

PASA ŞEV DURAYSIZLIK ANALİZİNE FARKLI BİR BAKIŞ

A Different View for the Spoil Slope Instability Analysis

Geliş (received) 28 Ağustos (August) 2009; Kabul (accepted) 28 Ekim (October) 2009

M. Suat DELİBALTA (*)

ÖZET

Kömür açık işletmelerinde gerek üretim, gerekse örtükazı (dekapaj) faaliyetleri sırasında ve sonrasında pek çok üretim çukurları/boşlukları ve şev yüzeyleri oluşmaktadır. Geometrileri örtü kalınlığına, işletme büyüklüğüne ve seçilen açık işletme üretim yöntemine bağlı olarak bozulan bu arazilerin, yeniden düzenlenmesi ve kullanıma sunulması çevresel etki bakımından büyük önem taşımaktadır. Pasa malzemesinin gevşek yapısal ve oluşum özellikleri nedeniyle, önemli bir kısmı kayma veya akma eğiliminde olmaktadır. Çok kısa zaman dilimi içerisinde ve büyük bir enerji boşalmasıyla sonuçlanan bu tür şev duraysızlıkları, önemli tehlike potansiyelleri içermektedir. Bu maksatla yapılan çalışmada; şev duraysızlık oluşum koşulları, stabilite analizleri, hipoplastik model (Δ^2E) ve kullanım alternatifleri tanıtılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Açık işletmeler, Pasa şev stabilitesi, Hipoplastik model

ABSTRACT

Many open-spaces and slopes are generated during or after production and overburden stripping in coal open pits. These land fields of which geometries are deformed depending on the overburden thickness, the size of the operation and the mining technique selected, directly impact the effectiveness of the reclamation process and in turn proper preparation of the land for public use. The mining land field soil is often tended to slide and flow due to its structural and stability properties. These sudden changes can reach to high speeds within seconds and often result in massive energy discharges which can cause catastrophic land slides. It is our hope that this present work will shed light to understand and predict the risk of slope stability so that this hypoplastic materials theory (Δ^2E) can be safely used as an alternative technique.

Keywords: Open pit mines, Spoil slope stability, Hypoplastic model

(*) Yard.Doç.Dr., Niğde Üniversitesi Müh.Mim.Fak., Maden Müh. Böl., Kampüs, NIĞDE, msdelibalta@nigde.edu.tr

1. GİRİŞ

Madencilik sektörü; diğer endüstriyel işletmelerden farklı olarak, doğal çevre ile çok daha 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, 1992, 1994; Ünver ve Kara, 1994).

Ancak, yeryüzünün şeklini ve görünüşünü değiştiren pek çok hareket vardır. Bunların en etkili ve tehlikeli olanları volkanlar, depremler, heyelanlar ve kitle hareketleridir. Bu tür olaylar, hareket eden malzemenin türüne, hızına ve yüzey şekline göre özel isimler alırlar (Çizelge 1). Genellikle hareketler arasında net bir sınır yoktur. Hareket bazen kayma ile başlar akma ile sonuçlanır. Bazen de akma ile başlar düşme ile sonuçlanır, yani karmaşık bir kitle hareketi oluşabilir. Kitle hareketleri, yerkürenin az ya da çok eğimli yüzeylerinde (yamaç) veya insanlar tarafından gerçekleştirilen kazılarda (şev) meydana gelmekte ve dolayısıyla mühendislik tasarımında şevlerin duraylılığı söz konusu olmaktadır (Vardar vd,1990).

Gerek iş güvenliği, gerekse çevresel etki değerlendirme (ÇED) bakımından, açık işletme sonrası bozulan arazilerin yeniden düzenlenmesi ve toplum yararına kullanıma sunulması yasal bir zorunluluktur (Değerli ve Dikmen, 2005).

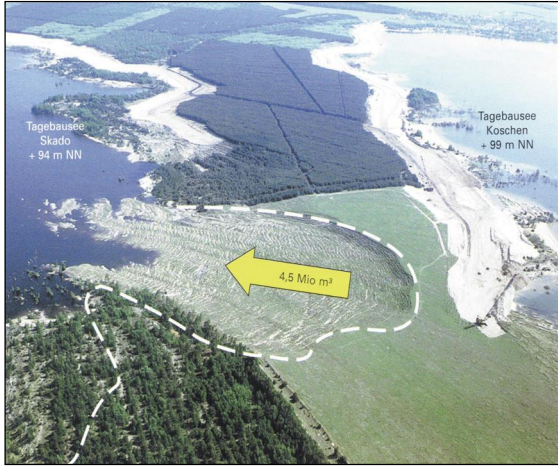
Farklı kullanım alternatiflerinin tasarlanabileceği bu arazilerin, başta jeoteknik ve zemin mekaniği bakımından duraylı (stabil) ortam koşullarına sahip olması gerekmektedir (Pierschke ve Boehm, 1996, Holtz ve Kovacs, 2002).

Açık işletme pası malzemesinin gevşek yapısal ve oluşum özellikleri nedeniyle önemli bir kısmı kayma veya akma eğiliminde olmaktadır. Bunun en önemli koşulu; boşluk suyu basıncının artması ile kesme dayanımının azalması ve statik denge durumunu bozacak yeterli büyüklükteki bir iç veya dış kuvvetin yüzeye etkimesidir. Çok kısa zaman dilimi içerisinde ani hızlara ulaşan ve büyük bir enerji boşalmasıyla sonuçlanan bu tür şev duraysızlıkları, önemli maddi hasar ve risk potansiyelleri içermektedir (Şekil 1). Ayrıca, bu tür duraysızlıkların özel bir risk potansiyeli içermesi, kayma öncesi belirtiler olarak yorumlanan;

- şev yüzeyindeki hareketlerin yavaş yavaş ilerleyerek artması,
- şevin göbek oluşturması,
- şev gerisinde gerilme çatlaklarının oluşması gibi alışlagelmiş belirtiler göstermemesi ve
- ani meydana gelen bir kaymanın zaman diliminin tam olarak tahmin edilememesinden kaynaklanmaktadır (Förster ve Walde, 1994; Kuyumcu, 2005).

Çizelge 1. Kitle Hareketlerin Genel Sınıflandırılması ve Türleri (Vardar vd, 1990)

Hareket Türü	Hareketin Olduğu Malzeme Türü	
	Kaya, Blok, İri Çakıl	Kum, Silt, Kil
Düşme	Kaya, blok düşmesi	Toprak dökülmesi
Akma	Hızlı Kaya-blok akması	Kum-kil akması
	Yavaş Yamaç molozu akması	Çamur-kum akması
Heyelan	Rotasyonel, Translasyonel	Eğrisel kayma yüzeyli zemin hareketi
Kayma	Blok kayması	Yanal genişleyerek kayma
	Kama kayması	
Devrilme	Kaya devrilmesi	Gevşek çimentolu moloz devrilmesi
Karmaşık	Hareket ve malzeme türü karışık	
Çökme	Belirli kayma yüzeyi olmayan kitle hareketi	



Şekil 1. Koschen-Skado linyit açık işletmeleri şev duraysızlığı örneği (LMBV, 1996)

2. PASA ŞEV DURAYSIZLIKLARININ OLUŞUM KOŞULLARI

Şev ya da yamaçlardaki kitlelerin statik dengesine etki eden faktörlerin en önemlileri; litolojik özellik, bileşim, süreksizlikler, boşluk suyu basıncı, gerilme durumu ve miktarıdır. Bunlardan herhangi birinde meydana gelebilecek bir değişme, şev sınır denge durumunun bozulmasına neden olabilir.

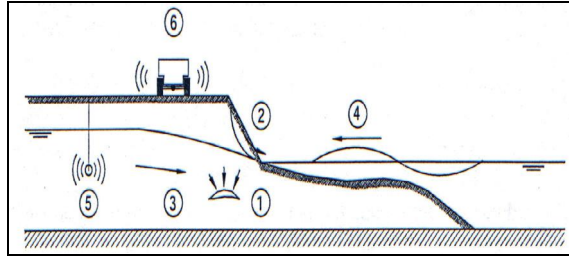
Şevler; içinde açıldıkları malzemenin ya da yapının türüne göre, zemin şevleri ve kaya şevleri olarak iki gruba ayrılır. Diğer taraftan mühendislik açısından kullanım sürelerine göre, kısa süreli şevler ve uzun süreli şevler şeklinde adlandırılırlar. Zemin deyince, ayrık, çimentolanmamış ya da az çimentolanmış, kayaların ayrışmasıyla veya taşınmasıyla oluşmuş, killi, siltli, kumlu ve çakıllı arazi akla gelmektedir. Dolayısıyla zemin şevleri ile sağlam kayada açılan şevlerin özellikleri ve duraylılıklarına etki eden faktörler de farklı olmaktadır (Vardar vd, 1990).

Kömür açık işletmelerinde muhtemel bir pasa (zemin) şev duraysızlığının oluşabilmesi, aşağıda belirtilen koşulların açığa çıkmasıyla mümkündür. Bunlar;

- Dane boyut dağılım eğrisinde bir dane büyüklüğünün baskın olarak gözükmesi,
- Yığındaki danelerin büyük bir kısmı iyi yuvarlaklık ve kaygan yüzey özellikleri göstermesi,

- Gevşek/çok gevşek yığın halinde bulunması,
- Boşluk ve gözeneklerin tamamen veya kısmen su ile dolu olması,
- Sınır denge koşulundaki yığının bir iç veya dış etkiyle bozulması,
- Dinamik kuvvetlerin etki büyüklükleri ve sıklığıdır.

Eğer; pasa şev duraysızlığı için yukarıda belirtilen gerekli tüm koşullar oluşmuş ise, yığın denge durumunu bozacak bir iç veya dış kuvvetin yüzeye etkisiyle, her an kayma başlayabilir. Kaymayı kolaylaştıran olası etki kuvvetleri Şekil 2'de verilmiştir (Förster ve Jennrich, 1999).



Şekil 2. 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 dinamik etkiler (örneğin patlatma veya sarsıntılar),
- ⑥ Yüzeyde oluşturulan dinamik etkiler (örneğin çalışan iş makinaları 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 bağlı olarak, kinematik, analitik ve nümerik bağıntılar ile göreceli olarak belirlenebilmektedir (Sevim vd, 1998; Ulusay, 2001, Duncan ve Wright, 2005).

3. PASA ŞEV KAYMA RİSKİNİN SAYISAL ANALİZİ

Statik koşuldaki bir pasa şev kayma riskinin geleneksel yöntemler ile analizinden; blok, dilim ve kama (Fellenius, Bishop, Janbu vb. gibi) yöntemlerinin kullanılması anlaşılmaktadır. Burada; kopan blok, kaymayı kolaylaştıran ve kaymaya karşı koyan kuvvet veya momentler arasında denge koşullarının sağlandığı ideal cisim olarak tasarlanır. Genel olarak şevlerin emniyet veya güvenlik katsayısı (G_s);

$$G_s = \frac{\sum \text{Tutucu kuvvetler}}{\sum \text{Kayma kuvvetleri}} \quad (1)$$

eşitliği ile belirlenir. Kayma yüzeyleri; dairesel, düzlemsel veya karmaşık olarak gelişebilir (Ulusay, 1982; Kızıl ve Köse, 1995; Şekercioğlu, 2007). 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 yansıtmaktadır. Bunun böyle gelişip gelişmeyeceği, benzer yığın ve ayrıntılı veriler üzerinde değerlendirilerek veya ikinci enerji yasası (Hipoplastik Model) vasıtasıyla öğrenilebilir. Geleneksel yöntemler ile özellikle sınır denge durumunun ($G_s > 1$) tespiti gereklidir, fakat denge koşulunun stabilitesi için yeterli değildir. Bu nedenle, geleneksel yöntemler ile birlikte diğer analiz yöntemlerini de dikkate almak gerekmektedir (Duncan ve Wright, 2005). Ayrıca; ani bir pasa şev duraysızlığı sadece kayma gerilmelerinin karşılaştırılması sorunu değil, bilakis bir stabilite problemidir. Sistem; bir etki sonrası kısmen açığa çıkabilecek potansiyel enerjiye sahip olmaktadır. Araştırma koşullarına uygunluğu ve yukarıda belirtilen gerekçeler nedeniyle, pasa şev stabilite analizlerinin hipoplastik model ile yapılması önerilmektedir (Förster ve Gudehus, 1998).

4. HİPOPLASTİK MODEL İLE STABİLİTE ANALİZİ

Burada tarif edilen stabilite analizi, 2. enerji yasasına dayanmaktadır ($\Delta^2 E$). 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 negatif değeri, sistemde kinetik enerji olarak açığa çıkar ve bununla başlamış deformasyon hızlanır $\Delta^2 E < 0$ (duraysız, stabil olmayan durum) veya frenlenir $\Delta^2 E > 0$ (duraylı, stabil durum).

Ancak, burada bulunan hız vektörleri sadece stabilite analizinde kullanılır ve gerçek koşulları temsil etmezler. Bu nedenle, salt stabilite analizinde kendiliğinden herhangi bir 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.

4.1 Hipoplastik Modelin Kullanım Özellikleri

Hipoplastik model; 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; diferansiyel tiptedir ve deformasyonlar, dane gerilmeleri ve boşluk oranı vasıtasıyla tanımladığından, objektif bir gerilme değerini ifade eder. Zemin davranışı üzerine basınç düzeyinin ve sıklığının etkisi dikkate alınır. Duraylılık, duraysızlık ve kritik içsel sürtünme açısı; zemin durumu ve deformasyon yönlerinden belirlenir. Hipoplastik yasa, dane temas kuvvetleri ve rölatif ötelenmelerin ortalama değeriyle karakterize edilebilen, basit çimentolanmamış dane yapısının mekanik davranışını tanımlar. Aşağıdaki özellikler, hipoplastik modelin temelini oluşturur. Bunlar;

- 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

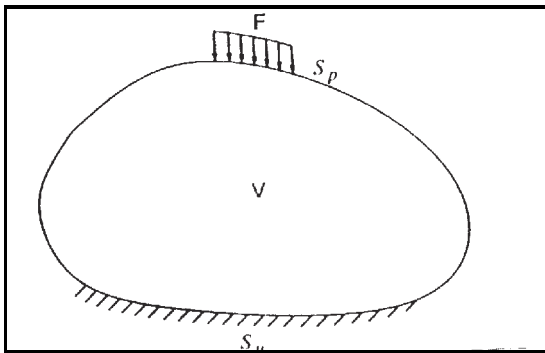
(anizotrop durum).

- Etkin gerilmeler prensibi vardır.
- Fiziko-kimyasal etkiler ve katı cisim ayrışmaları ihmal edilir.
- Gerilme eğrileri başlangıç durumundan bağımsız olarak, orantılı gerilme eğrilerinde asimptotik olarak meydana gelirler.

Hipoplastik model toplam sekiz malzeme parametresi ile karakterize edilmektedir. Bunlar; ϕ_g : İçsel sürtünme açısı ($^\circ$), h_g : Konsolidasyon basıncı (MPa), n : Malzeme özelliğine bağlı üstel değer (-), e_{io} : İzotrop boşluk oranı (-), e_{co} (emin): Dinamik boşluk oranı (-), e_{fo} (e_{max}): Başlangıç boşluk oranı (-), α ve β : Konsolidasyon exponentleri (-). Bunlar, malzemenin granülometri özellikleri ile çok sıkı ilişkilidir ve zemin mekaniği indeks deneyleri ile belirlenebilmektedir. Ayrıca, iki büyüklüğe daha gereksinim vardır: in-situ boşluk oranı ve dane gerilme bileşenleri. Bu yasa, elesto-plastik yasaya karşın elastik ve plastik kısımlardaki deformasyonların keyfi dağılmadığını kabul eder ve ilk defa Kolymbas, Gudehus ve Raju tarafından gevşek yığılmış, ayrışık daneli (kohezyonsuz) zeminler üzerinde, özellikle pasa şevlerinde kullanılmıştır.

4.2 Şev Stabilite Kriterleri

Sabit yükler etkisindeki bir katı cisim için Hill tarafından kullanılan, daha sonra Gudehus ve Raju tarafından geliştirilen matematiksel stabilite eşitlikleri aşağıda verilmektedir. Şekil 3'te 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 statik denge koşulunun oluştuğu kabul edilmektedir (Hill, 1958; Gudehus vd, 1992; Raju, 1994; Kudella, 1995).



Şekil 3. 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;

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

Virtüel iş prensibine göre;

$$\Delta E = \int_v T_g \frac{\partial V}{\partial x} \delta t dV - \int_{S_p} F \cdot v \delta t ds - \int_v B \cdot v \delta t dV = 0 \quad (3)$$

$$\delta E = \Delta^2 E (\delta t)^2 = \frac{1}{2} (\delta t)^2 \int_v \dot{T}_g \frac{\partial V}{\partial x} dV \quad (4)$$

Sabit yük altında şev stabilitesi için yeter koşulu;

$$\Delta^2 E = \int_v \dot{T}_g \frac{\partial V}{\partial x} dV > 0 \quad (5)$$

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 kayma yüzey açısı vasıtasıyla belirlenir (Şekil 4). $\Delta^2 E$ (J/s^2) (5) eşitliği alana integre edilir. Lineer dağılmış hız alanının kabulü ile gerilme bileşenleri her yerde eşit olacağından, DEC üçgeninde herhangi bir noktanın dikkate alınması (P noktası gibi) stabilite analizi için yeterlidir. Böylece kinematik hız alanı v belirlenir ve gerilme tansörü \dot{T}_g hesaplanır. Granüle malzemenin mekanik davranışı, \dot{T}_g Jaumannsch gerilme eşitliği ile belirlenir.

$$\tilde{T}_g = -a_1 \cdot f_b \cdot f_c \cdot \text{tr} T_g [L(\dot{T}_g \cdot D) + f_d \cdot N(\dot{T}_g) \|D\|] \quad (6)$$

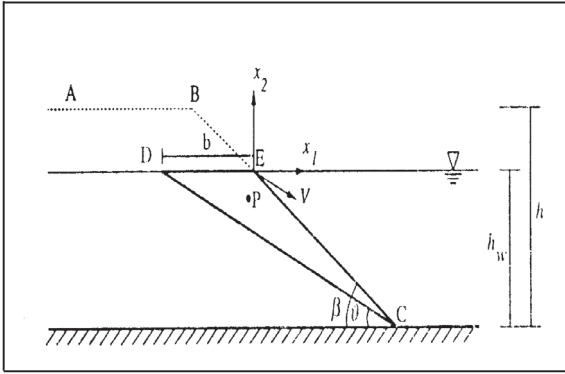
$$\dot{T}_g = \tilde{T}_g + W \cdot T_g - T_g \cdot D + T_g \cdot \text{tr} D \quad (7)$$

Burada; a_1 : Eğilme sabiti, f_b : Barotropi faktörü (basınca bağlı sabit), f_c , f_d : Pyknotropi faktörleri (malzeme özelliklerine bağlı sabit), D : Dağılma

hız tansörü, W : Dönme hız tansörü, L ve N : Lineer ve lineer olmayan tansörel büyüklüklerdir.

Eşitlik (7)'deki son üç terim çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. Buna göre; $W \cdot \dot{T}_g - T_g \cdot D + T_g \cdot \text{tr}D = 0$ olup, \dot{T}_g dir.

Böylece, \dot{T}_g birinci Piola–Kirchoff gerilme tansörü belirlenmiş olur. Benzer şekilde hesaplama adımları, olası her \dot{T}_g açısı ve P noktası için tekrarlanabilir (Şekil 4).



Şekil 4. Şev geometrisi ve parametrik büyüklükler (Raju,1994)

Hipoplastik madde yasasının temel eşitliklerini oluşturan ilgili tüm bağıntılar, MATLAB 6.0 bilgisayar programında yazılmıştır (Delibalta, 2003). Pasa malzemesinin mekanik davranışını belirleyen parametreler ise, yapılan laboratuvar ve model deneyler ile belirlenmiştir (Çizelge 2).

4.3 Laboratuvar Testleri ve Model Deneyler

Model deneyler arazi koşullarına uygun, kötü derecelenmiş SP kum numunesi ile 10x40x60 cm boyutundaki plexiglas havuzda 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, 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 kohezyon $c = 0 \text{ kg/cm}^2$ ve içsel sürtünme açısı $\phi = 41^\circ$ bulunmuştur (Şekil 5). En sıkı ve en gevşek yığın boşluk oranları ise yapılan piknometre deney sonuçlarına göre, $e_{\min}=0,52$ ve $e_{\max}=0,94$ olarak belirlenmiştir. İlk deney serisi sabit şev geometrisi esasıyla

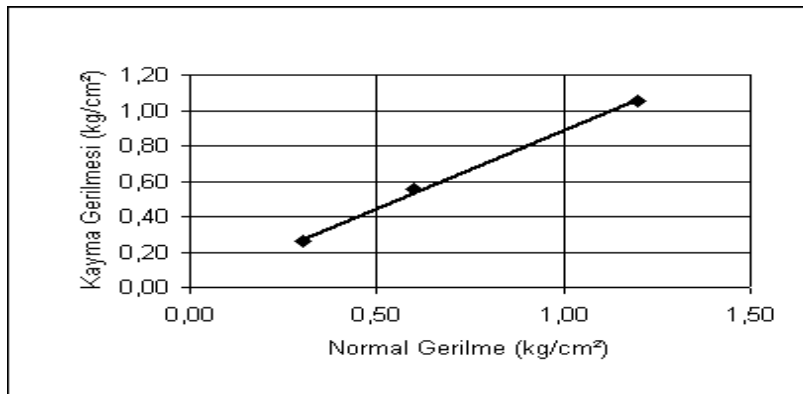
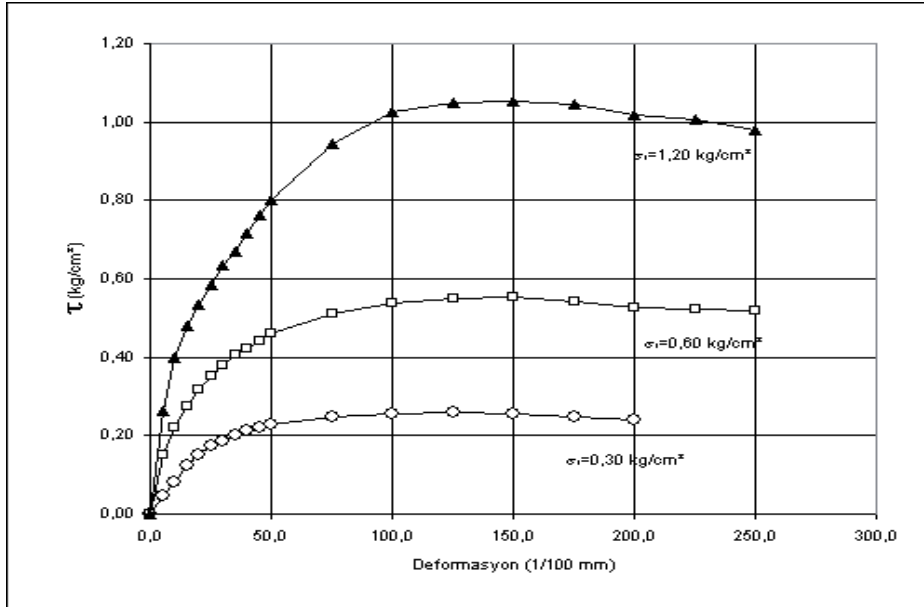
yapılmıştır (şev yüksekliği $h=32\text{cm}$, şevdeki su seviyesi $h_w=22\text{cm}$ ve şev açısı $\beta=35^\circ$). Boşluk oranı $0,52-0,94$ aralığında değişmektedir. Algoritması Şekil 6'da verilen MATLAB 6.0 bilgisayar programında gerçekleştirilen şev stabilitesi analiz sonuçlarına göre, sistemin enerji değeri (Δ^2E) ile boşluk oranı arasındaki ilişkiyi Şekil 7.a göstermektedir. Burada; $0,53$ 'ten büyük boşluk oranlarında şevin duraysız, $0,53$ 'ten küçük boşluk oranlarında ise muhtemel bir kaymanın olmayacağı görülmektedir. Bu gözlemlere göre, deney kumu için kritik boşluk oranı $e_{\text{kri}} = 0,53$ olarak belirlenmiştir. Buradaki kritik boşluk oranı değeri, Δ^2E 'nin sıfır olduğunu, yani kararsızlık koşulunu göstermektedir.

İkinci deney serisinde, şev açısı $25^\circ - 45^\circ$ arsında 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 risk artmaktadır. Şekil 7.b, 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 kayma oluşabilir.
- Şev açısı, şevin stabilitesi için ikinci derecede önemli rol oynar. Model deneylere göre, $33^\circ < \beta$ 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 vakit zemin hareketi duracaktır.

Çizelge 2. Bazı Zeminlerin Hipoplastik Parametre Büyüklükleri (Förster ve Gudehus, 1998)

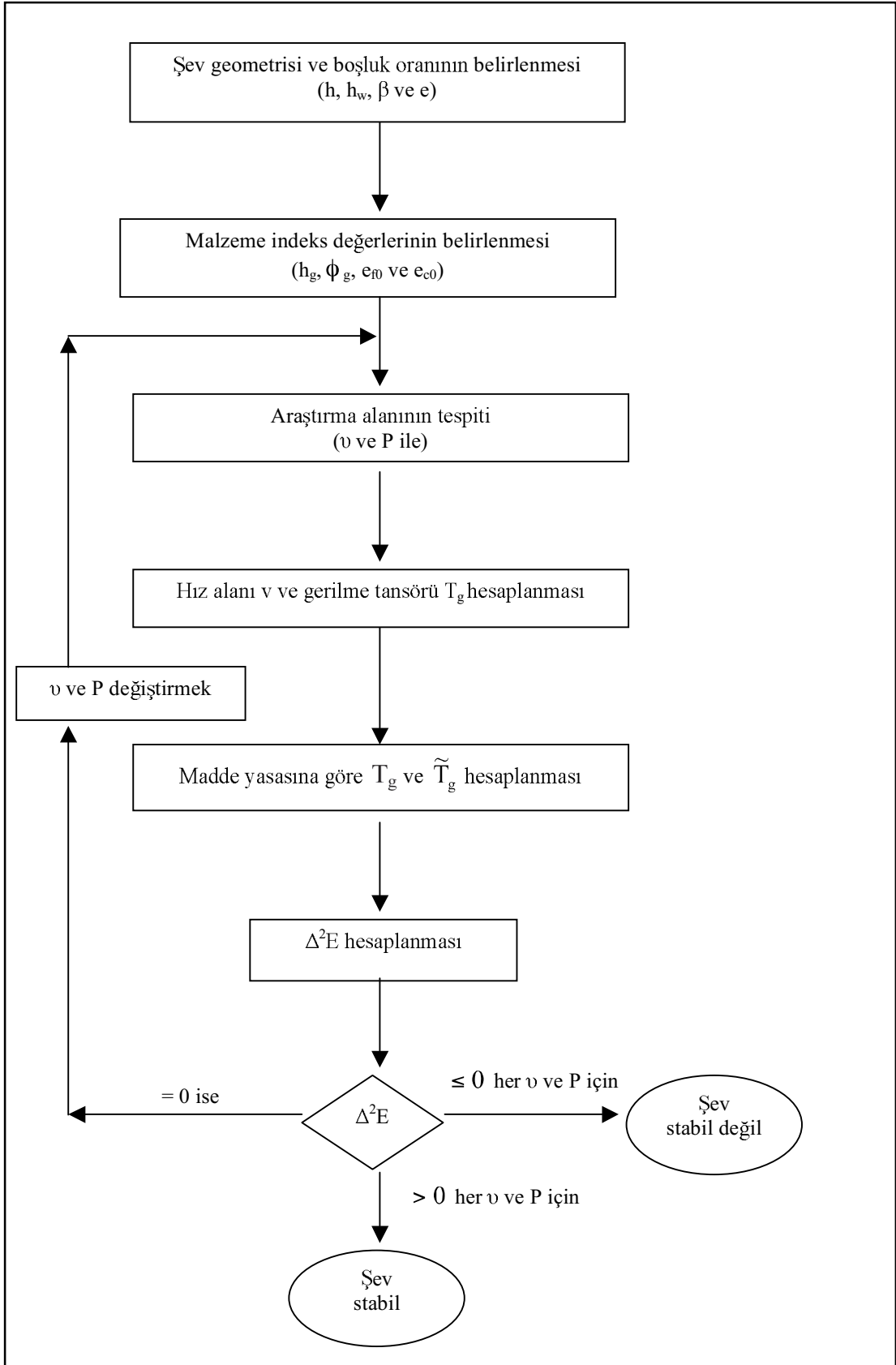
Kum	h_g (MPa)	n (-)	e_{io} (-)	e_{co} (-)	e_{io} (-)	ϕ_g (°)	α (-)	β (-)
Ticiono	250	0,68	0,938	0,59	1,105	31	0,11	1,00
Toyoura	120	0,69	0,98	0,61	1,127	32	0,12	1,00
L.Buzzard	6400	0,45	0,79	0,49	0,934	31	0,16	1,00
Hokksund	150	0,70	0,874	0,533	1,01	31	0,09	1,00
Monterey	8000	0,35	0,834	0,54	0,90	32	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



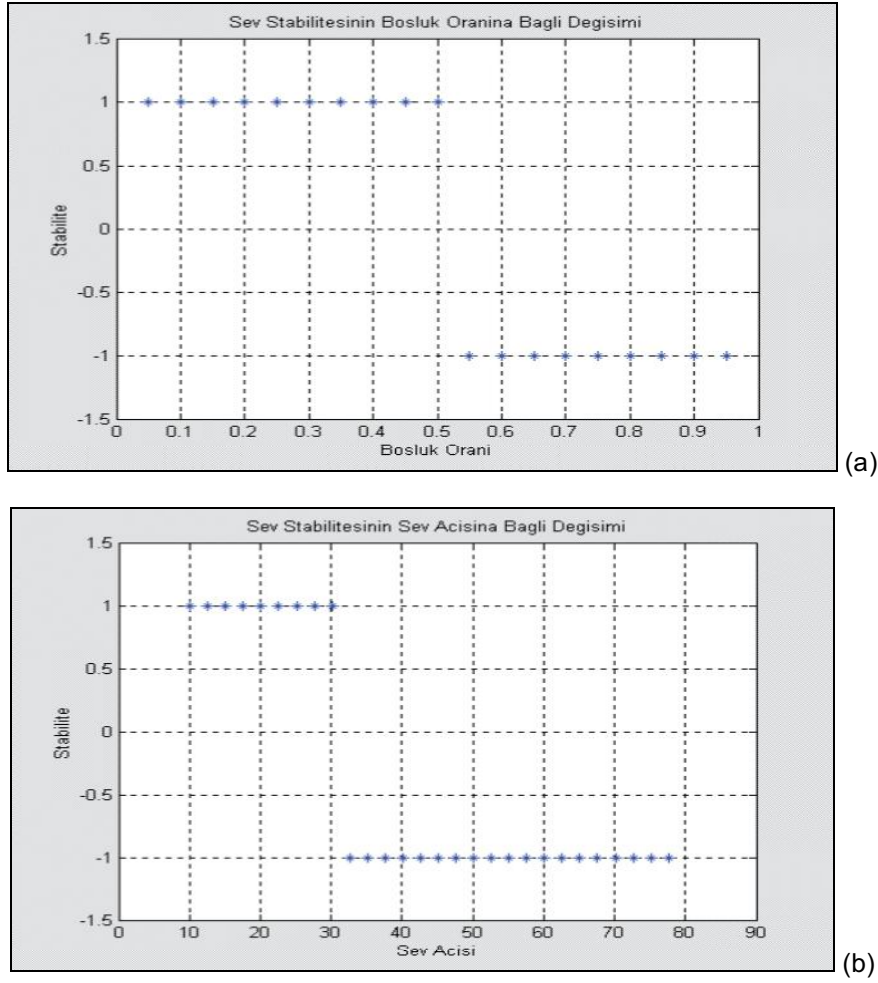
$$c = 0 \quad \text{kg/cm}^2$$

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

Şekil 5. Deney numunesine ait kesme kutusu deney sonuçları



Şekil 6. Pasa şev stabilitesi için MATLAB 6.0 bilgisayar programı algoritması



Şekil 7. Model deneye ait şev stabilitesi analiz sonuçları (Delibalta, 2003)

5. ŞEV STABİLİTE ANALİZ YÖNTEMLERİNİ KARŞILAŞTIRMA

Rijit bir bloğa etkiyen kaydırıcı ve tutucu kuvvetlerin oranı ile yapılan geleneksel stabilite analizi, sınır denge koşulunun tespiti için gereklidir (1.Yasa). Fakat bu sadece tasarımsal sistemlerde, yani tutucu ve kaydırıcı kuvvetlerin deformasyonlara neden olmaması halinde geçerlidir. Ayrıca, geleneksel stabilite analiz yöntemlerinde kesme 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 verebilmektedir. Sistemin sınırlı tasarımı, bir emniyet faktörünün gerçekleşme ihtimalini tam olarak açıklayamamaktadır. Yeter derecede stabilite için, 2. enerji yasası devreye girer ve hiçbir araştırma bölgesinde lokal

veya global $\Delta^2E < 0$ olmamalıdır. Söz konusu ikinci yasa, alınan enerjinin ön belirtisi üzerine (Δ^2E) 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 olası bir kaymanın başlaması, açığa çıkan kinetik enerji vasıtasıyla (kinematik zincir) gerçeğe yakın tahmin edilebilmektedir. Göreceli büyük enerji açığa çıkaran temsili alanlar, muhtemel bir kaymanın başlangıcını göstermektedir. Yalnız burada, kaymanın zamansal gelişimi ve süresi ortaya konulmaz. Fakat kesinlikle bir kayma bekleniyor mu? sorusuna, evet veya hayır olarak hipoplastik model ile daha belirgin cevap verilebilmektedir.

6. SONUÇLAR

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. Açık işletme pası malzemesinin gevşek yapısal ve oluşum özellikleri nedeniyle önemli bir kısmı kayma veya akma eğiliminde olmaktadır. Çok kısa zaman dilimi içerisinde ani hızlara ulaşan ve büyük bir enerji boşalmasıyla sonuçlanan bu tür şev duraysızlıkları, önemli maddi hasar ve risk potansiyelleri içermektedir. Gerek iş güvenliği, gerekse çevresel etki değerlendirme (ÇED) bakımından, açık işletme sonrası bozulan arazilerin yeniden düzenlenmesi ve toplum yararına kullanıma sunulması yasal bir zorunluluktur. Farklı kullanım alternatiflerinin tasarlanabileceği bu arazilerin, eski ekolojik ve ekonomik değerine kavuşturulması veya daha da geliştirmesi, ancak zemin mekaniği ve jeoteknik yönden duraylı (stabil) ortam koşullarına sahip olması ile mümkündür.

Kömür açık işletmelerinde bir şev yenildiği zaman, sadece bir etkenin tek başına bu duraysızlığa neden olduğu söylenemez. Bu maksatla pası kayma riski, işletme koşulları ve ortam büyüklüklerine (geometri, dekapaj sistemi, in-situ durum vb.) bağlı olarak, kinematik, analitik ve nümerik bağıntılar ile belirlenebilmektedir. Özellikle geleneksel şev duraylılık analiz yöntemleri ile sınır denge koşulunun tespiti gereklidir, fakat ortamın stabilitesi için yeterli değildir. Bu nedenle pası şev duraylılık analizi için, 2. enerji yasasına (Δ^2E) bağlı olarak geliştirilen hipoplastik model önerilmektedir. İlk kez Kolymbas, 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. Hipoplastik modelin temel eşitliklerini oluşturan bağıntılara göre hazırlanan MATLAB 6.0 bilgisayar programı yardımıyla, bu tür problemlere daha uygun çözümler sunulduğu görülmüştür. Yalnız burada, kaymanın zamansal gelişimi ve süresi hakkında bir öngörü ortaya konulmamaktadır. Fakat kesinlikle bir kayma bekleniyor mu? sorusuna, evet veya hayır şeklinde, hipoplastik model ile daha net cevap verilebilmektedir.

Şev duraylılık analizleri; basit denklemler, diyagramlar, hesap tabloları ve çeşitli bilgisayar yazılım programları (örneğin STABGM 2.0, UTEXAS4, REAME, SWASE ve STABIL2 vb.) ile de yapılabilmektedir. Belirli bir şevin duraylılığını değerlendirmede, çoğu zaman birden fazla yöntem kullanılabilir. Fakat; bir bilgisayar programının kullanılması durumunda, sonuçların doğruluğunu kontrol etmede bir başka bilgisayar programı veya hesap tablosu mutlaka kullanılmalıdır.

KAYNAKLAR

Değerli, E. ve Dikmen, A.C., 2005; "Çevre Mevzuatında Madencilik Sektörü", Madencilik ve Çevre Sempozyumu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara, 1-10.

Delibalta, M.S., 2003; "TKİ-GELİ (Muğla) Bölgesinde Dekapaj Döküm Sahasındaki Şev Duraysızlıklarının İncelenmesi", İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 154.

Duncan, J.M. ve Wright, S.G., 2005; "Zemin Şevlerinin Duraylılığı", Çeviren Kamil Kayabalı, Gazi Kitabevi, ISBN:975-6009-00-4, Ankara, 299.

Förster, W. ve Gudehus, G., 1998; "Beurteilung der Setzungfließgefahr und Schutz von Kippen gegen Setzungfließen", TU Bergakademie Freiberg, 135.

Förster, W. ve Jennrich, C., 1999; "Sanierung und Sicherung setzungfließgefährdeter Kippen und Kippenböschungen", TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Teilprojekt 4, 36.

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, Universität Karlsruhe, Institut für Boden und Felsmechanik

Hill, R., 1958; "A General Theory of Uniqueness and Stability in Elastic-Plastic Solids", Journal

Mech. Phys. Solids, Vol.6, 236-249.

Holtz, R.D. ve Kovacs, W.D., 2002; "Geoteknik Mühendisliğine Giriş", Çeviren Kamil Kayabalı, Gazi Kitabevi, ISBN:0-13-484394-0, Ankara, 723.

Kızıl, M.S. ve Köse, H., 1995; "Açık İşletmelerde Şev Stabilitesi", DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 254, İzmir, 114.

Kudella, P., 1995; "Stabilitätsberechnung von setzungfließgefährdeten Kippenrandböschungen," Geotechnik 19, 7-15.

Kuyumcu, M. 2005; "Doğu Almanya Linyit Ocakları Islahı ve Çevreye Entegrasyonu", Madencilik ve Çevre Sempozyumu, Ankara, 165-172.

LMBV mbH, 1996; "Sichere Gestaltung setzungfließgefährdeter Kippenbereiche", Öffentlichkeitsarbeit, Berlin, 12.

Pierschke, K-J. ve Boehm, B., 1996; "Geotechnische und wasserwirtschaftliche Aspekte bei der Restseegestaltung im Rheinischen Braunkohlenrevier," Braunkohle 48, Nr.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, 96.

Sevim, H., Nasuf, E. ve Kuzu, C., 1998; "Kömür Atıklarının Depolanması", Kömür özellikleri, teknolojisi ve çevre ilişkileri, C 34, Özgün Ofset AŞ., İstanbul, 603-621.

Şekercioğlu, E., 2007; "Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi", TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları: 28, Ankara, 286.

Ulusay, R., 2001; "Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler", TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları: 38, Ankara, 385.

Ulusay, R., 1982; "Şev Stabilité Analizlerinde Kullanılan Pratik Yöntemler ve Jeoteknik Çalışmalar", MTA Yayınlarından, Eğitim Serisi No:25, Ankara, 141.

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, Cilt:XXXI, Sayı:1, 5-12.

Ünal, E., Kara, D. ve Aydoğan, O., 1994; "Türkiye Madencilik Endüstrisinde İleri Teknoloji Uygulamaları", TÜBİTAK MAG-987/ YBAG-0028, Bölüm V, 165.

Ünver, Ö. ve Kara, D., 1994; "Türkiye'de Kömür Madenciliği ve Çevre", TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Madencilik, Cilt:XXXIII, Sayı:2, 3-9.

Vardar, M., Özmen, M. ve Eriş, İ., 1990; "Uygulamalı Jeoloji", İTÜ Maden Fakültesi, Kaya Mekaniği ve Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı, İstanbul, 7/40.