve gözeneklerin tamamen su ile dolu olması,
- Kritik denge koşulundaki yığının bir iç veya dış etkiyle bozulması,
- Dinamik etki kuvvetlerinin şiddeti ve tekrarlıdır.

Eğer pasa şev duraysızlığı için gerekli tüm koşullar oluşmuş ise, yığın denge koşullarını bozacak bir iç veya dış kuvvetin yüzeye etkisiyle kayma başlayabilir. Kaymayı kolaylaştıran olası etki kuvvetleri Şekil 1'de verilmiştir (Förster ve Jennrich, 1999).



Şekil 1. Açık işletmelerde pasa şev duraysızlığına neden olan etki kuvvetleri

- 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 oluşturulan tetikleyici dinamik etkiler (örneğin patlama veya sarsıntılar),
- ⑥ Yüzeyde oluşturulan tetikleyici dinamik etkiler (örneğin çalışan iş makineleri vb.),
- ⑦ Bölgenin depremsellik özelliği.

Burada, sadece dinamik etki kuvvetlerinden ⑤ ve ⑥ 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. Ancak; pasa şev kayma riski, işletme koşulları ve ortam büyüklüklerine (geometri, dekapaj sistemi, in-situ durum vb.) bağlı olarak, nitel ve ampirik bağıntılar ile göreceli olarak belirlenebilir (Vardar, 1996; Nasuf ve Avşar, 2000).

Pasa şev kayma riskinin sayısal analizi

Statik koşuldaki bir pasa şev kayma riskinin geleneksel 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 (Şekercioğlu, 1993; Kızıl ve Köse, 1995; Ulusay, 2001).

Esas itibarıyla analizlerdeki belirsizlikler, karşılaşılan malzeme davranışının karakterize edilmesinde oluşmaktadır. Geleneksel yöntemler, kaymanın şev topuğundan başlayarak geriye doğru gelişen değil de, hareketin kaynağı şev gerisinde bulunuyor ise, gerçek değerleri yansıtabilir. Bunun böyle gelişip gelişmeyeceği, benzer yığın ve ayrıntılı veriler üzerinde değerlendirilerek veya ikinci enerji yasası (2.enerji teorisi) vasıtasıyla öğrenilebilir. Geleneksel yöntemler ile özellikle sınır denge durumunun tespiti gereklidir, fakat denge koşulunun stabilitesi için yeterli değildir. Bu nedenle, geleneksel yöntemler ile birlikte diğer analiz yöntemlerini de dikkate almak gerekmektedir. Ayrıca; ani pasa şev duraysızlıkları sadece kayma gerilmelerinin karşılaştırılması sorunu değil, bilakis bir stabilite problemi. Sistem; bir etki sonrası kısmen

açığa çıkabilecek potansiyel enerjiye sahiptir. Araştırma koşullarına uygunluğu ve yukarıda belirtilen gerekçeler nedeniyle, pasa şev stabilite analizlerinin hipoplastik madde yasasına göre yapılması daha doğrudur (Förster ve Gudehus, 1998).

Hipoplastik model ile stabilite analizi

Burada tarif edilen stabilite analizi, 2.enerji yasasına dayanmaktadır. Bir şev alanında statik denge koşullarından hareketle, sonsuz küçük ayrışmalı 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 deformasyonlar, bütün gerilme bileşenlerinin değişmesine neden olur. Deformasyon gradyenlerinden oluşan söz konusu ikinci enerji yasasının (Δ^2E) negatif değeri, sisteminde kinetik enerji olarak açığa çıkar ve bununla başlamış deformasyon frenlenir ($\Delta^2E > 0$ (duraylı, stabil) veya hızlanır $\Delta^2E < 0$ (duraysız, stabil olmayan durum)).

Fakat, burada bulunan hız vektörleri sadece stabilite analizinde kullanılır ve gerçek koşulları temsil etmezler. Bu nedenle, salt stabilite analizinde kendiliğinden herhangi bir başlangıç duraysızlık koşulunun gelişip gelişmeyeceğini gösterirler. Sonuç temsili ayrışma hızının büyüklüğünden bağımsızdır. Gerçek etkilere karşın, sonsuz etki (kinematik zincir) bütün noktalarda eş zamanlı oluşacak gibi tasarlanır. Yasanın temel esasları ise aşağıda verilmektedir.

Hipoplastik modelin kullanım özellikleri

Hipoplastik madde yasası; fiziksel esaslara dayalı, durum değişkenlerinin açık bir matematiksel ifadesi ve geniş ölçüde malzeme parametrelerine bağlı olarak tanımlanır. Akma yüzeyleri ve şekline gereksinim olmaksızın, elastik ve plastik deformasyonlar arasında da fark gözetilmez. Eşitlik; oransal tiptedir ve deformasyonlar, dane gerilmeleri ve boşluk oranı vasıtasıyla tanımladığından, objektif bir gerilme değerini ifade eder. Zemin davranışı üzerine basınç düzeyinin ve sıklılığın etkisi dikkate alınır. Duraylılık, duraysızlık ve kritik içsel sürtünme

açısı, zemin durumu ve deformasyon yönlerinden belirlenir. Hipoplastik yasa, dane temas kuvvetleri ve relatif ötelenmelerin ortalama değeriyle karakterize edilebilen, basit çimento- lanmamış dane yapısının mekanik davranışını tanımlar. Aşağıdaki özellikler, hipoplastik eşitliğin temelini oluşturur:

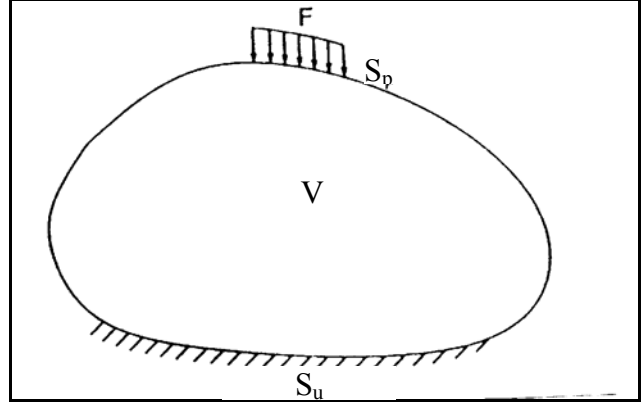
- Zemin durumu yalnız dane gerilme tansörü ve boşluk oranı ile tanımlanır,
- Daneler granülometrik olarak ayrışık, yani topaklanma ve dane bölünmeleri ihmal edilir,
- Boşluk oranının bir alt ve üst sınırı vardır, her ikisi de basınçla azalır,
- Ortalama basınç ile azalan kritik bir boşluk oranı vardır,
- 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 asimptodik olarak meydana gelirler.

Hipoplastik model 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. Hipoplastik eşitliğin kullanılabilmesi için, ek olarak iki büyüklüğe daha gereksinim vardır: İn-situ boşluk oranı ve dane gerilme bileşenleri. Bu yasa, elesto – plastik yasaya karşın elastik ve plastik kısımlardaki deformasyonların keyfi dağıldığını kabul eder ve ilk defa Gudehus (1992) ve Raju (1994) tarafından gevşek yığılmış, ayrışık daneli zeminler üzerinde özellikle pasa şevlerinde kullanılmıştır.

Stabilite kriterleri

Sabit yükler etkisindeki bir katı cisim için Hill (1958) tarafından kullanılan, Gudehus (1992) ve Raju (1994) tarafından geliştirilen matematiksel stabilite eşitlikleri aşağıda verilmektedir. Şekil 2’de gösterilen cisim, t zaman noktasında gözetlenir. V hacmindeki cismin bir kısmı S_u alanı ile

çevrilmiş ve S_p alanına F kuvvetinin etki ettiği varsayılmaktadır. B hacimsel tepki kuvveti ve T_g gerilme alanı ile bir denge koşulunun oluştuğu kabul edilmektedir.



Şekil 2. Kinematik ve statik sınır koşullarıyla bir cisimdeki yük davranışları (Raju, 1994)

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

$$\delta E = \Delta E \cdot \delta t + \Delta^2 E \cdot (\delta t)^2$$

$$= \int_v (T_g + \frac{1}{2} \dot{T}_g \cdot \delta t) \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \delta t \cdot dV - \int_{S_p} F \cdot v \cdot \delta t \cdot ds - \int_v B \cdot v \cdot \delta t \cdot dV \quad (1)$$

Virtürel iş prensibine göre;

$$\Delta E = \int_v T_g \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \delta t \cdot dV - \int_{S_p} F \cdot v \cdot \delta t \cdot ds - \int_v B \cdot v \cdot \delta t \cdot dV = 0 \quad (2)$$

$$\delta E = \Delta^2 E \cdot (\delta t)^2 = \frac{1}{2} \cdot (\delta t)^2 \cdot \int_v \dot{T}_g \frac{\partial V}{\partial x} \cdot dV \quad (3)$$

Sabit yük altında stabilite için yeterli bir koşul;

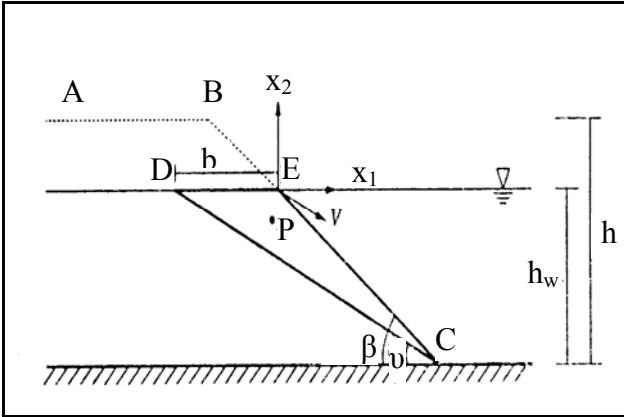
$$\Delta^2 E = \int_v \dot{T}_g \frac{\partial V}{\partial x} \cdot dV > 0 \quad (4)$$

her kinematik hız alanı (v) için sağlanmalıdır. \dot{T}_g , birinci Piola – Kirchoff gerilme tansörüdür.

Eğer $\Delta^2 E > 0$ ise şev stabil, $\Delta^2 E = 0$ ise kararsız, $\Delta^2 E < 0$ ise stabil olmayan denge koşulunu göstermektedir.

Stabilitesi araştırılacak bölge (ν) açısı vasıtasıyla belirlenir (Şekil 3). $\Delta^2 E$ 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 (ν) açısı ve P noktası için tekrarlanabilir.

Hız alanı: Hız alanının (v) belirlenmesi için DEC üçgeni gözetilir (Şekil 3). \overline{DC} uzunluğu değişmez kabul edilir. E noktası V sabit hızıyla DC'ye paralel hareket eder. Hız alanının ABC bölgesinde lineer dağıldığı varsayılır. Hareket sadece şekil düzleminde oluşur ve hacim değişimi oluşmaz.



Şekil 3. Şev geometrisi ve parametrik büyüklükler (Raju, 1994)

Buna göre, hız bileşenleri;

$$\begin{aligned} v_1 &= a_{10} + a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 \\ v_2 &= a_{20} + a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 \\ v_3 &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

sınır koşulları ile verilecek olursa,

$$\begin{aligned} v_1|E &= v \cdot \cos(\nu) & v_2|E &= v \cdot \sin(\nu) \\ v_1|D &= 0 & v_2|D &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$v_1|C = 0 \quad v_2|C = 0$$

$$\begin{aligned} v_1 &= \cos(\nu) + \frac{\cos(\nu)}{b} \cdot x_1 + \frac{\cos(\nu)}{h_w} \cdot \left(1 + \frac{h_w \cdot \cot(\beta)}{b}\right) \cdot x_2 \\ v_2 &= \sin(\nu) + \frac{\sin(\nu)}{b} \cdot x_1 + \frac{\sin(\nu)}{h_w} \cdot \left(1 + \frac{h_w \cdot \cot(\beta)}{b}\right) \cdot x_2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$v_3 = 0$$

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

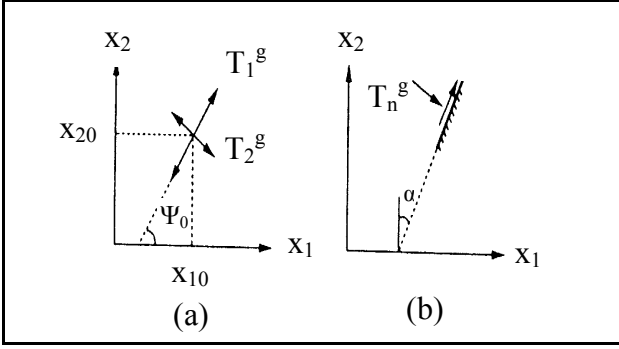
$$b = h_w \cdot \left(\frac{1}{\tan \nu} - \frac{1}{\tan \beta} \right) \quad (8)$$

Hız alanının gradyenti ise;

$$\text{grad}V = \frac{\partial V}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\nu)}{b} & \frac{\cos(\nu)}{h_w} \cdot \left(1 + \frac{h_w \cdot \cot(\beta)}{b}\right) & 0 \\ \frac{\sin(\nu)}{b} & \frac{\sin(\nu)}{h_w} \cdot \left(1 + \frac{h_w \cdot \cot(\beta)}{b}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

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: Statik koşulları sağlayan ve malzemenin sınır değerlerini aşmayacak şekilde bir gerilme alanı tasarlanır. T_g 'nin tam bir temini mümkün değildir, çünkü oluşumu kesin olarak bilinmemektedir. Ancak; Rankine gerilme alanının lineer dağılmasından hareket ederek, herhangi bir doğrultu boyunca çözümler üretilebilir. İzlenen Rankine gerilme alanı şekil 4 (a) ve (b)'de verilmiştir.



Şekil 4. Rankine gerilme alanı için tansörel büyüklükler (Raju, 1994)

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

$$T_m^g = \frac{1}{2} \cdot (T_1^g + T_2^g) \quad (10)$$

$$T_m^g - T_{mo}^g = \frac{\gamma}{\cos^2 \phi} \left[\begin{array}{l} (x_1 - x_{10}) \cdot \sin 2\psi_o \cdot \sin \phi + \\ (x_2 - x_{20}) \cdot (1 + \sin \phi \cdot \cos 2\psi_o) \end{array} \right] \quad (11)$$

Tasarlanan herhangi bir α açısı için gerilmeler,

$$t_n^g = T_m^g \cdot [1 + \sin \phi \cdot \cos 2(\psi_o + \alpha)] \quad (12)$$

$$t_t^g = T_m^g \cdot [\sin \phi \cdot \sin 2(\psi_o + \alpha)] \quad (13)$$

Yüksüz şev başlangıç koşullarına göre;

$$T_{mo} = 0 \text{ ve}$$

$$2\psi_o = -\arcsin(\sin \beta / \cos \phi) + \beta + \pi \quad (14)$$

Buna göre, gerilme bileşenleri;

$$T_{11}^g = T_m^g \cdot (1 + \sin \phi \cdot \cos 2\psi_o) \quad (15)$$

$$T_{22}^g = T_m^g \cdot (1 - \sin \phi \cdot \cos 2\psi_o) \quad (16)$$

$$T_{12}^g = T_{21}^g = T_m^g \cdot (\sin \phi \cdot \cos 2\psi_o) \quad (17)$$

$$T_{33}^g = K \cdot T_{22}^g \quad (18)$$

$$K = 1 - \sin \phi \quad (19)$$

$$T_{13}^g = T_{23}^g = 0 \quad (20)$$

eşitlikleri ile belirlenir.

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, hipoplastik madde yasasına göre hesaplanır. Piola-Kirchoff gerilme oranına göre;

$$\dot{T}_g = \tilde{T}_g + W \cdot T_g - T_g \cdot D + T_g \cdot \text{tr} D \quad (21)$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot ((\text{grad} v) + (\text{grad} v)^T) \quad (22)$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot ((\text{grad} v) - (\text{grad} v)^T) \quad (23)$$

D : Dağılma hız tansörü,

W : Dönme hız tansörü,

g : Granüle malzeme gerilme indisi demektir.

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. Böylece, \dot{T}_g Piola-Kirchoff gerilme tansörü belirlenmiş olur. Gudehus (1992) ve Bauer'e (1992) göre;

$$\tilde{T}_g = -a_1 \cdot f_b \cdot f_c \cdot \text{tr} T_g \left[L \cdot (\hat{T}_g \cdot D) + f_d \cdot N \cdot (\hat{T}_g) \cdot \|D\| \right] \quad (24)$$

$$\hat{T}_g = \frac{T_g}{\text{tr} T_g} \quad (\text{boyutsuz}) \quad (25)$$

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

$$\text{tr} T_g = \text{hg} \cdot \ln \left(\frac{e_o}{e_\infty} \right) \quad (26)$$

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. Eşitlik olarak;

$$L = D + a_2 \cdot \hat{T}_g \text{tr}(\hat{T}_g, D) \quad (27)$$

$$N = a_3 \cdot \hat{T}_g^2 - a_4 \cdot \hat{T}_g^{*2} \quad (28)$$

$$T_g^* = \hat{T}_g - \frac{1}{3} \cdot 1, \quad \hat{T}_g \text{ 'nin deviatörüdür.} \quad (29)$$

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 sabitlerdir. Eşitlik olarak,

$$a_2 = \frac{S_1 \cdot (a+2)^2}{2 \cdot (aS_2 - S_1)} \quad (30)$$

$$a_3 = \frac{a^3 S_1 - 3a^2 (S_1 - 2S_2) - 6/\sqrt{6}a(2b_E - 1) - 4S_1}{\sqrt{6} \cdot (a-2)(aS_2 - S_1)} \quad (31)$$

$$a_4 = \frac{a(a+2) \left[a^2 S_1 - a^3 \sqrt{3/2} (2b_E - 1) - a(S_1 - 2S_2) - 2S_1 \right]}{\sqrt{6} \cdot (a-1)^2 \cdot (a-2)(aS_2 - S_1)} \quad (32)$$

kullanılan diğer terimlerin eşitlikleri ise;

$$b_E = -\frac{1}{2} \cdot [1 + \tan \phi_g] \quad (33)$$

$$a = \frac{1 + \sin \phi_g}{1 - \sin \phi_g} \quad (34)$$

$$S_1 = \sqrt{6} \cdot b_E + \sqrt{1 + 2b_E^2} \quad (35)$$

$$S_2 = \sqrt{3/2} + \sqrt{1 + 2b_E^2} \quad (36)$$

$$\vartheta_g = \frac{2}{3} \cdot \phi_g \quad (\text{başlangıç şev duraylılık açısı}),$$

$$\partial_l \cdot f_b = - \left(\frac{1+e_o}{e_o} \right) \cdot \frac{1}{f_e^* \cdot h_o \cdot \ell_n \left(\frac{e_o}{e_{oo}} \right)} = - \left(\frac{1-e_o}{e_o} \right) \cdot \frac{h_g}{f_u^* \cdot h_o \cdot t_r \cdot T_g} \quad (37)$$

$$f_d = \left(\frac{e - e_c}{e_f - e_c} \right)^\alpha \quad (38)$$

$$f_e = \left(\frac{e_f}{e} \right)^\beta \quad (39)$$

$$f_e^* = \left(\frac{e_{fo}}{e_{oo}} \right)^\beta \quad (40)$$

$$e_o = e_\infty \cdot \exp(\text{tr} T_g / h_g) \quad (41)$$

$$e_f = e_{fo} \cdot \exp(\text{tr} T_g / h_g) \quad (42)$$

$$e_c = e_\infty \cdot \exp(\text{tr} T_g / h_g) \quad (43)$$

$e_c < e < e_f$ aralığında değerler alır. $\text{tr} T_g = 0$ ise, $e_{fo} = e_{\max}$ ve $e_{co} = e_{\min}$ alınabilir. α ve β üstel değerleri ise,

$$\alpha = \frac{\ln \left(\frac{(1+2K_o)^2}{a_3 \cdot (1-K_o) - a_4 \cdot \frac{1}{g} (1-K_o)^2 \cdot (4-1/K_o)} \right)}{\ln \left(\frac{e_\infty - e_{co}}{e_{fo} - e_{co}} \right)} \quad (44)$$

$$\beta = \frac{\ln \left(\frac{c_c (1+\bar{e}) \cdot e_o \cdot h_o \cdot (1+2K_o)^2}{(1+e_o) \cdot h_g \cdot \left\{ (1+2\bar{K}_o)^2 + a_2 + f_d \left[-a_3 + a_4 \cdot \frac{4}{9} \cdot (1-K_o)^2 \right] \right\}} \right)}{\ln \left(\frac{e_\infty \cdot e_f}{e_{fo} \cdot e} \right)} \quad (45)$$

$$\tilde{T}_g = \left(\frac{1+e_o}{e_o} \right) \cdot \frac{hg}{h_o} \cdot [L \cdot (\hat{T}_g \cdot D) + f_d \cdot N \cdot (\hat{T}_g) \parallel D] \quad (46)$$

$$h_o = \left(\frac{1}{1+2K_o} \right) \left\{ \left((1+2K_o)^2 + a_2 + \left(\frac{e_o - e_{co}}{e_{fo} - e_{co}} \right)^\alpha \left[-a_3 + a_4 \cdot \frac{4}{9} (1-K_o)^2 \right] \right) \right\} \quad (47)$$

$$K_o = \tan^2(45 - \phi/2) \quad (48)$$

Hipoplastik madde yasaının temel eşitliklerini oluşturan bu bağıntılar, MATLAB 6.0 bilgisayar programında yazılmıştır. Pasa malzemesinin mekanik davranışını belirleyen parametreler ise, yapılan arazi, laboratuvar ve model deneyler ile belirlenmiştir (Tablo 1).

Laboratuvar deneyleri

Deneyler arazi koşullarına uygun, kötü derecelenmiş SP kum numunesi ile yapılmıştır. Seçilen zemin %8.2 ince dane boyutuna, esas itibarıyla 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 önce deney numunesinden ayıklanmıştır. Kullanılan numuneye ait kesme kutusu deneyi ile $c = 0$ kg/cm² ve $\phi = 41^\circ$ bulunmuştur. En sıkı ve en gevşek yığın boşluk oranları ise (e_{\min} : 0.52; e_{\max} : 0.94) yapılan piknometre deney sonuçlarına göre belirlenmiştir.

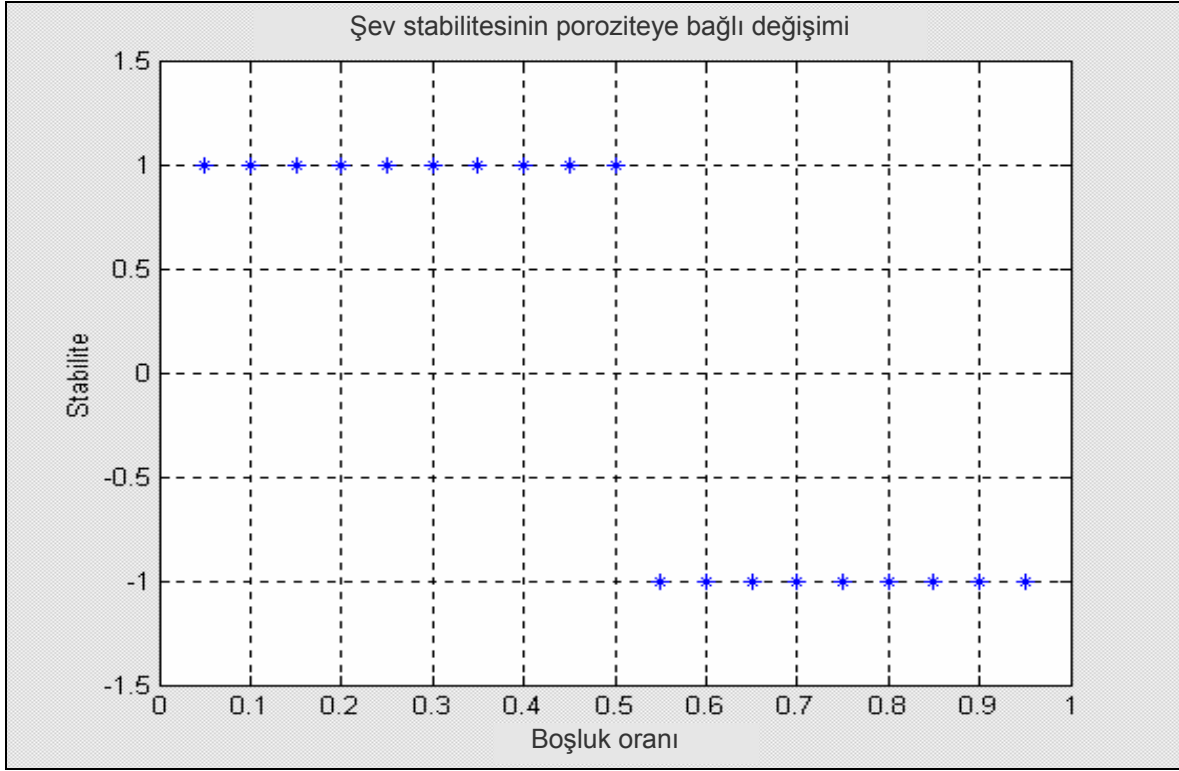
İlk deney serisi sabit şev geometrisi esasıyla yapılmıştır ($h=32$ cm, $h_w=22$ cm ve $\beta=35^\circ$). Boşluk oranı 0.52 - 0.94 aralığında değişmektedir. Şekil 5a, MATLAB bilgisayar programında gerçekleştirilen şev stabilitesi analiz sonuçlarına göre sistemin enerji değeri (Δ^2E) ile boşluk oranı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Burada; 0.53'ten büyük boşluk oranlarında şevin duraysız; 0.53'ten küçük boşluk oranlarında ise muhtemel bir kaymanın oluşamayabileceği görülmektedir. Bu gözlemlere göre, deney kumu için kritik boşluk oranı ($e_{\text{kri}} = 0.53$) olarak belirlenir. Buradaki kritik boşluk oranı değeri, Δ^2E 'nin sıfır olduğunu gösterir.

İkinci deney serisinde, şev açısı $25^\circ - 45^\circ$ arasında değiştirilmiştir (ilk geometrik değerler ve gevşek yığın halinde $e_o = 0.87 > e_{\text{kri}}$). Burada, kayma düzeyinin kullanılan tetikleme kuvvetine göre, şev açısından bağımsız olduğu tespit edilmiştir. Şev yüzeyinin kayması belirli şev açıları için mümkündür ve daha büyük şev açıları ile bu miktar artmaktadır. Şekil 5b, şev stabilitesinin şev açısına bağlı değişimini göstermektedir. Bu sonuçlara göre;

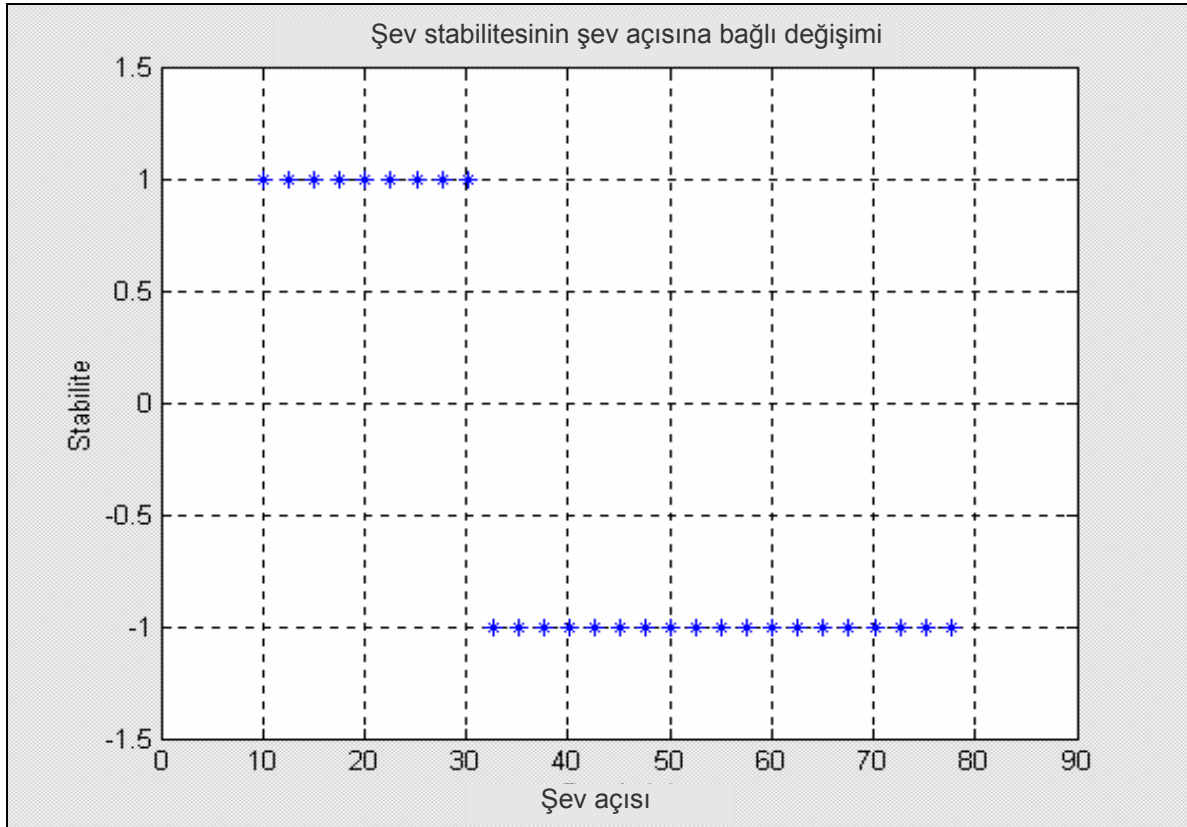
- Şev, büyük bir boşluk suyu basıncı olduğu sürece kayar.
- Laboratuvar deneyleri, kritik bir boşluk oranının (e_{kri}) var olduğunu doğrular. Araştırılan zemin için bu değer $e_{\text{kri}} = 0.53$ dir. Eğer şev bölgesindeki boşluk oranı kritik boşluk oranından daha büyük ise, ani bir kayma oluşabilir.

Tablo 1. İncelenmiş zeminlerin hipoplastik parametre büyüklükleri (Förster ve Gudehus, 1998)

Kum	h_g (MPa)	n (-)	e_{fo} (-)	e_{co} (-)	e_{io} (-)	ϕ_g ($^\circ$)	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



(a)



(b)

Şekil 5. Model deneye ait MATLAB bilgisayar programı şev stabilitesi analiz sonuçları

- Şev açısı, şevin stabilitesi için ikinci derecede önemli rol oynar. $33^\circ < \beta$ şev açılarında ani bir kayma mümkündür.
- Yuvarlak danelerde içsel sürtünme açısı (ϕ_g), köşelilerden daha düşüktür. Buna göre, küçük içsel sürtünme açısına sahip zeminlerde, yani yuvarlak daneli zeminlerde kayma daha çabuk oluşur.

Eğer oluşan bir kayma sıkı bir bölgeye veya yüksek konsolidasyonlu kısma ulaşırsa, o zaman zemin hareketi duracaktır.

Stabilite analiz yöntemlerinin karşılaştırılması

Bir bloğa etkiyen kaydırıcı ve tutucu kuvvetlerin karşılaştırılması ile geleneksel stabilite analizi, denge koşulunun duraylılığı için gereklidir (1.yasa). Fakat bu sadece tasarımsal sistemlerde, yani tutucu ve kaydırıcı kuvvetlerin deformasyonlara neden olmaması halinde geçerlidir. Ayrıca, klasik stabilite analiz yöntemlerinde dayanımların kullanımı daha da karmaşıktır, çünkü pasa yığınlarında zamansal ve yerel çok büyük değişken dirençler (anizotropi) söz konusudur. Bu nedenle, pasa şevlerinde geleneksel stabilite analizi, ancak göreceli sonuçlar verebilir. Sistemin sınırlı tasarımı, bir emniyet faktörünün gerçekleşme ihtimalini tam olarak açıklayamaz. Yeter derecede stabilite için, 2.enerji yasası devreye girer ve hiçbir araştırma bölgesinde (lokal veya global) $\Delta^2 E < 0$ olmamalıdır. 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 bir tanım alanını gerektirir. Bu alan; basit ampirik olarak belirlenir ve esas itibariyle gerçek bir etkinin hareket alanı ile hiçbir ilişkisi yoktur. Ancak; kayma hareketi olarak kabul edilen bir mekanizma ile statik dengenin kaybolması ve bir kaymanın başlaması, açığa çıkan kinetik enerji vasıtasıyla (kinematik zincir) gerçeğe yakın tahmin edilebilir. Göreceli büyük enerji açığa çıkaran temsili alanlar, muhtemel bir kaymanın başlangıcını gösterir. Yalnız burada, kaymanın zamansal gelişimi ve miktarı ortaya konulmaz. Fakat kesinlikle bir kayma

bekleniyor mu, evet veya hayır? sorusuna, hipoplastik model ile daha doğru cevap verilebilir.

Arazi rehabilitasyonu ve çevresel önlemler

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

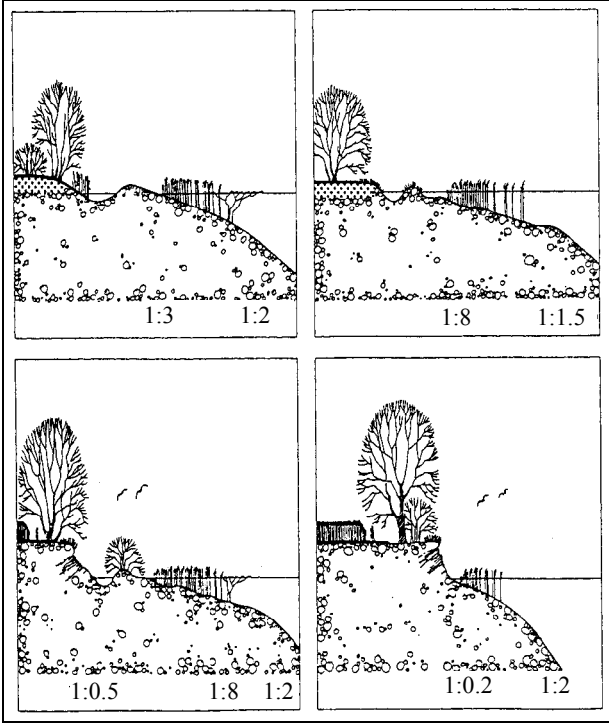
- daha önceden tamamen su ile dolu olması,
- kısmen su ile dolu olması,
- susuz olması arasında farklılıklar oluşur.

Fakat; dekapaj döküm şevlerinin kayma koşullarını belirleyen kriterlerden hareket edilerek, bir şev kayma riskinin önlenmesi için olası tedbirler:

- Dekapaj döküm yığın özelliklerini değiştirmek (konsolidasyon ile dayanım özelliklerini arttırmak ve yapısal değişiklikler),
- Hızlı bir işletme yöntemi ile 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 hemen sonra, yeraltı su seviyesi yükselmeden şevlerin kaymaya karşı güvenli şekillendirilmesi ile gerçekleştirilebilir.

Her defasında kullanıma giren arazi iyileştirme yöntemi; işletmenin jeolojik, hidrolojik ve zemin mekaniği koşullarına, üretim boşluğunun durumuna ve de öngörülen arazi kullanım planına bağlıdır (Şekil 6). Özellikle arazi kullanım planı (Biyotop, dinlenme, ulaşım, tarım, bayındırlık vb. gibi) yapılacak rehabilitasyonun kapsam ve yoğunluğunu belirler (Derbenstedt, 1996; Köse vd., 1993; Ünal vd., 1992). Ancak, gerekli arazi rehabilitasyon etkisine yalnız bir yöntem ile

değil, bilakis birden fazla yöntemin uygun bir kombinasyonu ile erişilebilir.



Şekil 6. Doğal çevre için şev tasarımı (Dingethal vd., 1985)

Sonuçlar

Kömür açık işletmelerinde gerek üretim, gerekse dekapaj faaliyetleri sırasında ve sonrasında pek çok üretim çukurları/ boşlukları ve şev yüzeyleri oluşmaktadır. Değişen hidrojeolojik ve zemin mekaniği koşullarında, bu yüzeylerin önemli bir kısmı kayma veya akma eğiliminde olmaktadır. 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. Farklı kullanım alternatiflerinin tasarlanabileceği bu arazilerin başta geoteknik bakımdan duraylı (stabil) ortam koşullarına sahip olması gerekmektedir. Bunun için şev kayma riski; işletme koşulları ve ortam büyüklüklerine (geometri, dekapaj sistemi, in-situ durum vb.) bağlı olarak, nitel ve ampirik bağıntılar ile belirlenmelidir.

Özellikle klasik analiz yöntemler ile şev duraylılık koşulunun tespiti gereklidir, ancak ortamın

stabilitesi için yeterli değildir. Bu nedenle pasa şev stabilitesi analizi için, 2.enerji yasasına (Δ^2E) bağlı olarak geliştirilen hipoplastik madde yasası kullanıma girer. 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. Bu maksatla hazırlanan MATLAB bilgisayar programı uygun çözümler sunmaktadır.

Ayrıca, üretim çukurunun geometrik boyutu, öngörülen arazi kullanım planlaması ve işletme bölgesindeki jeolojik, hidrolojik ve de zemin mekaniği koşulları, uygulanacak arazi rehabilitasyon yönteminin seçimini etkiler.

Sonuç olarak madencilik faaliyetleri sonrası bozulan arazilerin yeniden düzenlenmesi ve iyileştirilmesinin de başlıca amaç; bu arazilerin güzel bir peyzaj görünüm kazanması yanında, eski ekolojik ve ekonomik değerine kavuşturulması veya daha da geliştirilmesi olmalıdır. Çok yönlü disiplinlerarası çalışmayı gerektiren bu faaliyetler, ancak mevcut hukuksal, ekonomik ve zamansal olanaklar ölçüsünde gerçekleştirilebilir.

Semboller

- Ψ_0 : Asal gerilmelerin yatayla yaptığı açı ($^\circ$)
- f_a : Argotropi faktörü (-)
- S_1, S_2 : Ara değişkenler (-)
- b_E : Ara değişken (-)
- p_w, p_w, u_w : Boşluk suyu basıncı (kPa)
- d : Dane çapı (mm)
- h_g : Granüle malzemenin sertliği (MPa),
- ϕ : İçsel sürtünme açısı ($^\circ$)
- e : İn-situ boşluk oranı (-)
- e_{i0} : İzotrop başlangıç boşluk oranı (-)
- Δ^2E : İkinci enerji yasası (J/s^2)
- α, β : Konsolidasyon exponentleri (-)
- a_1, a_2, a_3, a_4 : Kalibrasyon sabitleri (-)
- c, C : Kohezyon kuvveti (kN/m^2)
- e_{max}, e_{min} : Maksimum, minimum boşluk oranı (-)
- n : Malzeme sertliğine bağlı üstel değer (-)
- \hat{T}^* : Norm gerilme tansörü (kPa)
- H_K, h : Pasa şev yüksekliği (m)
- H_{WK}, h_w : Pasa şev içerisindeki su seviyesi (m)
- β : Pasa şev açısı ($^\circ$)

- e_{c0} : Sıfır basınçta dinamik boşluk oranı(-)
 e_{p0} : Sıfır basınç daimi akımda boşluk oranı(-)
 K_0 : Statik yanıl basınç katsayısı (-)
 ϑ : Şev kayma yüzeyi açısı (°)

Teşekkür

Danışman hocalarım sayın Prof. Dr. Senai Saltoğlu ve Prof. Dr. Erkin Nasuf'a, ayrıca çalışmanın deneysel kısmında öneri ve desteklerinden dolayı Prof. Dr. Mahir Vardar ve Doç. Dr. Mustafa Laman'a teşekkür ederim.

Kaynaklar

- Bauer, E., (1992). *Zum mechanischen Verhalten granularer Stoffe unter vorwiegend ödometrischer Beanspruchung*, Veröffentlichungen des Instituts für Boden und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Heft **130**.
- Derbenstedt, C., (1996). Braunkohlenbergbau und Naturschutz, *Braunkohle*, **5**, 517-526.
- Dingethal, F. J., Jürging, P., Kaule, G. ve Weinzierl, W., (1985). *Kiesgrube und Landschaft*, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- Förster, W. ve Gudehus, G., (1998). Beurteilung der Setzungfließgefähr und Schutz von Kippen gegen Setzungfließen, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.
- Förster, W. ve Jennrich, C., (1999). Sanierung und Sicherung setzungfließgefährdeter Kippen und Kippenböschungen, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Abteilung Bodenmechanik, Freiberg.
- Förster, W. ve Walde, M., (1994). Überlegungen zur Sanierung von Tagebau-Restlöchern an Beispielen, *Vortrag zum Tagebautechnischen Kolloquium*, Freiberg.
- Gudehus, G, Kolymbas, D. ve Raju, V., (1992). Sanierung und Sicherung setzungfließgefährdeter Kippen und Kippenböschungen, *Bericht.*, Institut für Boden und Felsmechanik, Universität Karlsruhe.
- Hill, R., (1958). A General Theory of Uniqueness and Stability in Elastic-plastic Solids, *Journal Mech. Phys. Solids*, **6**, 236-249.
- Kızıl, M.S. ve Köse, H., (1995). *Açık İşletmelerde Şev Stabilitesi*, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları No: **254**, İzmir.
- Köse, H., Şimşir, F. ve Günay, A., (1993), *Açık Maden İşletmelerinde Rekültivasyon ve Regreasyon*, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları No: **236**, İzmir.
- Nasuf, E. ve Avşar, S., (2000). Kaya Mekaniği ve Şev Duraylılık Analizlerinde Bilgisayar Uygulamaları, İTÜ Maden Fakültesi, *Ders Notları*, İstanbul.
- Pierschke, K-J. ve Boehm, B., (1996). Geotechnische und wasserwirtschaftliche Aspekte bei der Restseegestaltung im Rheinischen Braunkohlenrevier, *Braunkohle* **48**, **6**, 647-653.
- Raju, V. R., (1994). *Spontane Verflüssigung lockerer, granularer Körper- Phänomene, Ursachen, Vermeidung*, Universität Karlsruhe, Institut für Boden- und Felsmechanik, Heft: **134**, Karlsruhe.
- Şekercioğlu, E., (1993). *Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi*, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları: **28**, Ankara.
- Ulusay, R., (2001). *Uygulamalı Geoteknik Bilgiler*, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası yayınları: **38**, Ankara
- Ünal, E., Kara, D. ve Aydoğan, O., (1994). Türkiye Madencilik Endüstrisinde İleri Teknoloji Uygulamaları, *TÜBİTAK MAG-987/ YBAG-0028*, Ankara.
- 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, s.5-12, Ankara.
- Ünver, Ö. ve Kara, D., (1994). Türkiye'de Kömür Madenciliği ve Çevre, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, *Madencilik*, Cilt:XXXIII, 2, s.3 -9, Ankara.
- Vardar, M., (1996). *Heyelanlar, Yamaç ve Şevlerde Duraylılık İrdemeleri*, İTÜ Maden Fakültesi, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı, *Ders Notları*, İstanbul.