

LAVVAR ATIKLARININ HİDROLİK DOLGUDA SIKIŞMA ÖZELLİKLERİ

The Compressibility Properties of Coal Washery Rejects in Hydraulic Backfilling

A.Kemal CENGİZ^w

ÖZET

Dolgu malzemesinin sıkışabilirliği, dolgu performansını belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Dolgu malzemesi, düşük yığılma boşluk oranına ve yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olması halinde uygun olmaktadır. Yük taşıma kapasitesi sıkışma eğrileri ve eşitlikleri ile belirlenmektedir. Bu eşitliklerdeki porozite ile ön oturma ve ön gerilme gibi sıkışma parametrelerinin dolgu tasarımında büyük bir önemi vardır.

Bu yazı, Zonguldak Kömür Havzası lavvar atıklarının hidrolik dolguda kullanılabilmesi amacıyla yapılan çalışmaları kapsamaktadır. Bu kapsamda sıkışma eğrileri çizilmiş ve bu eğrilerle literatürde verilen sıkışma eşitlikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu amaçla, etkin çap (d_{10}), düzenlilik katsayısı (C_u), eğrilik katsayısı (C_c) gibi tane boyu parametrelerine bağlı olarak çeşitli yapay karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımların yerinde boşluk oranı benzetimle belirlenmiştir. Tek eksenli sıkışma deneyleri, elde edilen sıkışma eğrileri ile literatürde verilen eşitlikler arasında yüksek bir korelasyon olduğu göstermektedir. Ayrıca, literatürde kuru dolgu için verilen bir eşitlik hidrolik dolgu için geliştirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Lavvar Atıkları, Hidrolik Dolgu, Sıkışma Eğrisi, Sıkışma Eşitliği

ABSTRACT

The compressibility of backfill material is one of the most important parameters that determines the backfill performance. Backfill material is suitable when it has low bulk void ratio and big load bearing capacity. Load bearing capacity is computed by compression curves and equations. Compression parameters such as porosity, pre-consolidation and pre-stress have a considerable effect on backfill design.

This paper covers the studies aiming the use of coal washery rejects of Zonguldak Colliery as hydraulic backfilling. In this scope, the compression curves were plotted and the relationships between these curves and the compression equations suggested in literature were studied. For this purpose, a number of different backfill aggregate compositions of coal washery rejects were prepared depending on particle size parameters such as effective size (d_{10}), coefficient of uniformity (C_u) and coefficient of curvature constant (C_c). The insitu void ratio of these compositions were determined by simulation. One-dimensional compression tests were carried out. The results show that there is a high correlation between the compression curves and the compression equations. An equation given for pneumatic backfilling in literature is adopted for hydraulic backfilling.

Keywords: Coal Washery Rejects, Hydraulic Backfilling, Compression Curve, Compression Equation

Dr., Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, 06532 Beytepe Ankara.

1. GERİŞ

Maden ocaklarında etkin bir dolgu işlemi, maden emniyeti ve tasman açısından çok önemlidir.

Dolgu uygulamalarında önceden gevşek kayaç ve alüvyonlu malzemeler kullanılırken, günümüzde sıkışmaya karşı direnci olan, diğer bir deyişle az sıkışan, pnömatik ya da hidrolik ortamda nakledilen kırılmış malzemeye doğru bir değişim görülmektedir. Bu yeni malzemeler az sıkışmakta ancak taşınması aynı oranda kolay olmamaktadır. Bununla birlikte hidrolik ortamda dolgu malzemesi nakliyatı ve dağıtım maliyeti daha az olmaktadır (Oliver, et al, 1989).

Dolgu malzemesinin yük altındaki davranışı, diğer bir deyişle sıkışması, dolgunun uygunluğunu belirleyen en önemli parametredir. Dolgu malzemesinin az sıkışan ve kolay nakledilebilen özellikte olması istenir. Bu ise malzemenin düşük yığın boşluk oranına sahip olması ve tanelerin yük altında kırılmaya karşı sağlam olmasını gerektirir. Boşluk oranı ve tanelerin yığın halde yük taşınması özellikleri birbirine bağlı olmaktadır. Düşük boşluk oranı, iyi bir granülometrik ayarlama ile sağlanabilir. Tanelerin yük taşınması, yığın haldeki malzemenin taneseli özelliklerine bağlı olmaktadır. Tanesel özelliklerin başında şekil faktörü gelmektedir. Küresel şekilli tanelerin şekil faktörü değeri bir olarak alınmakta ve küresellikten köşeli (düzensiz) şekilli tanelere doğru gidildikçe bu değer azalmaktadır. Bir karışımda tanelerin, şekil faktörünün yüksek olması halinde çok sayıda tane birbirleriyle temas etmektedir. Temas halindeki taneler bir iskelet yapısı oluşturarak, yük iletimi sağlarlar. Birbirleriyle temas eden çok sayıdaki tanenin, iskelet yapısı altında kırılması güçleşir ve sıkışmaya karşı dirençleri artar.

Taneli yapıdaki malzemenin dolguda kullanılabilirliği, sıkışma eğrileri ve bu eğrilerin analitik ifadeleri ile belirlenmektedir. Sıkışma eğrileri, çeşitli yük seviyelerindeki sıkışma miktarını göstermektedir. Sıkışma eşitliği, bu eğrilerin pratik kullanımını sağlamaktadır. Eşitliklerin, ön oturma ve boşluk oranına bağlı olarak çıkarılması dolgu malzemesi özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlar.

Hidrolik dolgu uygulamasında, yük altındaki malzeme içindeki suyun süzülmesiyle taneler birbirine daha yakın konum alır. Bu sayede boşluk oranı azalır yük taşıma miktarı artar. Bu olay ön oturma (ön konsolidasyon) sırasında meydana gelir. Hidrolik dolguda ön oturma değeri yüksek olmakta ancak, büyük yük seviyelerine gelindiğinde sıkışma miktarı pnömatik dolguya göre daha az olmaktadır (Cengiz, 2001). Sıkışma eğrileri analitik ifadelerle tanımlandığında, çeşitli yük seviyelerinde dolgu malzemesi özelliklerine bağlı olarak sıkışma miktarı hesaplanabilir. Bu ifadelerde porozite, ön oturma ve ön gerilme gibi sıkışma parametreleri yer almaktadır.

Jacobi (1960), kuru dolgu üzerinde yaptığı çalışmada sıkışma eğrilerini ön oturma ve uygulanan yüke bağlı olarak ifade etmiştir. Liberman ve Mal'kova (1978) dolgu malzemeleri için gerilme-birim deformasyon ilişkisini üssel olarak tanımlamışlardır. Bu ilişkide, malzemenin boşluk oranını ifade etmek için porozite kullanmıştır. Şenyur (1985), lavvar atıklarından çeşitli karışımlar hazırlayarak pnömatik dolgu uygulaması için sıkışma eğrilerini incelemiş ve olumlu sonuç elde etmiştir. Haner (1993), Zonguldak, Armutçuk çevresi malzemelerini hidrolik dolgu uygulaması için incelemiştir. Lavvar atığı malzemelerini tane boyu dağılımına göre birkaç gruba ayırıp dolgu için uygunluğunu araştırmış ancak olumlu sonuç elde edememiştir. Lavvar atıklarının hidrolik dolguda kullanılması için, yapay karışımların boşluk oranına bağlı olarak dolgu özelliklerini belirleyen kapsamlı bir çalışma literatürde yer almamaktadır.

Zonguldak Kömür Havzasında birkaç adet lavvar bulunmakta ve lavvar atıkları denize dökülmektedir. Bu atıklar çok miktarda şist ve az miktarda kireçtaşı, kumtaşı ve kömür kırıntıları içermektedir. Bu çalışmanın amacı, lavvar atıklarının hidrolik dolguda kullanılabilmesi için sıkışma özelliklerini belirlemektir. Bu amaçla, dolgu malzemesinin yerinde alacağı boşluk oranının laboratuvarında bir benzetimi yapılmıştır. Sıkışma deneyleri ile dolgu karakteristiği belirlenmiştir. Yapay karışım malzemelerinin yük altındaki davranışları incelenmiş ve sıkışma eğrileri, pratikte kullanabilmek amacıyla analitik olarak ifade edilmiştir.

2. DOLGU MALZEMELERİNİN SIKIŞMA ÖZELLİKLERİ

Ocaklarda kullanılan dolgu malzemeleri zemin mekaniğinde kohezyonsuz ya da çok az kohezyonlu taneli malzemeler olarak tanımlanır. Bu malzemelerin gerilme (σ)-birim deformasyon (ϵ) davranışları, tek eksenli sıkışma eğrileri ile incelenir. Bu eğriler doğrusal olmayan bir özellik taşır. Literatürde, dolgu malzemelerinin sıkışma eğrilerini açıklayan gerilme-birim deformasyon ilişkisi genellikle:

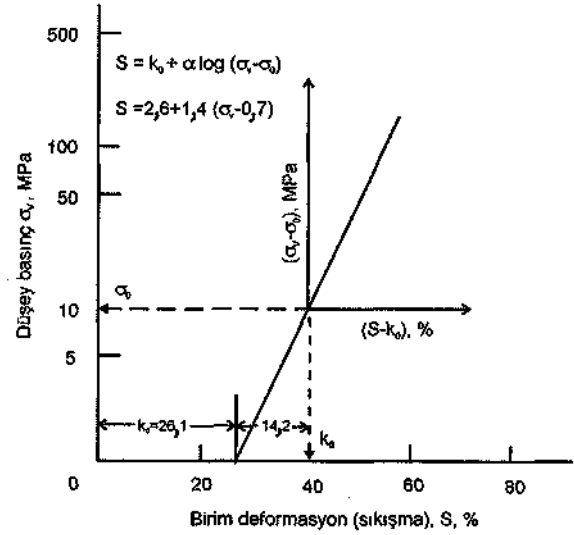
$$S = a a_v \quad (D)$$

şeklinde temel bir ifade ile tanımlanmaktadır. Burada, a ; sabit bir sayı S ; düşey birim deformasyon (sıkışma), a_v ; düşey gerilme ve V ise 0,5-0,7 arasında değişen kuvvet değeridir (Janbu, 1963; Schultz and Moussa, 1961). Ancak Eşitlik 1'de dolgu malzemesi tanelerinin yerleşme konumu ile ilgili bir parametre yer almamaktadır. Halbuki tanelerin diziliminden dolayı tanelerin yüzeyinde ve arasındaki suyun etkisiyle yığın boşluk oranı çeşitli değerler almaktadır. Yığın boşluk oranı, sıkışma parametreleri ile birlikte dolgu karakteristiğini açıklayan önemli bir parametredir (Cengiz, 2001).

Jacobi (1960), kuru dolgu üzerinde yaptığı çalışmada, dolgu malzemesinin sıkışmasını uygulanan yüke karşı çizmiştir. Birim deformasyonu dolgunun başlangıç yüksekliğinin yüzdesi olarak ifade etmiştir. Dolguya uygulanan düşey basınç, logaritmik y-ekseni üzerinde ve bu değere karşı gelen birim deformasyon (sıkışma) aritmetik x-ekseni üzerinde alınmıştır. Dolgu sıkışma karakteristiği iki aşamada açıklanmıştır: İlk aşamada, belirli bir yük seviyesine ($\sigma_v = \sigma_{b0}$) kadar ilk oturma birim deformasyonu (ϵ_0) oluşmaktadır. İkinci aşamada ise ϵ_0 'dan sonra oluşan birim deformasyon ile logaritmik ölçekli düşey basınç ($\sigma_v - \sigma_{b0}$) farkı arasında doğrusal bir ilişki mevcuttur. Bu ilişki:

$$S = k_0 + a_v \log(a_v - a_{v0}) \quad (2)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada a_v ; düşey gerilme, S ; toplam sıkışma (birim deformasyon) ve a ise gerilme-birim deformasyon doğrusu eğiminin tersidir ($\epsilon = 1/\tan \alpha$) (Şekil 1).



Şekil 1. Jacobi'nin (1960) sıkışma-gerilme doğrusu

Lieberman ve Mal'kova (1978) dolgu malzemeleri için gerilme-birim deformasyon ilişkisini $S < n_a$ koşulu ile

$$S = n_a \cdot 1 - e^{-U} \quad (3)$$

şeklinde ifade etmektedir. Burada, S ; birim deformasyon, n_a ; başlangıç boşluk oranı (porozite), e^{-U} ve U ; sıkışma katsayıları ve σ_v ise düşey gerilme (MPa) olmaktadır. Yapılan deneylere göre sıkışma katsayısının $0 < U < 1$ aralığında değerler aldığı görülmüştür.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Tanesel Özellikler

Dolgu malzemesi numunesi olarak şist ağırlıklı Zonguldak Merkez Lavvar atıkları kullanılmıştır. Örnekler lavvardan ASTM D75 standardına göre alınmıştır. Numuneler yıkanarak çamur, ağaç kırıntısı vb.'den temizlenip, kurutulmuştur. Bu malzeme 19,0 mm açıklığındaki çeneli kırıcıdan geçirilip tane boyuna göre sınıflandırılmıştır. ASTM C 117 ve ASTM C 128 standardına göre tanelerin özgül kütlesi ve su emme oranları bulunmuştur.

3.2. Yapay Dolgu Karışım Granülometreleri

Kırılmış malzemeden -19,0 mm +0,5 mm tane boyu aralığında çeşitli karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımları tanımlayan, etkin çap (d_{10}), malzemenin %10'nun geçtiği tane boyu, düzenlilik katsayısı ($C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$) ve eğrilik katsayısı ($C_c = \frac{d_{30}^2}{(d_{10} \cdot d_{60})}$) olan granülometre parametrelerinin değişimi ile çeşitli yapay karışım modelleri hazırlanmıştır. Burada, c_{30} ve d_{60} malzemenin %30 ve %60'nın geçtiği tane boylarıdır.

3.3. Yapay Karışımların Yerinde Yığın Özellikleri

Dolgu malzemelerinin yerinde almış olduğu yığın yoğunluğu (p_a) ve buna bağlı boşluk oranını (e) laboratuvar ortamında tespit etmek için bir benzetim yapılmıştır.

Hidrolik dolgu uygulamasında, su içinde çalkantılı akışla taşınan malzeme belli bir yükseklikten yerçekimi ile üretim yerine taşınarak dökülür (Charles, 1993). Suyun tamamen süzülmesiyle, malzemenin aldığı boşluk oranı değeri, yerinde boşluk oranıdır. Hidrolik dolgu malzemesi nakliyesinde öncelikle katı/su oranının belirlenmesi gerekir. Çünkü, düşük su oranında malzeme boruların içinde çökelerek tıkanıklığa, yüksek su oranında ise ocakta su probleminde yol açabilir. Bu nedenle, optimum katı/su oranının belirlenmesi gerekmektedir. Katı/su oranı, Mitchell ve Smith (1979) tarafından verilen eşitlikler yardımıyla hesaplanmış ve bu oran A olarak bulunmuştur (Cengiz, 2001).

Katı/su oranı hesaplanan malzemenin, laboratuvardaki benzetim işleminde, dolgu kabı olarak ASTM C 29 standardına uygun 20,7 cm çaplı 40 cm yüksekliğinde 0,55 cm et kalınlığında çelik silindir ve su süzülmesi için delinmiş alt tabla kullanılmıştır. Yaklaşık 17-18 kg arasında bir malzeme bir leğende suyla iyice karıştırılıp doymun hale getirilmiştir. Bir litrelik mezür içine bir miktar karışım malzemesi konulup ağırlıkça iki katı kadar su mezura ilave edilmiştir. Mezür iki el arasında aşağı yukarı çalkalanmış ve 20-30 cm yükseklikten ters çevrilip malzeme silindire boşaltılmıştır. Bu

şekilde, leğendeki karışım silindire yerleştirilmiştir. Malzemenin üst yüzeyi elle düzeltilmiş ve plaka, kapak oturtulmuştur. Malzeme suyunun süzülmesi için yaklaşık 45 dakika beklenmiştir. Sonra silindir üst kenarından plaka derinliği, çevresel eşit aralıklarda kumpasla ölçülüp ortalaması alınmış (ortalama derinlik) ve böylece ortalama dolgu yüksekliği ve hacmi bulunmuştur. Sonra malzemenin su içeriği (w) ASTM C 566 standardına göre tayin edilmiştir. Silindirdeki malzemenin yoğunluğu, birim hacim ağırlığı ve boşluk oranı hesaplanmıştır. Boşluk oranı (e):

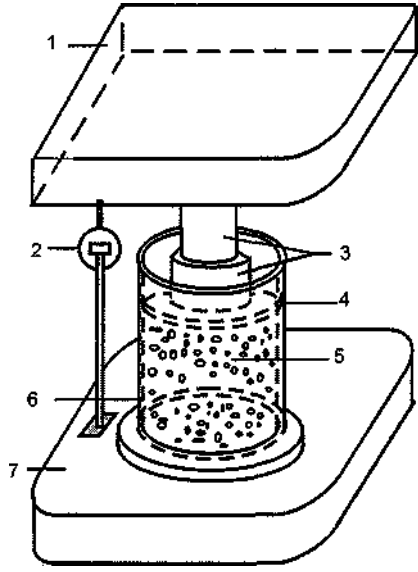
$$e = G_s(1 + w) - 1 \quad (4)$$

olarak ifade edilmektedir. (Craig, 1992). Burada, G_s özgül ağırlık (birimsizdir) (doymun kuru yüzey bazına göre), p dolgunun yoğunluğu (kN/m^3), p_w suyun yoğunluğu ($=10 \text{ kN/m}^3$), w su oranıdır. Eşitlik (4)'de yer alan e ve w birimi yüzde olup, sayısal olarak ifade edilmektedir. Porozite (n) ile boşluk oranı arasında aşağıdaki ilişki vardır:

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

3.4. Tek Eksenli Sıkışma Deneyleleri

Dolgu malzemesinin tek eksenli yük altında davranışını izlemek üzere tek eksenli sıkışma deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde suyu süzölmüş malzeme ile dolu silindir, hidrolik prese yerleştirilmiştir. Silindir içindeki dolgu malzemesinin üzerine çelik plaka yerleştirilmiştir. Pres ile plaka arasında yük iletimi sağlamak amacıyla yarı küresel başlıklar kullanılmıştır. Yük altında (düşey asal gerilme, $\langle T \rangle$) meydana gelen sıkışmayı (birim deformasyon, S) ölçmek için plaka üzerine kompratör bağlanmıştır. Yük seviyesi kademeli olarak artırılmış olup 32 ton'a kadar çıkmıştır. Düşey basınç $\tau_j = 10 \text{ MPa}$ 'ya karşılık gelmektedir. Şekil 2'de deney düzeneği verilmiştir.



1. Üst başlık, 2. Kompratör,
3. Ara plakalar, 4. Yükleme plakası,
5. Yapay karışım, 6. Deney silindiri,
7. Piston tablası

Şekil 2. Tek eksenli sıkışma deney düzeneği

4. DENEY SONUÇLARI

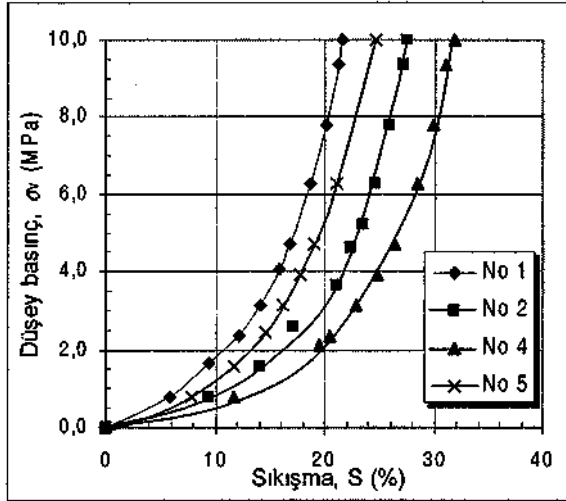
Bu çalışmada, tanelerin özgül ağırlık 2,55 olarak hesaplanmıştır. 1 nolu karışımın yerinde nem oranı $w=0,04$ (%4), yoğunluğu $p= 18,20 \text{ kN/m}^3$ olarak hesaplanmış olup, buradan Eşitlik 4'e göre boşluk oranı $e=0,442$ (%44,2) olarak hesaplanır. Benzetimle, deney silindire doldurulan sulu malzemenin suyu tabandan tamamen süzöldükten sonra aşağıdaki anlatılan yöntemle silindir içindeki nemli malzemenin hacmi ölçülerek, dolgu yoğunluğu hesaplanmıştır. Silindirin üst yüzeyinden dolguya kadar olan derinlik ölçümü kumpasla alınarak (h_a') silindir yüksekliğinden çıkarılarak ($h-h_a'$) dolgu yüksekliği bulunur. Buradan, silindirin taban çapı ($\phi_{20,7}$ cm) ve dolgu yüksekliğinden silindir içindeki dolgunun hacmi hesaplanır. Suyu doymuş dolgu malzemesi ağırlığının hacime bölünmesiyle dolgu yoğunluğu (kN/m^3) hesaplanır. Eşitlik 4 ile bu karışımın yerinde boşluk oranı hesaplanır. Her bir karışım için bu işlem yapılmıştır. Çeşitli düşey yük seviyelerinde dolgunun üzerinden birim deformasyon değerleri (h') alınmıştır. Başlangıç dolgu yüksekliğine (h_0) bölünmesiyle

her bir yük seviyesinde sıkışma miktarları (S , %) hesaplanmıştır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Yapay Karışımların Tane Boyu Parametreleri, Yerinde Boşluk Oranı (e) ve Sıkışma Değerleri (d_{\min} : En Küçük Tane Boyu, d_{10} : Etkin Çap, C_u : Düzenlilik Katsayısı, C_c : Eğrilik Katsayısı, S : 10 Mpa'da Sıkışma Oranı)

Karışım No	d_{\min} (mm)	d_{10} (mm)	C_u	C_c	e	S (%)
1	0,5	0,8	8,0	0,8	0,442	21,6
2	0,5	1,8	6,5	1,8	0,585	27,6
3	0,5	0,7	13,6	0,9	0,432	22,1
4	0,5	3,0	4,3	2,5	0,681	31,8
5	0,5	1,0	8,2	0,9	0,486	24,1
6	0,5	1,0	16,0	10,9	0,513	27,8
7	0,5	1,0	16,0	8,0	0,471	28,5
8	0,5	1,0	16,0	4,0	0,544	26,9
9	0,5	1,0	16,0	1,1	0,494	26,1
10	0,5	1,0	16,0	0,1	0,437	22,8
11	0,5	1,0	11,2	8,1	0,515	26,7
12	0,5	1,0	11,2	4,6	0,503	27,0
13	0,5	1,0	11,2	0,8	0,488	27,3
14	0,5	1,0	11,2	0,2	0,476	23,7
15	0,5	1,0	6,7	3,4	0,577	26,1
16	0,5	1,0	6,7	2,0	0,556	26,6
17	0,5	1,0	6,7	0,9	0,500	24,8
18	0,5	1,0	6,7	0,3	0,518	24,2
19	0,5	1,0	3,1	1,9	0,633	30,0
20	0,5	1,0	3,1	1,0	0,637	30,3
21	0,5	1,0	3,1	0,6	0,569	28,2
22	0,5	2,8	3,4	0,8	0,617	30,3
23	1,0	1,3	3,2	0,6	0,508	28,6
24	1,0	1,3	9,6	0,8	0,505	24,6
25	1,0	2,0	8,0	4,9	0,530	26,5
26	1,0	2,0	8,0	2,9	0,526	29,6
27	1,0	2,0	8,0	0,7	0,508	27,7
28	1,0	2,0	8,0	0,2	0,596	28,9
29	1,0	2,0	4,8	3,4	0,646	30,8
30	1,0	2,0	4,8	2,4	0,653	29,8
31	1,0	2,0	4,8	1,2	0,687	32,2
32	1,0	2,0	4,8	0,4	0,595	28,3
33	1,0	2,0	2,4	1,7	0,629	31,8
34	1,0	2,0	2,4	0,8	0,607	27,7
35	1,0	2,0	2,3	0,9	0,646	30,4

Sıkışma oranına karşı uygulanan düşey basınç çizilerek sıkışma eğrisi elde edilmiştir. Şekil 3'de dört adet sıkışma eğrisi verilmiştir. Liberman and

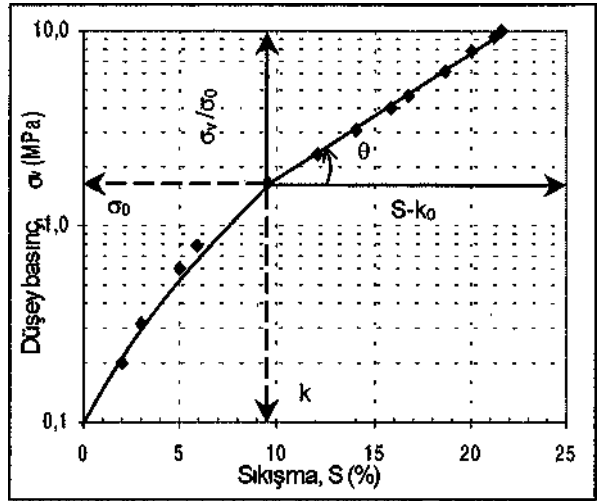


Şekil 3. Dört adet karışımın sıkışma eğrileri

Mal'kova (1978) eşitliği parametreleri (σ_0 ve IV), herbir karışım için SPSS paket programında doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. 1 nolu karışımın yerinde porozite değeri $n_s=0,307$ ve çeşitli yük seviyelerinde alınan sıkışma değerleri kullanılarak yapılan hesaplamada $cr_0=6,895$ MPa ve $IV=0,535$ değerleri bulunmuştur. Deneysel verilerle bu eşitlik arasında yüksek uyum izlenmiştir ($R^2=0,998$). Deneysel sonuçlarla, paket programdan hesaplanan sıkışma parametrelerinin Eşitlik 3'de yerine konularak hesaplanan sıkışma değerleri arasında yüksek uyum olduğu görülmüştür (Şekil 5.a).

Jacobi'nin kuru dolgu malzemesi üzerine yaptığı çalışmadan çıkardığı Eşitlik 2 deney sonuçları ile uyum göstermemiştir. Bunun nedeni, hidrolik dolguda tanelerin su yardımıyla daha kolay hareket edebilmesi ve yük altında taneler arasındaki suyun da süzülmesiyle daha yüksek ön oturma değerinin gözlenmesidir. Sıkışma eğrisinin, ön oturma değerinden sonraki kısmı, kuru dolgudaki ile aynı benzerlik göstermemektedir.

Bu çalışmada, su ile yerleştirilmiş olan malzeme belli bir oranda nem içeriğine sahiptir. Laboratuvarında yapılan deneyde yük (düşey basınç)-sıkışma ölçümleri yarı-logaritmik ölçekli çizildiğinde, Şekil 4'de görülen ilişki elde edilmiştir. Düşey basınç (a_v), logaritmik y-ekseni

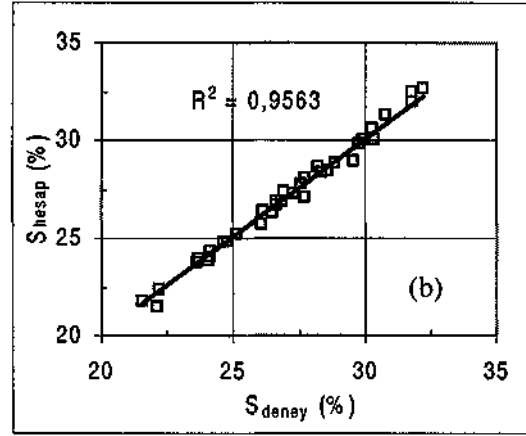
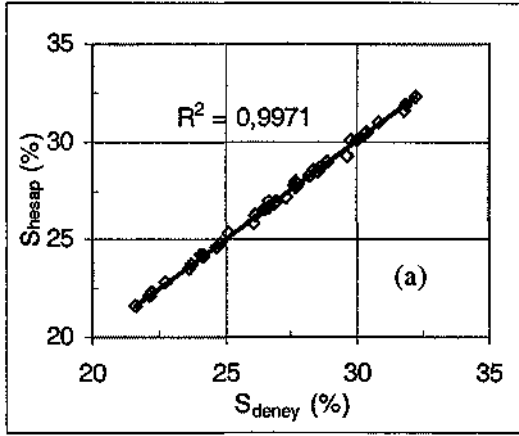


Şekil 4. 1 nolu karışımın, sıkışma-yük doğrusu

üzerinde ve bu değere karşılık gelen oturma (S) aritmetik x-ekseni üzerinde yer almaktadır. Belli bir basınç seviyesine kadar noktalar çok az kavisli bir eğri üzerinde kalacak şekilde sıralanmakta ve bu noktadan itibaren bir eğilme gözlenmektedir. Grafiğin büküm noktasına kadar olan kısmı ön oturma (σ_0) değerini göstermektedir. Eşitlik 2'nin k_0 değerinden sonraki kısmının analitik olarak tanımlanabilmesi için grafiğin eksenleri büküm noktasına taşınır. Yeni eksen, x-ekseni ($S-k_0$) değerlerini y-ekseni $\log(a_v/\sigma_0)$ değerlerini göstermektedir. Buna göre 1 nolu karışım için çizilen sıkışma-düşey basınç grafiğinden $\sigma_0=9,5$ ve $\sigma_0=1,65$ MPa değerlerindedir (Şekil 4). Eşitlik 4'ün ikinci kısmındaki $\log(cr_0/\sigma_0)$ ifadesi yerine $\log(\sigma_0/\sigma_0)$ alındığında denklem hidrolik dolgu malzemesi için iyi uyum göstermektedir. Büküm noktasından sonraki doğrunun eğimi $\tan\theta$ olarak ifade edilip, a katsayısı $a=1/\tan\theta$ şeklinde sıkışma eşitliğinde kullanılabilir. Bu durumda Eşitlik 3,

$$S = k_0 + a \log(a_v/\sigma_0) \quad (7)$$

ile ifade edilmektedir. Eşitlik 7'ye göre Şekil 4'deki grafikte, taşınan (yeni) y-eksenini $\log(\sigma_0/\sigma_0)$ değeri göstermektedir. Yeni eksen üzerindeki doğrunun eğimi $\tan\theta=0,0636$ ve $co=\% 15,70$ olarak hesaplanmıştır. Bulunan değerler, Eşitlik 7'de yerine konularak sıkışma miktarları hesaplandığında, elde edilen



Şekil 5. Sıkışma değerinin (S), deneysel ve (a) Liberman ve Mal'kova eşitliği, (b) önerilen eşitlik ile uyumluluğu (R^2 : regresyon katsayısı)

değerlerin deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir. ($R^2=0,957$) (Şekil 5.b).

5. SONUÇLAR

Zonguldak Lavvar atıklarının hidrolik dolguda, granülometrisi -19,0 mm +0,5 mm aralığında, katı/su oranı X_A alındığında çeşitli karışımların 10 MPa'lık düşey basınç altında %21-32 arasında sıkışma miktarına sahip olduğu görülmüştür. Bu karışımların, düzenlilik katsayısı $C_n > 4$ ve eğrilik katsayısı $C_c < 1$ olanların, yerinde almış olduğu boşluk oranının (e) düşük olduğu görülmektedir. Boşluk oranı $e < 0,5$ olan karışımların yük altında daha az sıkıştığı gözlenmektedir.

Dolgu malzemesinin sıkışma karakteristiğini tanımlayan Liberman ve Mal'kova eşitliği boşluk oranına bağlı sıkışmayı tanımlamaktadır. Deneysel ve hesaplanan sıkışma değerleri arasında çok iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Jacobi'nin önerdiği eşitlik, ön oturma değerine bağlı olarak sıkışmayı tanımlamaktadır. Bu eşitlik hidrolik dolguda kullanılabilecek şekle dönüştürülmüştür. Böylece eşitlik, gerçek uygulamada granülometrisi bilmen bir hidrolik dolgu malzemesinin, yük taşıma kapasitesinin hesaplanabilmesine olanak sağlanacaktır.

Teşekkür

Yazar, bu çalışmanın gerçekleşmesinde, ODTÜ Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği Laboratuvarının kullanılmasını sağlayan Prof.Dr. Celal Karpuz'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR

ASTM C 117-90, 1993; "Standard Test Method for Materials Finer than 75-mm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing", Annual Book of ASTM Standards, Cilt 04.02, s. 57-59.

ASTM C 128-93, 1993; "Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate", Annual Book of ASTM Standards, Cilt 04.02, s. 70-74.

ASTM C 29/C 29M-91a, 1993; "Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregate", Annual Book of ASTM Standards, Cilt 04.02, s. 1-4.

ASTM C 566-89, 1993; "Standard Test Method for Total Moisture Content of Aggregate by Drying", Annual Book of ASTM Standards, Cilt 04.02, s. 288-289.

ASTM D 75-87, 1993; "Standard Practice for Sampling Aggregates", Annual Book of ASTM Standards, Cilt 04.08, s. 650-653.

Cengiz, A.K., 2001; "Zonguldak Lavvar Atıklarının Hidrolik Dolguda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, H.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 261 s.

Charles, J.A., 1993; "Building on Fill: Geotechnical Aspects", Building Research Establishment, Graston, Watford, 163 s.

Craig, R.F., 1992; "Soil Mechanics", Fifth edition, Chapman & Hall University and Professional Division, London, 427 s.

Jacobi, O., 1960; "Die Ableitung von Gesetzmäßigkeiten aus den Druck und Konvergenzmessungen im Blasversatz", Glückauf 96, s.419-428.

Haner, B., 1993; "Hidrolik Dolgu Uygulaması için Zonguldak-Armutçuk Çevresi Malzemelerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 315 s.

Janbu, N., 1963; "Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Test", Proc. of European Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Wiesbaden, Germany, I, 19-25.

Liberman, Y.M. and Mal'kova K.R.I., 1978; "Influence of the Compaction of Stowing Materials on Roof-to-Floor Convergence of a Coal Seam Being Worked", Soviet Mining Science, 14, 3, s.321-324.

Mitchell, R.J. and Smith, J.D., 1979; "Mine Backfill Design and Testing", CM Bulletin, January, 72, 801, s.82-88.

Oliver, P.H. and Landriault, 1989; "The Convergence Resistance of Mine Backfills", Proc. of the 4th Int. Symp. on Mining with Backfill, Montreal, s.433-436.

Schultze, E. and Moussa, A., 1961; "Factors Effecting the Compressibility of Sands", Proc. of 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Dunod, Paris, 1, s.335-340.

Şenyur, M.G., 1985; "The Behaviour of Pneumatic Filling Materials in One-Dimensional Compression", Ph.D. Thesis, METU, Ankara, 278 s.