

MADENCILIK

TMMOB MADEN MÜHENDİSLERİ ODASIDERGİSİ
THE JOURNAL OF THE CHAMBER OF MINING ENGINEERS OF TURKEY

ARALIK
DECEMBER
2009

CILT
VOLUME
48

SAYI
NUMBER
4

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

HalukÇELİK 3 **X-IŞINI SEDİMANASYONU VE LAZER IŞIĞI KİRİNİMİ METODLARIYLA TANE İRİLİĞİ ANALİZİ: GENEL İLKELER VE FARKLI KARAKTERDEKİ İKİ KİL NUMUNESİYLE ELDE EDİLEN SONUÇLARININ TARTIŞILMASI**
Particle Size Analysis with X-ray Sedimentation and Laser Light Diffraction Methods: General Discussion of Results Obtained From Two Clay Samples Having Different Characteristics

A. Seyfi ERDEM 19 **BİLYALI DEĞİRMENLERİN ÇEKTİĞİ GÜCÜN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER VE KURU SİSTEM ÇALIŞAN KAMARALI BİLYALI DEĞİRMENLERE UYGULANMASI**
The Methods Used to Determine of the Power of Ball Mills and Their Application Dry-System Multi-Compartment Ball Mills

Gökhan AYDIN, İzzet KARAKURT, KerimAYDINER 31 **İŞLETİLEMİYEN KOMUR DAMARLARINDA KARBONDİOKSİTİN DEPOLANMASI**
Carbon Dioxide Storage at Unminable Coal Seams

M. Suat DELİBALTA 45 **PASA ŞEV DURAYSIZLIK ANALİZİNE FARKLI BİR BAKIŞ**
A Different View for the Spoil Slope Instability Analysis

MADENCILIK dergisi yazı dizini ve özetlerinin yer aldığı veri tabanları / INDEXED in IMM Abstracts, GeoRef, Aluminium Industry Abstracts, Cambridge Scientific Abstracts, PASCAL, Chemical Abstracts, ENCOMPLIT, ENCOMPLİT2, ENERGY, Compendex

Abone Koşulları:

Yıllık abone bedeli 100,00 TL'dir.

Subscription

Annual subscription rate is 100,00 TL. All subscription inquiries should be made to the correspondence address.

Banka Hesap No:

Türkiye İş Bankası Meşrutiyet Şubesi: 8120

T.C. Ziraat Bankası Kızılay Şb. 39009031-5001

Posta Çeki Hesap No: 86665

ISSN: 0024-9416

X-IŞINI SEDİMANTASYONU VE LAZER IŞIĞI KIRINIMI METODLARIYLA TANE İRİLİĞİ ANALİZİ: GENEL İLKELER VE FARKLI KARAKTERDEKİ İKİ KİL NUMUNESİYLE ELDE EDİLEN SONUÇLARININ TARTIŞILMASI

Particle Size Analysis with X-ray Sedimentation and Laser Light Diffraction Methods: General Discussion of Results Obtained From Two Clay Samples Having Different Characteristics

Geliş (received) 30 Haziran (June) 2009; Kabul (accepted) 01 Eylül (September) 2009

Haluk ÇELİK(*)

ÖZET

Temel fiziksel özelliklerden biri olan tane büyüklüğü dağılımının tam olarak belirlenmesi birçok endüstri için zorunlu hale gelmiştir. Eleme, sedimentasyon; ışık, lazer ışığı, X-ışınları ile etkileşim vb. gibi çeşitli teknikler tane boyutunun belirlenmesinde uygulanmaktadır. Bu çalışmada, killerin tane boyutu dağılımlarının belirlenmesinde sıkça kullanılan X-ışını sedimentasyonu ve lazer ışığı kırınımı yöntemlerinin genel prensipleri ve önemli hususları ele alınmıştır. Sonrasında, ayrı özelliklere sahip iki kil numunesinin bu iki yöntemle saptanan tane boyutu dağılımları sonuçları tartışmaya açılmıştır. Çalışmada lazer ışığı kırınımı yöntemine göre X-ışını sedimentasyonu yöntemiyle kil fraksiyonundaki (<2 µm) malzeme miktarı, Afyon kilinde %15,2, İstanbul kilinde ise %57,2 oranında fazla hesaplandığı belirlenmiştir. Yapılan istatistiki değerlendirmeler her iki yöntemin tekrarlanabilir sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu iki yöntem ile belirlenen oldukça farklı tane iriliği dağılımının sonuca olan etkisi, killerin granülometriksınıflandırmasının yapıldığı Winckler's diyagramındaki konumlarının değerlendirilmesiyle açıkça gösterilmiştir.

Anahtar sözcükler: Tane Boyutu Analizi, X-ışını Sedimentasyonu, Lazer Işığı Kırınımı

ABSTRACT

Accurately determining particle size distribution has become essential in many industries, as it is a one of the fundamental physical characteristics. The various techniques employed in particle size determination include sieving, sedimentation, interaction with light, laser light, X-rays, etc. In this study, general principles and important subjects of X-ray sedimentation and laser light diffraction methods for determination of particle size distribution of clays are considered. Then, results of particle size distribution of two different clays samples obtained with these two methods are discussed. In this study, it was found out that the amount of material in clay fraction (<2 µm) determined by X-ray sedimentation method was overestimated by 15.2% for Afyon clay, and 57.2% for İstanbul clay when compared with the results of laser light diffraction method. The statistical assessments pointed out that both methods gave repeatable results. The effects of particle size distribution determined from these methods on results were demonstrated clearly by means of the evaluation of the granulometric classification of the studied clays according to the position on Winckler's diagram.

Keywords: Particle Size Analysis, X-ray Sedimentation, Laser Light Diffraction

(*) Yard.Doç.Dr., Uşak Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fak., Seramik Böl., Bir Eylül Kampüsü, UŞAK, haluk.celik@usak.edu.tr

1. GİRİŞ

Başta madencilik, seramik, çimento, kimya, gıda vb. sanayi kollarında olmak üzere birçok sektör için ham maddelerin, nihai ürünün veya prosesin belirli aşamalarında oluşan ürünlerin tane boyutunun ve tane boyut dağılımının tespiti önem arz etmektedir. Proseslerde kullanılan malzemelerin tane boyut dağılımının yeterli kontrolünün yapılmaması veya uygun olmayan boyut analiz yönteminin kullanımı ile ortaya çıkan yanıltıcı veriler, nihai ürün kalitesini olumsuz etkilediği gibi, yüksek atık oluşumu ve ekonomik kayıplar vb. gibi olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir.

Günümüzde tane boyut dağılımının belirlenmesinde 400 farklı yöntemin olduğu bilinmektedir (Ryzak vd, 2007). Tane boyutu hesabında kullanılan yöntemler; doğrudan ölçüm metotları (cetvel, mikroskop gibi), eleme, elütrasyon yöntemleri, sedimentasyon (yerçekimi etkisinde, santrifüj kuvveti etkisinde), radyasyon ile etkileşim (ışık, lazer ışığı, x-ışınları, nötronlar), elektriksel direnç özelliği, optik özellikler, gaz adsorpsiyonu ve geçirgenlik olmak üzere gruplara ayrılabilir (Loveland ve Whalley, 2001). Malzemelerin farklı karakteristik özelliklerine bağlı olarak farklı tane boyutu ölçüm tekniklerinin kullanıldığı cihazlar ve bu cihazların ölçüm prensipleri literatürde ayrıntılı bir şekilde anlatılmaktadır (Saklar vd, 2000; Jillavenkatesa vd, 2001; Loveland ve Whalley, 2001; Alien, 1997; Syvitski, 2007; Bunville, 1984). Yöntemler aynı malzemenin farklı özelliklerine bağlı olarak ölçüm gerçekleştirildiğinden, herhangi bir metodun doğru sonucu gösterdiğini söylemek tartışılabilir (Goossens, 2008). Tane boyut dağılımı sonuçlarındaki farklılıklardan dolayı, literatürde farklı ölçüm teknikleri kullanılarak (Andreasen pipeti, hidrometre, lazer ışığı kırınımı, elektriksel direnç, optik metotlar, yaş eleme gibi) çeşitli malzemelerin boyut dağılımlarının belirlendiği ve karşılaştırılmasının yapıldığı çalışmalar bulunurken (Orhan vd, 2004; Eshel vd, 2004; Cramp vd, 1997; Ryzak vd, 2007; Konert ve Vandenberghe, 1997; Dalkey ve Leecaster, 2009; Surman vd, 2001; Goossens, 2008; Knosche vd, 1997; Lehmann vd, 2004), lazer ışığı kırınımı ve X-ışını sedimentasyon yönteminin karşılaştırıldığı çalışma sayısı sınırlıdır (McCave vd, 2006; Goossens, 2008; Bianchi vd, 1991). Pabst ve diğ. (2007), çalışmalarının bir bölümünde 3 tabakalı bir kil minerali olan

pirofillitin tane iriliği ve şekil karakterizasyonunu araştırmışlar, lazer ışığı yöntemi ile belirlenen d_{50} değerinin (5.76- μm) sedimentasyon yöntemine (4.27- μm) göre daha iri olduğunu saptamışlardır. Amerika Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsünce (NIST) yayımlanan tane boyutu karakterizasyonu ile ilgili el kitabında; eleme, sedimentasyon, mikroskop ve lazer ışığı kırınımı metotları karşılaştırılmış, her bir yöntemin eşsiz bazı üstünlükleri, sınırlamaları ve hata kaynakları olduğu vurgulanmıştır (Jillavenkatesa, 2001).

Bütün tane boyutlandırma tekniklerinin hedefi üç boyutlu tanelerin boyutlarını tek bir rakam ile ifade etmektir. En uygun analiz yönteminin seçilmesi tane boyutunun tam olarak belirlenmesinin anahtarı durumundadır. Bilindiği üzere tanelerin çoğunun şekli; küre, küp vb. gibi çapları veya belirli boyutlarının bilinmesi ile büyüklükleri hakkında tam olarak fikir sahibi olunan düzenli geometrik şekillere sahip değildir. Bu tanelerin büyüklükleri için; belirli bir ortamda aynı davranışı (ışığı kırma açısı benzerliği, terminal çökme hızı benzerliği gibi) gösteren aynı malzemenin küre olan tanesinin çapı anlamına gelen "eş küre çapı" tanımı yapılmaktadır.

Eleme tane boyutunun belirlenmesinde kullanılan en eski yöntemlerden biridir ve günümüzde de oldukça geniş bir aralıkta (125 mm-20 μm) kullanılmaktadır (Jillavenkatesa, 2001). Eleme yönteminin üstünlüğü; uygulamasının basit oluşuna, ucuz olmasına, sonuçlarının güvenilirliğinin yüksek oluşuna ve uygulanmasında diğer yöntemlere göre teknik uzmanlık gerektirmemesine dayanmaktadır (Jillavenkatesa, 2001; Alien, 1997; Syvitski, 2007). Tane boyu analizinde esas problem standart laboratuvar elekleri ile inilemeyecek boyutların analizinin, mevcut yöntemlerden hangisi ile yapılacağıdır. Mevcut yöntemler kendi içerisinde tekrarlanabilir sonuçlar vermesine rağmen, birbirleri arasında farklılıklar olmaktadır. Ayrıca, farklı yöntemlerin kullandığı fiziksel temelden kaynaklanan avantaj ve dezavantajlar da bulunmaktadır (Saklar vd, 2000).

Tane boyut analizinde kullanılacak olan yöntemin seçiminden önce, cihazda ölçümün bağlı olduğu modelin, yani cihazın tanelerin hangi karakteristik özelliğini ölçtüğünün ve bu ölçümün tane boyu ile nasıl bir ilişkisi olduğunun tam olarak anlaşılması gerekmektedir (Webb, 2004a; Webb, 2004b).

Bu çalışmada; öncelikle ince boyut dağılımlarının analizinde kullanılan lazer ışığı kırınımı ve X-ışını sedimantasyonu yöntemlerinin kısa teorilerinin ve uygulamalarının tanıtımı yapılmıştır. Sonrasında karakteristik özellikleri farklı olan iki kil numunesinin tane boyut dağılımları iki farklı ölçüm prensibine dayalı iki farklı cihaz ile ölçülmüş, sonuçların değerlendirilmesi yapılmış, istatistiksel değişkenlikler araştırılmış ve konunun tartışmaya açılması amaçlanmıştır.

2. ÇALIŞMADA KULLANILAN TANE BOYUT ANALİZİ YÖNTEMLERİNİN TANITIMI VE UYGULAMALARI

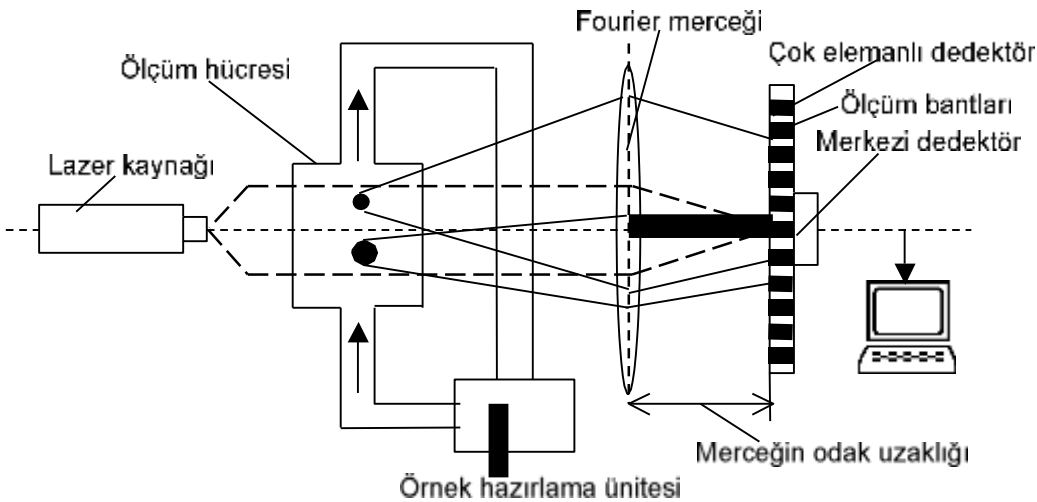
2.1 Lazer Işığı Kırınımı

Lazer kırınım tekniği; lazer ışınları içersinden geçirilen tanelerin boyutlarına bağlı olarak belirli bir açıda ışınları saçmaları prensibine dayalıdır. Tane boyu düştükçe kırınım açısı logaritmik olarak yükselmektedir. Tespit edilen kırınımın şiddeti de tane boyutuna bağlıdır ve büyük taneler lazer ışınlarını yüksek şiddette saçmaktadır (Anon (b), 2009). Tipik bir lazer kırınım aygıtı Şekil 1.'de görüldüğü üzere;

- a- sabit dalga boyunda şiddetli, duraylı ve paralel ışın üreten bir lazerden,
- b- ölçümü yapılacak numuneyi lazer ışınları içersinden homojen bir akım ile geçiren numune hazırlama ünitesinden,
- c- numunelerden farklı açılarda saçılan ışınları ölçen bir seri dedektörden oluşmaktadır.

Tane büyüklüğü belirlenecek olan malzeme, içersinde su ve topakların dağıtılması amacıyla dispersant (genellikle kalgon (sodyum hegzametafosfat)) bulunan örnek hazırlama ünitesine beslenir. Cihazda ultrasonik enerji uygulaması ile de topaklanmalar önlenmeye çalışılır. Cihaza bağlı bilgisayar ekranından kararına (obscuration) miktarı izlenerek %15-30 arasında olacak şekilde numune ilave edilir. Mekanik karıştırıcı ile homojenize edilen süspansiyon, pompa aracılığı ile lazer ışınlarının önünde bulunan özel bir hücreye pompalanır. Taneler bu hücre içersinden defalarca devridaim yaptırılarak lazer ışınlarına maruz bırakılır. Bu sırada, tanelerden kırılarak yansıyan ışınlar Fourier merceği ve dedektörler ile toplanarak sürekli olarak değerlendirmeye tabii tutulur.

Taneler tarafından kırılan ışınlar dedektörler üzerinde hangi ölçüm bandının üzerine düştüğü eş zamanlı olarak çalışan bilgisayar tarafından değerlendirilerek, kırılma açısından tane büyüklüğü ve bantların üzerine düşen ışın yoğunluğundan ise hacimce tane yüzdeleri hesaplanır. Lazer kırınım yönteminin en önemli özelliklerinden birisi, tane büyüklüğü dağılımını tanelerin hacmini esas alarak hesaplamasıdır. Dolayısıyla, ölçümü yapılan tanelerin özgül kütlelerine ve ağırlığına ihtiyaç duyulmamaktadır. Killerin genellikle farklı minerallerden oluştuğu ve laboratuarda yapılan özgül ağırlık deneyinde malzemenin tümü için sadece tek bir değer tespit edildiği düşünülürse, bu durumdan kaynaklanabilecek hatanın lazer yöntemine avantaj sağlayacağı söylenebilir. Bu



Şekil 1. Lazer kırınım cihazının genel şeması (Özer ve Orhan 2007).

açıdan yöntem, tanelerin ağırlığını esas alan pipet, hidrometre, X-ışınları sedimantasyonu yöntemlerine göre farklılık göstermektedir.

Bu cihazlarda He-Ne lazeri ($A=0.63\mu\text{m}$) en iyi duraylılığı verdiği için tercih edilmektedir (Rawle, 1993). Lazer kırınımı tekniğinde, ölçümü yapılan tane ile eş kırma modeli gösteren küresel bir tanenin çapı belirlenmekte ve belirlenen çap ölçümü yapılan tanenin çapı olarak kabul edilmektedir. Lazer yönteminde eş ışın kırma özelliği gösteren farklı boyutlardaki tanelerden eş hacimli olanları gruplandırılır. Belirli bir boyuttaki tanelerin hacimsel olarak yüzde değerleri belirlenir. Eğer tane yoğunluğu bütün taneler için aynı ise hacim verilerinden kütleli dağılım oranları hesaplanır (Anon (b), 2009).

Lazer cihazlarında farklı sayıda dedektör kullanılarak farklı ölçüm aralıklarında analiz yapılabilmektedir. Örneğin Fritsch A22 cihazında 31 dedektörle $0.16-1250\mu\text{m}$ aralığında, Malvern Master Sizer E cihazı 32 dedektörle $0.1-600\mu\text{m}$ aralığında, CoulterLS 100 cihazı ile 72 dedektörle $0.4-900\mu\text{m}$ aralığında, Coulter LS 230 cihazı ile 116 dedektör ve aşırı ince tanelerin ölçümü için ilave 6 polarize ışın dedektörü ile $0.04-2000\mu\text{m}$ aralığında ölçüm yapılabilmektedir (Burman vd, 2001).

Lazer kırınımı yönteminde tane boyut dağılımı, numunenin kırınım modelinin matematiksel bağıntılar kullanarak uygun bir optik model ile karşılaştırılmasıyla hesaplanmaktadır. Geleneksel olarak Fraunhofer Yaklaşımı ve Mie Teorisi olmak üzere iki farklı model kullanılmaktadır (Anon (b), 2009). Bu iki modelin teorisi ve karşılaştırılması kaynaklarda detaylı bir şekilde yapılmış olup (Özer ve Orhan, 2007; Saklar vd, 2000; Anon (a), 2009; Jilavenkatesa vd, 2001; Alien, 1997; Syvitski, 2007; Boer vd, 1987), bu çalışmada bunun üzerinde durulmamıştır. Konert ve Vandenberghe (1997) kırınım modelinin tane boyutu dağılımına dönüşümünde Fraunhofer Teorisinin kullanımının küresel olmayan kil taneleri için uygun olduğunu ve bu iki teorinin hesaplama şeklini karşılaştırdıklarında, çok ince boyutlardaki malzeme miktarının Mie Teorisi kullanıldığında diğerine göre daha az oranlarda hesaplandığını belirtmektedirler. Diğer yandan Fraunhofer Teorisinin kil boyutundaki ($<2\mu\text{m}$) fraksiyonun hesaplanmasında yeterli doğru sonuçları vermediği belirtilmektedir (Eshel vd, 2004; Boer vd, 1987).

Çeşitli yazarlar lazer kırınımı yönteminin kil tanelerinin miktarını, pipet yöntemi ile hesaplanan miktara göre %20-70 oranında daha düşük gösterdiğini belirtmektedirler (Loizeau vd, 1994; McCave vd, 1986).

Bir tanecikten kırılan ışın, merceğe ulaşmadan başka bir tane veya taneler ile karşılaşarak tekrar kırınımına uğrayabilir. Tane boyu dağılımının hesabında hataya sebep olan bu olaya çoklu kırınım denir. Lazer kırınım cihazlarında karşılaşılan bu sorunun aşılabilmesi için, deney sırasında hacimsel numune derişiminin minimum bir değerde tutulması gerekir (Saklar vd, 2000). Merkezi dedektör ile Lambert-Beer yasası kullanılarak (Saklar vd, 2000) numunenin hacimsel derişimi deney süresince sürekli kontrol edilir. Bu yöntemle çoklu kırınımın önüne geçilemeye de (Nascimento vd, 1997), belli bir oranda tutulması sağlanmaktadır (Rawle, 1993).

2.2 X-Işını Sedimantasyonu

Sedimantasyon yöntemleri, genel olarak katı tanelerin sıvı veya gaz bir ortam içerisinde yerçekimi kuvvetinin etkisiyle çökelmeleri esasına dayanır. Akışkan bir ortam içerisinde bulunan hafif veya küçük boyutlu taneler, kendilerinden daha iri veya daha ağır olan tanelere göre daha yavaş çöker. Dolayısıyla, tanelerin akışkan ortam içerisindeki çökme hızları bunların irilikleri hakkında bilgi verir (Saklar vd, 2000). Sedimantasyon analizinin temelini oluşturan bu düşünce 1850'li yıllarda George Gabriel Stokes tarafından ortaya atılarak incelenmiş ve tane çapları ile çökme hızları arasında bir ilişki olduğu matematiksel olarak ifade edilmiştir (Webb, 2004b). Bazı kabullerin yapılması ile ortaya atılan bu ifadeye literatürde Stokes Kanunu adı verilmekte olup, kanun sadece tek bir kürenin su içinde çökmesini inceleyip bunu geneliyor (Orhan vd, 2004). Sedimantasyon yöntemlerinde, çökme hızı ve tane çapını ilişkilendiren Stokes Eşitliği (Eşitlik 1) kullanılarak, tanelerin çökme hızlarından tane boyu hesap edilir. Stokes Yasasına göre, küresel bir tanenin sıcaklığı sabit olan bir sıvı içerisindeki terminal çökme hızı, tanenin çapının karesi ile doğru orantılıdır. Küresel olmayan taneler için, aynı malzemenin aynı hızda çöken küresel bir tanesinin çapı (eş küre çapı) ölçülmektedir.

$$V_t = \frac{d^2 \cdot g \cdot (\rho_t - \rho_o)}{18\mu} \quad (1)$$

v_t = çökme hızı, m/s

d = tane çapı, m

g = yerçekimi ivmesi, m/s²

ρ_t = tane yoğunluğu, kg/m³

ρ_o = ortamın yoğunluğu, kg/m³

μ = ortamın viskozitesi, kg.m/s²

Ancak, bu eşitlik küresel taneler ve serbest çökmenin oluşabileceği ideal koşullar için geçerlidir. Stokes Kanunu, tanelerin ortamda çökmesi esnasında taneler etrafında laminar akım koşulunun sağlanması durumunda uygulanmaktadır. Bu koşul, ortamdaki en iri tanenin Reynolds sayısının <0.3 olması durumunda sağlanmaktadır. Daha küçük taneler daha düşük Reynolds sayısına sahip olmaktadır (Webb, 2004b). Stokes Eşitliğinde, yerçekimi kuvveti ile düşmekte olan taneye, sıvının uyguladığı sürüklenme direnci ve kaldırma kuvveti olmak üzere hareketin aksi yönünde 2 kuvvetin taneye etki ettiği kabul edilir. Ayrıca, bu kuvvetlerin haricinde tane üzerine etki edebilecek diğer kuvvetler de söz konusu olabilir (taneler arası itme-çekme kuvvetleri, Van der Waals kuvvetleri, Brownian hareketi vb.). Dolayısıyla, Stokes Eşitliğinden bulunan çap tanenin yaklaşık çapıdır. Buna Stokes Çapı veya Çökme Çapı da denir. Sedimentasyon yöntemleri içerisinde kullanımı en yaygın olanları dekantasyon, Andreasen pipeti, fotosedimentasyon ve X-ışını sedimentasyonu olarak sınıflandırılabilir (Saklar vd, 2000).

Yukarıda kısaca açıklanan Stokes Yasası ve sedimentasyon analizi ile tanelerin boyut dağılımının belirlenmesinde bazı kabuller yapılmaktadır (Orhan vd, 2004; Loveland ve Whalley, 2001). Bu kabuller ve sağlanması gereken kıstaslar şunlardır;

1. Diğer tane boyut analizi yöntemlerinde olduğu gibi tanelerin şekli küre olarak kabul edilir,
2. Sıvı ve taneler arasında etkileşim olmamalıdır,
3. Ölçümü yapılan malzemedeki bütün tanelerinin özgül ağırlığının aynı olduğunu kabul edilir,
4. Malzeme içerisinde kümeleşmiş halde bulunan tanelerin birbirinden tamamen ayrılmış olduğu kabul edilir,
5. Çökme sırasında tanelerin birbirinden etkilenmediği ve birbirlerinden bağımsız olarak çöktüğü, ayrıca tanelerin çökmesi sırasında

süspansiyonda meydana gelen hareketlerin "laminar akım" şartlarında olduğunu kabul edilir, 6. Tanelerin sıvı içinde çöktüğü kolonun çapı tanelerin çapından yeterince büyük olması gerekir,

7. Taneler terminal çökme hızlarına ulaşmış olmalıdır.

Sedimentasyona dayalı yöntemlerin, özellikle <2µm tane boyutları için uzun zaman alması ve özellikle <1µm boyutları için sonuçların Brownian hareketlerinden dolayı güvenilir olmaması (Loveland ve Whalley, 2001) gibi dezavantajları bulunmaktadır. Sedimentasyona dayalı tekniklerde tane şekli etkilidir. Küresel olmayan tanelerin en kararlı çökme pozisyonları, tanenin en büyük enine kesit alanının çökme doğrultusuna dik olduğu pozisyonudur. Bu durum tanenin çökmesine engel olan kuvvetlerin yükselmesine ve buna bağlı olarak çökme hızının düşmesine neden olmaktadır. Böylece ince tane fraksiyonu fazla hesap edilmektedir. Stokes Eşitliğinde ölçümü yapılan malzemenin yoğunluk değeri olarak tek bir değer kullanılmaktadır. Ancak, iyi bilinmektedir ki malzemeyi oluşturan farklı minerallerin yoğunlukları farklı olmaktadır ve bu durum sedimentasyona dayalı teknikler ile hatalı sonuçların alınmasına neden olabilmektedir (Eshel vd, 2004).

Genel bir kural olarak, tanenin çökme yönündeki yüzey alanı yükselirse, sedimentasyon yöntemiyle lazer yöntemine göre daha ince tane oranları elde edilmektedir. Özellikle mika ve kaolinit gibi tabakalı tanelerin ölçümünde bu durum oldukça açık bir şekilde görülmektedir. Gözenekli taneler düşük yoğunluklarından ötürü aynı hacimdeki gözeneksiz tanelere göre daha yavaş çökecektir. Lazer yöntemi daima tane hacmine bağlı bir boyut verdiğinden bu olumsuzluk görülmemektedir. Gözenekli taneler için sedimentasyon yöntemi ile belirlenen tane büyüklüğü daha ince olmaktadır (Anon (b), 2009).

1960'lı yılların ortalarında Oliver ve Hickin (Freeport Kaolin Laboratory) tane boyutunun hesabı için sedimentasyon yöntemi ile süspansiyondan çöken tanelerin kütesel konsantrasyonlarındaki zamana bağlı değişimi belirleyen X-ışınları absorpsiyonu tekniklerini birleştirerek bir cihaz üretmişlerdir. Bu yöntem Micromeritics Instrument şirketince elde edilerek, 1967'de ilk cihaz satışa sunulmuştur (Webb,

2004b). Yerçekimi kuveti etkisinde çökme prensibine dayalı tane boyut dağılımı ölçümünde en yaygın kullanılan cihaz Micromeritics firmasının ürettiği SediGraph serisi cihazıdır (Bunville, 1984). Bu cihazlarda sedimantasyon hücresinin alttan üste taranması ile hızlı çökelen tanelerin ölçümü yapılırken, aynı zamanda çok yavaş çöken taneler için gerekli olan ölçüm zamanı da kısaltılmaktadır (Anon (b), 2009).

SediGraph metodu yerçekimi kuvetine bağlı çökme ve düşük enerjili X-ışınları absorpsiyonu olmak üzere iki iyi bilinen ve anlaşılabilir fiziksel olgu temeline bağlıdır (Webb, 2004a). Süspansiyon haldeki tanelerin çökme hızları; zamana bağlı olarak elde edilen çöken malzemenin miktarının belirlenmesi veya zamana bağlı olarak süspansiyonda kalan tanelerin konsantrasyonlarının ölçülmesi gibi iki farklı şekilde belirlenmektedir. Sonraki yaklaşım matematiksel olarak tercih edilmekte ve Micromeritics firmasınınca cihazlarda uygulanmaktadır (Webb, 2009). Düşük enerjili X-ışınlarının geçirim miktarı süspansiyondaki katı konsantrasyonuna bağlıdır ve Beer-Lambert-Bouguer yasası ile her bir tane sınıfı için kütleli konsantrasyon miktarı hesaplanmaktadır (Anon (b), 2009). Uzun çökme zamanına önlem olarak, numuneleri içeren hazne, X-ışınlarına göreceli olarak aşağı yönde hareket etmektedir (Webb, 2009).

SediGraph yönteminde numune haznesine gönderilen X-ışınları ile sıvı ortam içinde bulunan tanelerin kütle konsantrasyonu ölçülür. Numune cihaza verilmeden önce numune haznesinde bulunan sıvının boş halde şiddeti (intensity) ölçülür (Imax). Cihazda sıvının sirkülasyonu devam ederken, numune cihazın haznesine eklenir ve homojen bir süspansiyon elde edilene kadar karıştırılır. X-ışınları katı numune tanecikleri tarafından absorbe edileceğinden, haznedeki geçiren X-ışınları şiddetinde boş ölçüme göre azalma gerçekleşir. Cihazda dolaştırılan süspansiyon homojen olduğundan, verilen X-ışınları şiddeti sabit bir değere ulaşır (Imin). Daha sonra karışımın akışı durdurularak homojen süspansiyon çökmeye başlar. Bu arada haznedeki geçiren X-ışınları şiddeti ölçülür. Sedimantasyon işlemi süresince, ilk olarak en iri taneler ölçüm zonunun altına çöker ve her kütle ölçümü artı kalan ince tanelerin kümülatif kütle fraksiyonunu verir. Sonrasında dereceli olarak ince ve daha ince taneler çökmekte, bütün taneler

bu zonun altına geçerken en sonunda ölçüm zonunda temiz sıvı kalmaktadır. Bu nedenle, ortama verilen X-ışınları şiddeti Imin'dan Imax'a ulaşır. Bu iki uç değer arasında geçirilen şiddet (I) bağıntısıyla ifade edilmektedir (Webb, 2004a). Mt ölçüm zonundaki tanelerin t zamanındaki

$$I_t = I_{max} \cdot 10^{-kM_t} \quad (2)$$

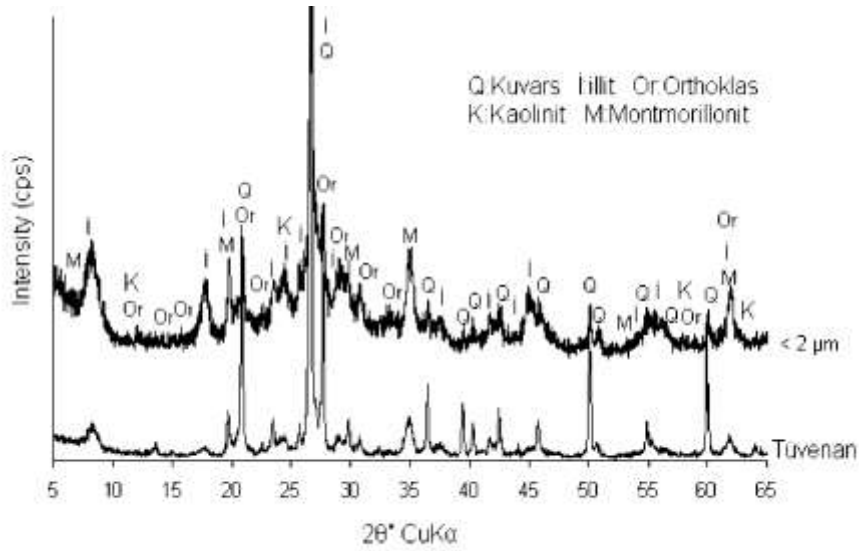
kütle fraksiyonu, k ise X-ışınları absorpsiyonunu etkileyen diğer değişkenleri birleşik olarak ifade etmektedir. Eşitlikten görüldüğü üzere, ölçüm zonundaki tanecik kütle fraksiyonu sıfıra eşit olduğunda I, Imax'a eşit olmaktadır. Akış kesildikten sonraki diğer bütün "1" değerleri cihaz tarafından otomatik olarak okunmaktadır (Webb, 2004a). Sıvı ve tane yoğunluğu, sıvının viskozitesi cihaz tarafından ölçüldüğünden, Stokes Kanunu uyarınca tanelerin çökme hızları ve buradan da tane boyu hesaplanmaktadır. Numune haznesinin en üst kısmı ve kütle ölçümünün yapıldığı zon arasındaki mesafe (l) ve geçen zaman (t) cihaz tarafından hesaplanarak çökme hızı (v=l/t) belirlenmektedir. Çökme hızı her bir kütle ölçümü için yapılmaktadır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

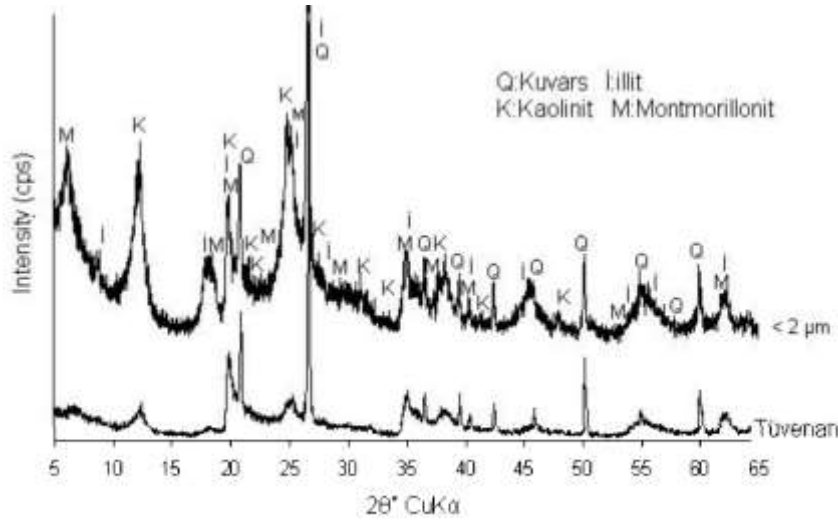
3.1 Malzeme

Araştırma kapsamında iscehisar-Afyon Bölgesi ve Şişli-İstanbul Bölgesi olmak üzere iki bölgeye ait kil numuneleri kullanılmıştır. Numunelerin mineralojik bileşimi Rigaku marka Rint-2200 model X-Ray Difraktometre (XRD) cihazı ile (Cu-Ka, 28 5-70°, 2°/dk) belirlenmiş olup, sonuçlar Şekil 2. ve 3.'de verilmiştir. Tüvenan kil numuneleri için yapılan XRD çekimleri sonucunda kuvars fazının çok baskın olması, kil minerallerinin net olarak pik vermemesine neden olmuştur. Malzeme su içinde tamamen açılana kadar karıştırılmış, daha sonra numunelerin iri fraksiyonlarının çökmesi için bekletilmiştir. Kilin su içinde süspansiyon halinde kalan ve çökmeyen kil fraksiyonu olarak tanımlanan -2 µm'luk kısım vakumlama ile alınmış ve santrifüjleme işlemi ile sudan ayrılmıştır. Santrifüjle ayrılan katı kısım etüvde 80 °C'de kurulduktan sonra XRD çekimi yapılmıştır.

Şekil 2.'den görüldüğü üzere Afyon kili mineralojik olarak illit, montmorillonit ve kaolinit kil mineralleri



Şekil 2.1. Afyon kili için XRD grafiği.



Şekil 3. İstanbul kili için XRD grafiği.

ile kuvars (SiO_2) ve orthoklas ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) içermektedir. İstanbul-Şile kili ise kaolinit, illit, montmorillonit ve kuvars (SiO_2) minerallerinden oluşmaktadır (Şekil 3).

Spectro IQ marka X-Ray Floresans (XRF) cihazı ile tespit edilen kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1.'de verilmiştir.

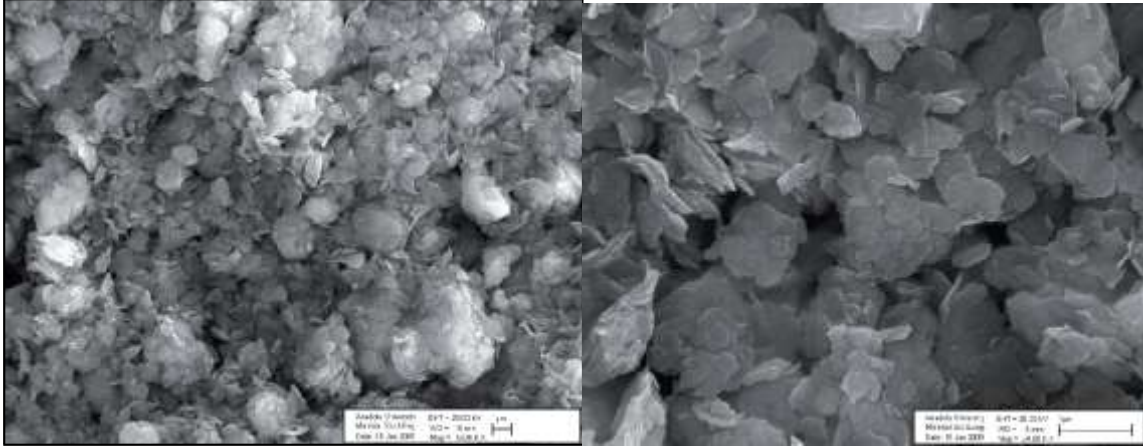
Azotun adsorpsiyon gazı olarak kullanıldığı ve numunelerin $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de bir saat ışıltı ile maruz bırakıldığı üç noktalı BET yüzey alanı analizi (Quantachrome Autosorb-1C cihazı ile) sonucunda, Afyon kilinin yüzey alanı $38,52 \text{ m}^2/\text{gr}$, İstanbul kilinin yüzey alanı ise $39,10 \text{ m}^2/\text{gr}$ olarak

tespit edilmiştir. Helyum piknometresi ile ölçülen kütle yoğunluğu değerleri Afyon kili için $2,68 \text{ gr}/\text{cm}^3$, İstanbul kili için $2,63 \text{ gr}/\text{cm}^3$ şeklindedir.

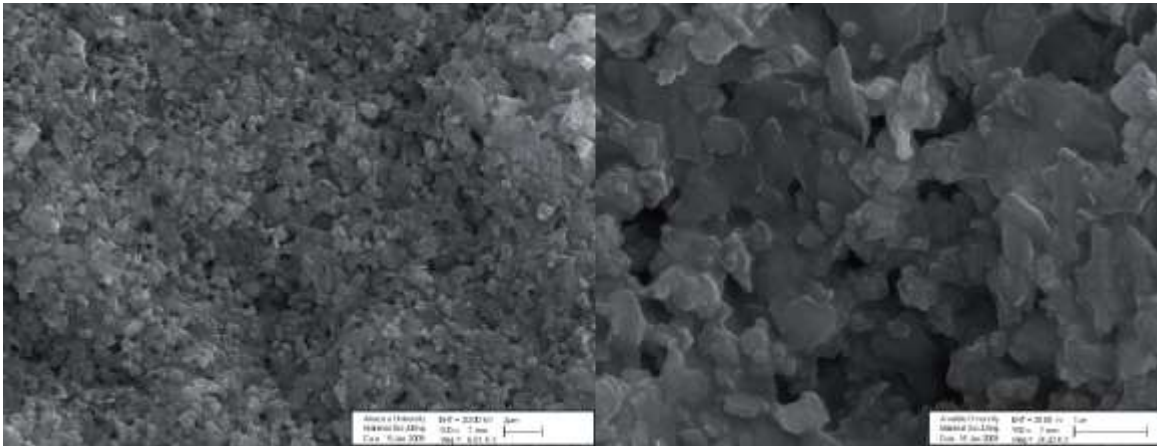
CamScan Marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile tüvenan numunelerin $6000\times$ ve $24000\times$ büyütme görüntüleri İstanbul kili için Şekil 4.'de, Afyon kili için Şekil 5.'de gösterilmiştir. Özellikle İstanbul kiline ait görüntülerden, kil minerallerinin disk, yaprak şeklindeki tane yapıları ağırlıklı olarak açıkça görülmektedir. Afyon kilinde ise XRD sonuçları ile uyumlu olarak, daha fazla kuvars ve feldspat mineralleri içeriğine bağlı olarak disk şeklindeki kil mineralleri fazı daha az oranda görülmektedir.

Çizelge 1. Kil Numunelerinin Kimyasal Analizleri

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	K.K	%
Afyon	77,66	13,76	1,04	0,06	0,17	0,17	0,10	4,01	0,23		2,80	100,00
İstanbul	55,85	26,46	3,23	1,21	0,34	0,58	0,11	2,00	0,22	0,12	10,00	100,00



Şekil 4. İstanbul kilinin 6000x ve 24000x büyütme SEM görüntüsü.



Şekil 5. Afyon kilinin 6000x ve 24000x büyütme SEM görüntüsü.

3.2 Tane İriliği Analizi

Numunelerin yaş elek analizi ile belirlenen fraksiyonel boyut dağılımları Çizelge 2. ve Şekil 6.'da verilmiştir. Görüldüğü üzere İstanbul kili, Afyon kiline göre daha ince bir dağılıma sahiptir. 38µm altındaki malzeme miktarı İstanbul kilinde yaklaşık %87 iken, Afyon kilinde %42 civarındadır.

Killerin tane boyut dağılımının tespitinde iki farklı cihaz ve yöntem kullanılmıştır.

• Lazer ışığı kırınımı yöntemi-Malvern Hydro 2000G Mastersizer ile (ölçüm aralığı:0,2-

2000µm) ve

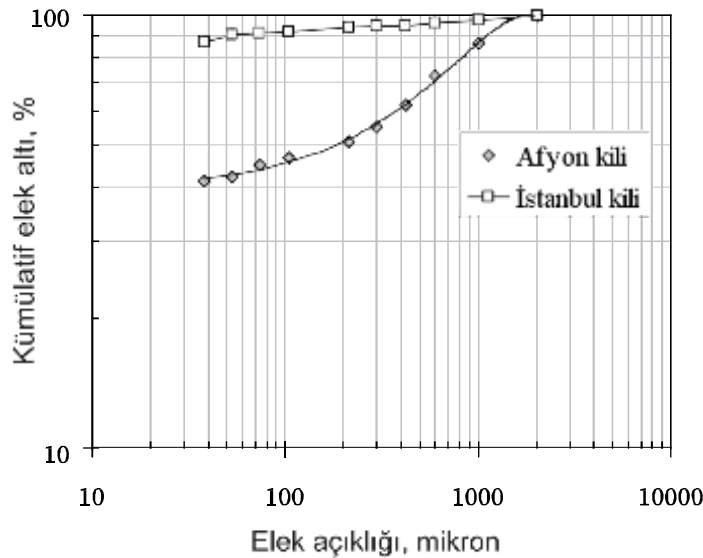
• X-ışını sedimantasyonu yöntemi-Micromeritics SediGraph 5120 ile (ölçüm aralığı:0.1-300µm).

Lazer ışığı kırınımı yönteminde numuneler önce 2mm kontrol eleğinde elenmiş olup, her iki numunenin tamamı 2 mm'nin altındadır. Suda bir gün açılması için bekletilen numuneler mekanik karıştırıcıda 15 dakika süreyle karıştırılmıştır. 2 dakika ultrasonik işlem sonrasında cihazda ölçüm gerçekleştirilmiştir. Cihazda ölçüm sırasında saptanan bazı değerler Çizelge 3.'de verilmiştir.

X-ışını sedimentasyonu yönteminde numuneler önce 125 µm'lik elekte elenerek iri kısımlar ayrılmıştır (elek üstü oranı: Afyon kili %51,10, İstanbul kili:% 7,20). İri kısmın tane boyut dağılımı sulu elek analizi ile belirlenmiştir. 125µm elek altı fraksiyonunun tane boyut ölçümünde, numuneler önce %0,5 kalgon (sodyum hegzametafosfat) içeren suda bir gün bekletilmiş, bu numuneden alınan örnek 50 ml kalgonlu su içerisinde mekanik karıştırıcı ile yarım saat karıştırılmış, sonrasında 2 dakika ultrasonik işleme tutulduktan sonra cihazda ölçüme geçilmiştir. Çizelge 4.'de numunelerin tane iriliklerinin hesaplanmasında kullanılan ve cihaz tarafından tespit edilen değerler verilmiştir.

Çizelge 2. Elek Analizi sonuçları

µm	Afyon kili		İstanbul kili	
	%	%ΣE.A	%	%ΣE.A
2000+1000	14,00	100,00	2,22	100,00
1000+600	13,21	86,00	1,56	97,78
600+425	10,48	72,79	1,43	96,22
425+300		7,01	62,31	0
		,21	94,79	
300+212		4,10	55,30	0
		,58	94,58	
212+104	3,97	51,20	1,90	94,00
104+74	2,02	47,23	0,76	92,10
74+53	2,43	45,21	0,89	91,34
53+38	1,18	42,78	3,33	90,45
38+0	41,60	41,60	87,12	87,12
Toplam	100,00		100,00	



Şekil 6. Numunelerin elek analizi sonuçlarının kümülatif elek altı eğrileri.

Çizelge 3. Lazer cihazında saptanan Değerler

	İstanbul kili	Afyon kili
Numunenin ışın kırma indeksi	1,555	1,555
Suyun ışın kırma indeksi	1,330	1,330
% Katı konsantrasyonu	0,084	0,0157
% Kararma oranı	17,09	16,27

Çizelge 4. X ışını sedimentasyonu cihazında saptanan değerler

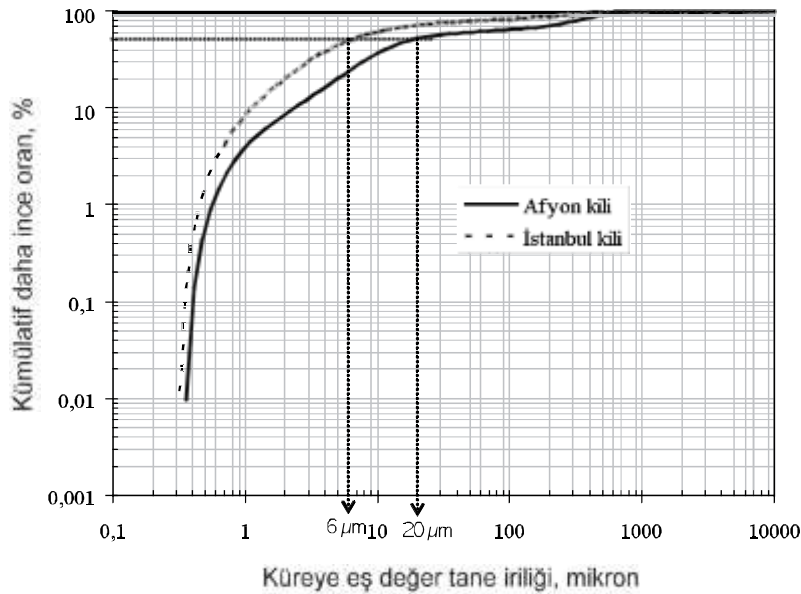
	İstanbul kili	Afyon kili
Sıvı viskozitesi, mPa.s	0,7230	0,7227
Sıvı yoğunluğu, gr/cm ³	0,9941	0,9941
Katı yoğunluğu, gr/cm ³	2,6	2,6
Analiz sıcaklığı, C ^o	35	35
Reynolds sayısı	0,29	0,29

Her iki yöntemde de tane boyut dağılımı oranları, on ölçümün sonucunun ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Şekil 7.'de numunelerin lazer ışığı kırınımı yöntemiyle, Şekil 8.'de ise $>125\mu\text{m}$ için yaş elek analizi ile elde edilen sonuçların, $<125\mu\text{m}$ için X-ışınları sedimantasyon sonuçlarıyla birleştirilmesi ile elde edilen tane iriliği dağılımı logaritmik olarak verilmiştir. Lazer yöntemiyle İstanbul ve Afyon kilinin tane iriliklerinin ortanca değeri (d_{50}) sırasıyla yaklaşık olarak $6\mu\text{m}$ ve $20\mu\text{m}$ iken, bu değer sedimantasyon yönteminde sırasıyla $0,3\mu\text{m}$ ve $200\mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir. $38\mu\text{m}$ 'den ince malzeme oranı sedimantasyon yöntemi ve lazer yöntemiyle, Afyon kili ve İstanbul kili için sırasıyla %46, %90 ve %58 ve %77'dir.

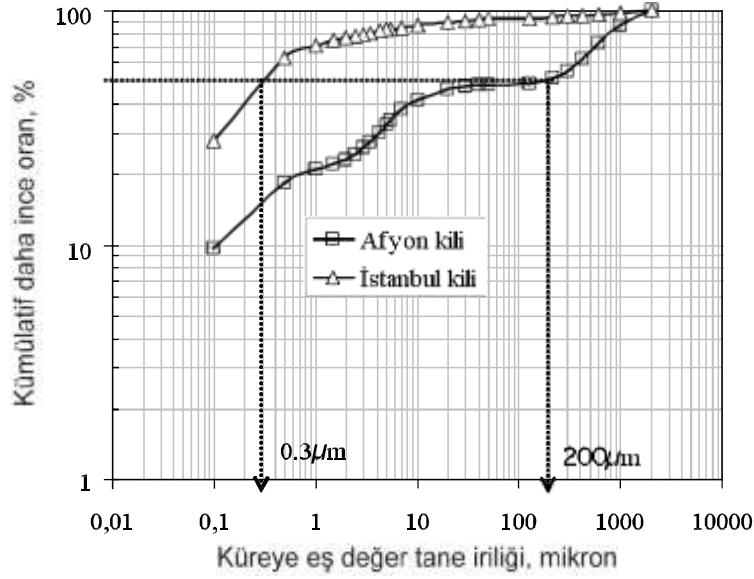
Çizelge 5'de Uluslararası Toprak Bilimi Topluluğu'nun (ISSS) tane boyutuna göre yaptığı fraksiyonel toprak sınıflandırması ve numunelerin bu sınıflarda % dağılımı verilmiştir. Görüldüğü üzere kil fraksiyonu olarak belirtilen $2\mu\text{m}$ altındaki malzeme miktarları, lazer yöntemiyle Afyon kili için %8,13, İstanbul kili için %19,06 olarak saptanırken, sedimantasyon yöntemiyle Afyon kili için %23,33, İstanbul kili için %76,28 oranında belirlenmiştir. X-ışınları sedimantasyon yöntemiyle belirlenen kil fraksiyonu miktarı, lazer yöntemine göre Afyon kili için 2,9 kat, İstanbul kili için 4 kat daha fazla saptanmıştır. SEM görüntülerinden anlaşıldığı üzere İstanbul kilinde

disk şeklinde tane yapısına sahip kil mineralleri oranı, Afyon kiline nazaran daha fazladır. SEM görüntüleriyle uyumlu olarak, İstanbul kilinde sedimantasyon metodu ile saptanan kil fraksiyonundaki malzeme oranı, Afyon kiline göre lazer yöntemiyle karşılaştırıldığında daha fazla miktarlarda hesaplanmaktadır.

Şekil 9'da, kil numunelerinin iki yöntemle belirlenen ve Çizelge 5.'de verilen tane boyut dağılımı oranlarına göre Winckler's diyagramındaki (Souza, 2002; Monterio ve Vieira, 2004) konumları gösterilmiştir. Tane boyut dağılımı analizinde kullanılacak olan yöntemin, numunelerin karakteristik özelliklerinden olan tane iriliği dağılımına olan etkisi, malzemelerin granülometrik sınıflandırmasının yapıldığı diyagramda açıkça görülmektedir. Diyagrama göre Afyon kilinin lazer kırınımı yöntemiyle ve İstanbul kilinin X-ışını sedimantasyonu yöntemiyle saptanan boyut dağılımı sonuçlarına göre, bu iki kil seramik ürünler üretimi için karakteristik alanın dışında kalmaktadır. Bu iki kil numunesinden istenilen özelliklerde kil tabanlı malzemeler üretimi ancak, bu hammaddelerin başka malzemeler ile karışım oluşturulması ile sağlanabilir. Bunun yanında Afyon kili için sedimantasyon yöntemi ve İstanbul kili için lazer yöntemi sonucuna göre, bu iki hammaddede doğrudan deliksiz zemin kaplama malzemesi üretimine uygundur.



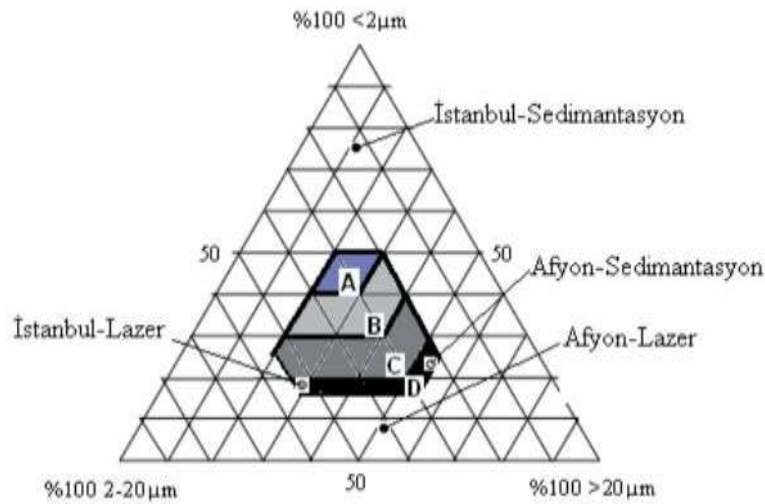
Şekil 7. Numunelerin lazer yöntemiyle belirlenen küreye eş değer tane iriliği dağılımı.



Şekil 8. Numunelerin X ışınları sedimantasyon yöntemiyle belirlenen (<125μm fraksiyonu için) küreye eş değer tane iriliği dağılımı .

Çizelge 5. Numunelerin İki yöntemle Belirlenen Fraksiyonel Boyut Dağılımı Oranları

ISSS*	μm	Lazer yöntemi		Sedimantasyon yöntemi	
		Afyon kili	İstanbul kili	Afyon kili	İstanbul kili
Çakıl	>2000				
İri Kum	200 2000	31.59	12.93	48.80	6.00
İnce Kum	20 200	19.38	16.53	4.99	4.91
Silt	2 20	40.90	51.48	22.89	12.81
Kil	<2	8.13	19.06	23.33	76.28
%Anon (c) 2009)	Toplam	100.00	100.00	100.00	100.00



Şekil 9. Numunelerin boyut dağılımlarına göre Winckler's diyagramındaki konumları

A: yüksek kaliteli seramik hammaddesi B: çatı kaplama malzemesi
C: delikli zemin kaplama malzemesi D: deliksiz zemin kaplama malzemesi

3.3 0-125 µm Fraksiyonunun Tane Boyut Dağılımının Tespiti

X-ışınları sedimantasyon ve lazer ışığı kırınımı yöntemlerinin daha dar tane iriliği fraksiyonunda karşılaştırmasının yapılması amacıyla numuneler 125µm açıklıklı elekte elenmiş, elek altı malzemenin tane boyut dağılımı lazer yöntemiyle tespit edilmiştir (elek üstü oranı: Afyon kili: %51,88, İstanbul kili: %7,33). Numunelerin X-ışınları sedimantasyonu sonuçları için Bölüm 3.2'de verilen <125µm için sedimantasyon yöntemiyle belirlenen tane iriliği dağılımı sonuçları kullanılmıştır. Çizelge 6'dan görüldüğü üzere lazer yöntemiyle Afyon ve İstanbul kilinin kil fraksiyonu (<2µm) oranı sırasıyla yaklaşık olarak %17 ve %21 oranlarında belirlenirken, sedimantasyon yöntemiyle sırasıyla %47 ve %82 miktarında kil belirlenmiştir. İstanbul kilinin disk, yaprak şeklindeki malzeme oranının fazlalığına bağlı olarak, iki yöntem karşılaştırıldığında kil fraksiyonu oranı sedimantasyon yöntemiyle İstanbul kili için 3,9 kat, Afyon kili için 2,8 kat daha fazla belirlenmiştir. Şekil 10'da numunelerin <125µm fraksiyonunun lazer ışığı kırınımı ve X-ışınları sedimantasyonu yöntemleriyle belirlenen ve on adet ölçümün ortalamalarını gösteren küreye eş değer tane iriliği dağılımları gösterilmiştir.

Çizelge 6. Kil Numunelerinin <125µm Fraksiyonundaki Tane İriliği Dağılımı

µm	Lazer		Sedimantasyon	
	Afyon	İstanbul	Afyon	İstanbul
>20	26,78	19,87	6,10	4,28
2-20	56,31	58,97	46,50	13,76
<2	16,91	21,16	47,40	81,96
Toplam	100,00	100,00	100,00	100,00

3.4 Tutarlılık Analizi

Çalışmada kullanılan X-ışınları sedimantasyon ve lazer ışığı kırınımı yöntemlerinin tekrarlanabilirliklerinin, cihazlardan ölçülen sonuçların tutarlılıklarının belirlenmesi amacıyla <125µm fraksiyonundaki malzeme ile 10 kez ölçüm yapılmıştır. Tutarlılık analizinde iki yöntem arasında kil fraksiyonundaki farkın daha fazla olduğu İstanbul kili kullanılmıştır. ISO 13320'de (Anon (d), 1999) lazer ışığı kırınımı metodu ile tane boyut analizinin tekrarlanabilirliğinin ölçütü olarak, aynı örnekten en az 5 kez alınan alt örneklerin d_{50} parametreleri arasındaki değişim katsayısının %3'den, d_{10} ve d_{90} parametreleri arasındaki değişim katsayısının ise %5'den az olması gerektiği belirtilmektedir. Bu ölçütün hesabında d_{10} , d_{50} ve d_{90} değerlerine karşılık gelen tane çaplarının (X_i) aritmetik ortalaması (X) (Eşitlik 3), standart sapması (σ) (Eşitlik 4) ve değişim katsayısı (σ_d) (Eşitlik 5) aşağıda verilen formüller ile hesaplanmıştır (n:gözlem sayısı (10 adet)). Günümüzde X-ışınları sedimantasyonu yöntemiyle tane boyut analizinin prensiplerini tanımlayan herhangi bir standart olduğu yönünde bir bilgi bulunmamaktadır.

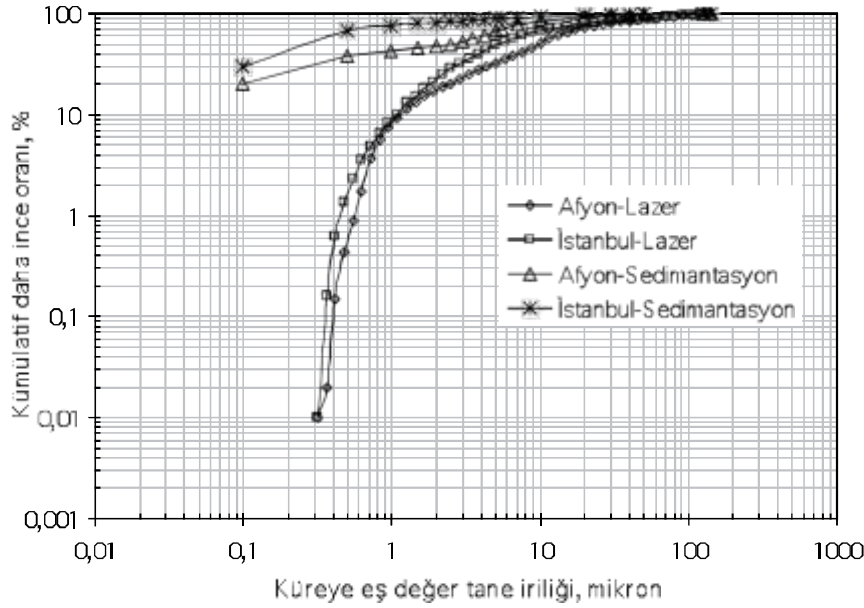
$$X = \frac{\sum X_i}{n} \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}}{n-1}} \quad (4)$$

$$\sigma_d = \frac{\sigma}{X} * 100 \quad (5)$$

Çizelge 7. Tutarlılık Analizi sonuçlarının Aritmetik Ortalaması (X), Standart Sapması (σ) ve Değişim Katsayısı (σ_d)

Parametre	Lazer Yöntemi			Sedimantasyon Yöntemi		
	d_{-c}	d_{5c}	d_{9c}	d_{-c}	d_{5c}	d_{9c}
X, µm	1,096	5,012	60,256	0,0157	0,274	5,563
σ , %	0,0570	0,1812	3,4472	0,0011	0,0181	0,3263
σ_d , %	5,24	3,62	5,72	6,89	6,59	5,87
σ_d , % (ISO 13320)	<5	<3	<5			



Şek 10. Numune er n 0-125µ m fraksiyonunun k yöntem e be r enen küreye eş değer tane r ı dağılımı.

Çizelge 7'den görüldüğü gibi, lazer yöntemi için d_{10} , d_{50} ve d_{90} değerleri, ISO 13320 standardında belirtilen üst sınır değerlerin kabul edilebilir bir miktar üzerinde çıkmıştır. Her iki yöntemde de elde edilen küçük standart sapma değerleri, istatistiksel hesaba giren tane iriliği değerlerinin birbirlerine yakın dağıldığını göstermektedir. X-ışınları sedimentasyonu yöntemiyle hesaplanan her üç değişim katsayısı değeri lazer ışığı kırınımı metoduna ait değerlerden bir miktar fazla çıksa da, yapılan bu istatistiki değerlendirme her iki yöntemin kendi içinde tutarlı sonuçlar verdiğini ve her iki yöntemle tekrarlanabilir sonuçlar alınabildiğini göstermiştir.

4. SONUÇ

Başta madencilik, seramik, çimento, kimya, gıda vb. sanayi kollarında olmak üzere birçok endüstri dalında, hammaddelerin veya prosesin belirli aşamalarında elde edilen ürünlerin temel fiziksel karakteristik özelliklerinden olan tane büyüklüğü dağılımının kesin olarak belirlenmesi zorunlu hale gelmiş olup, günümüzde laboratuvarlarda birçok teknik ile tane boyut analizi yapılmaktadır. Bilindiği üzere bütün tane boyutlandırma teknikleri ile küp veya küre gibi genellikle düzenli geometrik şekilleri olmayan üç boyutlu tanelerin boyutlarının belirtilmesinde

tek bir rakam kullanılmaktadır. Tane boyut analizinin gerçekleştirileceği yöntemin temel prensiplerinin, yöntem ile tanenin tane boyutunun hesaplanmasında kullanılacak hangi karakteristik özelliğinin ölçüldüğünün, yöntemin avantaj ve dezavantajlarının ve tane şeklinin sonuca olan etkisinin tam olarak anlaşılması sonucunda en uygun yönteminin seçilmesi, doğruya en yakın sonucun alınmasının anahtarıdır denilebilir.

Çalışma kapsamında araştırılan lazer ışığı kırınımı yönteminde, her ne kadar deney sırasında hacimsel numune derişimi minimum bir değerde tutulması ile çoklu kırınım önlenmeye çalışılsa da, bu durumun bir dezavantaj oluşturduğu düşünülmektedir. Kırınım modelinin tane boyutu dağılımına dönüşümünde kullanılacak olan teori konusundaki tartışmalar da, yöntemin bir diğer olumsuzluğu olarak dumatadır. Nitekim farklı firmalarca üretilen lazer difraksiyon cihazlarında farklı teorilerin kullanıldığı görülmektedir (Coulter LS230:Fraunhofer teorisi (Pye ve Blott, 2004), Malvern Mastersizer:Mie teorisi (Rawle, 1993)). Lazer kırınımı yönteminde sıvı ve katının yoğunluğu, viskozite değeri, laminar akım şartlarının sağlanması gibi değişkenlerin sonuç üzerinde etkili olmaması, yöntemde üstünlük sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan kil numunelerinin XRD sonuçlarından görüldüğü üzere Afyon kili 3 farklı kil minerali,

kuvars ve feldspattan (orthoklas) oluşurken, istanbul kili 3 farklı kil minerali ve kuvarstan oluşmaktadır. Bu minerallerin farklı özgül ağırlık değerlerine sahip olduğu ve sedimentasyon yönteminde tek bir değer küreye eş tane çapının hesabında kullanıldığı düşünülürse, X-ışını sedimentasyonu için buradan bir takım hataların oluşması kaçınılmaz durumdadır. Sedimentasyon yönteminin, çökme sırasında tanelerin birbirlerinden etkilenmeyerek bağımsız olarak çöktüğü, tanelerin çökmesi sırasında süspansiyonda meydana gelen hareketlerin laminar akım şartlarında olduğu gibi bir takım ön kabullere bağlı olması da, yöntem ile alınan sonuçların tartışılmasına sebep olan hususlar olarak görülmektedir.

Deneysel çalışmada kullanılan kil numunelerinin SEM görüntülerinden de görüldüğü gibi, kil minerallerinin tane şekilleri genellikle disk, yaprak şeklindedir. Bu özellik çalışmada kullanılan her iki tane boyut dağılımı analiz yöntemi için bir takım dezavantajlar oluşturmaktadır. Lazer ışığı kırınımı yöntemi, taneleri iki boyutlu objeler olarak görmekte ve görülen kesit alana bağlı olarak eş değer alana sahip kürenin çapı, tane çapı olarak belirlenmektedir. Disk şeklindeki tanenin yan kesit alanı lazer ışığı tarafından görülüp, kırınıma uğradığında tane boyutunun düşük hesaplanması kaçınılmaz olacaktır. X-ışını sedimentasyonunda ise sıvı ortam içinde çökmekte olan disk şeklindeki taneye etki eden karşı kuvvetler artmakta, bunun sonucunda da tanenin çökmez zamanının yükselmesi, ince boyut fraksiyonunun fazla hesaplanmasına neden olmaktadır. Nitekim çalışmada kil boyutundaki malzeme miktarı (<2 µm) lazer yöntemine göre sedimentasyon metoduyla Afyon kilinde %15,2, istanbul kilinde ise %57,2 oranında fazla hesaplanmaktadır. Her iki yöntem daha dar olan 0-125 µm fraksiyonunda karşılaştırıldığında ise kil fraksiyonu X-ışını sedimentasyonu yöntemiyle Afyon kili için %30,5, istanbul kilinde ise %60,8 oranında daha fazla hesaplanmaktadır. SEM görüntülerinden görüldüğü üzere istanbul kilinde disk, yaprak şeklindeki kil fazı miktarı Afyon kiline göre daha fazladır ve bu durum kil fraksiyonunun istanbul kilinde X-ışını sedimentasyonu yöntemiyle çok daha fazla oranlarda hesaplanmasına neden olmaktadır. Yöntemlerin tutarlılıklarının saptanması amacıyla gerçekleştirilen istatistiki değerlendirme, her iki tane boyut analizi metodunun kendi içinde tekrarlanabilir sonuçlar verdiğini ve sonuçların

oldukça güvenilir olduğunu ortaya koymuştur.

Çalışma kapsamında araştırılan yöntemler aynı malzemenin farklı özelliklerine bağlı olarak ölçüm gerçekleştirdiğinden (lazer yöntemi: tane ile eş kırınım modeli gösteren, eş değer alana sahip kürenin çapı; sedimentasyon yöntemi: tane ile eş çöken kürenin çapı), hangi metod ile belirlenen tane boyut dağılımının doğru sonucu gösterdiğini ve değerlendirmeye alınması gerektiğini söylemek tartışılabilir. Ancak, her ne kadar <38 µm fraksiyonundaki malzeme miktarını elek analizi ile saptanan ve iki yöntemle hesaplanan miktarlar ile karşılaştırıp, doğru sonuç veren yöntemi kesin olarak belirlemek yanlış değerlendirmeye neden olabilirse de, bir fikir vermesi açısından incelendiğinde X-ışını sedimentasyonu yöntemiyle belirlenen oranların elek analizi yöntemine daha yakın değerler verdiği görülmüştür. Yeterli sayıda tanenin doğrudan gözlenip, referans daireler veya ölçekler yardımıyla boyutlandırılarak doğrudan tane sayımı esasına dayanan (mikroskop gibi) ve bu konuda diğer yöntemlere göre daha fazla uzmanlık gerektiren metotlarla da boyut dağılımı analizi yapılması, doğru yöntemin ve malzemenin doğru boyut dağılımının belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Alien T., 1997; "Particle size measurement", Volume:1; Powder Sampling and Particle Size Measurement, 5th Edition, Chapman and Hall publication.

Anon (a) 2009; "Laser diffraction:millennium-link for particle size analysis", http://www.sympatec.com/LaserDiffraction/publications/LD_2000_millenniumlink.pdf

Anon (b) 2009; "Particle size analysis", <http://www.micromeritics.com/>

Anon (c) 2009; "International Soil Science Society", <http://www.iuss.org>

Anon (d) 1999; Particle size analysis: Laser diffraction methods. Part 1. General principles. International Organization for Standardization. ISO 13320-1:1999 http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=21706

- Bianchi, G.G., Hall, I.R., McCave, I.N., and Joseph, L., 1991; "Measurement of the sortable silt current speed Proxy using the SediGraph 5100 and Coulter Multisizer II: precision and accuracy", *Sedimentology*, 46, 1001-1014.
- Boer de G.B.J., De Weerd C., Thoenes, D., and Goossens, H.W.J., 1987; "Laser diffraction spectrometry: Fraunhofer versus Mie scattering", *Particle Characterization*, 4, 14-19.
- Bowen, P., and Schellhammer, M. 2002; "Particle size measurement of ceramic powders: A practical approach from 0.1 to 400 microns", *Key Engineering Materials*, 206(2), 131-134.
- Bunville, L.G. 1984; "Chapter:1 Commercial instrumentation for particle size analysis", in *Modern Methods of Particle Size Analysis*, Wiley-Interscience publication, edited by Barth, H.G.
- Burman, P., Pape, Th., Reijneveld, J.A., de Jong, F., and van Gelder, E., 2001; "Laser-diffraction and pipette-method grain sizing of Dutch sediments: correlations for fine fractions of marine, fluvial, and loess samples", *Netherlands J. Of Geosciences*, 80(2), 49-57.
- Cramp, A., Lee, S.V., Herniman, J., Hiscott, R.N., Manley, P.L., Piper, D.J.W., Deptuck, M., Johnston, S.K., and Black, K.S., 1997; "Interlaboratory comparison of sediment grain-sizing techniques: data from amazon fan upper levee complex sediments", *proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, Flood, R.D., Piper, D.J.W., Klaus, A., and Peterson, L.C. (Eds.)
- Dalkey, A., and Leecaster, M.K., 2009; "Comparison of sediment grain size analysis among two methods and three instruments using environmental samples", ftp://ftp.sccwrp.org/pub/download/DOCUMENTS/AnnualReports/1999AnnualReport/28_ar26.pdf
- Eshel, G., Levy, G.J., Mingelgrin, U., and Singer M.J., 2004; "Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis", *Soil Science Society of America*, 68, 736-743.
- Goossens, D., 2008; "Techniques to measure grain-size distributions of loamy sediment: A comparative study of ten instruments for wet analysis", *Sedimentology*, 55, 65-96.
- Jillavenkatesa, A., Dapkunas, S.J., and Lum, L.S.H., 2001; "Particle size characterization, National Institute of Standards and Technology", NIST Recommended Practice Guide, No:960-1
- Ketler, TA., Doran, J.W. and Gilbert, TL., 2001; "Simplified method for soil particle-size determination to accompany soil-quality analyses", *Soil Science Society of America*, 65, 849-852.
- Konert, M., and Vandenberghe, J., 1997; "Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction", *Sedimentology*, 44, 523-535.
- Knosche, C., Friedrich, H., and Stintz, M., 1997; "Determination of particle size distribution and electrokinetic properties with the Acoustosizer in comparison with other methods", *Particle and Particle Systems Characterization*, 175-180.
- Lehmann, M., Berthold, C., Pabst, W., Gregorova, E., and Nickel, K.G., 2004; "Particle size and shape characterization of kaolins-comparison of settling methods and laser diffraction", *Key Engineering Materials*, 264-268, 1387-1389.
- Loizeau, J.L., Arbouille, D., Santiago, S., and Vernet, J.P., 1994; "Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyzer for use with sediments", *Sedimentology*, 41, 353-361.
- Loveland, P.J. and Whalley, W.R., 2001; "Particle size analysis, in *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*", II. Editions, edited by Smith, K.A., and Mullins, C.E., CRC publication.
- McCave, I.N., Bryant, R.J., Cook, H.F., and Caughanowr, C.A., 1986; "Evaluation of a laser diffraction size analyzer for use with natural sediments", *J. of Sedim. Petrol.*, 56, 561-564.
- McCave, N., Hall, I.R., and Bianchi, G.G., 2006; "Laser vs. velocity differences in silt grain size measurements: estimation of palaeocurrent vigour", *Sedimentology*, 53, 919-928.
- Monterio, S.N. and Vieira, C.M.F. 2004; "Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campas dos Goytacazes, Brazil", *Applied Clay Science*, 27, 229-234.

Nascimento, C.A.O., Guardani, R., and Giulietti, M., 1997; "Use of neuralNetworksin the analysis of particle size distributions by laser diffraction", Powder Technology, 90, 89-94.

Orhan, M., Özer, M. ve Işık, N.S. 2004; "incetaneli zeminlerin gronülometrisinin belirlenmesinde kullanılan sedimanıasyon ve lazer difraksiyon metodlarının irdelenmesi", Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 17(2), 105-113.

Özer, M. ve Orhan, M. 2007; "Lazer kırınım yöntemiyle zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi: genel ilkeler ve örnek hazırlama yöntemi", Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 22(2), 217-226.

Pabst, Willi, Berthold, C., and Gregorova, E., 2007; "Size and shape characterization of oblate and prolate particles", J. Of the European Ceramic Society, 27,1759-1762.

Pye, K., and Blott, S.J., 2004; "Particle size analysis ofsediments, soil and related particulate materials for forensic purposes using laser granulometry", Forensic Science International, 144, 19-27.

Rawle, A. 1993, "The basic principles of particle size analysis, application note MRK038", Malvern Instruments, Malvern, UK, www.malvern.co.uk.

Ryzak, M., Bieganowski, A., and Walczak, R.T., 2007; "Application of laser diffraction method for determination of particle size distribution of grey-brown podzolic soil", Res. Agr. Eng., 5(31), 34-38.

Saklar, S., Bayraklar, İ. ve Öner, M., 2000; "ince tane boyu analizinde kullanılan yöntemler", Madencilik, 39(2), 29-47.

Souza, G.P., Sanchez, R., and Holanda, J.N.F., 2002; "Characteristics and physical-mechanical properties offired kaolinitic materials", Ceramica, 48(306), 102-107.

Strickland, M.L. 2006; "Characterizing particles"; http://www.ceramicindustry.com/Articles/Cover_Story/4e21794e4372901OVgnVCM100000f932a8c0_

Syvitski, P.M., 2007; "Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis", Cambridge

University publication

Webb, P.A. 2004a; "The perseverance of the sedigraph method of particle sizing", http://www.micromeritics.com/Repository/Files/sedigraph_method.pdf

Webb, P.A. 2004b; "Sizing Particles with X-ray sedimentation", http://www.ceramicindustry.com/Articles/Cover_Story/f8997184a-6ac701OVgnVCM100000f932a8c0_.

Webb, P.A., 2009; "Modern methods of particle characterization", <http://www.micromeritics.com/pdf/other/MMPC.pdf>

BİLYALI DEĞİRMENLERİN ÇEKTIĞİ GÜCÜN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER VE KURU SİSTEM ÇALIŞAN KAMARALI BİLYALI DEĞİRMENLERE UYGULANMASI

The Methods Used to Determine of the Power of Bali Mills and Their Application Dry-System
Multi-Compartment Bali Mills

Geliş (received) 02 Ağustos (August) 2009; Kabul (accepted) 03 Kasım (November) 2009

A. Seyfi ERDEM (*)

ÖZET

Bu çalışmada, Bond (1961) ve Morrell (1996) tarafından yaş sistem bilyalı, otojen ve yarı otojen değirmenlerin çektiği gücün belirlenmesi için önerilen yaklaşımların kuru sistem çalışan karnaralı bilyalı değirmenlerdeki tahmin gücü sınanmıştır. Her iki yaklaşımda, tasarım ve işletme değişkenlerinin çekilen güç üzerindeki etkileri incelenmiştir. Klinker öğütmedevrelerinde yer alan ve çapları 3,2-4,8 m arasında değişen 13 adet karnaralı bilyalı değirmenin çektiği güç değerleri her iki yöntemle hesaplanmış ve tasarım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Her iki yöntemin de kuru sistem çalışan karnaralı bilyalı değirmenlerin çektiği gücü tahmin etmede başarılı olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Öğütme, Bilyalı Değirmen Gücü.

ABSTRACT

In this study, the Bond (1961) approach and the Morrell (1996) approach proposed for the prediction of the power of wet bali mills, autogenous mills and semi-autogenous mills were tested. Effects of operational and design parameters on the power drawn by the mill were investigated for both approaches. The power of 13 multi-compartment bali mills operating in cement grinding circuits and having 3,2-4,8 m diameter was calculated using both approaches and compared with design results. It was concluded that both methods are sufficient for predicting the power of dry-grinding multi-compartment bali mills.

Keywords: Grinding, Bali Mill Power.

(*) Dr. A. Seyfi Erdem, Eti Bakır A.Ş., Murgul işletmesi, Damar/ARTViN, aserdem@hacettepe.edu.tr

1 GİRİŞ

Çimento fabrikaları enerjinin en yoğun kullanıldığı endüstri kuruluşlarından biridir. Dünyadaki yıllık çimento üretimi yaklaşık olarak 2,6 milyar tondur (Anon (a), 2008) ve çimento üretim aşamalarındaki öğütme işlemi için harcanan elektrik enerjisi, bütün dünyadaki elektrik enerjisi üretiminin %2'sine denk gelmektedir (Norholm, 1995). Bir çimento fabrikasındaki çimento üretim aşamalarında harcanan elektrik enerjisinin %60'ı klinker ve hammadde öğütme işlemlerinde ve bunun da %40'ı, klinker öğütme birim işleminde harcanmaktadır (Zhang vd, 1988 ve Fujimoto, 1993). Bu sayısal değerler çimento fabrikalarındaki en önemli maliyet biriminin enerji olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, çimento öğütme işlemlerinde harcanan enerjinin doğru bir şekilde belirlenmesi, öğütme için gereksinim duyulan ekipmanların doğru seçiminde ve optimum öğütme koşullarının saptanmasında büyük önem arz etmektedir.

Çimento üretim prosesindeki klinker boyut küçültme işleminin en önemli amacı kullanım için uygun dayanım ve istenilen özelliklere sahip nihai ürün malzemesini üretmektir. Bu aşama yaygın olarak tüp değirmen olarak da adlandırılan kuru sistem çalışan karnaralı bilyalı değirmenlerle gerçekleştirilmektedir (Gouda, 1981).

Tüp değirmenlerin çektiği gücü tahmin eden ve tasarım ile birlikte işletme parametrelerini içeren genel kabul görmüş bir matematiksel eşitlik henüz yoktur. Literatürde, bu değirmenlerin çektiği gücün belirlenmesine yönelik önerilen çeşitli çalışmalar ve ampirik eşitlikler bulunmaktadır (Duda, 1985). Ancak bu eşitliklerin pek çoğu belirli amaçlar doğrultusunda ve kısıtlı deneysel koşullar altında yapıldığı için genel eşitlikler değildir. Bu eşitliklerden en önemlisi Bond tarafından önerilen ve Rowland tarafından ufak değişiklikle son halini alan Bond eşitliğidir (Rowland, 1985; Napier-Munn vd, 1996). Bond yöntemi özellikle yaş sistem çalışan bilyalı değirmenlerin seçiminde ve çektiği gücün belirlenmesinde yaklaşık 50 yıldır oldukça geniş bir uygulama alanı bulmuştur.

Bond yönteminde malzemenin istenilen ürün tane boyunun altına indirgemek için gerekli enerji hesaplanmakta ve değirmen boyutlandırılması yapılmaktadır. Bu yöntem işletme ve tasarım değişkenlerinde meydana gelebilecek bir

değişiklik durumunda devre performansını tahmin edememektedir (Austin vd, 1982; Austin vd, 1984; Napier-Munn vd, 1996; Morrell ve Man, 1997; Man, 2000). Ayrıca çimento hammaddeleri, boksit, kil gibi malzemelerin, değirmenin çekeceği güçte değişikliğe neden olabileceği ve dolayısıyla bu malzemelerin öğütülmesi için seçilecek olan bilyalı değirmenlerin boyutlandırılmasında ve güç değerlerinin belirlenmesinde Bond yönteminin yetersiz kalabileceği ve değirmen üretici firmalarına danışılması gerektiği belirtilmektedir (Rowland ve Kjos, 1980).

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesini müteakiben matematiksel modelleme ve simülasyon tekniklerinin öğütme devrelerinin tasarımı ve optimizasyonunda kullanılmasıyla birlikte değirmen seçimi konusunda önemli gelişmeler sağlanmıştır. Ancak tüp değirmenlerin tasarımı ve çektiği gücün belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar, öğütme sistemi ve ekipman tasarımındaki farklılıklar nedeniyle, yaş sistem bilyalı değirmenlerdeki kadar değildir. Yaş sistem çalışan bilyalı değirmenlerin çektiği gücün tahmini üzerine yapılmış en son çalışma Morrell (1996) yöntemidir. Bu yöntemde, yaş sistem bilyalı, otojen ve yarı otojen değirmenlerin çektiği güç yeni bir yaklaşımla hesaplanmakta ve oldukça fazla sayıda tesis verisiyle yöntemin başarısı sınanmaktadır. Bölüm 2'de, Bond (1961) ve Morrell (1996) yaklaşımları hakkında detaylı bilgi verilmektedir.

Bu çalışmada, hali hazırda çalışmakta olan ve çapları 3,2-4,8 m arasında değişen 13 adet karnaralı bilyalı değirmenden toplanan veriler kullanılarak değirmenlerin çektiği güç değerleri değirmen geometrisine göre yeniden düzenlenen Morrell (1996) ve Bond (1961) yaklaşımı ile ayrı ayrı belirlenmiştir. Bulunan sonuçlar, tasarım güç değerleri ile karşılaştırılmış ve her iki yaklaşımın kuru sistem karnaralı bilyalı değirmenlerin çektiği gücü tahmin etmedeki performansı değerlendirilmiştir.

2 DEĞİRMEN GÜCÜNÜN HESAPLANMASI

2.1 Bond (1961) Yöntemi

Bond öğütülebilirlik testleri, Maxson, Cadena ve Bond tarafından 1934 yılında geliştirilmiştir. Bond bilyalı değirmen öğütülebilirlik testi, öğütme için gerekli enerjinin tahmin edilmesi

aşamasında kullanılan iş indeksi (Wİ) değerinin belirlenmesinde faydalanılan kapalı devre öğütme testidir. Bond (1952), öğütülebilirlik test sonucunu iş indeksiyle ilişkilendirmiştir. Daha sonra, bu deneysel ilişki düzenlenmiş ve 1961 yılında son halini almıştır.

Bond yönteminde öncelikle standart ölçülere sahip laboratuvar ölçekli bir değirmende gerçekleştirilen bilyalı değirmen öğütülebilirlik testi yardımıyla malzemenin öğütülebilirliği belirlenmekte ve %80'inin geçtiği tane boyu verilen belirli bir besleme hızına sahip malzemenin, %80'ini ürün tane boyunun altına indirgemek için gerekli enerji hesaplanmaktadır. Daha sonra, ampirik eşitlikler kullanılarak ölçek büyütme işlemi gerçekleştirilmekte, değirmenin çekeceği güç belirlenmekte ve değirmenin boyutlandırılması yapılmaktadır. Ayrıca yaş sistem boğazdan taşmalı bilyalı değirmenlerin çektiği güç, Bond tarafından önerilen Eşitlik 1'deki matematiksel ifade ile hesaplanmaktadır.

$$kW_b = 4,879D^{2,3} \times (3,2 - 3V_p) \times C_s \times \left(1 - \frac{0,1}{2^{9-10C_s}}\right) + S_s \quad (1)$$

kW_b : 1 ton bilya hareketi için değirmenin çekeceği güç, kW/t

D : Değirmen iç çapı, m

V_p : Değirmen % bilya şarj oranı

C_s : Değirmen % kritik hız oranı

S_s : Bilya boyu faktörü, kW/t

Değirmen çapının 3,3 m'den büyük olması durumunda, Eşitlik 2'deki bilya boyu etkisi hesaba katılmaktadır.

$$S_s = 1,102 \times \left(\frac{B - 12,5 \times D}{50,8}\right) \quad (2)$$

S_s : B ya boyu faktörü, kW/t

B : En büyük bilya boyu, mm

Öğütme ortamından dolayı, yaş ve kuru sistem öğütme işlemlerinde harcanan enerji farklılık göstermekte ve kuru sistem öğütmede daha fazla enerji sarfiyatı olmaktadır. Izgara çıkışlı kuru sistem bilyalı değirmenlerin çekeceği güç, Eşitlik 1 ile bulunan değerin 1,08 ile çarpımıyla elde edilmektedir. Kuru sistem kamaralı bilyalı değirmenler, seri haldeki iki veya daha fazla ızgara çıkışlı bilyalı değirmenden oluşmaktadır. Bu nedenle, aynı eşitlik seri haldeki her bir değirmenin çektiği gücün hesaplanmasında kullanılmakta ve kamaralı bilyalı değirmenin

çektiği güç, her bir bilyalı değirmen için ayrı ayrı hesaplanan güçlerin toplamına eşit olmaktadır (Rowland, 1985).

2.2 Morrell (1996) Yöntemi

Morrell (1996) yaklaşımında endüstriyel ölçekli değirmenlerdeki güç çekiminin modellenmesi, değirmen içerisindeki öğütücü ortam ve öğütülen malzemeden oluşan yükün hareketi ile tanımlanmaktadır. Değirmendeki yükün sürekli bir hareket içerisinde davranması ve tanelerin sabit hızla hareket etmesi, modelde bulunacak eşitliklerin geliştirilmesi için gerekli analitik çözümlerin bulunmasına izin vermektedir. Değirmenin hareketi ile yük yukarı doğru taşınmakta, bu durum da belirli bir enerji harcanmasına neden olmaktadır. Bu yük hareketi tanımlanarak, değirmen içerisindeki yüke hangi oranda potansiyel ve kinetik enerji sağlandığı belirlenmekte ve Eşitlik 3 ile değirmenin çekeceği toplam güç hesaplanmaktadır (Morrell, 1992).

Toplam güç = değirmenin yüksüzken çektiği güç + (k x yük hareketi için gerekli güç)

$$P_T = P_y + (k \times (P_i + P_c)) \quad (3)$$

P_T : Değirmenin çektiği toplam güç, kW

P_y : Değirmenin yüksüzken çektiği güç, kW

P_i : Silindirik kısımdaki yük hareketi için gerekli güç, kW

P_c : Konik kısımdaki yük hareketi için gerekli güç, kW

k : Sabit

Yaklaşımında, değirmen yüzeyinin yüke hangi oranda potansiyel ve kinetik enerji sağladığı belirlenmekte ve bir k düzeltme katsayısıyla çarpılarak, silindirik ve konik kısımdaki toplam yükün hareketi için gerekli net güç hesaplanmaktadır. Daha sonra, değirmenin yüksüzken çekeceği güç hesaplanarak, değirmen motorundaki gücü ifade eden değirmenin çekeceği toplam güç bulunmaktadır. Silindirik kısımdaki yük hareketi için gerekli teorik güç Eşitlik 4, konik kısımdaki yük hareketi için gerekli teorik güç Eşitlik 5 ve değirmenin yüksüzken çekeceği güç Eşitlik 6 ile ifade edilmektedir. k bir düzeltme katsayısı olup; iç sürtünmeden kaynaklanan ısı ve ses için harcanan enerji kaybı, aşındırma ile kırmada harcanan enerji, öğütülen ortamın dönüş hareketinde harcanan enerji ve yükün hareketi ve şeklini belirlerken yapılan hata

değerlerini içeren bir değerdir. k değerinin 1,26 olduğu durumda elde edilen sonuçların ölçülen değerlere en iyi uyum sağladığı görülmüştür (Morrell, 1996).

Otojen, yarı otojen ve yaş sistem bilyalı değirmenler için önerilen bu modelde, silindirik ve konik kısımdaki yük hareketi için gerekli güç ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Ancak kamaralı bilyalı değirmenlerdeki konik kısım, tasarım farklılığı nedeniyle diyagramı Şekil 1'de görülen yaş sistem bilyalı değirmendeki gibi değildir ve bu konik kısım, kamaralı bilyalı değirmenlerdeki öğütme ortamının çok ufak bir kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle, kamaralı bilyalı değirmenlerin çektiği net güç hesaplanırken konik kısmın çektiği güç ihmal edilebilir.

Silindirik kısımdaki yük hareketi için gerekli teorik güç;

$$P_t = \left[\frac{\pi \times g \times L \times N_m \times r_m}{3(r_m - z \times r_i)} \right] \times [2r_m^3 - 3z \times r_m^2 \times r_i + r_i^3 (3z - 2)] + [\rho_c \times (\sin \theta_s - \sin \theta_r) + \rho_p \times (\sin \theta_r - \sin \theta_{ro})] \times \left[L \times \rho_c \times \left(\frac{N_m \times r_m \times \pi}{(r_m - z \times r_i)} \right)^2 \times [r_m^2 - z \times r_m \times r_i + r_i^2 \times (z - 1)^2] \right] \quad (4)$$

P_t : Silindirik kısımdaki yük hareketi için gerekli güç, kW

L : Değirmen silindirik kısmının uzunluğu, m

N_m : Değirmen dönüş hızı, dev/s

g : Yerçekimi ivmesi, m/s²

ρ_c : Değirmendeki yükün yoğunluğu, t/m³

ρ_p : Değirmen çıkışı malzeme yoğunluğu, t/m³

Z : Şarj oranına bağlı bir parametre

r_m : Değirmen iç yüzey yarıçapı, m

r_i : Değirmendeki yükün iç yüzeyinin merkeze olan uzaklığı, m

θ_s : Değirmen yüzeyinde omuz bölgesinin açılmal yer değiştirmesi, radyan

θ_r : Değirmen yüzeyinde topuk bölgesinin açılmal yer değiştirmesi, radyan

θ_{ro} : Boğazdan taşmalı değirmenler için topukta pulp havuzu yüzeyinin açılmal yer değiştirmesi, radyan (izgara çıkışlı değirmenlerde $\theta_{ro} = \theta$ 'dir)

Konik kısımdaki yük hareketi için gerekli teorik güç;

$$P_c = \left[\frac{\pi \times g \times L_d \times N_m}{3(r_m - r_i)} \times [r_m^4 - 4r_m \times r_i^3 + 3r_i^4] \right] \times [\rho_c \times (\sin \theta_s - \sin \theta_r) + \rho_p \times (\sin \theta_r - \sin \theta_{ro})] + \left[\frac{2\pi^3 \times N_m^3 \times L_d \times \rho_c}{5(r_m - r_i)} \times (r_m^5 - 5r_m \times r_i^4 + 4r_i^5) \right] \quad (5)$$

P_c : Konik kısımdaki yük hareketi için gerekli güç, kW

L_d : Değirmen konik kısmının uzunluğu, m

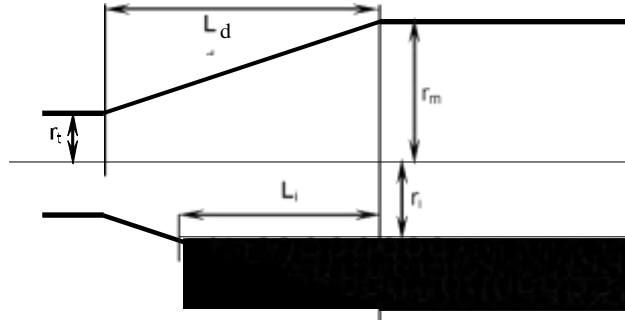
r_i : Değirmen çıkış boğazının yarıçapı, m

Değirmenin yüksüzken çektiği güç;

$$P_y = 1,68D^{2,05} \times [\phi \times (0,667L_d + L)]^{0,82} \quad (6)$$

D : Değirmen iç çapı, m

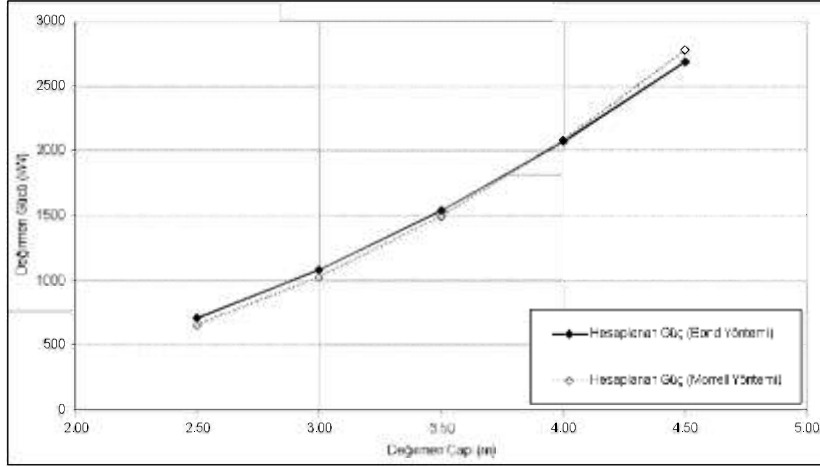
ϕ : Değirmen % kritik hız oranı



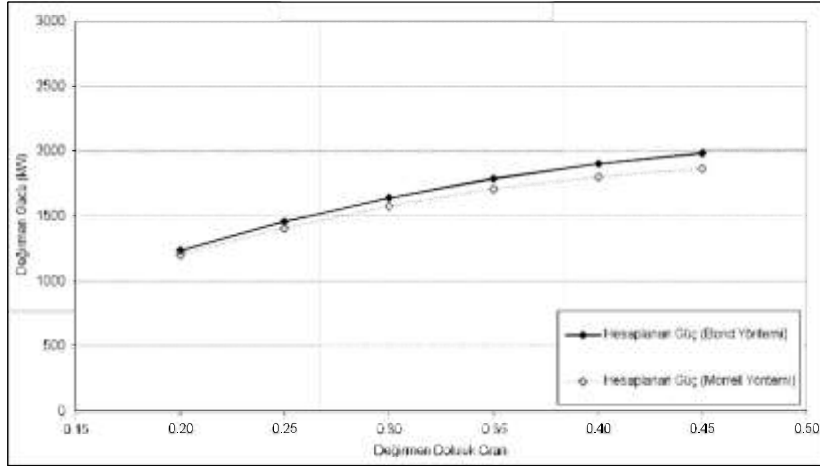
Şekil 1. Morrell (1996) modelindeki yaş sistem bilyalı değirmenin konik kısmının şematik görünümü (Morrell, 1996'dan alınarak düzenlenmiş tir)

Bond (1961) ve Morrell (1996) yaklaşımının her ikisinde de değirmenin çektiği güç büyük oranda değirmen çapı, boyu ve doldurma oranıyla ilişkili olup dönüş hızı, bilya çapı, malzeme ve yük yoğunluğu güç üzerinde daha az etkisi olan değişkenlerdir. Her iki yaklaşımında matematiksel ifadelerinde bulunan bu değişkenlerin hesaplanan güç değerleri üzerindeki etkileri Şekil 2-Şekil 5'te

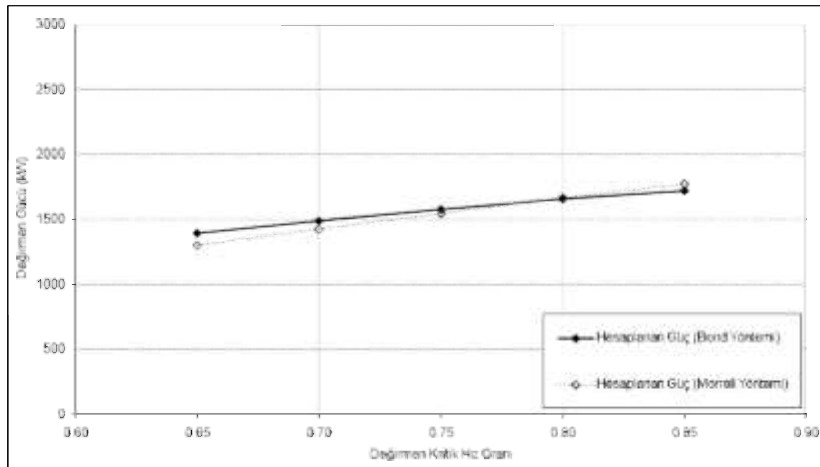
verilmektedir. Değirmen güç hesabı bölümünde detaylı teknik bilgileri verilecek olan 3,5 m çapında, 9,65 m uzunluğunda, %72,89 kritik hız oranına sahip, birinci kamarasında %23,48 ve ikinci kamarasında %30,63 doluluk oranı olan bir kamaralı bilyalı değirmenin verileri kullanılarak bu grafikler elde edilmiştir.



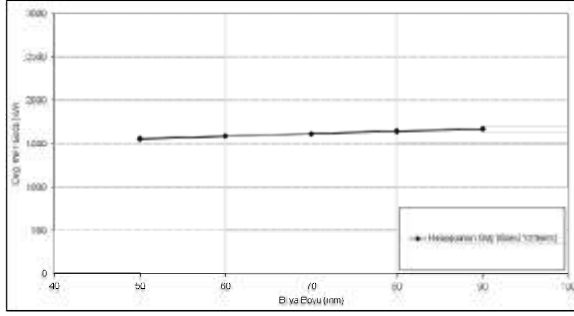
Şekil 2 Bond ve Morrell yaklaşımında değirmenin çekeceği gücün değirmen çapı ile değişimi



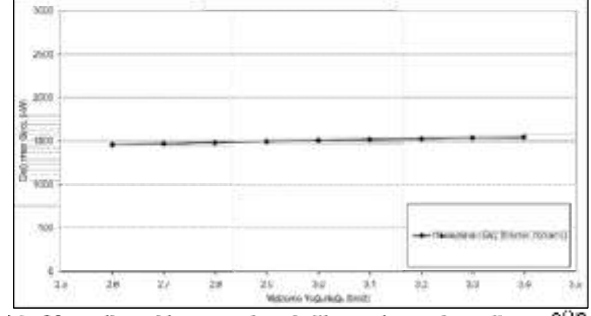
Şekil 3 Bond ve Morrell yaklaşımında değirmenin çekeceği gücün değirmen doluluk oranı ile değişimi



Şekil 4 Bond ve Morrell yaklaşımında değirmenin çekeceği gücün kritik hız oranı ile değişimi



a) Bond yaklaşımında değirmenin çekeceği gücün bilya boyu ile değişimi



b) Morrell yaklaşımında değirmenin çekeceği gücün malzeme yoğunluğu ile değişimi

Şekil 5 Bond ve Morrell yaklaşımında değirmen gücünün bilya boyu ve malzeme yoğunluğu ile değişimi

3 TESİS ÖRNEKLEME VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Klinker öğütme devrelerindeki kamaralı bilyalı değirmenlerde ölçüm ve örnekleme çalışmaları yürütülmüş, gerekli ölçümler alınmış ve teknik bilgiler toplanmıştır. Bu değirmenlere ait tasarım ve işletme değişkenleri Çizelge 1'de verilmektedir.

Değirmenlerdeki doluluk oranı değerlerinin daha doğru bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla değirmen içi ölçümleri alınmıştır. Değirmenler sabit koşullarda çalışırken ani duruş yapılmış ve değirmen içerisindeki yük yüzeyi boyunca, her bir

kamaradan en az 3 farklı noktadan olmak üzere, yatay ve dikey uzunluk ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerle değirmenlerin farklı noktalarındaki yük genişliği (X) ve yük ile değirmen üst iç yüzeyi arasındaki mesafeler (Y) belirlenmiştir. Ayrıca değirmenlerin mevcut koşullarda çektiği güç değerleri kaydedilmiştir.

Öğütülen malzemelerin özgül ağırlığı ve yığın yoğunluğunu belirlemek amacıyla temsili numuneler de alınmıştır. Malzemelerin özgül ağırlığı havalı ve normal piknometreyle, yığın yoğunlukları ise ölçeklendirilmiş mezürle belirlenmiştir.

Çizelge 1. Örnekleme Çalışması Yürütülen Değirmenlerin İşletme ve Tasarım Değişkenleri

İşletme ve Tasarım Değişkenleri		Değer Aralığı	
Değirmen çapı		3,2	
1. ve 2. kamaralar uzunluğu		4,25 / 5,18 10,00	
Değirmen dönüş hızı, dev/dk		14,87 47,34	
Değirmen kritik hız oranım		3,15 71,89 77,02	
1. ve 2. kama		36,20 / 24,00 34,90	
		100,9 / 70,8 233,74	
		100 80 / 60 25	
şarj oranı (bilya+malzeme+boşluk)		29,00	
1. ve 2. kamaradaki bilya tonajı t		34,2	
1. ve 2. kamaradaki maksimum bilya boyu, mm			
ğütülen malzemenin özgül ağırlığı ve yığın yoğunluğu			
Değirmen tasarım güç değeri	t/m ³	2,90	3,10 / 1,54 2,07
	kW	1450 5200	

4 HESAPLAMALAR VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

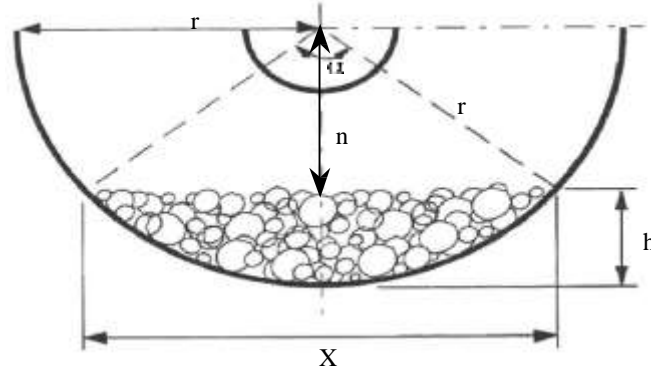
Bu çalışmada yer alan her iki yaklaşımda direk olarak sonuca etki eden ve sonucu büyük oranda değiştiren en önemli değişken doldurma oranıdır. Değirmen hareketi ile birlikte zamanla bilyalarda meydana gelen aşınma kaybı nedeniyle eldeki mevcut bilgilerle değirmenin çalıştığı andaki

doluluk oranını doğru şekilde belirlemek oldukça güç bir işlemdir ve yapılan hesaplamalar yüksek hatalar içerebilir. Bu nedenle, değirmen doluluk oranının değirmen içi ölçümlerinin kullanıldığı farklı hesaplamalarla belirlenerek kontrol edilmesi daha gerçekçi sonuçlara ulaşılmasına yardımcı olacağı için değirmenlerin doluluk oranları farklı eşitliklerle belirlenmiştir.

4.1 Değirmen Doluluk Oranı Hesabı

Farklı araştırmacılar ve firmalar tarafından önerilen değirmen doluluk oranlarının belirlendiği matematiksel ifadeler mevcuttur (Napier-Munn, 1996). Ani duruş sonrası belirlenen X ve Y ölçümleri kullanılarak, bu önerilen matematiksel eşitlikler ve basit geometrik bağıntılar yardımıyla değirmen doluluk oranları hesaplanmıştır.

Geometrik bağıntıların kullanıldığı matematiksel ifade Eşitlik 7, Morrell tarafından önerilen matematiksel bağıntı Eşitlik 8 ve Allis Chalmers firması tarafından önerilen matematiksel bağıntı Eşitlik 9 ile verilmiştir. Ayrıca değirmen içerisindeki toplam bilya tonajının bilinmesi durumunda, Eşitlik 10 ile değirmen doluluk oranı belirlenebilmektedir. Eşitliklerde kullanılan sembollerin gösterimi Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Bir bilyalı değirmenin kesit görünümü ve eşitliklerde kullanılan sembollerin gösterimi

$$\% \text{ doluluk oranı} = \frac{(A_{\alpha} - A_{\beta})}{A_d} \times 100 \quad (7)$$

$$\% \text{ doluluk oranı} = \frac{\left(\frac{h}{6X} \times (3h^2 + 4X^2) \right)}{A_d} \times 100 \quad (8)$$

$$\% \text{ doluluk oranı} = 113 - \left(\frac{Y}{D} \times 126 \right) \quad (9)$$

$$\% \text{ doluluk oranı} = \frac{\left(\frac{10m_d}{6\rho_b} \right)}{A_d \times L} \times 100 \quad (10)$$

- D : Değirmen çapı, m
- L : Kamara uzunluğu, m
- m_d : Her bir kamaradaki toplam bilya tonajı, t
- ρ_b : Bilya yoğunluğu, t/m³
- A_{α} : Taban uzunluğu X ve yüksekliği n olan üçgenin alanı, m²
- A_{β} : α açılı yayın alanı, m²
- A_d : r yarıçaplı dairenin alanı, m²
- h : Yükün yüksekliği, m
- X : Yükün genişliği, m
- Y : Yük ve astar yüzeyi arasındaki mesafe (n+r), m

Bilyalı değirmenlerin birinci ve ikinci kamaralarındaki doluluk oranları yukarıda açıklanan dört farklı şekilde hesaplanmıştır. Örnek bir hesaplama için gerekli veriler Çizelge 2'de, hesaplama sonucunda bulunan değerler ise Çizelge 3'te verilmektedir. Değirmen güç hesaplamalarında kamaralardaki toplam bilya tonajı kullanılarak hesaplanan doluluk oranı değerleri kullanılmıştır. Değirmenlerdeki farklı astar tasarımları ve değirmen giriş kapağının üst pozisyondayken ani duruş işleminin yapılamaması sonucunda değirmene manevra yaptırılırken yükün eğimli bir pozisyon alması nedeniyle değirmen içindeki X ve Y ölçümleri farklılık göstermektedir. Bu durum çok farklı doluluk oranı değerlerinin hesaplanması olarak sonuçlara yansımaktadır. Dolayısıyla daha doğru doluluk oranlarının belirlenebilmesi için bu noktalara dikkat edilmeli ve daha hassas değirmen içi ölçümleri yapılmalıdır.

Çizelge 2. Öğütme Devresindeki Kamaralı Bilyalı Değirmenin Özellikleri

Değirmen yarıçapı, m	1,75
1. ve 2. kamara uzunluğu, m	3,85 - 5,80
1. ve 2. kamaradaki bilya tonajı, t	40,70 - 80,00
Bilya yoğunluğu, t/m ³	7,8
Yük üzerinde ölçülen yatay uzunluk, (X), m	3,15
Yük üzerinde ölçülen dikey uzunluk, (Y), m	2,28

Çizelge 3. Öğütme Devresindeki Değirmen İçin Hesaplanan Doluluk Oran Değerleri

Kullanılan Eşitlik	% Doluluk Oranı	
	1. Kamara	2. Kamara
Geometrik eşitlik (X ölçüm değeri kullanılarak)	23,26	31,40
Geometrik eşitlik (Y ölçüm değeri kullanılarak)	30,91	33,46
Allis Chalmers eşitliği	30,81	33,44
Morrell eşitliği	29,56	33,22
Matematiksel eşitlik (bilya tonajı kullanılarak)	23,48	30,63

Değirmenlerin çektikleri güç değerleri her iki yöntemle ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplama aşamalarını gösteren örnek bir çalışma Bölüm 4.2 ve Bölüm 4.3'te, bu örnek çalışmadaki

hesaplamalar için gerekli malzeme özellikleriyle birlikte işletme ve tasarım değişkenlerini içeren değirmen teknik bilgileri ise Çizelge 4'te verilmektedir.

Çizelge 4. Öğütülen Malzeme ve Değirmen Teknik Bilgileri

Değirmen çapı, m	3,50
1 ve 2 kamara uzunluğu, m	3,85 - 5,80
Değirmen dönüş hızı, dev/dk	16,48
Değirmen % kritik hız oranı	72,89
1. ve 2. kamara % doluluk oranı (bilya+malzeme+boşluk)	23,48 - 30,63
Öğütücü ortam (bilya) yoğunluğu, t/m ³	7,80
Öğütülen malzemenin özgül ağırlığı, t/m ³	2,90
Öğütülen malzemenin yığın yoğunluğu, t/m ³	1,88
Malzeme porosite oranı	0,40

4.2 Bond Yöntemi ile Değirmen Güç Hesabı

Bond yöntemi ile kamaralı bilyalı değirmenin çekeceği gücün hesaplanması iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, her iki kamaradaki bir ton bilyanın çekeceği güç ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Daha sonra, kamaralardaki toplam bilya tonajı kullanılarak değirmenin çekeceği değirmen motorundaki güç belirlenmektedir. Bu örnekteki değirmen çapı 3,3 m'den büyük olduğu için bu faktör de hesaplama işlemlerinde hesaba katılmıştır.

a) 1 ton bilyanın öğütme hareketi için çekilen güç:

Eşitlik 1 kullanılarak birinci kamaradaki 1 ton bilya hareketi için çekilen güç, 13,532 kW ve

ikinci kamaradaki 1 ton bilya hareketi için çekilen güç, 10,937 kW olarak bulunmuştur.

b) Değirmenin çektiği toplam güç:

Değirmenin birinci kamarasında 40,7 ton ve ikinci kamarasında ise 80,0 ton bilya bulunmaktadır. Bu durumda, birinci kamaranın çektiği toplam güç, 550,75 kW, ikinci kamaranın çektiği toplam güç, 874,96 kW ve bu iki kamaranın toplamı olan değirmenin çektiği güç, 1425,71 kW'tir. Bu güç değeri yaş sistem ve boğazdan taşmalı bilyalı değirmenler içindir. Değirmenin ızgara çıkışlı olması ve kuru öğütme yapması durumunda, bulunan değer 1,08 katsayısı ile çarpılmaktadır. Sonuçta bu yöntemle yapılan hesaplama neticesinde bu değirmenin çektiği toplam güç 1539,77 kW olarak belirlenmiştir.

4.3 Morrell Yöntemi ile Değirmen Güç Hesabı

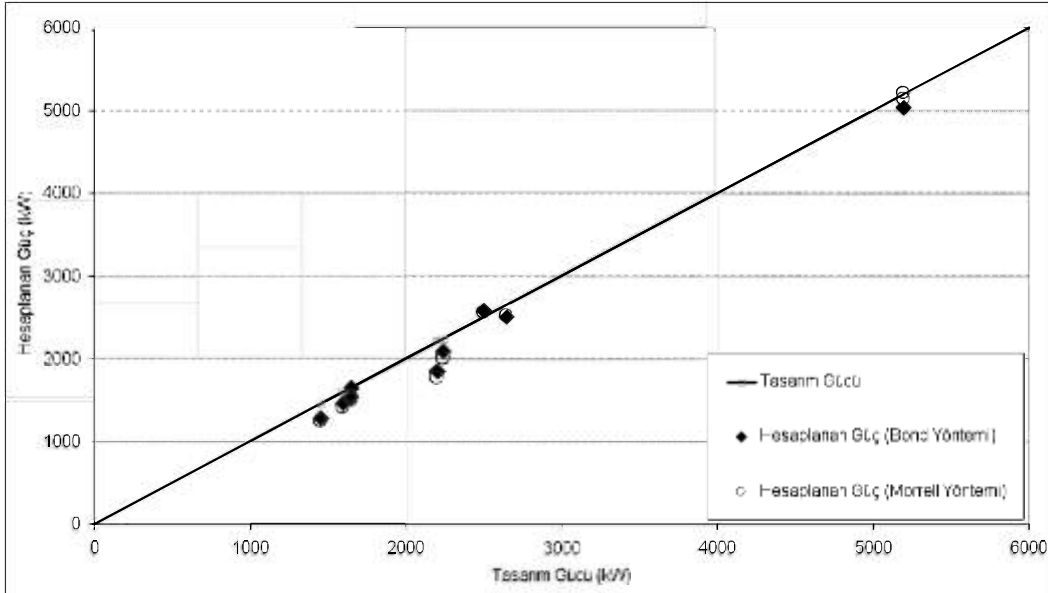
Morrell yaklaşımı ile bu değirmenin çekeceği güç değeri, Eşitlik 3, Eşitlik 4 ve Eşitlik 6 kullanılarak üç aşamada hesaplanmaktadır. Öncelikle kamaralardaki yükün hareketi için gerekli güç belirlenmektedir. Daha sonra, boş haldeki kamaraların hareketi için gerekli güç belirlenmekte ve değirmenin çekeceği toplam güç değerine ulaşılmaktadır.

a) Kamaralardaki yük hareketi için gerekli güç: Eşitlik 4 kullanılarak birinci kamaradaki yük hareketi için gerekli güç, 387,28 kW ve ikinci kamaradaki yük hareketi için gerekli güç, 701,28 kW olarak bulunmuştur.

b) Kamaraların yüksüzken hareketi için gerekli güç: Eşitlik 6 kullanılarak birinci kamaranın yüksüzken hareketi için gerekli güç, 51,06 kW ve ikinci kamaranın yüksüzken hareketi için gerekli güç, 71,46 kW olarak bulunmuştur.

c) Değirmenin çektiği toplam güç: Her iki kamaradaki yük hareketi için gerekli toplam güç, 1088,56 kW ve kamaraların yüksüzken hareketi için gerekli toplam güç, 122,52 kW'tır. Eşitlik 3'ten bu değirmenin çektiği toplam güç değeri 1494,10 kW olarak belirlenmiştir.

Bond ve Morrell yaklaşımı ile değirmenlerin tahmin edilen ve tasarım güç değerlerinin grafiksel olarak sunumu Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 7. Bond ve Morrell yöntemi ile tahmin edilen ve gözlemlenen değirmen güç değerleri

Kuru sistem çalışan kamaralı bilyalı değirmenlerin çektiği gücün belirlenmesine yönelik olarak bu çalışmada tahmin güçleri sınanan her iki yöntemin bir değerlendirilmesi yapıldığında, Şekil 7'de görüldüğü gibi, Bond ve Morrell yaklaşımı kuru sistem kamaralı bilyalı değirmenlerin çektiği güçü tahmin etmede kabul edilebilir sonuçlar vermekte ve güç hesaplamalarında başarıyla kullanılabileceği görülmektedir. Değirmenlerin tasarım ve her iki yaklaşımla hesaplanan güç değerleri Çizelge 5'te verilmektedir. Bond yaklaşımındaki matematiksel ifadeler ampirik,

Morrell yaklaşımındakiler ise fiziksel anlam yüklenmiş eşitlikler olmasına karşın her iki yaklaşımda da sonuç üzerinde en fazla etkisi olan değişkenler benzer değişimler göstermekte ve her iki yöntemle de birbirine yakın güç tahminleri yapılmaktadır.

Bilyalı değirmenlerin çektiği güç, değirmen çapı, boyu, dönüş hızı, malzeme yoğunluğu, bilya yoğunluğu ve doldurma oranının bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Bilyalı değirmenlerde harcanan enerjinin büyük kısmı öğütücü ortam

ve malzemeden oluşan yükün hareketinde harcadığı için şarj oranı değirmen güç çekimini etkileyen en önemli işletme değişkenidir.

Her iki yaklaşımla belirlenen güç değerleri ile tasarım güç değerleri arasındaki farklılığın, değirmenlerin doluluk oranlarının duyarlı olarak belirlenememesinden dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir. Değirmen iç yüzeyindeki astar yapısı ve ani duruşla birlikte yük yüzeyinde oluşan düzensizlik nedeniyle değirmen içi ölçümlerinde farklı sayısal değerler elde edilmesi ayrıca zamanla değişen tasarım bilya tonajlarının kayıt altında tutulmaması nedeniyle Çizelge 3'te de görüldüğü gibi farklı doluluk oranı sonuçları bulunmaktadır. Bu durumda güç tahmininde sapmalara neden olmaktadır.

Bond yaklaşımında istenilen öğütme koşullarını sağlayacak değirmenin boyutlandırılması bu işlem için gerekli değirmenin gücü belirlendikten sonra yapılmaktadır. Dolayısıyla değirmenin çekeceği gücün yeterli duyarlılıkta belirlenebilmesi durumunda daha doğru değirmen boyutlandırma işlemi gerçekleştirilebilecektir.

Kuru sistem çalışan bilyalı değirmenlerin modellenmesi ve simülasyonu çalışmalarında başarıyla kullanılan Austin (1974) mükemmel karışım modelinde belirlenen kırılma hızı parametresine tasarım ve işlem değişkenlerinin etkisi Eşitlik 11'de verilen matematiksel ifade (Napier-Munn vd, 1996) yardımıyla yansıtılmakta ve aynı zamanda ölçek büyütme işlemi de gerçekleştirilebilmektedir (Erdem, 2002). Morrell

yaklaşımı mükemmel karışım modeliyle birlikte kullanılarak simülasyon çalışmalarında belirlenen yeni işletme ve tasarım koşulları için değirmen gücündeki değişim hesaplanabilir. Ayrıca özgül enerji tüketimindeki değişim belirlenebilir, belirlenen yeni koşulların devreye uygulanabilirliği kontrol edilebilir ve bu değişikliklerin öğütme devresine olan maliyeti daha doğru bir şekilde ortaya konulabilir.

$$\frac{d_{\text{yeni}}}{d_{\text{eski}}} = \left(\frac{D_{\text{yeni}}}{D_{\text{eski}}} \right)^{0.5} \times \left(\frac{1-LF_{\text{yeni}}}{1-LF_{\text{eski}}} \right) \times \left(\frac{LF_{\text{yeni}}}{LF_{\text{eski}}} \right) \times \left(\frac{CS_{\text{yeni}}}{CS_{\text{eski}}} \right) \times \left(\frac{WI_{\text{yeni}}}{WI_{\text{eski}}} \right)^{1.8} \quad (11)$$

r/d : Kırılma hızı parametresi

D : Değirmen çapı, m

LF : Değirmen % şarj oranı

Cs : Değirmen % kritik hız oranı

WI : İş indeksi değeri, kWs/t

Çimento fabrikalarında klinker ve hammadde öğütmede kullanılan kamaralı bilyalı değirmenlerde akışkan ortamın hava olması, tasarım farklılıklarından kaynaklanan bir takım fiziksel kısıtlamalar ve malzemelerin fiziksel değişkenliği nedeniyle bu değirmenlerde güç hesaplanması konusunda yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Yürütülen çalışmalar da genelde belirli bir amaç doğrultusunda yapıldığından ve laboratuvar ölçekli değirmen verilerine dayandığı için genel bir uygulama alanı bulamamıştır. Sonuçta, kuru sistem çalışan kamaralı bilyalı değirmenlerin güç değerleri, Morrell ve Bond yaklaşımı ile doğrudan hesaplanabilir ve işlem değişkenleri ile devredeki özgül enerji tüketimindeki değişim belirlenebilir.

Çizelge 5. Değirmenlerin Tasarım ve Hesaplanan Güç Değerleri

Değirmen	Tasarım Gücü (kW)	Hesaplanan Güç (kW)		% Hata Değeri	
		Bond Yöntemi	Morrell Yöntemi	Bond Yöntemi	Morrell Yöntemi
A	1650	1652	1537	+0.1	6.8 B
	2200	1851	1780	15.8	19.1
c	1650	1652	1550	+0.1	6.0 D
	2500	2583	2550	+3.3	+2.0 E
	5200	5034	5127	3.2	1.4 F
	1650	1652	1550	+0.1	6.0
G	5200	5034	5206	3.2	+0.1 H
	1455	1284	1248	11.7	14.2
	1650	1540	1494	6.7	9.4 J
	1600	1464	1403	8.5	12.3
	2240	2091	2001	6.7	10.7
L	5200	5034	5213	3.2	+0.2
M	2650	2497	2513	5.8	5.2

5 SONUÇLAR

Bond (1961) ve Morrell (1996) yaklaşımlarının kuru sistem çalışan karnaralı bilyalı değirmenlerin çektiği gücün hesaplanmasında başarıyla kullanılabileceği görülmektedir.

Her iki yaklaşımda da değirmen çapı, değirmen boyu ve doldurma oranı karnaralı bilyalı değirmenlerin çektiği güç üzerinde büyük oranda etkili olan ve sonuç üzerinde önemli değişiklikler yapan değişkenlerdir.

Bond yaklaşımıyla kuru sistem çalışan karnaralı bilyalı değirmenin çekeceği gücün yeterli duyarlılıkla belirlenebilmesi durumunda daha doğru değirmen boyutlandırma işlemi gerçekleştirilebilir. Morrell yaklaşımı ise mükemmel karışım modeliyle birlikte kullanıldığında ölçek büyütme ve simülasyon çalışmalarında değirmen gücü önceden tahmin edilebilir ve devredeki özgül enerji tüketimindeki değişim hesaplanabilir.

Kuru sistem karnaralı bilyalı değirmenlerin çektiği gücün hesaplanmasında bu yaklaşımların geliştirilip geliştirilebilmesi için daha çok sayıda veriyle sınanması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Anon(a), 2008; "U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2008" <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2008-cemen.pdf>, 2008.

Austin, L. G., Klimpel, R. R., Luckie, P. T. and Rogers, R. S. C., 1982; "Simulation of Grinding Circuits for Design, Design and Installation of Comminution Circuits", AIME Ine, New Jersey, Editor; Mular, A. L., Jergensen, G. V., Chapter 19, 301-324.

Austin, L. G., Klimpel, R. R. and Luckie, P. T., 1984; Process Engineering of Size Reduction: Bali Milling, AIME Ine, New York, 561.

Bond, F. C., 1952, The Third Theory of Comminution, Transaction AIME, 193, 484-494.

Bond, F. C., 1961; "Crushing and Grinding Calculations, Part 1", British Chemical Engineering, 6(6), 378-385.

Bond, F. C., 1961; "Crushing and Grinding Calculations,

Part II", British Chemical Engineering, 6(8), 543-548.

Duda, W H., 1985; Cement Data Book 1 and 2, Bauverlag GmbH-Weisbaden und Berlin.

Erdem, A. S., 2002; "Modelleme Yardımıyla Karnaralı Bilyalı Değirmen Tasarımı ve Tane Boyu Dağılımlarının Belirlenmesi", Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Yüksek Lisans Tezi, 223s.

Fujimoto, S., 1993; "Reducing Specific Power Usage in Cement Plant", World Cement, No. 7, 25-35.

Gouda, G. R., 1981; "Technical Aspects of Comminution in the Cement Industry", World CementTechnology, April 1981, 112-122.

Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., Kojovic, T., 1996; "Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation", Editor; Napier-Munn, T. J, 1-413.

Man, Y. T., 2000; "A Model-Based Procedure for Scale-Up of Wet, Overflow Bali Mills", Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre Department of Mining, Minerals and Materials Engineering, Degree of Doctor of Philosophy, The University of Queensland, February 2000.

Morrell, S., 1992; "Prediction of Grinding-Mill Power", Transeation of IMM, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 101, 25-32.

Morrell, S., 1996; "Power Draw of Wet Tumbling Mills and Its Relationship to Charge Dynamics, Part 1: A Continuum Approach to Mathematical Modelling of Mill Power Draw", Transeation of IMM, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 105, 43-53.

Morrell, S., Man, Y. T., 1997; "Using Modelling and Simulation for the Design of Full Scale Bali Mill Circuits", Minerals Engineering, 10(12), 1311-1327.

Norholm A., 1995; "Notes on Energy Conservation", FL Smidth and Co. Seminar, September 1995, Istanbul, Turkey.

Rowland, C. A., Kjos, D. M., 1980, "Rod and Bali Mills", Mineral Processing Plant Design, 2nd Edition, Editors; Mular, A. L., Roshan, B. B., AIME Ine, New York, Chapter 12, 239-277.

Rowland, C. A. 1985; "Bali Mills", SME Mineral Processing Handbook, AIME Ine, New York, Editor; Weiss, N. L., Section 3C.

Zhang Y. M., Napier-Munn T. J., Kavetsky A., 1988; "Application of Comminution and Classification Modelling to Grinding of Cement Clinker", Transactions of IMM, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 97, 207-214.

İŞLETİLEMİYEN KÖMÜR DAMARLARINDA KARBONDİOKSİTİN DEPOLANMASI

Carbon Dioxide Storage at Unminable Coal Seams

Geliş (received) 28 Ağustos (August) 2009; Kabul (accepted) 29 Ekim (Octoberber) 2009

Gökhan AYDIN (*)
İzzet KARAKURT (**)
Kerim AYDINER (***)

ÖZET

Endüstrileşme ve artan nüfus günümüzde bir sera gazı olan karbondioksitin atmosferdeki oranının yüksek seviyelere ulaşmasına neden olmaktadır. Tahminler gelecekte de artmasını öngörmektedir. Karbondioksitin küresel ısınma üzerindeki etkisinin azaltılabilmesi ve fosil yakıtların çevreye dost bir şekilde kullanılabilmesi karbondioksitin çeşitli ortamlarda depolanabilmesi ile mümkün olabilecektir. Bu alanlar petrol ve gaz sahaları, işletilemeyen kömür damarları, akiferler ve okyanuslardan oluşmaktadır. Baca gazları, çoğunlukla düşük oranlarda karbondioksit içeren bir atık gaz olarak açığa çıkmaktadır. Baca gazı içeriğindeki karbondioksit yanma öncesinde ve yanma sonrasında çeşitli teknolojiler kullanılarak tutulabilmektedir. Elde edilen karbondioksit tanklar, boru hatları ve gemiler kullanılarak depolama sahasına ulaştırılabilmektedir.

Bazı kömür damarları çok derinlerde olmalarından ya da ince damarlar halinde bulunmalarından dolayı işletilememektedirler. Bu kömür damarlarına enjekte edilen karbondioksit kömür matrisinde adsorbe edilmiş olarak bulunan metanla yerdeğiştirilerek depolanmakta ve metanın üretilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada karbondioksitin işletilemeyen kömür damarlarında depolanması uygulaması tartışılmaktadır. Bu bağlamda kömürde karbondioksit depolama mekanizması, depolamada etkin rol oynayan kömür özellikleri, depolama maliyeti ve emniyeti değerlendirilmiş ve uygulama diğer depolama seçenekleriyle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Sera gazı, Karbondioksit Depolama, Kömür, Seçimli Adsorpsiyon, Desorpsiyon

ABSTRACT

Industrialization and increasing population have nowadays resulted in higher levels of concentration of CO₂, a greenhouse gas, in the atmosphere. Estimations anticipated that the concentration of CO₂ will keep increasing in the future. Being able to decrease the effect of CO₂ on global warming and to use fossil fuels in an environmentally friendly way can be possible with the storage of CO₂ at various media. These media consist of oil and gas basins, unminable coal seams, aquifers and oceans. Flue gases are released often as waste gases containing low concentrations of CO₂. Carbon dioxide in flue gas could be captured using various technologies in pre- and post-combustion stages. Captured CO₂ can be transported to the storage field by pipelines, tanks and ships.

Some coal seams can not be mined because of being very thin and too deep. CO₂, injected into these coal seams, is stored by replacing the methane absorbed in the coal matrix and provides methane production. In this study, the storage of carbon dioxide in unminable coal seams is discussed. In this sense, carbon dioxide storage mechanisms in coal, coal properties controlling the storage behavior, storage cost and safety are considered and the application is compared with other storage options.

Keywords: Greenhouse Gas, Carbon Dioxide Storage, Coal, Selective Adsorption, Desorption

(*) Arş. Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh., Böl., TRABZON, gaydin@ktu.edu.tr

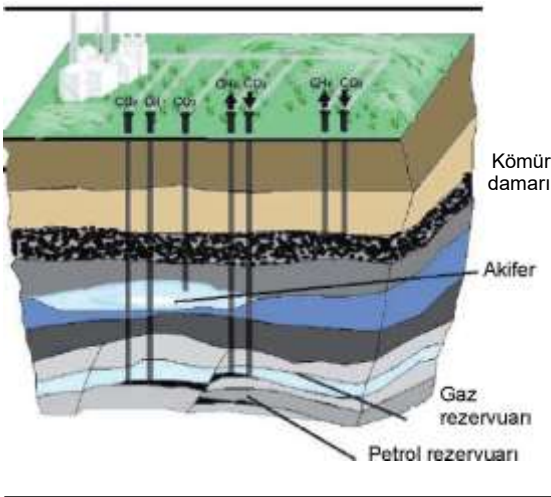
(**) Arş. Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh., Böl., TRABZON

(***) Yard.Doç.Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh., Böl., TRABZON

1. GİRİŞ

Tahminler dünya enerji ihtiyacının gelecek uzun yıllarda da önemli oranda fosil yakıtlara dayanacağını göstermektedir. Ancak fosil yakıtların kullanımı atmosferdeki karbondioksit oranını artırmaktadır. Bir sera gazı olan karbondioksitin sera etkisi %50 olarak tahmin edilmektedir (Benson, 2009). Küresel ısınmaya katkıda bulunan diğer gazlar nitrik oksit, Kloroflorokarbonlar (CFCs), metan ve ozondur. Fosil yakıtlar karbondioksit üretiminin % 73'ünden sorumludur. Diğer büyük kaynak ise ormansızlaştırmadır (%25) (Wildenborg ve Lokhorst, 2005). Geçen yüzyıllardan bu yana atmosferdeki karbondioksit oranı sürekli bir şekilde artmıştır. Sanayi öncesi dönemde oranı 280 ppm olan gaz günümüzde 370 ppm'e kadar yükselmiştir. Bu gün 20 milyon tonun üzerinde karbondioksit yıllık olarak atmosfere salınmaktadır (Bachu, 2008; Benson, 2009).

Atmosfere karışan CO₂ konsantrasyonun azaltılması/önlenmesi bir öncelik durumundadır. Bu amaçla üretilen ve atmosfere karışacak CO₂ 'in kaynağında ya da atmosferden tutulması ve bir depolama ortamında depolanması gereklidir. Bu ortamlar petrol ve gaz sahaları, işletilemeyen kömür damarları, akiferler gibi jeolojik formasyonlar ile okyanuslardan oluşmaktadır. Bu bağlamda karbondioksit emisyonlarını yutan bir rezervuar tipinin bulunması, fosil yakıtların çevreye zarar vermeden güvenli şekilde kullanımı konusundaki umutları artırmaktadır.



Şekil 1. CO₂ depolama seçenekleri (Anon, 2009).

Aşağıda depolama seçenekleri hakkında kısa bilgiler sunulmuştur.

Petrol ve doğal gaz sahaları: Petrol ve doğal gaz sahalarında karbondioksitin iki değişik şekilde depolanması söz konusudur. Bunlardan ilki üretimin sona erdiği veya sona ermek üzere olduğu rezervuarlarda karbondioksitin depolanması diğeri ise tükenmiş petrol ve doğal gaz sahalarında karbondioksitin depolanmasıdır. Geleneksel petrol üretim yönteminde yapılan sondajlarla petrol içeren tabakaya girilmekte ve sondaj kuyusunun boşluğuna akan petrol pompalanarak yeryüzüne çıkarılmaktadır. Ancak, bu yöntemle petrolün belli bir kısmı üretilebilmektedir. Yapılacak CO₂ enjeksiyonu, rezervde kalan petrol ya da gazın bir miktarının daha üretilmesini sağlamaktadır. Rezervuara enjekte edilen karbondioksit ham petrol ile karışarak petrolün vizkozitesini azaltmakta ve petrolü hareketlendirmektedir. Gaz aynı zamanda rezervuar basıncının sürekli tutulmasını ya da artırımını da sağlamaktadır. Artan basıncın etkisiyle formasyonda bulunan petrol üretim kuyularına yönlendirilerek üretilebilmektedir. Üretim sonrasında rezervuar içerisinde belirli bir kısmı depolanabilmektedir. Kalan miktar ise üretim kuyusundan emilerek tekrar rezervuar içerisine gönderilmekte ve sistem bu şekilde devam ettirilmektedir. (Meer, 2005; Ravagnani vd, 2009)

İşletilemeyen yeraltı kömür damarları: Bazı durumlarda çok derinlerde yerleşmiş ya da ince damarların üretimi teknolojik olarak mümkün olamaz. Bu damarlar CO₂ 'nin depolanması için bir seçenek olmaktadır. Bu damarlara enjekte edilen CO₂ kömür matrisinde adsorbe edilmiş olarak bulunan metanla yer değiştirerek karbondioksitin depolanmasını ve metanın üretilmesini sağlar (Shi ve Durucan, 2005b; Zarrouk ve Moore, 2009).

Akiferler: Akiferler, içerisinde endüstri ya da tarımsal faaliyetlerin kullanımına uygun olmayan çözünmüş bileşenler bulunan ve önemli miktarlarda su iletimini sağlamak için yeterli gözenekli ve geçirgenliği olan jeolojik formasyonlardır. Akiferler, tuzlu su ya da formasyon suyu olarak da adlandırılabilirler (Meer, 2005). Kuyu vasıtasıyla akifere enjekte edilen CO₂ formasyon suyundan daha az yoğunluk ve viskoziteye sahip olduğundan değişen basıncın da etkisiyle kuyudan uzaklaşarak akifer içerisine

yayılır (Nordbotten vd, 2005; Zhang, 2009; Qi, 2009).

Okyanuslar: Bir diğer depolama alternatifi; tutulan karbondioksitin doğrudan derin okyanuslarda 1000 metrenin üzerinde derinliklere basılmasıdır. Karbondioksit su sütununun altına veya deniz tabanına enjekte edilerek depolanabilmektedir. Eriyen veya dağılan karbondioksit, global karbondioksit çevriminin bir parçası haline gelir (Herzog, 2009).

Bu çalışmada, işletilemeyen kömür damarlarında karbondioksitin depolanması yöntemi tartışılmaktadır. Depolanma mekanizması, depolama maliyeti, kömür damarına gazın enjeksiyonu, depolamada etkin rol oynayan kömür özellikleri ve depolama güvenliği faktörleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, uygulamanın alternatif yöntemlerle bir karşılaştırması da yapılmıştır.

2. KARBONDİOKSİTİN TUTULMASI

Baca gazları, çoğunlukla yüksek oranlarda nitrojen ve düşük oranlarda (% 5-15) karbondioksit içeren bir atık gaz olarak termik santrallerden ve diğer yanma kaynaklarından açığa çıkmaktadır. Baca gazı içerisindeki karbondioksitin yeraltında depolanabilmesi için diğer gazlardan arındırılması gerekmektedir. Baca gazındaki karbondioksitin oranının düşük olmasından dolayı (Çizelge 1) ayrıştırma işlemi oldukça pahalıdır ve büyük çaplı yüzey tesislerine ve fazla miktarlarda enerjiye ihtiyaç duyar (Benson, 2009). Karbondioksit tutmanın amacı, yüksek basınçta ve yüksek konsantrasyonda bir karbondioksit akışı elde etmektir.

Çizelge 1 çeşitli kaynaklardan açığa çıkan baca gazlarının içerdiği karbondioksit miktarlarını, baca gazının basıncını ve karbondioksitin kısmi basıncını içermektedir. Karbondioksit tutmada baca gazı içerisindeki karbondioksitin kısmi basıncı en az konsantrasyonu kadar önemlidir. Karbondioksitin kısmi basıncı tutma yöntemi seçiminde en etkin parametredir. Ek olarak baca gazı içerisindeki karbondioksitin kısmi basıncının düşük olması maliyetleri arttırmakta ve işlemlerin daha da karmaşık olmasına yol açmaktadır (Dooley vd., 2006; IPCC, 2001 ; IEA, 2004).

Fosil yakıt ve biyokütle kullanılmasına bağlı olarak açığa çıkan karbondioksit emisyonlarının tutulmasında kullanılan temel sistemler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

2.1 Yanma öncesi karbondioksitin tutulması

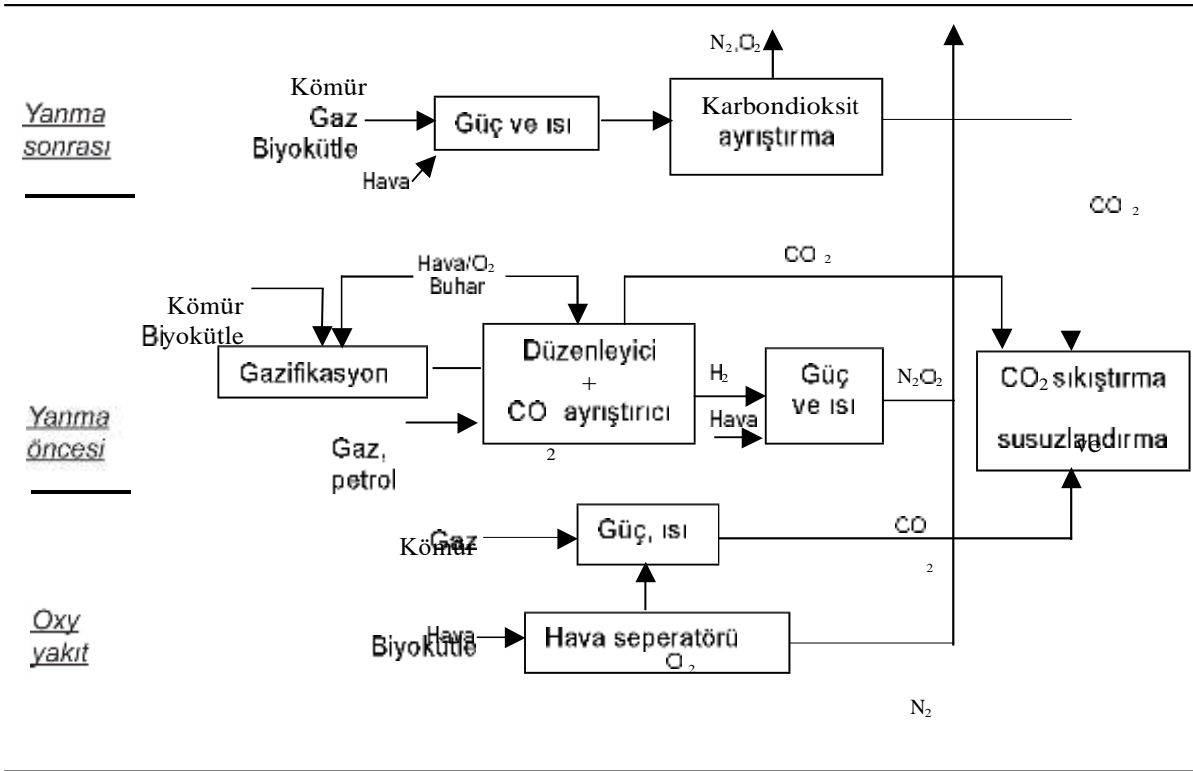
Bu proseste yakıt bir reaktör içerisinde buhar, hava veya oksijenle işleme tabi tutulmakta ve büyük ölçüde hidrojen ve karbon monoksitten oluşan bir karışım (sentetik gaz) elde edilmektedir. Bir başka reaktörde ise karbonmonoksit, buharla reaksiyona sokularak ilave hidrojenle birlikte karbondioksit elde edilmektedir. Bu karışımda hidrojen ve karbondioksit ayrıştırılmaktadır (Başaran, 2006).

2.2 Yanma sonrası karbondioksitin tutulması

Fosil yakıtların ve biyokütlelerin yakılması sonucu açığa çıkan baca gazından karbondioksitin ayrıştırılması işlemidir. Yöntemde ana öğesi azot olan baca gazından sıvı bir solvent kullanarak karbondioksitin belli bir yüzdesi ayrıştırılmaktadır (IEA, 2004; Gibbins ve Chalmers, 2008).

Çizelge 1. Çeşitli Kaynaklara Bağlı Olarak Açığa Çıkan Baca Gazlarının özellikleri (IPCC, 2006)

	O ₂ Kaynağı	O ₂ kons. % V (kuru)	Basınç MPa	O ₂ nin P _{kisim} MPa
Güç istasyonları	Doğal gaz yakan kazanlar	7 10	0,1	0,007 0,010
	Gaz türbünleri	3 4	0,1	0,003 0,004
	Petrol yakan kazanlar	11 13	0,1	0,011 0,013
	Kömür yakan kazanlar	12 14	0,1	0,012 0,014
	Yanma sonrası	12 14	0,1	0,012 0,014
- Rafinerileri ve petrokimya tesisleri		8	0,1	0,008
Yüksek fırın	Yanma öncesi	20	0,2 0,3	0,040 0,060
	Yanma sonrası	27	0,1	0,027
Çimento fırınları		14 33	0,1	0,014 0,033
	Zenginleştirme sonrasında sentetik gaz	8 20	2 7	0,16 1,4



Şekil 2. Karbondiyoksit tutma sistem ve süreçlerine genel bir bakış (IPCC, 2001).

Çizelge 2. Karbondiyoksit Tutmada Kullanılan Yöntemlerin Karşılaştırılması (Benson, 2009)

Teknoloji	Avantajlar	Dezavantajlar
Yanma sonrası	<ul style="list-style-type: none"> • Diğer uygulamalar için gelişmiş teknoloji (Ör.: doğal gazdan karbondiyoksitin ayrıştırılması) • Var olan güç üretim kapasitelerinin standart uyarlanması • İlave gelişimler ve teknolojik yenilikler ile maliyetin düşürülmesi mümkün 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek enerji kullanım cezası (-30%) • Yüksek maliyet
Yanma öncesi	<ul style="list-style-type: none"> • Yanma sonrası tutmaya göre daha düşük maliyetler • Yanma sonrası tutmaya kıyasla daha düşük enerji cezaları/yaptırımları • CO₂'nin yüksek basıncı sıkıştırma maliyetlerini azaltır • Ulaşım sektörü için H₂ üretimi ile kombine • İlave gelişimler ve teknolojik yenilikler ile maliyetin düşürülmesi mümkün 	<ul style="list-style-type: none"> • Gazlaştırma için karmaşık kimyasal süreçler gerekir • Mevcut kapasitelerin güçlendirilmesi ihtiyacı • Mevcut kapasitelerin kullanımı için yüksek yatırım maliyetleri
Oxy yakıt	<ul style="list-style-type: none"> • Kompleks yanma sonrası ayrıştırma için ihtiyaçlardan sakınır • Potansiyel olarak yüksek üretim verimi • İlave gelişimler ve teknolojik yenilikler ile maliyetin düşürülmesi mümkün 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimum performans için yeni yüksek ısılı materyallere ihtiyaç duyulur • Yerinde oksijen ayırma ünitesine ihtiyaç duyulur • Mevcut kapasitelerin güçlendirilmesi ihtiyacı

2.3 Oksijenle yakma (Oxy yakıt sistemleri)

Bu yöntemde yakıt hava yerine oksijenle yakılmaktadır. Dolayısıyla baca gazı da su buharı ve karbondioksitten oluşmaktadır. Açığa çıkan baca gazındaki karbondioksit konsantrasyonu oldukça yüksektir (hacimsel olarak %80'lere ulaşır). Bacadan çıkan bu gaz soğutulularak sıkıştırılmakta ve su buharından ayrıştırılmaktadır. (IEA, 2004; Reynen, 2008; Gibbins ve Chalmers, 2008). Şekil 2 tanımlanan proseslerin akım şemasını göstermektedir. Çizelge 2'de ise prosesler değişik parametreler bakımından karşılaştırılmıştır.

3. NAKLİYE

Karbondioksit üretilen tesisin depolanma sahasına uzak olması durumunda depolanma için taşınması gerekmektedir. Karbondioksit katı, sıvı ve gaz olarak taşınabilmektedir. Ticari ölçekli taşımalarda tanklar, boru hatları ve gemiler kullanılmaktadır.

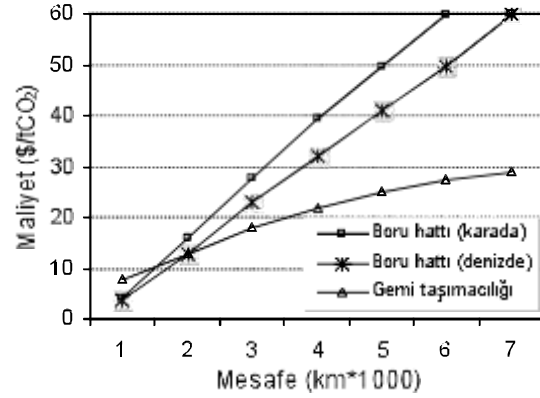
Atmosfer basıncına yakın basınçlarda taşınan karbondioksit büyük hacimleri işgal etmekte ve geniş çaplı donanımlara ihtiyaç duymaktadır (Hoff, 2009). Karbondioksitin hacmi sıvılaştırma, katılaştırma ya da hidratasyonla azaltılabilmektedir. Sıvılaştırma, gazların nakliyesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Mevcut teknoloji ve deneyimler sıvılaştırılmış karbondioksitin nakliyesinde de kullanılabilir. Katılaştırma ise diğer seçeneklerle kıyaslandığı zaman daha fazla enerjiye ihtiyaç duymaktadır.

Nakliye yönteminin seçiminde en önemli parametre gazın kaynağıyla depolama bölgesi arasındaki mesafenin uzunluğudur. Şekil 3 taşıma mesafesine bağlı olarak farklı taşıma seçeneklerinin maliyetlerinde meydana gelen değişimleri göstermektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi kısa mesafeler için boru hattı uzun mesafeler için ise (yaklaşık > 2000km) gemi taşımacılığı daha ekonomik olmaktadır.

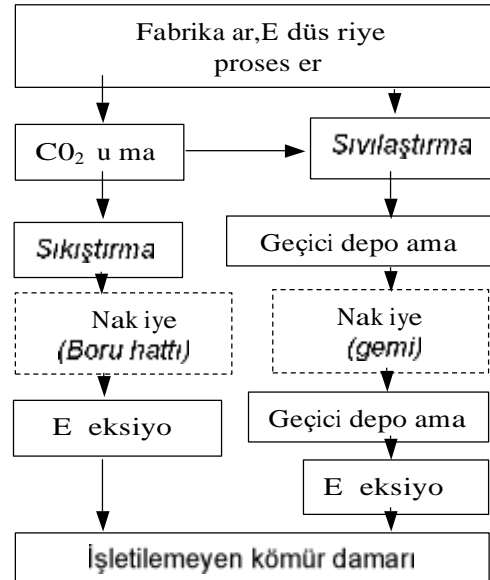
Şekil 4'te boru hattı ve gemi taşımacılığında gerek duyulan işlemler belirtilmektedir. Boru ile nakilde gaz sıkıştırmaya gemi ile nakilde ise sıvılaştırmaya ihtiyaç duymaktadır.

Karbondioksit karada sürekli olarak tutulur

ancak gemi taşımacılığı aşaması ayrıdır ve dolayısıyla bir deniz taşımacılık sistemi karada geçici depolama ve bir yükleme işlemi gerektirir. Kapasite, servis hızı, gemi sayısı ve gemicilik programı CO₂ tutum oranı, nakil uzaklığı, sosyal ve teknik kısıtlamalar göz önüne alınarak planlanır.



Şekil 3. Mesafeye bağlı olarak farklı taşıma seçeneklerinin maliyetlerindeki değişim (IPCC, 2001).



Şekil 4. Karbondioksit tutma ve depolama aşamaları (IPCC, 2006).

Çizelge 3. Gemi ve Boru Hattı ile Nakliyenin Karşılaştırılması (Renn e, 2008).

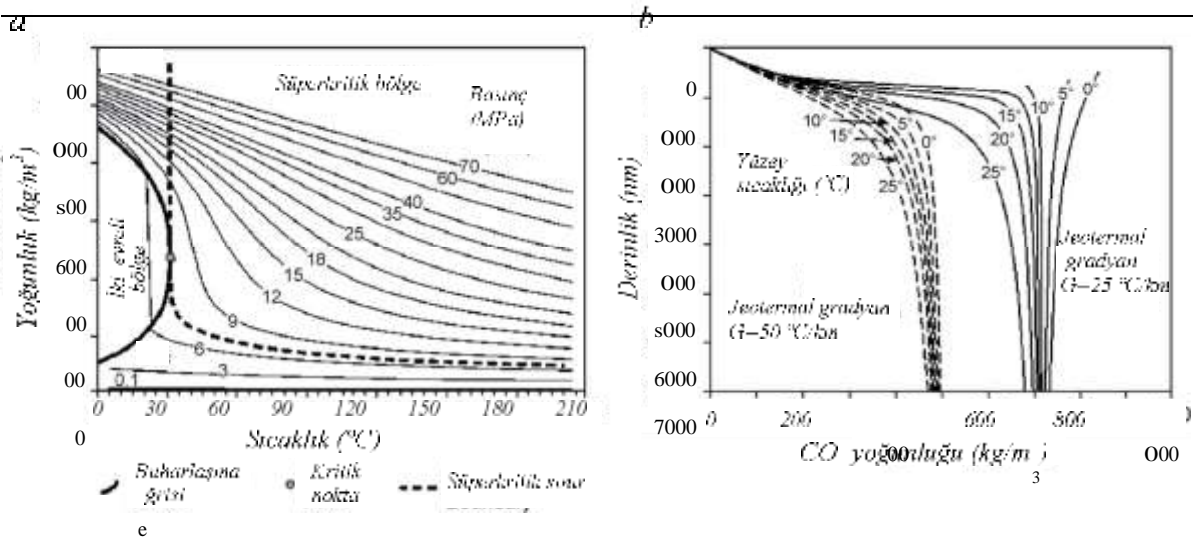
Gemi taşımacılığı	Boru hattı
<p>Yüksek ilk yatırım maliyeti</p> <ul style="list-style-type: none"> Yüksek iş Düşük işletme maliyeti 10 yıllık taahhütlerle gerçekleşen rekabetin yüksek olduğu taşımacılık sektörü için önemli bir maldır. Karlılığın yüksek oluşu seçilebilirliği artırır Aktarmalı taşımada ara depolama veya yük miktarlarında taşıma kısıtlayıcıdır Esnek fakat dağıtımda geçici depolama alanlarına ihtiyaç duyulur 	<p>Yüksek ilk yatırım maliyeti</p> <ul style="list-style-type: none"> Düşük işletme maliyeti 10-15 yıllık tesis ömürleri İhtiyaç ve amaçlara uygun tesis tasarımı Bespoke, improved by networking İş kurma/tesis süreci Kısıtlı kapasite değişimi Kayaak ve depolama alanı arasında sabit Yüksek güvenilirlik

Çizelge 3'te gemi ve boru hattı nakliyesi karşılaştırılmıştır. Gemi taşımacılığında ilk yatırım maliyetleri düşük olmasına rağmen işletme maliyetleri yüksektir.

4. KARBONDİOKSİTİN KÖMÜRDE DEPOLANMASI

Çok derinde yerleşmiş ya da ince olmaları nedeniyle üretilemeyen kömür damarları karbondioksitin depolanması için uygundur. Karbondioksit kömür damarlarında süperkritik bir sıvı olarak depolanabilir. Bu evrede sıvı ve gaz arasında ayırım yapılamaz.

Karbondioksit bulunduğu kabın şeklini alan ve sıkıştırılabilen bir sıvı olarak davranır (yoğunluğu ise sıvı yoğunluğuna sahiptir). Şekil 5a farklı basınçlarda karbondioksit yoğunluğunun sıcaklığa bağlı olarak değişimini göstermektedir. Şekil 5b ise karbondioksit yoğunluğunun derinliğe bağlı olarak değişimini ifade etmektedir. Grafikten görüleceği gibi yaklaşık 800-850 m derinliklerde karbondioksit maksimum yoğunluğuna ulaşmaktadır. Yani bu evrede karbondioksit süperkritik bir sıvıdır (Meer, 2005). Bu derinliğin üzerinde ise karbondioksit bir gazdır ve yoğunluğu ekonomik olarak depolanamayacak kadar düşüktür.



Şekil 5. Sıcaklık ve derinliğe bağlı olarak karbondioksitin yoğunluğunun değişmesi (Bachu, 2008)

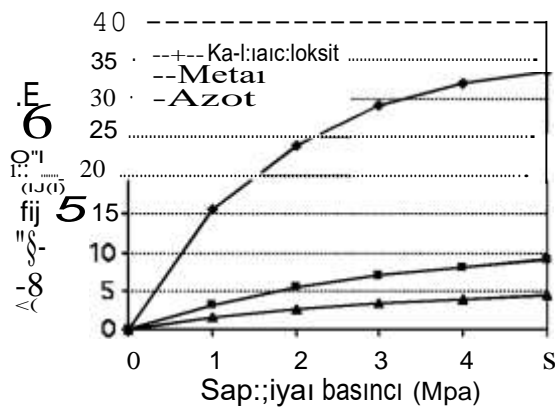
4.1 Depolama Mekanizması

Kömürün kolloidal yapısı kömürün hacminin 1-40 katı kadar metan gazını içinde tutmasına olanak sağlar (Dallege ve Barker, 1999). Yeraltında kömür ve beraberindeki metan basınç altında bir denge durumundadır. Bu basıncın miktarı kömürleşme derecesi (rank), damar derinliği ve kömürün gözenekliliği ile bağlantılıdır. Kömür damarları içerisinde depolanmış olan metan;

- i. çatlaklarda, kırıklarda ve gözenek içinde serbest gaz olarak,
- ii. çatlaklarda ve gözeneklerde kömür yüzeyine tutunmuş olarak ve
- iii. su içerisinde çözülmüş olarak bulunur.

Kömürde oluşan gaz önce adsorpsiyon yoluyla tutulur. Adsorplama kapasitesinin üzerine çıktığı durumlarda, gaz, formasyon suyu içerisinde çözünür ve/veya serbest gaz olarak gözenek ve çatlaklarda birikir (Gürdal ve Yalçın, 1992).

Kömürler iki ayrı porozite sistemiyle karakterize edilirler. Bunlar i) iyi tanımlanmış doğal çatlaklar ve ii) çatlaklar arasında heterojen gözenekli yapı içeren matriks bloklarıdır. Doğal çatlaklar, rezerv boyunca süreklilik gösteren (face cleat) ve süreklilik göstermeyen çatlaklardan (butt cleat) oluşur. Çatlakların yerleşimi oldukça düzenlidir ve milimetreden santimetreye kadar değişir. Gaz akışı bu çatlaklar vasıtasıyla gerçekleşir (Wildenborg, 2005; Gruskiewicz vd, 2009)



Şekil 6. Çeşitli gazların kömürdeki adsorpsiyon miktarları (Durucan ve Shi, 2009).

Şekil 6'da çeşitli gazların adsorpsiyon izotermi gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi, kömürler karbondioksit oranla metana daha fazla yakınlık

göstermektedir. CO/CH₄ adsorpsiyon oranı antrasit gibi olgun kömürler için düşük; ancak, linyit gibi genç kömürler için daha yüksektir (10) (Prusty, 2007).

Kömür damarlarına enjekte edilen karbondioksit kömür matrisinde adsorbe edilmiş olarak bulunan metanla yer değiştirerek depolanır. Bu aynı zamanda kömür içinde yer alan metanın üretilmesini de sağlar. (Peole vd, 2008; Shi ve Durucan, 2005a; Zarrouk ve Moore, 2009).

4.2 Kömür Damarına Karbondioksitin Enjeksiyonu

Kömür damarlarında karbondioksit depolanması için gereken teknolojilerin birçoğu yıllardır çeşitli alanlarda uygulanmaktadır. Örneğin, petrol ve gaz sanayinde enjeksiyon kuyularının delinmesi ve işletilmesinde gelişmiş teknolojiler kullanılmaktadır. Kapsamlı petrol sanayii deneyimleri temelinde, karbondioksitin kömür damarlarında depolanması için gereken delme, enjeksiyon, izleme ve diğer teknolojiler mevcuttur ve çeşitli mevcut projelerde bazı adaptasyonlarla kömür damarlarına uygunluğu test edilmektedir.

Kömürde karbondioksit depolamada uygun enjeksiyon sahalarının seçiminde bir çok parametre bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- i. Uygun permeabilite (henüz minimum değerleri saptanmamıştır);
- ii. uygun kömür geometrisi (birkaç adet kalın tabakalar, birleşik incetabakalardan daha uygundur);
- iii. basit yapı (minimal faylanma ve kıvrımlanma);
- iv. yatay olarak sürekli ve dikey olarak ayrılmış, örtülü homojen kömür tabakaları;
- v. uygun derinlik (1500 m' ye kadar, daha yüksek derinlikler henüz araştırılmamıştır);
- vi. uygun gaz doygunluk koşulları (ECBM için yüksek gaz doygunluğu);
- vii. formasyondan suyu uzaklaştırma yeteneği (IPCC, 2006).

Bir enjeksiyon kuyusu ile kuyu başı parçaları, Şekil 7'de gösterilmiştir. Enjeksiyon kuyuları genellikle iki valf ile donatılmıştır. Bunlardan biri normal kullanım, diğeri ise güvenlik

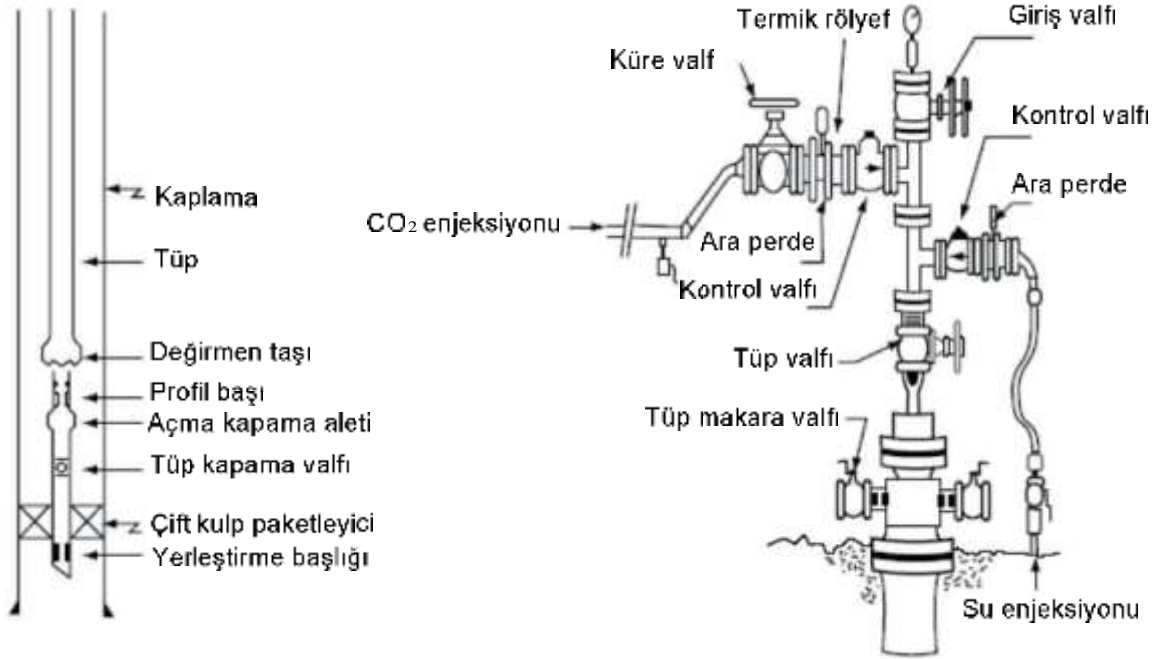
kesintisi amacıyla kullanılmaktadır. Jarrell vd (2002), sızıntı oluşmasını önlemek ve karbondioksitin enjeksiyon sistemine kazara geri akışını engellemek için bir otomatik valf ile donatılmasını önermiştir. Enjeksiyon kuyusu için tipik bir konfigürasyon çift kulp paketleyicisi, açma-kapama aleti ve güvenlik kesintisi valfi şeklindedir. Yüzeyledeki ekipmanlarda tehlikeli yüksek basınç artışının önüne geçmek ve karbondioksitin atmosfere salınmasını önlemek amacıyla karbondioksit enjeksiyonu, sızıntı oluşur oluşmaz durdurulmalıdır. Kırılma diskleri ve güvenlik valfleri, oluşan yüksek basıncı azaltmak için kullanılabilir. Karbondioksit enjeksiyon kuyularının düzgün bir şekilde sürdürülmesi için sızıntının ve kuyu başarısızlığının önüne geçilmelidir (Jarrell vd, 2002).

Kömür damarlarında karbondioksitin enjeksiyonunda düşey kuyular kullanılabilir. Enjeksiyon için gerekli kuyu sayısı bir dizi faktöre bağlıdır. Bunlar aşağıda sıralanmaktadır.

- i. Toplam enjeksiyon miktarı
- ii. Damar kalınlığı
- iii. Kömürün geçirgenliği
- iv. Maksimum enjeksiyon basıncı
- v. Enjeksiyon kuyuları için yüzeyde gerekli alanların varlığı

Geçirgenlik, kuyu sayısını etkileyen en önemli kömür fiziksel özelliğidir. Yüksek geçirgenliğe sahip kömür damarlarında daha az düşey kuyuyla üretim yapılabilir. Geçirgenlik azaldıkça gazın depolanması için gereken kuyu sayısı da artar (IPCC, 2006).

Karbondioksitin depoformasyonuna basılması için enjeksiyon basıncının hazne suyu basıncından daha yüksek olması gerekmektedir. Diğer taraftan, artan formasyon basıncı da formasyonda kırıklara neden olabilmektedir. Enjeksiyon formasyonunda kırık oluşmasını engellemek için maksimum kuyu basıncının sınırlandırılması gerekmektedir. Güvenli enjeksiyon basıncının oluşması için formasyonun in-situ gerilme ve boşluk suyu basıncı ölçümleri yapılmalıdır. Üretim sırasında boşluk suyu basıncının tükenmesi, haznedeki gerilim durumunu etkileyebilmektedir. Bazı tükenmiş haznelerin yapılan analizlerinde boşluk basıncının düşmesi sonucu kayadaki yatay gerilmelerin %50-80 düştüğü, dolayısıyla haznenin kırılma olasılığının arttığı gözlenmiştir (IPCC, 2006).



Şekil 7. Tipik bir karbondioksit enjeksiyon kuyusu ve kuyu başı konfigürasyonu (IPCC, 2006).

4.3 Kömür özelliklerinin sorpsiyon kapasitesine etkisi

Kömürde karbondioksit depolanmasında etkin olan kömür özellikleri rank, nem içeriği, maseral bileşimi ve gözenekliliktir.

4.3.1 Rank

Yapılan çalışmalarda (Busch vd, 2003; Levy vd, 1997; Prusty, 2007) metan sorpsiyon kapasitesinin ranka bağlı olarak lineer olarak arttığı belirlenmiştir. Busch ve arkadaşları (2003) rankın kömürde metan ve karbondioksitin sorpsiyon kapasitesini kontrol eden parametrelerden bir tanesi olduğunu öne sürmüşlerdir. Yüksek ranklı kömürlerde karbondioksitin seçimli adsorpsiyonu ve metanın seçimli desorpsiyonu gözlenirken düşük ranklı kömürlerde düşük basınçlarda metanın seçimli adsorpsiyonu ve tüm basınçlarda karbondioksitin seçimli desorpsiyonu gözlenmiştir. Ancak bu çalışmada kömürün seçimli adsorpsiyon davranışı ile rankı arasında keskin bir ilişki tanımlanamamıştır. Düşük ranklı Polonya kömürleri üzerine yapılan başka bir çalışmada ise düşük basınçta karbondioksit ve metanın seçimli adsorpsiyonu gözlenmiştir.

4.3.2 Maseral bileşimi

Bazı çalışmalarda (Ryan ve Lane, 2001; Prusty, 2007) kömürün maseral bileşiminin kömürde karbondioksit ve metanın sorpsiyonunu kontrol eden bir parametre olduğu kaydedilmiştir. Çeşitli maseraller arasında vitrinit benzer ranka sahip kömürlerde inertinitle karşılaştırıldığı zaman metana daha fazla çekim göstermektedir. Yüksek uçuculu bitümlü Amerikan kömürlerinde karbondioksit sorpsiyonu üzerine yapılan bir çalışmada karbondioksitin sorpsiyon kapasitesinin vitrinit içeriğiyle pozitif ilişkide olduğu, inertinit içeriğiyle ise zayıf ilişki içerisinde olduğu gözlenmiştir. Ryan ve Lane tarafından yürütülen bir çalışmada inertinitin karbondioksiti seçimli olarak adsorpladığı, metanın ise vitrinit tarafından adsorpladığı gözlenmiştir (Mastalerz vd, 2004).

4.3.3 Nem içeriği

Nem tek bir gazın ve ayrıca kömürün seçimli sorpsiyonu kontrol eden faktörlerden biri olarak tahmin edilmektedir. Clarkson ve Bustin (2000) nemin kömürde karbondioksitin sorpsiyonunu

engellediği ve seçimli adsorpsiyonunu azalttığını gözlemiştir. Busch vd (2003) tarafından yürütülen başka bir çalışmada ise nemin metanın seçimli adsorpsiyonunu artırdığı tespit edilmiştir

4.3.4 Gözeneklilik

Kömürün karbondioksit ve metana seçimli sorpsiyonu ayrıca kömürdeki porozite sistemi tarafından da kontrol edilir. Kömürde porozitenin çoğunluğunu mikro gözenekler oluşturur. Karbondioksit kömürün mikro gözenekleri boyunca hareket edebilir ve seçimli olarak adsorplanabilir. Karbondioksit fizikokimyasal özelliklerinin (özellikle düşük aktivasyon enerjisi) bir sonucu olarak metanın giremediği çok sayıda kömür gözeneği içerisine nüfuz edebilir. Bu, karbondioksitin seçimli adsorpsiyonuna katkıda bulunur. Metan molekülleri mikro gözeneklere girerneyebilir ve makro gözeneklerde serbest olarak kalabilirler. Bu nedenle metan desorpsiyon boyunca kömürün yapısından hızlı bir şekilde ayrılır. Kömürün mikro gözenekliliği genellikle kömürün kalitesine bağlı olarak artış gösterdiğinden karbondioksitin seçimli adsorpsiyonu ve metanın desorpsiyonunun kömürdeki mikro gözenekliliğin artmasıyla artması gerekir. Ancak kömürün kılcallık yapısı ve maseral bileşimi gibi bazı özellikleri bu olayı değiştirebilir (Ceglarska ve Zarebska, 2005; Prusty, 2007)

4.3.5 Çevresel riskler ve önlemler

Kömür damarlarında karbondioksit depolanmasındaki eksikliklerden kaynaklanan riskler vardır. Bu risklerle ilgili olarak oluşabilecek iki tip senaryo söz konusudur. Birinci senaryo enjeksiyon kuyusunda oluşan aksaklıkların yol açtığı sızıntılardan kaynaklanır. Bu sızıntıların sonucu olarak ani karbondioksit yayılmaları meydana gelebilir. Bu yayılmalar öncelikle çalışanları etkiler (karbondioksitin havadaki konsantrasyonunun % 7-10' dan büyük olduğu durumlarda insan yaşamı tehlikeye girer). İkinci senaryoda ise sızıntı belirlenemeyen çatlak ve kırıklar boyunca gerçekleşir. Bu durumda, gaz içme sularını etkileyebilir ve su havzası üstü ile yüzey arasındaki zonda birikebilir. Ayrıca toprağın asitliği ve topraktaki oksijenin yer değiştirmesi ikinci senaryoya dahil riskler olarak değerlendirilir. (Shi ve Durucan, 2005a, IPCC, 2006).

İzleme kömür damarlarında karbondioksit depolama projeleri için toplam risk yönetiminin önemli bir parçasıdır. Enjeksiyon hızı ve enjeksiyon kuyu basıncı gibi bazı parametrelerin rutin olarak ölçülmesi çalışmaların emniyeti açısından oldukça önemlidir. Tekrarlanan sismik araştırmalar ile karbondioksitin yeraltı hareketi izlenebilir. Ek olarak yeraltı suyu ve topraktan örneklerin alınması karbondioksit sızıntısının belirlenmesi için yararlı olabilir (Heinrich, 2003; IPCC, 2001).

4.4 Maliyet

Karbondioksitin ele geçirilmesi, 300 km'lik bir mesafeye nakliyesi ve kömür damarında

depolanmasının maliyeti depolanan karbondioksitin her bir tonu için yaklaşık olarak 30-50 \$ olarak tahmin edilmektedir (IEA, 2009).

Karbondioksitin kömür damarında depolanması sonucunda açığa çıkan metan gazı tabloda belirtilen uygulamalarda kullanılabilirliği olanağı vardır. Gazın bu amaçlarla kullanılması depolama maliyetlerini azaltacaktır. Kömür kökenli metanın kullanım teknolojilerini gazın doğal gazın yerine kullanılması, gazın madende yada yakın bölgelerde kullanılması, elektrik üretiminde kullanılması ve gazın basit bir şekilde imha edilmesi olarak dört grupta toplamak mümkündür.

Çizelge 4: Kömür Kökenli Metanın Kullanım Seçenekleri (Su ve Agnew, 2005; Bibler ve Carothers, 2001)

		Doğal gaz yerine gazın kullanılması
Kullanım/azaltım seçenekleri	Doğrudan kullanım	Kömürle birlikte gazın müşterek yakılması (ısı üretmek için) Kömürün kurutulması Ağır metaller içeren suyun buharlaştırılması Maden binalarının ve havasının ısıtılması Yerel sanayiler tarafından değişik amaçlarda kullanımı Havalandırma havasının oksidasyonu (ısı üretmek için)
	Elektrik üretimi ve kojenerasyon	Kömürle birlikte gazın müşterek yakılması (elektrik üretmek için) İçten yanmalı motorlar Türbinler Yakıt hücreleri Havalandırma havası oksidasyonu
		İmha (yakma, havalandırma havasının oksidasyonu)

4.5 Diğer depolama seçenekleriyle karşılaştırılması

Petrol ve gaz sahalarında ve akiferlerde karbondioksitin depolanmasına yönelik çeşitli uygulamalar bulunmasına rağmen kömürde karbondioksitin depolandığı geniş çaplı bir uygulama bulunmamaktadır. Günümüzde kömür kökenli metanın üretiminin artırılmasında karbondioksit yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak kömürde karbondioksitin depolanmasıyla ilgili çalışmalar genellikle laboratuvar ölçeklidir ve araştırma safhasındadır. Çizelge 5'de karbondioksitin tutulmasından depolanmasına kadar olan aşamalar çeşitli açılardan değerlendirilmiştir. Kömür damarlarında gazın depolanması için gereken tutma ve taşıma sistemleri mevcuttur ve uygulama araştırma safhasındadır.

Çizelge 6'da bazı jeolojik depolama seçeneklerinin kapasiteleri verilmektedir. Kömür damarlarının karbondioksit depolama potansiyelinin 0-1500 Gton gibi geniş bir aralıkta olduğu tahmin edilmesine karşılık yaklaşık 250 Gton olduğu kabul edilmektedir (IEA, 2009). Bu değerlendirmeler her bir metan molekülü için 2 karbondioksit molekülünün depolanacağı varsayımına dayandırılmıştır ve bu nedenle belirsizlikler içermektedir (Wildenborg ve Lokhorst, 2005; Torvanger, 2004).

Terk edilmiş petrol ve gaz rezervuarları aşağıda belirtilen nedenlerle karbondioksitin depolanmasında genellikle birincil seçenek olarak değerlendirilmektedir.

- Petrol ve gaz rezervleri genellikle detaylı olarak araştırılmış yerlerdir ve karbondioksit depolanması için güvenilir

oldukları düşünülür. Çünkü bu rezervler milyonlarca yıl boyunca petrol, gaz ve çoğu zaman da karbondioksit tutmuşlardır.

- ii. Petrol ve gaz rezervuarlarının fiziksel ve yapısal özellikleri daha önceden çalışılmış ve karakterize edilmiştir.
- iii. Daha önceden mevcut olan kuyular ve alt yapıları karbondioksit depolaması için kullanılabilir (Meer, 2005).
- iv. Karbondioksit depolama sürecinde

fazladan üretilecek petrol ya da gazdan sağlanan kazanç, karbondioksit depolaması sırasında yapılacak harcamalar için kullanılabilir (Ravagnani, 2009).

- v. Hidrokarbonların rezervuar içerisindeki hareketi ve yer değiştirme karakteristikleri bilgisayar programları kullanılarak tahmin edilebilir.

Çizelge 5: Karbondioksit Tutma ve Depolama sistemlerinin Bileşenleri ve Uygulanabilirliği(IPCC, 2006)

Karbondioksit tutma ve depolama işlemleri bileşeni	Karbondioksit tutma ve depolama teknolojisi	Araştırma aşaması	Deneme aşaması	Özel koşullarda ekonomik uygunluğu	Gelişmiş pazar
Tutma	Yanma sonrası			✓	
	Yanma öncesi Oxy yakıt kullanımı Endüstriyel ayrıştırma		✓	✓	✓
Nakliye	Boru hattı				✓
	Gemi taşımacılığı			✓	
Jeolojik depolama	Petrol üretimini artırmak için				✓
	Gaz ve Petrol sahaları Tuzlu formasyonlar KKM'nin üretimini artırılmasında		✓	✓	
Okyanusta depolama	Direkt enjeksiyon (çözündürme modeli)	✓			
	Direkt enjeksiyon (göl tipi)	✓			

Akiferlerde karbondioksit depolama işlemi diğer jeolojik depolama seçeneklerine göre oldukça kolaydır. Ancak, bu formasyonlarda depolama işleminde enjeksiyon derinliği ve karbondioksit yoğunluğu önemlidir. Formasyon içine enjekte

edilen karbondioksitin yayılımı, formasyonun homojenliğinden etkileneceği gibi formasyon içindeki diğer gaz ya da safsızlıklardan da etkilenebilir (Mito, 2008).

Çizelge 6: Farklı Tipteki Jeolojik Formasyonların Karbondioksit Depolama Kapasiteleri (IPCC, 2001)

Rezev tipi	En düşük depolama kapasitesi		En yüksek depolama kapasitesi	
	GtCO ₂		GtCO ₂	
Petrol ve gaz bölgeleri	675*		900*	
Kazılamayan kömür damarları			200	
Derin tuzlu formasyonlar	315	1000	Belirsiz, fakat imkan dahilinde 10	

* İşletilmemiş petrol ve gaz bölgelerine enjeksiyon yapıldığı zaman bu oran %25 değerine kadar artış gösterecektir.

Yöntemler maliyetler açısından karşılaştırılırsa aktif petrol kuyularında karbondioksit depolama maliyetinin en az olduğu görülür (IPCC, 2001). Kömür yatakları, terk edilmiş petrol ve gaz rezervuarlarında depolama maliyetleri aktif petrol kuyularına oranla daha fazladır (Herzog, 2009).

Aktif petrol kuyuları ve tüketilmiş petrol ve gaz rezervleri yüksek depolama güvenliğine ve uygulanabilirliğe sahipken diğer yöntemler için bu özellikleri belirlemesine yönelik araştırmalar devam etmektedir (Herzog, 2009).

5. SONUÇLAR

Fosil yakıtların kullanımının atmosferdeki karbondioksit oranını artırdığı bilinmektedir. Sera gazları içerisinde karbondioksit sera etkisi bakımından en etkili gazdır. Karbondioksitin işletilemeyen kömür damarlarında depolanabilmesiyle (ya da diğer seçenekler) fosil yakıtların çevreye zarar vermeden güvenli şekilde kullanımı söz konusu olacaktır.

Karbondioksitin tutulmasında çeşitli yöntemler kullanılabilir olup yöntem seçiminde etkili parametre açığa çıkan gazdaki karbondioksit miktarıdır. Nakliyede ise taşıma yönteminin seçiminde etkin parametre gaz kaynağıyla depolama kaynağı arasındaki mesafedir. Uzun mesafelerde gemi taşımacılığı daha ekonomik bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır.

Kömür özelliklerinin adsorpsiyon kapasitesine etkisini konu alan çalışmalar devam etmektedir. Geçmiş çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- i. Yüksek ranklı kömürlerde karbondioksitin seçimli adsorpsiyonu ve metanın seçimli desorpsiyonu gözlenmiştir. Düşük ranklı kömürlerde ise düşük basınçlarda metanın seçimli adsorpsiyonu ve tüm basınçlarda karbondioksitin seçimli desorpsiyonu gözlenmiştir.
- ii. Karbondioksitin sorpsiyon kapasitesi vitrinit içeriğine bağlı olarak artmaktadır.
- iii. Nem, kömürde karbondioksitin sorpsiyonunu engelleyen ve seçimli adsorpsiyonunu azaltan bir faktördür.
- iv. Karbondioksitin seçimli adsorpsiyonu ve metanın desorpsiyonunun kömürde mikrozönelikliğin artmasıyla artmaktadır

Kömür damarlarında karbondioksit depolamanın birim maliyeti 30-50 \$olarak tahmin edilmektedir. Bu maliyet açığa çıkan metanın pazarlanması ya da çeşitli amaçlarda kullanılmasıyla düşebilir. Kömür damarlarında karbondioksit depolanmasındaki eksiklikler ya da hatalardan kaynaklanan riskler mevcut teknolojiler kullanılarak izlenebilmekte ve gerekli tedbirler alınabilmektedir.

işletilemeyen kömür damarlarındaki karbondioksitin depolanmasıyla ilgili çalışmalar laboratuvar aşamasında olup ilerleyen dönemlerde geniş uygulama alanları bulacağı tahmin edilmektedir. Bu bağlamda işletilemeyen kömür damarlarının rezervlerinin ve çoklu adsorpsiyon özelliklerinin belirlenmesi ileri uygulamalara ışık tutacaktır.

6 KAYNAKLAR

Anon, 2009; <http://images.chron.com/blogs/news/watch/energy/archives/1carbon%2520sequestration.gif>

Ceglarska-Stefan'ska, G. and Zarebska, K., 2005; "Sorption of carbon dioxide-methane mixtures" *International Journal of Coal Geology* **62**, 211-222.

Bachu, S., 2008; "CO₂ Storage in Geological Media: Role, Means, Status And Barriers to Deployment", *Progress in Energy and Combustion Science*, **34**, 254-273.

Başaran, M., 2006; "Karbondioksit (CO₂) Tutma ve Depolama" TMMOB Türkiye VI. Enerji Sempozyumu-Küresel Enerji Politikaları ve Türkiye Gerçeği. 442-456.

Benson, S., 2009; "Overview of geological Storage of CO₂", <http://dels.nas.edu/besr/docs/BENSON.pdf>

Bibler, C. and Carothers, P., 2001. Overview of Coal Mine Gas Use Technologies, <http://www.ravenridge.com/Utilization.PDF>

Busch, A. Krooss, M.B, Gensterblum, Y., Bergen, F. and Pagnier, M.J.H., 2003; "High-Pressure Adsorption Of Methane, Carbon Dioxide and Their Mixtures On Goals With A Special Focus on the Preferential Sorption Behavior" *Journal of Geochemical Exploration*, **78-79**, 671-674.

- Clarkson C R and Bustin R M., 2000; "Binary gas adsorption/desorption isotherms: effect of moisture and coal composition upon carbon dioxide selectivity over methane" *International Journal of Coal Geology*, 42(4), 241-271.
- Dallegge, T. and Barker, C., 1999. Coal-Bed Methane Gas-In-Place Resource Estimates Using Sorption Isotherms and Burial History Reconstruction: An Example from the Ferron Sandstone Member of the Mancos Shale. http://pubs.usgs.gov/pp/p1625b/Reports/Chapters/Chapter_L.pdf
- Dooley, J., Dahowski, T., Davidson, C., Wise, M., Gupta, N., Kim, S. and Malone, E., 2006. "Carbon Dioxide Capture and Geologic Storage: A Core Element Of A Global Energy Technology Strategy To Address Climate Change", A Technical Report from the Second phase of Global Energy Technology Strategy Program.
- Durucan, S. and Shi, J., 2009; "Improving the CO₂ well injectivity and enhanced coalbed methane production performance in coal seams", *International Journal of Coal Geology*, 77, 214-221.
- Gruszkiewicz, M.S., Naney, M.T., Blencoe, J.G., Cole, D.R., Pashin, J.C. and Carroll R.E., 2009; "Adsorption kinetics of CO₂, CH₄, and their equimolar mixture on coal from the Black Warrior Basin, West-Central Alabama" *International Journal of Coal Geology*, 77, 23-33.
- Gibbins, J. and Chalmers, H., 2008; "Carbon capture and storage" *Energy Policy*, 36, 4317-4322.
- Gürdal, G. ve Yalçın, E., 1992; "Kömürde Gaz Birikmesini Kontrol Eden Parametreler-Genel Bakış", *Türkiye 8. Kömür Kongresi, Bildiriler Kitabı*, 307-318.
- Heinrich, J.J., Herzog, H.J. and Reiner, D.M.: 2003, 'Environmental Assessment of Geologic Storage of CO₂', The Second Annual Conference on Carbon Sequestration, Alexandria, VA, United States Department of Energy.
- Herzog, 2009 "CO₂ Capture, Reuse, and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change", A White Paper, Final Report, <http://sequestration.mit.edu/pdf/WhitePaper.pdf>
- Hoff, T., 2007 "CO₂ Storage in Depleted Gas Field" http://www.deloitte.com/dtUcda/doc/contentUml_en_Deloitte_OiiGasConf07_Hoff.pdf
- IEA, 2009 "Storing CO₂ in Unminable Coal Seams" <http://www.ieagreen.org.uk/8.pdf>
- IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 'Carbon Dioxide Transport, Injection And Geological Storage' http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_5_Ch5
- IPCC, 2001; "IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage" http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports_carbon_dioxide.htm
- Jarrell, P.M., Fox, E.C., Stein, H.M. and Webb, L.S., 2002: Practical Aspects of CO₂ Flooding. SPE Monograph Series No. 22, Richardson, TX, 220 pp.
- Levy, J.H., Day, S.J. and Killingley J.S., 1997 "Methane capacities of Bowen Basin coals related to coal properties" *Fuel*, 76(9), 813-819.
- Mastalerz, M., Gluskoterb, H. and Rupp, J., 2004; "Carbon dioxide and methane sorption in high volatile bituminous coals from Indiana, USA" *International Journal of Coal Geology*, 60, 43-55.
- Meer, V., 2005 "Carbon Dioxide Storage in Natural Gas Reservoirs, Oil & Gas Science and Technology", 60(3), 527-536.
- Mito, S., Xue, Z. ve Ohsumi, T., 2008 "Case study of geochemical reactions at the Nagaoka CO₂ injection site, Japan" *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2, 30, 9-31.
- Nordbotten, J., Celia, M. and Bachu, S., 2005; "Injection and Storage of CO₂ in Deep Saline Aquifers: Analytical Solution for CO₂ Plume Evolution During Injection", *Transport Porous Media*, 58, 339-360.
- Prusty, K. B., 2008; "Sorption of Methane and CO₂ for Enhanced Methane Recovery and Carbon Dioxide sequestration" *Journal of Natural Gas Chemistry*, 17, 29-38.
- Qi, R., La Force, T. and Blunt, M., 2009; "Design

of carbon dioxide storage in aquifers", International Journal of Greenhouse Gas Control, 3, 195-205.

Ravagnani, G., Ligerio, E. And Suslick, S., 2009; "CO₂ Sequestration through Enhanced Oil Recovery in a Mature Oil Field" Journal of Natural Gas Chemistry, 17, 29-38.

Rennie, E., 2008 "Carbon Capture And Storage Financing Challenges And Opportunities" http://www.worldenergy.org/documents/alastair_rennie.pdf

Reynen, B., 2008 " CO₂ Storage Potential in Canada" http://www.neb-one.gc.ca/clf-nsi/rnrgynfmtn/nrgyrprt/nrgyftr/cnslttrnd3/bill_reynen.pdf

Ryan B and Lane B., 2001; Geological Fieldwork 2001, Paper 2002-1. British Columbia Ministry of Energy and Mines, 83pp.

Shi, Q and Durucan, S., 2005a; "CO₂ Storage in Deep Unminable Coal Seams" Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP, **60(3)**, 547-558.

Shi, Q and Durucan, S., 2005b; "CO₂ Storage in Caverns and Mines" Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP, **60(3)**, 569-571.

Su, S. and Agnew, J., 2005 "Catalytic Combustion of Coal Mine Ventilation Air Methane", Fuel, 85, 1201-1210

Wildenborg, T. and Lokhorst, A.,; 2005 "Introduction on CO₂ Geological Storage. Classification of Storage Options", Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP, **60(3)**, 513-515.

Zhang, W., Li , Y., Xu, T., Cheng, H., Zheng, Y. and Xiong, P., 2009; "Long-term variations of CO₂ trapped in different mechanisms in deep saline formations: A case study of the Songliao Sasin, China", International Journal of Greenhouse Gas Control, 3(2), 161-180.

Zarrouk, S. and Moore, T., 2009 "Preliminary reservoir model of enhanced coalbed methane (ECBM) in a subbituminous coal seam", Huntly Coalfield, New Zealand, International Journal of Coal Geology, 77,153-161.

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, hipapiastik model ($\Delta^2 E$) ve kullanım alternatifleri tanıtılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Açık işletmeler, Pasa şev stabilitesi, Hipapiastik 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 ($\Delta^2 E$) 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, NiGDE, 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 sözkonusu 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 alışılmadık belirtiler göstermemesi ve
- ani meydana gelen bir kaymanın zaman diliminin tam olarak tahmin edilememesinden kaynaklanmaktadır (Förster ve Walde, 1994; Kuyumcu, 2005).

Çizelge 1. Kitle Hareketlerinin 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	Kaya blok akması	Kum kil akması
	Yamaç molozu akması	Çamur kum akması
Heyelan	Rotasyonel, Translasyonel	Eğrisel kayma yüzeyli zemin hareketi
Kayma	Blok kayması	Analgenleşerek kayma
	Kama kayması	
Devrilme	Kaya devrilmesi	Gevşek çimento moloz devrilmesi
Karmaşık	Hareket ve malzeme türü karışık	
Çökme	Belirli kayma yüzeyi olmayan kitle hareketi	



Şekil 1. Koscherikado linyit açık işletme erşev duraysızlığı örneğı (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 değışme, şev sınır denge durumunun bozulmasına neden olabilir.

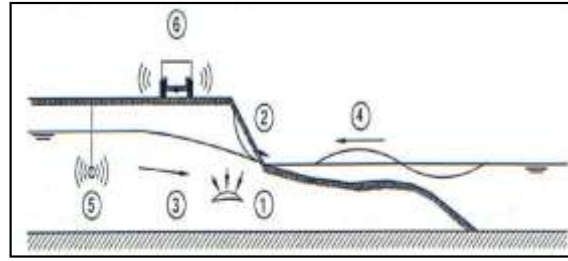
Şevler; içinde açıldıkları malzemenin ya da yapının türüne göre, zemin şevleri ve kaya şevleri olarak iki gruba ayrılır. Diğer taraftan mühendislik açısından kullanım sürelerine göre, kısa süreli şevler ve uzun süreli şevler şeklinde adlandırılırlar. Zemin deyince, ayrık, çimentolanmamış ya da az çimentolanmış, 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 işletme erde 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 makineleri vb.),
- 7 Bölgenin depremsellik özelliğı.

Burada, sadece dinamik etki kuvvetlerinden 5 ve 6 zamansal olarak kısıtlanabilir. Diğer etki faktörlerinin herhangi bir zamanda gerilme değışimine neden olup olmayacağı, bir kayma oluşturup oluşturmayacağı ve ne zaman meydana geleceğı henüz belirsizdir. Ancak; pasa şev kayma riski, işletme koşulları ve ortam büyüklüklerine bağılı 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 problemi. 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 yasa 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 frenlerin $\Delta^2 E > 0$ (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 sıklığın 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.

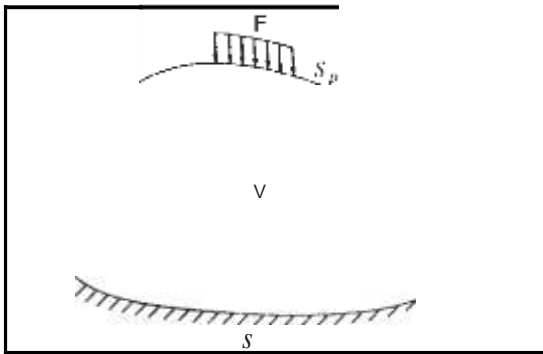
Fiziko-kimyasal etkiler ve katı cisim ayrışmaları ihmal edilir.

Gerilme eğrileri başlangıç durumundan bağımsız olarak, orantılı gerilme eğrilerinde asimptotik olarak meydana gelirler.

Hipopiastik model toplam sekiz malzeme parametresi ile karakterize edilmektedir. Bunlar; ϕ_9 : içsel sürtünme açısı (D), h_9 : Konsolidasyon basıncı (MPa), n : Malzeme özelliğine bağlı üsteldeğer (-), eio : izotrop boşluk oranı (-), eco (emin): Dinamik boşluk oranı (-), efo (ema): Başlangıç boşluk oranı(-), a ve l_3 : Konsolidasyon exponentleri(-). Bunlar, malzemenin granülomeiri 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 Kolybas, 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 SP alanına F kuvetinin etkidiği varsayılmaktadır. B hacimsel tepki kuveti ve T_9 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 $\dot{u}=v.\dot{\theta}$ sonsuz küçük bir kayma alanı gözlenir. $\dot{\theta}$ sonsuz küçük zamanda yapılan net iş;

$$\delta W = \dot{u} + E(\dot{\theta})^2$$

$$= \int_V \left[\frac{1}{2} T_g \dot{\theta} \right] \dot{\theta} dV - \int_{S_i} F \cdot v \cdot \dot{\theta} ds - \int_V B \cdot v \cdot \dot{\theta} dV \quad (2)$$

Virtüel iş prensibine göre;

$$\delta W = \int_V a \cdot v \cdot \dot{\theta} dV - \int_{S_i} F \cdot v \cdot \dot{\theta} ds - \int_V B \cdot v \cdot \dot{\theta} dV = 0 \quad (3)$$

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

Sabit yük altında şev stabilitesi için yeter koşul;

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

her kinematik hız alanı (v) için sağlanmalıdır. T_9 birinci Piola – Kirchoff gerilme tansörüdür. Eğer; ${}^2E > 0$ ise şev stabil, ${}^2E = 0$ ise kararsız, ${}^2E < 0$ ise stabil olmayan denge koşulunu göstermektedir.

Stabilitesi araştırılacak bölge kayma yüzey açısı vasıtasıyla belirlenir (Şekil 4). 2E (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 \mathbf{t} hesaplanır. Granüle malzemenin mekanik davranışı, T_9 Jaumannsch gerilme eşitliği ile belirlenir.

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

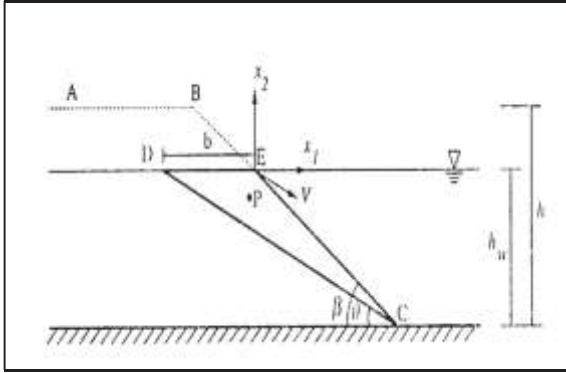
$$\mathbf{T}_g = \mathbf{T}_g + W \cdot \mathbf{T}_g - \mathbf{T}_g \cdot D + \mathbf{T}_g \cdot \text{tr} D \quad (7)$$

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

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; $W \cdot \dot{T}_g - T_g \cdot D + T_g \cdot trD = 0$ 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).



Şeki 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

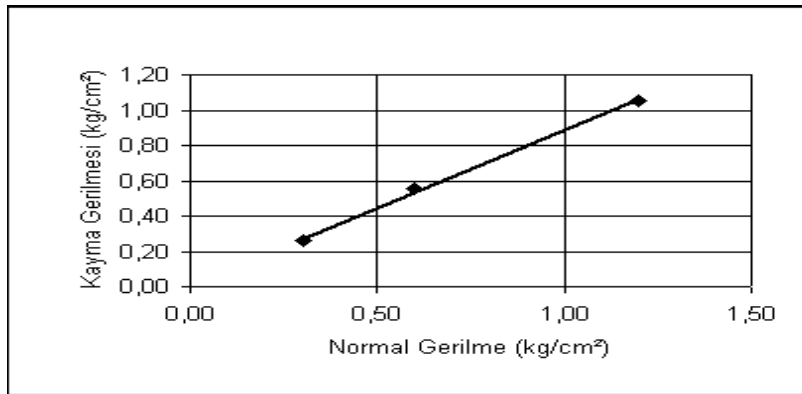
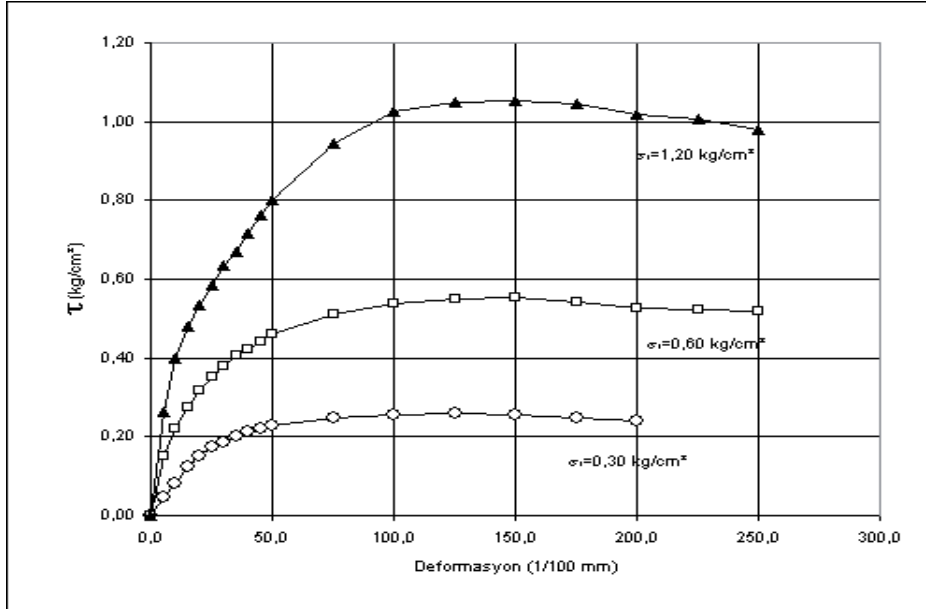
yapılmıştır (şev yüksekliği $h=32\text{cm}$, şevdeki su seviyesi $h_w=22\text{cm}$ ve şev açısı $\beta=35^\circ$). Boşluk oranı $0,52-0,94$ aralığında değişmektedir. Algoritması Şekil 6'da verilen MATLAB 6.0 bilgisayar programında gerçekleştirilen şev stabilitesi analiz sonuçlarına göre, sistemin enerji 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 oluşmayacağı görülmektedir. Bu gözlemlere göre, deney kumu için kritik boşluk oranı $e_{kri} = 0,53$ 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 $e_o = 0,87 > e_{kri}$). 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 oluştuğu sürece kayar.
- Laboratuvar deneyleri, kritik bir boşluk oranının (e_{kri}) var olduğunu doğrular. Araştırılan zemin için bu değer $e_{kri} = 0,53$ 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 Haplastık Parametre Büyüklükleri (Förster ve Gudehus, 1998)

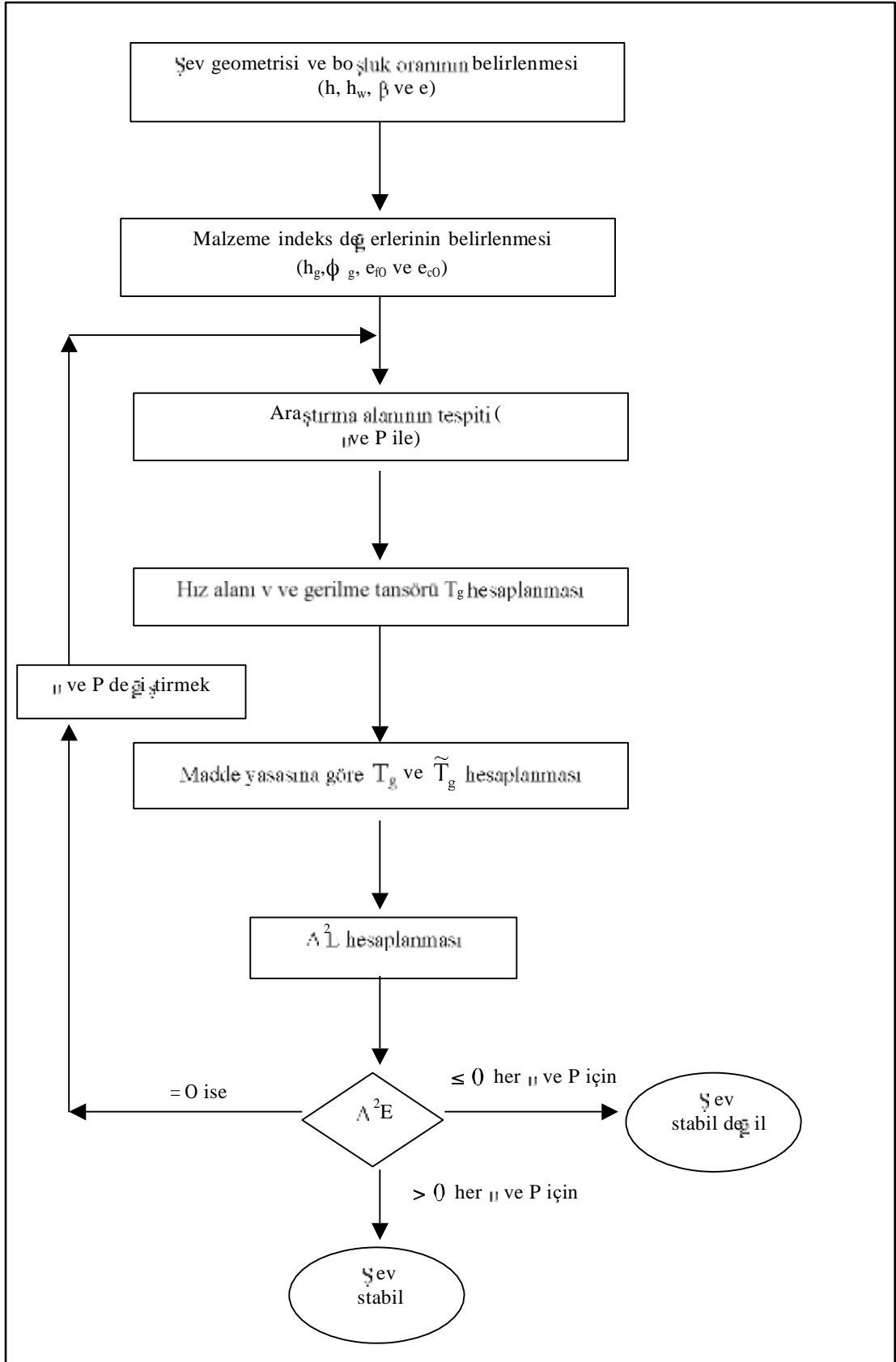
Kum	h_g (MPa)	n (-)	e_{i0} (-)	e_{c0} (-)	e_{i0} (-)	ϕ_g (°)	μ (-)	β (-)
Ticiono	250	0,68	0,938	0,59	1,105	31	0,11	1,00
Toyoura	120	0,69	0,98	0,61	1,127	32	0,12	1,00
L.Buzzard	6400	0,45	0,79	0,49	0,934	31	0,16	1,00
Hokksund	150	0,70	0,874	0,533	1,01	31	0,09	1,00
Monterey	8000	0,35	0,834	0,54	0,90	32	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



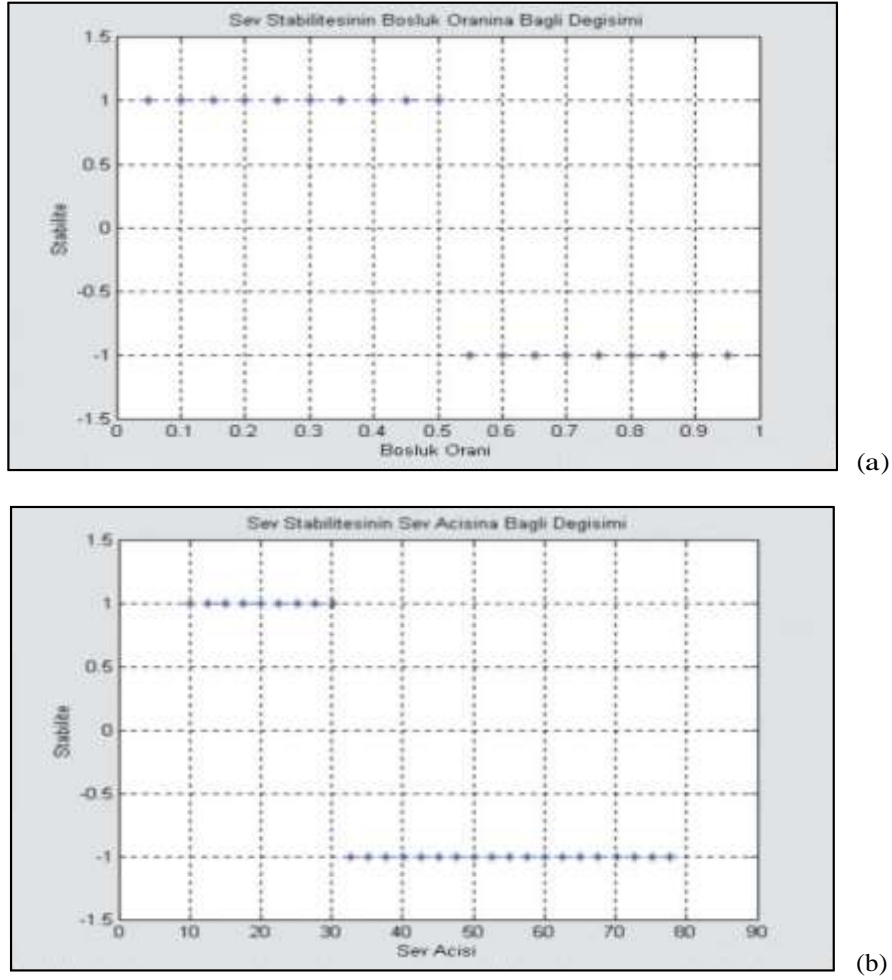
$$c = 0 \quad \text{kg/cm}^2$$

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

Şekil 5. Deney numunesine ait kesme kutusu deney sonuçları



Şek 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 pasaya malzemesinin gevşek yapısal ve oluşum özellikleri nedeniyle önemli bir kısmı kayma veya akma eğiliminde olmaktadır. Çok kısa zaman dilimi içerisinde ani hıza 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 çıkış işletmelerinde birşey yenildiği zaman, sadece bir etkenin tek başına bu duraysızlığa neden olduğu söylenemez. Bu maksatla pasaya şev 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 pasaya şev duraylılık analizi için, 2. enerji yasasına (2E) bağlı olarak geliştirilen hipopiastik 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 $^2E < 0$ olmamalıdır. Hipopiastik 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, hipopiastik 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; "TKi-GELi (Muğla) Bölgesinde Dekapaj Döküm Sahasındaki Şev Duraysızlıklarının incelenmesi", 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 setzungfließgefahrdeeter 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., Kolybas, D. ve Raju, V., 1992; "Sanierung und Sicherung setzungfließgefahrdeeter 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 işletmelerde Şev Stabilitesi", DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 254, izmir, 114.

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

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

LMBV mbH, 1996; "Sichere Gestaltung setzungsfleißgefährdeter 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., istanbul, 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 iyileştirilmesi", 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, istanbul, 7/40.