

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ATIK DÖKÜM KUMUNUN GEÇİRİMSİZ PERDE
YAPILARAK TEKRAR KULLANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Pınar SOLMAZ

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ZEMİN MEKANİĞİ VE GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ATIK DÖKÜM KUMUNUN GEÇİRİMSİZ PERDE
YAPILARAK TEKRAR KULLANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Pınar SOLMAZ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2007

Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Ocak 2008

Tez Danışmanı : Doç.Dr. M. Ayşen LAV (İ.T.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Mete İNCECİK (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Gökhan BAYKAL (B.Ü.)

OCAK 2008

ÖNSÖZ

Bu çalışma kapsamında, İstanbul civarında faaliyet gösteren döküm sanayi kuruluşlarından temin edilen atık döküm kumlarının indeks özellikleri, bentonit miktarları, organik madde miktarları, kompaksiyon özellikleri, hidrolik iletkenlikleri (permeabilite) incelenmiştir. Literatürde bulunan benzer çalışmaların da yardımıyla sonuçlar hakkında değerlendirilmeler yapılmış, bentonit yüzdesine bağlı hidrolik iletkenlik değişimi incelenmiştir. Ayrıca süzüntü suyunda ICP ve AAS cihazları kullanılarak ağır metal analizi yapılmıştır.

Bölüm bazında çalışmanın değerlendirilmesini yapmak gerekirse; Bölüm 2’de döküm işlemi, döküm ve kalıplama yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Bölüm 3’de döküm kumu hakkında genel bilgiler verilmiş, döküm kumunun fiziksel ve kimyasal özelliklerine değinilmiş ve döküm kumu bileşenlerinden olan bentonit tanıtılmıştır. Bölüm 4’de kum-bentonit karışımları ile ilgili geçmiş çalışmalardan örnekler verilmiş ulaşılan sonuçlara değinilmiştir. Bölüm 5’de ise atık döküm kumunun geçirimsizlik amaçlı kullanımına değinilmiş, bu konuda yapılmış çalışmalardan örnekler verilmiştir. Bölüm 6 tüm laboratuvar deney/çalışmalarını özetlemekte sonuçları tablolar ve grafikler halinde sunmaktadır. Bölüm 7’de ise ulaşılan sonuçlar ve sonuçlarla ilgili değerlendirmeler verilmiştir.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında sonsuz katkısını esirgemeyen hocam Doç. Dr. Sayın M. Ayşen Lav’a, konunun olgunlaşmasında ve laboratuvar imkanlarından yararlanmada yardımlarını eksik etmeyen Prof. Dr. Sayın M. Sabri Çelik ve Dr. Sayın Birgül Benli’ye, tüm çalışma sürecim boyunca yardımlarını esirgemeyen Sayın Burhan Erdil’e laboratuvar çalışmalarına destek veren Sayın M. Murat Kepekçi, Sayın Emre Ekici, Sayın Cem Duman’a, numune göndererek veya vererek bu araştırma çalışmalarının başlatılmasını sağlayan döküm kuruluşlarına başta Sayın Nizamettin Özdemir, Sayın Bülent Nilüfer, Sayın Can Akbaşoğlu, Sayın Yusuf Tahran, Sayın Arif Oktay Şimşir olmak üzere Döktaş Dökümcülük Tic. San. A.Ş., Emin Döküm, Bıyıklı Döküm, Arı Metal, Ferro Döküm Sanayi Tic. A.Ş., Körfez Döküm San. Tic. A.Ş., Ata Döküm, Ümit Döküm, Akmetal Metalurji End. A.Ş., Haytaş Döküm San. A.Ş., Çemaş Döküm San. A.Ş., Anadolu Döküm San. A.Ş., Acarer Döküm San. Tic. A.Ş., Kutes, Trakya Döküm San. Tic. A.Ş., Erkunt San. A.Ş., Entil End. Yat. Tic. A.Ş., Demisaş Döküm Em. Mam. San. A.Ş.’a ayrıca TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığına ve son olarak desteklerini asla esirgemeyen annem Fatma Solmaz ve babam Vahit Solmaz’a teşekkürlerimi sunarım.

Aralık, 2007

Pınar Solmaz

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. DÖKÜM İŞLEMİ	3
2.1. Döküm İşlemi Hakkında Genel Bilgiler	3
2.2. Döküm ve Kalıplama Yöntemleri	4
2.2.1. Kum Kalıba Döküm	4
2.2.2. Kabuk Kalıba Döküm	10
2.2.3. Kalıcı Kalıplara Döküm	12
2.2.4. Hassas Döküm	18
2.2.5. Alçı Kalıba Döküm	20
2.2.6. Dolu Kalıba Döküm	23
3. DÖKÜM KUMU VE İÇERİĞİ	25
3.1. Döküm Kumu Hakkında Genel Bilgiler	25
3.2. Döküm Kumunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	29
3.3. Bileşenler Bazında Döküm Kumu	35
3.3.1. Kum	35
3.3.2. Su	36
3.3.3. Bağlayıcılar	36
3.3.4. Eklentiler	38
3.4. Bentonit Hakkında Genel Bilgiler	38
4. KUM-BENTONİT KARIŞIMLARININ HİDROLİK İLETKENLİKLERİ HAKKINDAKİ İNCELEMELER	44
4.1. Kompaksiyon Koşullarının Etkisi	45
4.2. Donma-Çözünme Döngüsünün Hidrolik Etkisi	46
4.3. Islanma-Kurumanın Döngüsünün Etkisi	47
4.4. Kimyasal Maddelerin Etkisi	47
4.5. Kum Bentonit Karışımlarının Şişmesi	48
5. ATIK DÖKÜM KUMLARININ YENİDEN KULLANIMINA YÖNELİK ÇALIŞMALAR	56
5.1. Atık Döküm Kumunun Geçirimsizlik Amacıyla Yeniden Kullanımı	56
5.2. Atık Döküm Kumunun Kullanılması Mümkün Diğer Alanlar	63

6. TÜRKİYE'DE ATIK DÖKÜM KUMLARININ GEÇİRİMSİZ PERDE YAPIMINDA KULLANILMASI	67
6.1. Giriş	67
6.2. Method ve Malzeme	67
6.2.1. Örnek Toplama	67
6.2.2. İndex Özelliklerinin Belirlenmesi	68
6.2.3. Kızdırma Kaybı	77
6.2.4. Kompaksiyon Deneyleri	78
6.2.5. Permeabilite Deneyleri	79
6.2.6. ICP İncelemeleri	80
6.2.7. Atomik Absorbsiyon Spektrometrisi	83
6.3. Deney Sonuçları ve Analizler	85
6.3.1. İndeks Deneyleri	85
6.3.2. Kızdırma Kaybı	91
6.3.3. Kompaksiyon Deneyleri	92
6.3.4. Permeabilite Deneyleri	97
6.3.5. ICP ve AAS Deneyleri	102
7. SONUÇLAR	105
KAYNAKLAR	108
ÖZGEÇMİŞ	111

KISALTMALAR

SEM	: Scanning Electron Micrograph
ICP	: Inductively Coupled Plasma
AAS	: Atomic Absorption Spectrophotometer
ASTM	: American Society for Testing and Materials
PMMA	: Polimetilmetakrilat
PS	: Polistiren
AFS	: American Foundry Society
KAD	: Katı Atık Depolama
ppm	: Parts Per Million
meq	: Milliequivalent

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Yaş Kum Kalıplama Yöntemi Özellikleri (Aran, 1999).....	6
Tablo 2.2 Kuru Kum Kalıplama Yönteminin Özellikleri (Aran, 1999).....	7
Tablo 3.1 Kırıntılı Tortulların Dane Boyu Sınıflandırması (Wentworth, 1922).....	25
Tablo 3.2 Döküm Yolu ile Üretilen Mamullerin Sınıflandırılması (DPT Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Çalışma Raporu, 1995).....	26
Tablo 3.3 Dünya Döküm Kumu Tüketimi(DPT Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Çalışma Raporu, 1995).....	27
Tablo 3.4 Kalıp Kumu Türleri (Dışpınar, 2005).....	30
Tablo 3.5 Döküm Kumlarının Fiziksel, Kimyasal ve Teknolojik Özellikleri (DPT Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Çalışma Raporu, 1995)	36
Tablo 3.6 Dünya Bentonit Rezervleri (DPT Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Çalışma Raporu, 2001).....	42
Tablo 5.1 Iroquois Döküm Şirketinin Test Numunelerinin Özellikleri (Abichou, 1999).....	57
Tablo 5.2 Grede Döküm Şirketi Test Kesit ve Özellikleri (Vierbicher Associates, 1996).....	60
Tablo 5.3 Hafifletilmiş, Standart ve Modifiye Proctor Enerjileri için Hidrolik İletkenlik Değerleri (Abichou, 1999).....	61
Tablo 5.4 Donma-Çözünme Döngüleri Sonunda Hidrolik İletkenliğin Değişimi (Abichou, 1999).....	62
Tablo 5.5 Islanma-Kuruma Döngüleri Sonunda Hidrolik İletkenliğin Değişimi (Abichou, 1999).....	62
Tablo 5.6 Hidrolik İletkenliğin Geçen Sıvıya Bağlı Değişimi (Abichou, 1999).....	63
Tablo 6.1 Kullanılan Atık Döküm Kumları ve Özellikleri.....	68
Tablo 6.2 Atık Döküm Kumlarının İndeks Özellikleri.....	86
Tablo 6.3 Bentonitlerin İndeks Özellikleri.....	86
Tablo 6.4 Hafifletilmiş Proctor Deney Sonuçları.....	92
Tablo 6.5 Standart Proctor Deney Sonuçları.....	92
Tablo 6.6 Ağırlandırılmış Proctor Deney Sonuçları.....	92
Tablo 6.7 Döküm Kumu Numunelerinde Hidrolik İletkenlik Değerleri.....	97
Tablo 6.8 Doğal zeminin geçirgenliğinin yeterliliği (Alyanak, 2006).....	102
Tablo 6.9 Ağır Metal Kriterleri (Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, 2005).....	103
Tablo 6.10 Numunelerin Eluat Kriterleri-1.....	103
Tablo 6.11 Numunelerin Eluat Kriterleri-2.....	104

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Kum Kalıba Dökümün Tipik Akım Şeması (Dışpınar,2005).....	5
Şekil 2.2 : Kum Kalıba Döküm (Aran, 1999).....	5
Şekil 2.3 : Kurutma Sıcaklığının Nem Dağılımına Etkisi (Aran, 1999).....	7
Şekil 2.4 : Vakumlu Kalıpla hazırlanmış Hava Filtresi Kutusu.....	12
Şekil 2.5 : Vakumlu Kalıpla Hazırlanmış Otomobil Emme Manifoldu.....	12
Şekil 2.6 : Kum ile Vakumlu Kalıplama Süreci (Dışpınar, 2005).....	13
Şekil 2.7 : Kokil Kalıba Döküm (Dışpınar, 2005).....	15
Şekil 2.8 : Alçak Basıncı Döküm (Aran, 1999).....	16
Şekil 2.9 : Basıncı Döküm Örnekleri-1.....	17
Şekil 2.10 : Basıncı Döküm Örnekleri-2.....	17
Şekil 2.11 : Basıncı Döküm Örnekleri-3.....	17
Şekil 2.12 : Hassas Döküm (Dışpınar, 2005).....	18
Şekil 2.13 : Hassas Döküm Uygulama Örnekleri (Dışpınar, 2005).....	20
Şekil 2.14 : Alçı Kalıp Örneği.....	22
Şekil 2.15 : Alçı Kalıp ve Döküm Örnekleri.....	23
Şekil 2.16 : Dolu Kalıba Döküm Yöntemi (Sarıdikmen ve diğ.,2002).....	24
Şekil 3.1 : Dane Çapının Yaş Mukavemetine Etkisi (Dışpınar, 2005).....	31
Şekil 3.2 : Farklı Dane Çapının Artan Nem ile Yaş Mukavemetine Etkisi (Dışpınar, 2005).....	31
Şekil 3.3 : Dane Şeklinin Yaş Mukavemetine Etkisi (Dışpınar, 2005).....	32
Şekil 3.4 : Bağlayıcı Miktarının Yaş Mukavemetine Etkisi (Dışpınar, 2005)...	32
Şekil 3.5 : Dane Çapının Gaz Geçirgenliğine Etkisi (Dışpınar, 2005).....	33
Şekil 3.6 : Dane Şeklinin Gaz Geçirgenliğine Etkisi (Dışpınar, 2005).....	33
Şekil 3.7 : Bağlayıcı Miktarının Gaz Geçirgenliğine Etkisi (Dışpınar, 2005)...	34
Şekil 3.8 : Nem Miktarının Gaz Geçirgenliğine Etkisi(Dışpınar, 2005).....	34
Şekil 4.1 : Tipik Zaman-Şişme İlişkisi (Sivapullaiah ve diğ. , 1996).....	49
Şekil 4.2 : Zaman-Şişme İlişisini Gösteren S Eğrisi (Sivapullaiah ve diğ., 1996).....	50
Şekil 4.3 : %10 Bentonit İçeren Farklı Zemin Karışımlarının Tipik S Eğrileri (Sivapullaiah ve diğ., 1996).....	51
Şekil 4.4 : %5 Bentonit İçeren Yeni Hazırlanmış Kum-Bentonit Karışımının SEM Görüntüsü (Komine ve Ogata, 1996).....	52
Şekil 4.5 : %5 Bentonit İçeren Kum-Bentonit Karışımında Bentonitin Şişerek Boşlukları Küçültmesi (Komine ve Ogata, 1996).....	52
Şekil 4.6 : %10 Bentonit İçeren Yeni Hazırlanmış Kum-Bentonit Karışımının SEM Görüntüsü (Komine ve Ogata, 1996).....	53
Şekil 4.7 : %10 Bentonit İçeren Kum-Bentonit Karışımında Bentonitin Şişerek Boşlukları Küçültmesi (Komine ve Ogata, 1996).....	53
Şekil 4.8 : %20 Bentonit İçeren Yeni Hazırlanmış Kum-Bentonit Karışımının SEM Görüntüsü (Komine ve Ogata, 1996).....	54
Şekil 4.9 : %20 Bentonit -İçeren Kum-Bentonit Karışımında Bentonitin Şişerek Boşlukları Doldurması (Komine ve Ogata, 1996).....	54

Şekil 4.10	: %50 Bentonit İçeren Yeni Hazırlanmış Kum-Bentonit Karışımının SEM Görüntüsü (Komine ve Ogata, 1996).....	55
Şekil 4.11	: %50 Bentonit İçeren Kum-Bentonit Karışımında Bentonitin Şişerek Boşlukları Doldurması (Komine ve Ogata, 1996).....	55
Şekil 5.1	: Grede Döküm Şirketi Test Kesitleri (Vierbicher Associates, 1996).....	59
Şekil 5.2	: Grede Döküm Şirketi Test Kesitlerinin Yıllık Sızma Miktarları (Vierbicher Associates, 1996).....	61
Şekil 5.3	: Atık Döküm Kumunun Yol Dolgusunda Kullanımı (US Federal Highway Administration, 2004).....	64
Şekil 5.4	: Kademeli Dolgu (US Federal Highway Administration, 2004).....	64
Şekil 5.5	: Atık Döküm Kumunun Yol Tabanında Kullanımı (US Federal Highway Administration, 2004).....	65
Şekil 5.6	: Sıcak Asfalt Karışımla Yol Kaplaması (US Federal Highway Administration, 2004).....	65
Şekil 6.1	: Casagrande Aleti.....	70
Şekil 6.2	: Plastik Limitin Belirlenmesi.....	71
Şekil 6.3	: Hidrometre Analizi.....	73
Şekil 6.4	: Manyetik Karıştırıcıda Metilen Mavisi Deneyi Numunesinin Hazırlanması-1.....	75
Şekil 6.5	: Manyetik Karıştırıcıda Metilen Mavisi Deneyi Numunesinin Hazırlanması-2.....	76
Şekil 6.6	: Filtre Kağıdında Mavi Halelerin Gözlenmesi-1.....	76
Şekil 6.7	: Filtre Kağıdında Mavi Halelerin Gözlenmesi-2.....	77
Şekil 6.8	: Kızdırma Kaybı Deneyinin Yapıldığı Fırın.....	78
Şekil 6.9	: Kompaksiyon Deney Kalıbı.....	78
Şekil 6.10	: Permeametre.....	80
Şekil 6.11	: Hidrolik Geçirgenlik Deneyi.....	80
Şekil 6.12	: Plazma Fazı (Kaluç ve Taban, 2004).....	81
Şekil 6.13	: Aksiyal Sistem ve Radyal Sistem (Kaluç ve Taban, 2004).....	82
Şekil 6.14	: ICP Cihazı.....	82
Şekil 6.15	: ICP Numune Alıcı.....	83
Şekil 6.16	: AAS Cihazı.....	84
Şekil 6.17	: AAS Katot Lambası.....	85
Şekil 6.18	: 1 Numaralı Bentonit Numunesinin Su Muhtevası-Vuruş Sayısı Grafiği.....	87
Şekil 6.19	: Granülometre Eğrileri.....	89
Şekil 6.20	: 7 ve 8 Numaralı Numunenin Artan Bentonit Yüzdesine Karşı Değişen Dane Boyutu Dağılımı.....	90
Şekil 6.21	: Bentonit Yüzdesine Karşı Organik Madde Yüzdesinin Değişimi.....	91
Şekil 6.22	: Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı Bentonit Yüzdesi Grafiği... ..	93
Şekil 6.23	: Optimum Su Muhtevası Bentonit Yüzdesi Grafiği.....	94
Şekil 6.24	: 8 Numaralı Numune için %6.11 (mevcut hal), %10 ve %15 Bentonit Oranlı Standart Proctor Eğrileri.....	95
Şekil 6.25	: Tüm Standart Kompaksiyon Eğrileri.....	96
Şekil 6.26	: Bentonit Yüzdesi ile Hidrolik Geçirgenliğin Değişimi.....	99

Şekil 6.27	:7 Numaralı Numunede Hafifletilmiş, Standart ve Modifiye Proctor Deneyleri Sonucunda Elde Edilen Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlıklara Karşı Hidrolik Geçirgenliğin Değişimi.....	100
Şekil 6.28	: 8 Numaralı Numunede Hafifletilmiş, Standart ve Modifiye Proctor Deneyleri Sonucunda Elde Edilen Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlıklara Karşı Hidrolik Geçirgenliğin Değişimi.....	101
Şekil 6.29	: Tüm döküm kumu numuneleri için porozitenin hidrolik geçirgenlikle değişimi.....	101

SEMBOL LİSTESİ

k	: Hidrolik İletkenlik (Permeabilite)
n	: Porozite
γ_k	: Kuru Birim Hacim Ağırlık
γ_{kmax}	: Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık
W_{opt}	: Optimum Su Muhtevası
LL	: Likit Limit
PL	: Plastik Limit
PI	: Plastisite İndisi
K_r	: Son Hidrolik İletkenlikleğin İlk Hidrolik İletkenliğe Oranı

ATIK DÖKÜM KUMUNUN GEÇİRİMSİZ PERDE YAPILARAK TEKRAR KULLANIMI

ÖZET

Döküm işleminin en önemli elemanlarından biri döküm kumudur. Bu kumlar içerdikleri bağlayıcılara göre bentonitli ve reçineli olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Döküm kumları döküm sanayisinde kullanıldıktan sonra belediyelerin gösterdiği depolama alanlarına atılmaktadır. Döküm kuruluşlarının İstanbul ve çevresinde yoğunlaşması da saha açısından döküm atıklarının depolama alanlarını kısıtlamaktadır.

Bu çalışma dünyada farklı alanlarda yeniden kullanılan döküm kumunun geçirimsiz perde yapılarak kullanımını hedeflemektedir. Bu amaçla, ülkemizde faaliyet gösteren bazı döküm sanayi kuruluşlarından temin edilen 15 ayrı atık döküm kumu(14 tanesi bentonitli 1 tanesi reçineli) numunesinin indeks özellikleri, bentonit miktarı, kompaksiyon özellikleri, hidrolik iletkenlik değerleri belirlenmiş ve süzüntü sularında ağır metal konsantrasyonlarının tayini için ICP, AAS analizleri yapılmıştır. Ayrıca 4 ayrı bentonit numunesinin indeks özellikleri belirlenmiştir.

Bentonit içeren döküm numuneleri Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırmasına göre SM (siltli kumlar, fena derecelenmiş kum silt karışımları) sınıfına, reçineli örnek ince dane oranı düşük olduğundan SP (kötü derecelenmiş kumlar) sınıfına ve bentonitler ise CH (yüksek plastisiteli killer) sınıfına girmektedir.

Atık döküm kumlarının bir kısmında likit limitlerin belirlenebilmesine rağmen plastik limit değerleri belirlenememiş bazılarında ise likit limit değerleri de tayin edilememiştir. Bu durumda numunelerin tamamı nonplastik olarak isimlendirilmiştir. Bunun sebebi bentonit yüzdesinin azlığı ve kullanılan bentonitin kaliteli bentonit olmayışı olarak görünmektedir. Bentonitlerin likit limit değerleri %155 ila %456 arasında, plastisite indeksi ise %121 ila %419 arasında değişmektedir

Atık döküm kumlarının dane birim hacim ağırlıkları ise 2,45 ve 2,61 arasında değişiklik göstermektedir.

Atık döküm kumu numunelerinin içerdiği organik madde(kömür) %4 ile %23 arasında değişmektedir. Standart kompaksiyon deneyleri sonucu atık döküm kumlarının maksimum kuru birim hacim ağırlıkları 1,44 ile 1,86 gr/cm³ arasında değişirken optimum su muhtevaları ise %12-%23 arasında değişmektedir. Düşen seviyeli permeabilite aleti ile ölçülen hidrolik iletkenlik değerleri ise 1,8x10⁻⁷ m/sn değerine kadar inmektedir. Bu değer evsel atık depolama sahalarında numunenin

geçirimsizlik amacı ile kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca bu çalışmada bir gün olarak alınan hidratasyon süresi uzatılırsa ve bu deney geçirimsiz perdenin arazide maruz kalacağı yanal düşey gerilme şartları altında esnek cidarlı bir deney sisteminde gerçekleştirilse hidrolik iletkenlik değerinin daha da düşeceği tahmin edilmektedir.

Yapılan ICP ve AAS analizleri sonucu ise sadece bir numunede Zn değeri Çevre ve Orman Bakanlığında tarafından yayınlanan Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliğine göre standardın üstünde çıkmıştır. Bunun dışındaki ağır metal konsantrasyonları sınır değerlerin altındadır. Fakat laboratuvar imkanlarının kısıtlı olması sebebiyle yönetmelikte bulunan tüm kriterler kontrol edilememiştir. Bu çevresel etkilerin detaylandırılması gerekmektedir.

REUSE OF WASTE FOUNDRY SAND AS HYDRAULIC BARRIERS

SUMMARY

One of the most important components of foundry process is foundry sand. Foundry sand can be separated into two fundamental classes according to contained binder as green sand and chemically bonded sand. After using it in foundry industry they are stored in dumping sites which is shown by the municipality. Most foundry firms are around İstanbul and this is limiting the storage site.

The aim of this study is reuse of waste foundry sand as hydraulic barriers. This waste sand can be used in different subjects on the world. For this purpose, a group of tests were conducted to assess 15 different foundry sands (14 pieces are green sand and 1 piece is chemically bonded sand) from different suppliers to find index properties, bentonite content, compaction characteristics, hydraulic conductivity values and ICP, AAS analyzes are done to assess heavy metal concentrations of the filtration water. Also index properties of 4 bentonite specimens are assessed. The waste foundry sands which include bentonite are SM according to ASTM Classification System. Chemically bonded specimen is SP according to ASTM Classification System because of low fines content. Bentonites are classified as CH. Specific gravity values of waste foundry sand vary from 2.45 to 2.61.

Organic content amount (coal) of waste foundry sand specimens varies from 4% to 23%. Maximum dry unit weight as per Standard Proctor effort of waste foundry sand varies from 1,44 gr/cm³ to 1,86 gr/cm³ and optimum water content varies from 12% to 23%. Minimum hydraulic conductivity which is measured with falling head permeameter test of waste specimens is $1,8 \times 10^{-7}$ m/sec. This value shows that the specimen can be used to impermeable purpose in domestic solid waste storage areas. Also in this study the hydration time is taken as one day. It is guessed that if the hydration time is extended and flexible permeameter is used than the hydraulic conductivity will be decreased. According to the ICP and AAS analysis only one specimen has a higher value of Zn as per Dangerous Waste Control regulations published by Ministry of the Environment and Forestry. The other heavy metal concentrations are lower than limit values according to same regulations. However because of narrow circumstances of laboratory all criteria can not be checked. Determination of environmental effects are required improving by checking all the criteria.

1. GİRİŞ

Döküm kumu, başta otomotiv endüstrisi olmak üzere pek çok iş kolunda başlıca demir-çelik döküm sanayinde, alüminyum ve bakır ağırlıklı alaşımların imalinde büyük miktarlarda tüketilmektedir. Döküm sanayinde bu atık kumlar tekrar tekrar iyileştirilerek kullanılsa da yine de önemli miktarda atığın bertaraf edilmesi gerekmektedir. Atık döküm kumunun depolama veya yakma gibi bertaraf yöntemlerinin dışında özellikle düzenli depolama sahalarında geçirimsiz tabaka olarak kullanabilmesi hem büyük miktarlardaki atığın bertarafı hem de yeni bir ürünün geliştirilmesi açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışma, döküm kumunun geçirimsizlik özelliğinin bentonit katkısı ile iyileştirilerek çok amaçlı depolama sahalarında sızdırmaz perde yapımında kullanılabilecek bir endüstriyel hammadde olarak tekrar kullanılması ile ilgilidir. Çalışmada, farklı yataklardan gelmiş bentonitlerin indeks özellikleri, kullanılmış döküm kumlarının indeks, kompaksiyon özellikleri ve hidrolik iletkenliğin değişimi incelenmiştir.

Kullanılmış ve atılmış döküm kumunun geçirimsizlik özelliğinin bentonit katkısı ile iyileştirilmesi ve sızdırmaz zemin tabakası olarak özellikle düzenli çöp depolama alanlarında kullanımına yönelik çalışmalar sınırlıdır. Bu konudaki çalışmalar daha çok kaolin tipi kil zeminlerin sıkıştırılarak kullanımı, ya da bentonit katkılı kum zemin karışımı konularında yoğunlaşmaktadır.

Kil zeminler sıkıştırılarak atık depolama alanlarında kaplama veya sızdırmaz perde yapımında kullanılmaktadır. Çok amaçlı depolama alanlarında en önemli faktör geçirgenlik (permeabilite yada hidrolik iletkenlik)dir. Sadece kil kullanılması sıkıştırma işlemini güçleştirmekte ve ayrıca kil şişme-rötre çevrimleri sonucu, uzun dönemde daha geçirgen olmaktadır. Bu nedenle hem iyi bir şekilde sıkıştırılabilen hemde şişme-rötre, donma-çözülme çevrimlerinde performansını kaybetmeyen optimum bir kum-bentonit karışımı hazırlamak sızdırmaz perde yapımında gerekli olmaktadır. Döküm kumu, içerisinde bulunan değişik oranlardaki bentonit ile halihazırda böyle bir karışımdır. Kullanılmış döküm kumlarının sızdırmaz perde

yapımında kullanımı ise atıkların değerlendirilmesi gibi ayrı bir öneme sahiptir. Atık döküm kumlarında sıkıştırma sonucu hidrolik iletkenliğin önemli ölçüde azaltılabildiğini gösteren ve sızdırmaz perde yapımında kullanılmasının uygunluğunu araştıran bazı çalışmalar yapılmıştır.

Kullanılmış farklı döküm kumlarından hazırlanan numunelerin hidrolik iletkenliğinin 10^{-7} m/sn mertebelerine ulaşabildiği, her malzemenin performansının farklı olduğu, sızdırmazlığın daha iyileştirilmesi için bentonit katkısı gerekli olduğu bu çalışmada gözlemlenmiştir.

2. DÖKÜM İŞLEMİ

2.1. Döküm İşlemi Hakkında Genel Bilgiler

Döküm, metal veya alaşımların ergitilerek önceden hazırlanmış bir kalıp boşluğuna doldurulması ile parça imalatını kapsamaktadır. Bir adımda basit veya karmaşık şekilli parçalar ergitilebilen herhangi bir malzemedan üretilebilir. Nihai ürün dizayn mühendisinin istediği şekillerin tamamına sahiptir.

İstenilen özelliklere sahip ve sağlam bir döküm elde etmek için göz önünde tutulması gereken ilkeleri sıralarsak; uygun döküm yöntemini seçimi, seçilen yönteme göre kalıp dizaynı, kalıp ve maçaların hazırlanması, özelliklerini belirlenmesi, istenilen alaşımın hazırlanması, uygun ergitme ünitesinin seçilmesi, ergitme için gerekli işlemlerin yapılmasıdır.

Döküm ürünlerinde, 'yöntem-yapı özellik' ilişkisi döküm teknolojisini ana uğraşını oluşturur. Bir başka deyimle, seçilen alaşımdan belli bir parçanın;

- i) hangi döküm yöntemi ile elde edileceği,
- ii) bu yoldan ne tür bir katılaşma yapısına sahip olacağı,
- iii) buna bağlı olarak ne tür ve ne mertebede özellikler kazanacağı,
- iv) döküm hatalarının oluşmamasının ne şekilde sağlanacağı

döküm teknolojisince çözümlenecek konuların başlıcalarıdır (**Dışpınar, 2005**).

Döküm yoluyla üretilen parçaların boyutları birkaç mm'den birkaç metreye ve ağırlıkları da birkaç gramdan birkaç tona kadar değişebilmektedir. Dahası döküm iç

boşlukları olan veya eğri yüzeylere sahip karmaşık şekilli veya çok büyük kısımlardan oluşmuş parçaların imalatı için oldukça uygundur. Bu avantajlarından dolayı döküm, imal usulleri içerisinde büyük bir öneme sahiptir. İşlenebilirliği güç olan veya deformasyon kabiliyeti düşük olan bazı malzemeler ancak döküm yoluyla şekillendirilebilirler. Titreşim söndürme ve işlenebilene kabiliyeti gibi bazı mühendislik özellikleri döküm malzemelerde daha yüksektir. Döküm, seri imalata uygun olup, çok sayıda parça kısa zamanda ve diğer yöntemlere nazaran en düşük maliyetle üretilebilir.

Günümüzde, mevcut döküm yöntemlerinin biri veya birden fazlası ile her türlü geometrik şekle sahip parçaların imali mümkündür. Ancak tüm üretim yöntemlerinde olduğu gibi, yüksek kalite ve düşük maliyete, imalat mühendisinin değişik dizayn opsiyonlarını anlaması, değerlendirmesi, en uygun şekillendirme yönteminin seçimi ve bu yöntemin verimli şekilde kullanımı suretiyle ulaşılabilir. Değişik döküm metotları arasındaki ana farklılıklar kalıp malzemesi (kum, metal veya diğer bir malzeme) ve sıvı metalin kalıba giriş şekline dayanır (yerçekimi, vakum, düşük veya yüksek basınç). Bütün yöntemlerde ergitme ve katılaşmanın, gaz ve çekilme boşluğu gibi potansiyel hataların oluşumunu önleyecek ve özellikleri maksimize edecek şekilde gerçekleştirilmesi sağlanmalıdır.

2.2. Döküm ve Kalıplama Yöntemleri

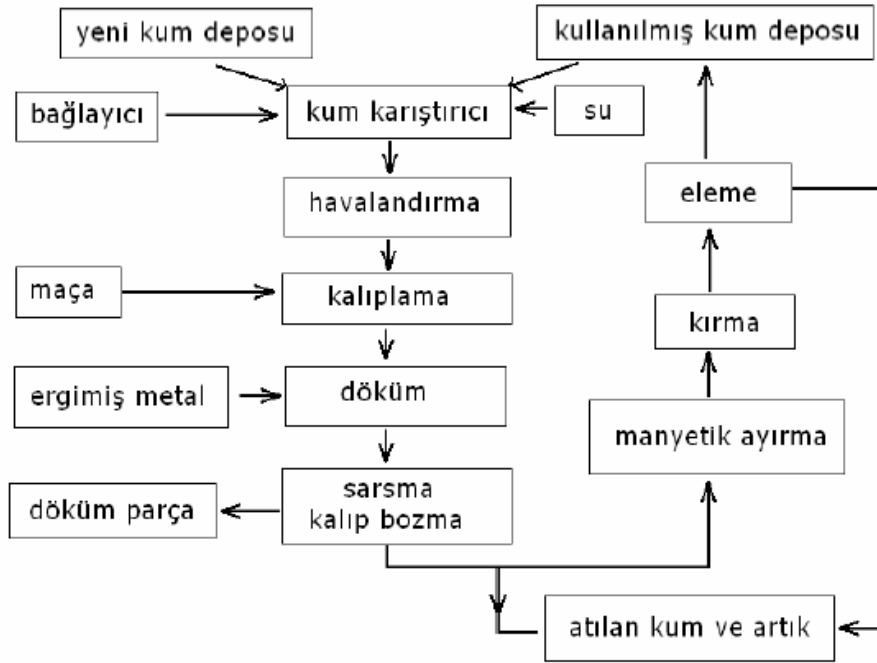
2.2.1. Kum Kalıba Döküm

Kum Kalıba dökümü yaş ve kuru olarak ikiye ayırabiliriz. Yaş kum kalıba döküm, dökümhanelerde en yaygın kullanılan döküm yöntemidir. Bu yöntemde erimiş metal yeniden kullanılabilir, sıkıştırılmış bir kum kalıba dökülür ve katılaşana kadar kalıp içinde tutulur. Katılaştıktan sonrada kalıp bozularak parça dışarı çıkarılır.

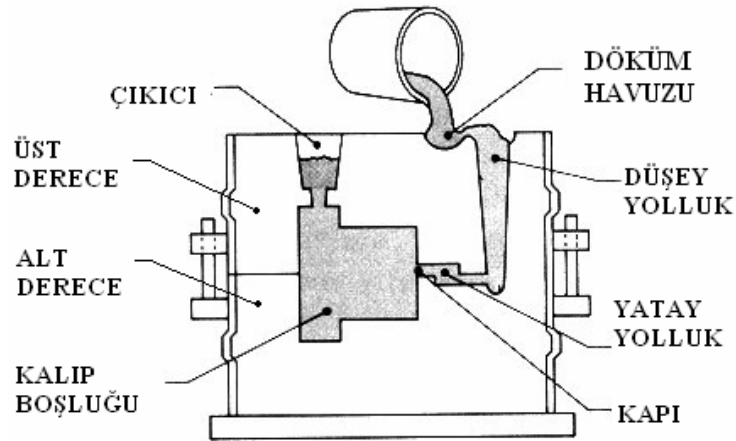
Yaş kum kalıba döküm yönteminde kalıp; kum tanecikleri, kil, su ve diğer katkıların bir karışımıdır. Kum tanecikleri kalıp malzemesinin esasını, kil ile su ile birleşerek kumların bir arada tutulması için bir bağlayıcı vazifesi görür.

Kalıplama, küçük parçalar için tezgah üzerinde, iri parçalar için yerde kum havuzlarında yapılır. Elde edilen parçanın kalitesi belli ölçüde kalıpcı ustasının becerisi ile belirlenir. Saatte 60 kalıptan fazla üretilmesi gerektiğinde makineli

kalıplamaya geçmek zorunlu olur ve bu durumda işlemler mekanik olarak yapıldığından kalıpcıların deneyimli olmasına gerek yoktur (Aran, 1999).



Şekil 2.1 : Kum Kalıba Dökümün Tipik Akım Şeması (Dışpınar, 2005)



Şekil 2.2 : Kum Kalıba Döküm (Aran, 1999)

Yaş kum kalıba döküm işleminin genel özelliklerini kısaca özetlemek gerekirse; genelde kalıp boşluğunu sıvı metalle doldurabilmek için yer çekimi kuvvetinden yararlanır, kum bağlayıcı madde içerir, yeniden kullanılabilir bir model gerektirir. ve modelin kalıptan çıkabilmesi için gereken eğimler daha önceden düşünülmelidir, genelde kaba ve pürüzlü bir yüzey elde edilir, dökümden sonra çıkıcı ve yollukların parçadan ayrılması gerekmektedir.

Tablo 2.1 : Yaş Kum Kalıplama Yöntemi Özellikleri (Aran, 1999)

Kalıplama yöntemi	Parça ağırlığı(kg)	Boyu hassasiyeti (mm/m)	Çekme dayanımı (mpa)	Üretim hızı (parça/s)	Gözeneklilik	Hurda miktarı
Yaş kum	0,1 - 2000	30 - 60	130	1 - 300	5	5

Yaş kum kalıba döküm yönteminin üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

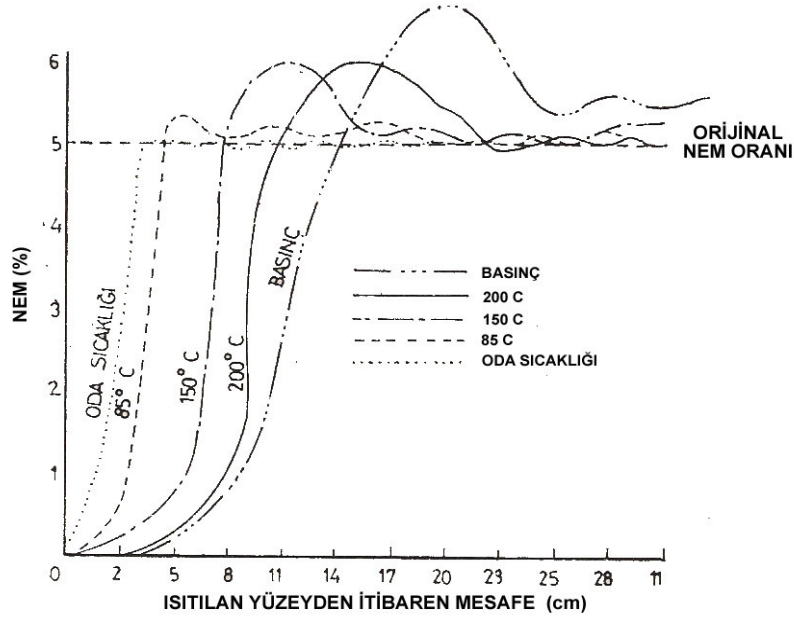
Kalıp malzemesi ucuzdur ve tazelenerek defalarca kullanılabilirdiğinden en ekonomik kalıplama yöntemidir. Yöntem basittir, gerektiğinde mekanizasyon da uygulanabilir. Değişik metallerin dökümü için elverişlidir.

Yaş kum kalıba döküm yönteminin sakıncaları ise şunlardır:

İnce, uzun, karmaşık biçimli ve iri parçaların dökümünde kalıp malzemesinin dayanımı yetersiz olur. Kalıp, taşıma sırasında bozulabilir. Erimiş metal dökümü sırasında nemli kalıpta oluşan buhar kusurlara neden olabilir. Boyut hassasiyeti ve yüzey kalitesi çok iyi değildir. Kalıbın optimum dayanıma sahip olabilmesi için nem miktarının iyi kontrol edilmesi gereklidir.

Kuru kum kalıplarda yaş kum kalıplara benzer şekilde hazırlanır ve 15-350°C arasındaki sıcaklıklarda kurutulurlar. Bağlayıcı görevi yapan kilin tüm suyunu kaybetmemesi için 400°C sıcaklığın üzerine çıkılmamalıdır. Zira tüm suyun kaybolması kumların mukavemeti üzerinde yıkıcı bir etki yapar. Kurutma öncesinde metalin döküleceği kalıp boşluğunun yüzeylerine uygun bir karışım sürülerek veya püskürtülerek bu bölgede daha yüksek sertlik ve refrakterlik elde edilebilir. Kurutmada kaybedilen zaman başlıca dezavantajı teşkil eder. Kalıp boşluğu yüzeyinin 2-2.5 cm. Derinliğine kadar kurutulması ile hazırlanan “kabuğu kurutulmuş” kalıplar, kuru kum kalıp yönteminin bir başka türü olmaktadır.

Kuru kum kalıplarda serbest nem buharı olmadığından kalıp havalandırması problemi çok azalmaktadır. Daha düşük geçirgenlikli kumların kullanılabilmesi, bu yöntemle daha iyi döküm yüzeyi elde etmek imkanı sağlar. Yaş kum kalıp yöntemine nazaran, nem kontrolü daha az kritiktir. Ayrıca kalıbın dökümünden önce bir müddet beklemesi, yaş kum kalıplarda olduğu gibi kuruma ve yüzeyin gevrekleşmesi gibi sorunlara yol açmaz.



Şekil 2.3 : Kurutma Sıcaklığının Nem Dağılımına Etkisi (Aran, 1999)

Oda sıcaklığında nem yalnız kurutulmuş yüzeyden dışarı çıkar, oysa daha yüksek sıcaklıklarda nemin hareketi her iki yönde olmakta ve kondensasyon bölgeleri meydana gelmektedir. Bu bölgelerde nem oranının, orijinal değerinin %60 üzerinde bir değere ulaşabildiği gösterilmiştir. Dolayısıyla ile bu tür kısmen kurutulmuş kalıplarda, vakit kaybetmeden döküme geçmek gereklidir.

Yüzey kurutma işlemi hamlaçlar, ısıtıcı lambalar veya elektrikli ısıtıcı elemanlarla yapılabilir. Havadan tekrar nem kapılması mümkündür. Nemdeki bu yükseliş mukavemette bir azalmaya neden olmakla beraber çok kısa süreli bir ısıtma ile giderilebilir.

Tablo 2.2 : Kuru Kum Kalıplama Yönteminin Özellikleri (Aran, 1999)

Kalıplama yöntemi	Parça ağırlığı (kg)	Boyu hassasiyeti (mm/m)	Çekme dayanımı (mpa)	Üretim hızı (parça/saat)	Gözeneklilik	Hurda miktarı
Kuru kum	>0,1	30-60	130	1-300	5	5

Kuru kum kalıplara döküm yönteminin başlıca üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

Dayanımı vakumdan daha yüksektir. Taşınırken bozulma tehlikesi daha azdır. Yaş kum kalıplardaki gibi kalıplama sırasında nem miktarının kontrolü kritik değildir. Döküm sırasında buhar oluşmayacağından, bu nedenle ortaya çıkan döküm kusurları söz konusu değildir. Gaz geçirgenliği daha iyidir. Kalıp havalandırması problemi çok azdır. Daha düşük geçirgenlikli kumların kullanılabilmesi sayesinde daha az yüzey

pürüzlülüğü sağlanabilir. Yöntemin sakıncası ise kurutma işleminin kalıp hazırlama süresini uzatması ve maliyeti arttırmasıdır.

Bazı durumlarda yaş kum kalıpların sadece yüzeyleri kurutularak dökümde nemden kaynaklanan sorunlar azaltılabilir. Bu işlemde üfleç, sıcak hava veya elektrikli ısıtıcılardan yararlanır. Yüzey kalitesini arttırmak ve kalıp boşluğu yüzeylerindeki kumun kalkmasını önlemek için kalıp yüzeyi, refrakter bir malzeme püskürtülerek kaplanabilir. Püskürtülen bu sıvılar genellikle su, refrakter malzeme ise bentonit, tahıl veya melas gibi bir bağlayıcının karışımıdır. Kalıp yüzeyine fırça ile grafit tozu da sürülebilir. Bazen su yerine alkol veya diğer uçucu sıvılar kullanılır. Bu şekilde kalıp hazırlandıktan sonra yüzey tutuşturularak hem bu çözücüler giderilir, hem de açığa çıkan ısı ile yeterli bir kurutma sağlanır. Ancak döküm sırasında gaz oluşumuna engel olmak için bu çözücü sıvıların tam olarak yakılması çok önemlidir. Yüzeyi kurutulmuş kalıplarda iç kısımlardaki nem, zamanla yüzeye ilerleyeceğinden, bu kalıpların yüzey kurutma işleminden hemen sonra kullanılmaları çok önemlidir.

Yüzey kurutmada, ısıtma esnasında buharlaşan nem, kum içinde her yönde yayılabileceğinden, kurutma kendi kendine havada değil fakat bir ısı kaynağı ile yapıldığında, sıcaklık artışına paralel olarak önemli oranda bölgesel nem konsantrasyonu meydana gelebilir. Bunun nedeni, ısıtılan yüzeyden uzak, soğuk bölgedeki kondensasyon olayıdır.

Bazı durumlarda derecelere sığmayacak kadar büyük dökümlerin gerçekleştirilmesi için çukur kalıplar kullanılır. 1 tondan 100 tona kadar olan dev dökme parçaları, dereceler içinde kalıplamak mümkün olmamaktadır. Bu şekildeki parçaların dökümünü gerçekleştirebilmek için kutu biçiminde, duvarları beton ile örülen, boyutları birkaç metreye kadar çıkabilen havuzlar içinde kalıplama yapılır. Kalıbın yapılması uzun zaman alır, parçanın şekline göre kalıbın yapılması günleri alabilir.

Kalıplama sırasında model bir çukura yerleştirilir ve kalıp kumu modelin altına ve çevresine dökülür, kum orada tamponlanıp sıkıştırılır. Daha sonra üst kalıp yerleştirilerek bölüm yüzeyinde metal sızmasını önlemek için yere bağlanır. Bölüm yüzeyi zemin seviyesinde veya üzerinde olabilir. Birçok dökümhanede sürekli olarak ürettikleri iri parçalar için hazır beton çukurlar vardır. Parçanın biçimi modelin kalıptan çıkmasını engelliyor ise, kalıplamada maçalardan yararlanılabilir. Maça içi

boş çıkacak parçanın oluşabilmesi için dökülen parçanın bu boş kısmını oluşturan negatif kısımlara verilen isimdir.

Büyük iç gerilmelerin ortaya çıkmasını önlemek için, bu tür büyük dökümler yavaş soğutulmalıdır. Dolayısıyla dökümden sonra kalıbın açılması için birkaç gün beklenmesi gerekebilir. Bu yöntemde de kalite, kalıpcıların becerisine bağlı olup, boyut hassasiyeti düşüktür. Çukur kalıba dökümde boyut toleransları 1-2 cm'ye çıkabilir.

Yaş kum kalıplama ile kuru kum kalıplama arasında sınıflandırılabilen modern bir yöntem de (CO₂ - sodyum silikat yöntemi) CO₂ ile kalıpların sertleştirilmesidir. Kalıp ve maçaların karbondioksit gazı yardımıyla sertleştirildiği CO₂ yöntemi, ilk önce 1950 yıllarında uygulanmaya başlanmış ve bunu izleyen yıllarda giderek geliştirilerek kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu yöntemde kalıplar, kurutulmuş kalıbinkine eşit bir mukavemete, ısıtmaya gerek kalmadan erişebilmektedir. Furan reçineleri gibi kendi kendine sertleşen organik bağlayıcı kumlar da kalıplamada benzer şekilde kullanılabilir.

CO₂ yönteminde, kum + % 1.5 - 6 camsuyu (Na₂O.SiO₂) karışımı, model etrafına konur ve içinden CO₂ gazı geçirilir. CO₂ gazı, sodyum silikatu silikajele dönüştürür ve kum tanecikleri bağlanır. Bu işlemle kalıp sertleştirilir veya sertleştirilen kısımlar bir araya getirilerek kalıp teşkil edilir. Alt ve üst kalıpların bu şekilde sertleştirilip kalıbın kapatılmasından sonra dökümün 24 saat içinde yapılması gerekir. Bu yöntem için özel kalıplama ve maça üfleme makineleri geliştirilmiş olup, bu makinelerde kalıplama ve gaz verme işlemleri peş peşe yapılabilmektedir.

CO₂ yöntemi ile kalıplamada konvansiyonel kil bağlayıcılarının yerini sodyum silikat bağlayıcıları almaktadır. Cam suyu ve sodyum silikatın meydana getirdiği alçak mukavemetli kalıplardan CO₂ gazı geçirilerek 14 kg/cm²'ye kadar yüksek bir kuru mukavemete erişilebilir. Bu yöntem pişirilmeden sertleşen kalıp ve bilhassa maça yapımında kullanılır.

Yöntem, bilinen bütün döküm alaşımları için uygundur ve özellikle çelik, gri dökme demir ve bakır esaslı alaşımlarının dökümünde kullanılır.

2.2.2. Kabuk Kalıba Döküm

II. Dünya Savaşı sırasında Alman Johannes Cronning tarafından bulunan kabuk kalıba döküm yöntemi, Croning veya C-Yöntemi olarak da adlandırılmaktadır.

Isıtılmış model (yaklaşık 200°C) kum-reçine karışımının bulunduğu kutuya monte edilir.

Daha sonra kutu ters çevrilerek ısıtılmış modelin kum-reçine karışımı ile temas etmesi sağlanır. Bu sayede model yüzeyine temas eden reçine ısınarak sertleşir ve model üzerinde sıcaklık ve tutma süresi ile kalınlığı ayarlanabilen bir kabuk oluşur. İstenilen kabuk kalınlığına ulaşıldığında (6-12 mm) kabuk tekrar çevrilerek sertleşmemiş ve bağlanmamış kumun geriye dökülmesi sağlanır. Tam sertleşmeyi sağlamak için kabuk bir fırında yaklaşık 350°C sıcaklıkta bir kaç dakika bekletilir. Bu işleme pişirme denir. Pişirme işlemi sonrasında iyice sertleşmiş olan kabuk kalıp modelden çıkarılır. Yapıştırılarak birleştirilen kalıplar bir dolgu malzemesi içerisine yerleştirilerek döküm yapılmaya başlanır.

Kabuk kalıpların diğer kum kalıplara üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

Hassas toleransların elde edilmesi mümkündür. Çelik dökümlerde 0,25 mm'lik, dökme demirlerde ise 0,35 mm'lik boyut hassasiyetlerine ulaşmak mümkündür. Çok ince kum kullanıldığından yüzey kalitesi yüksektir. Makinelerle üretildiğinden seri üretime uygundur ve deneyimli çalışana ihtiyaç duyulmaz. Döküm daha düşük sıcaklıklarda yapılabilir ve yaş kum kalıplardan daha ince cidarlar elde edilebilir. Kalıplar hafiftir ve depolanabilir.

Fakat, metal malzemelerden üretilen modeller pahalıdır. Bu nedenle yöntem ancak seri üretimde ekonomik olabilir. Kabuk kalıplama makinelerinin maliyeti yüksektir. Dökülebilen parça boyut ve ağırlıkları sınırlıdır. Kuma bağlayıcı madde olarak reçine katıldığından kalıp malzemesi masrafı yüksektir.

Vakumlu kalıplar yöntemi ise 1970'li yıllarda Japonya'da geliştirilmiştir. Kalıp malzemesi olarak bağlayıcı içermeyen ince taneli kuru kum kullanılır. Sızdırmazlık, model yüzeyinin ince, plastik bir filmin ısıtılarak kaplanmasıyla sağlanır. Bu filmin uygulanmasından sonra eklenen kum hafif bir titreşim uygulandıktan sonra vakumun etkisiyle sıkıştırılarak derece oluşturulmuş olur. Derecenin üst yüzeyi de filmle kaplandıktan sonra vakum uygulanmaktayken derece kaldırılır. Bu yöntemle hazırlanan iki derece vakum hala uygulanmaktayken birleştirilir ve döküm işlemi

uygulanır. Katılaşma süreci sonunda vakum kaldırılınca kum, bağlayıcı içermediğinden kolayca dağılır.

Bu yöntemin çeşitli avantajları ise şöyle sıralanabilir. Vakum sayesinde kalıbın her bölgesinin eş ve değışmez sertlikte olması ve sonucunda yüksek boyutsal hassasiyet. Yöntemde nem ve bağlayıcı olmadığından ve ince kum kullanılabilmediğinden döküm yüzeyi oldukça düzgündür. Bağlayıcı ve nem olmadığından vakum kaldırılmasıyla birlikte kum döküm parçasından çok kolay ayrılır ve temizleme işlemine hemen hemen hiç ihtiyaç olmaz. Bağlayıcısız ve nemsiz kum kullanımı ve kumun sürekli kullanılabilir olması ve farklı metal, tahta gibi modellere ihtiyaç duymaz. Ayrıca model aşınması söz konusu değildir. Bilinen bütün dökme demir, çelik, demir dışı metal ve alaşımları bu yöntem ile dökülebilmektedir. Kum işlemlerinde gerek döküm öncesi (bağlayıcı ile karıştırma ve bekleme ve kalıplama) gerekse döküm sonrası (temizleme ve ayırma ve kumu geri kazanma) gibi işlemlere ve cihazlara ihtiyaç yoktur. Dökülebilecek parça kesit kalınlığı için sınır yoktur (**Dışpınar, 2005**).

Yukarıda anlatılan kum ile hazırlanan derecenin yanı sıra, aynı avantajlara sahip, silikon kalıplama denilen bir vakumlu kalıplama yöntemi daha vardır. Silikon Kalıplama teknolojisi sayesinde, eldeki numuneden veya üretilen bir prototipten aynı gün içerisinde hazırlanabilen silikon kalıplara vakumlu ortamda poliüretan malzemeler dökülebilmektedir. Pek çok çeşidi olan poliüretan malzemeler sayesinde, imalat sanayisinde kullanılan pek çok plastik malzemeyi simüle edip mekanik özelliklerini sağlayabilmektedir. Ayrıca şeffaf ve değışik renklere parçalar üretmek de mümkündür.

Her yöntemde olduğu gibi bu yöntemin de bazı dezavantajları vardır. Bunlar; Ana model 15-20 defa kullanılabilir, bu sayıdan sonra yeni ana model üretimi gerektiğinden ve yeni ana model üretiminin de uzun sürmesi nedeniyle efektif ve ekonomik imalat yapabilmek için 20 ve katları adette imalat yapılmalıdır. Vakum, ekstra bir kuvvete sebep olduğundan ince kesitler kırılabilir veya deforme olabilir. Vakumlu kalıplama yöntemi hızlı prototip üretmede, hassas yüzey kalitesine sahip elemanlarda, karmaşık tasarımlı, çok büyük boyutlu olmayan (maksimum 65-70 cm civarında boyutlar) parçalarda kullanılır. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'de Vakumlu kalıplarla hazırlanmış örnekler görülmektedir.



Şekil 2.4 : Vakumlu Kalıpla hazırlanmış Hava Filtresi Kutusu

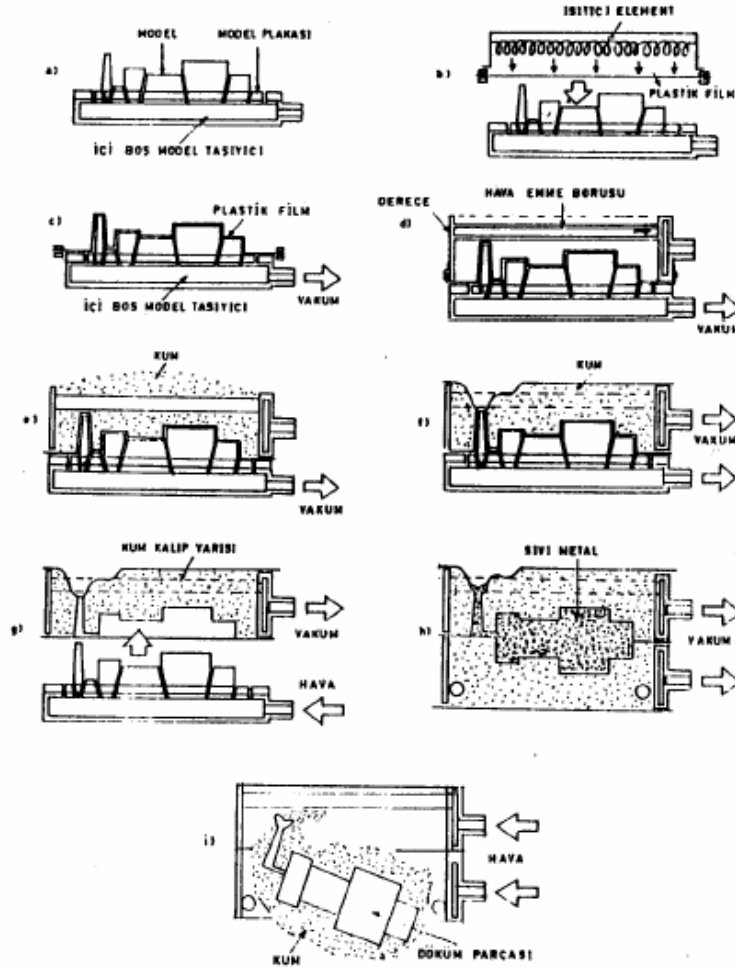


Şekil 2.5 : Vakumlu Kalıpla Hazırlanmış Otomobil Emme Manifoldu

Kum ile Vakumlu kalıplama süreci ise Şekil 2.6'de anlatıldığı gibi gelişir.

2.2.3. Kalıcı Kalıplara Döküm

Kalıcı kalıplara dökümü kokil kalıba döküm ve basınçlı döküm olarak iki başlık altında inceleyebiliriz. Karmaşık biçimli, boyut toleransları dar ve çok sayıda üretilecek parçalar için tercih edilir. Dökülecek metalin gerektirdiği refrakterliğe sahip olması gereken kalıp malzemesi olarak genellikle özel kalite dökme demir veya çelik kullanılır. Düşük sıcaklıkta eriyen metallerin dökümü için bronz da kullanılmaktadır. Kokil dökümde tek bir kalıpla demir esaslı malzemelerden 3.000-10.000, alüminyum gibi düşük sıcaklıkta eriyen malzemelerden ise 100.000'e kadar parça dökülebilir. Metal kalıcı kalıba döküm yönteminde katılaşma sırasındaki soğuma, kum kalıplardan daha hızlı olduğu için iç yapı daha ince tanelidir. Boyut hassasiyeti 0,25 mm olup, parça yüzeyleri temizleme işlemi gerektirmeyecek kadar yüksek kalitelidir.



Şekil 2.6 : Kum ile Vakumlu Kalıplama Süreci (Dışpınar, 2005)

Metal kalıplarda kullanılan maçalar metal, kum veya alçıdan yapılabilir. Metal olmayan maçaların kullanılması halinde yöntem yarı kalıcı kalıba döküm olarak adlandırılır. Kalıp ömrünü arttırmak için kalıp boşluğu refrakter malzemelerle kaplanır ve bu sayede parçanın kalıptan çıkarılması da kolaylaşır.

Kokil kalıplar genellikle açılıp kapanan iki veya daha çok parçadan oluşur. Kalıp kapandıktan sonra oluşan boşluğa erimiş metal dökülür ve katılaşma beklendikten sonra kalıp açılarak parça çıkarılır. Bu işlemler elle yapılabileceği gibi, bir tertibat yardımıyla veya mekanizasyona geçilmesi halinde makineler tarafından da yapılabilir. Kalıp üretiminde kalıp boşluğu ve diğer kanallar işlenerek açılır. Kalıp malzemesi geçirgen olmadığından hava kanallarının da açılması zorunludur. Kokil kalıp tasarımı büyük deneyim ister. Metal kalıpların cidar kalınlığının belirlenmesinde ısı girdi ve çıktılarının dikkate alınması gerekir. Çünkü bu

yöntemlerin başarısı kalıbın sürekli çalışma sıcaklığına bağlıdır. Kalıp cidar kalınlıkları genellikle 18-50 mm arasında seçilir. Gerektiğinde kalıp soğutulabilir.

Kokil kalıbın üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

İnce taneli iç yapı sayesinde mekanik özellikleri daha iyidir. Hassas boyu toleransları sağlanabilir. Karmaşık parçaların üretimi mümkündür. Parçanın yüzey kalitesi iyi olup, temizleme masrafları düşüktür. Seri üretim için ekonomik bir uygulamadır.

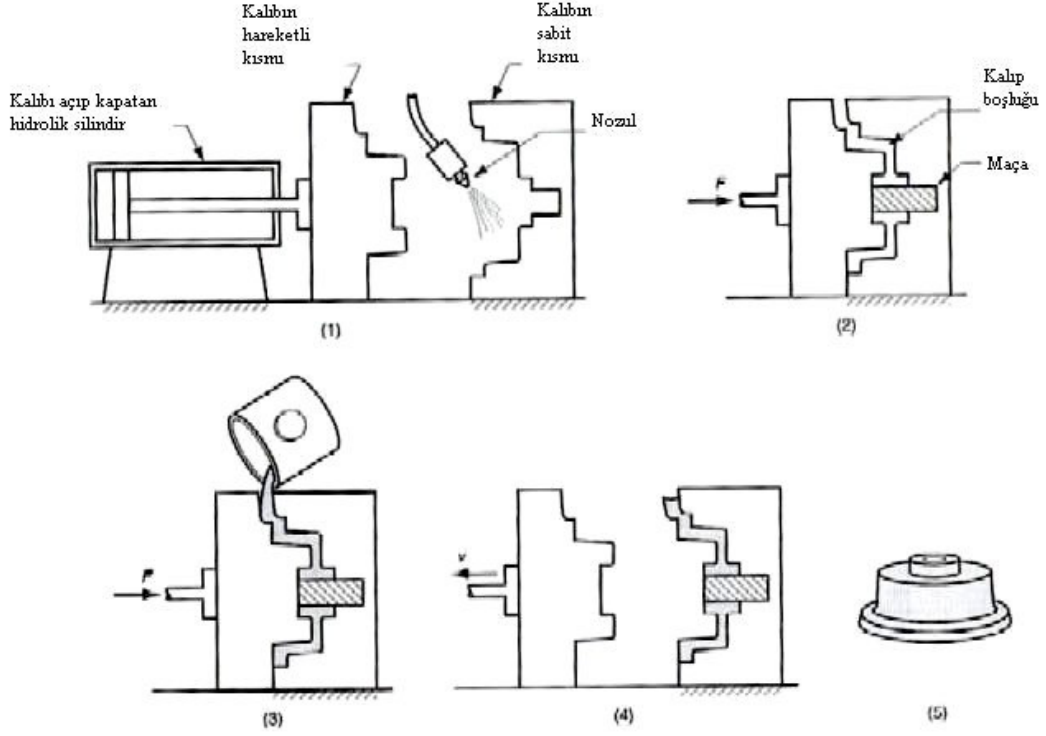
Yöntemin sakıncaları ise şunlardır:

Kokil kalıp pahalı olduğundan yöntem ancak seri üretimde ekonomiktir. Bu yöntemle her malzeme dökülemez. Sadece küçük parçaların üretimi için uygundur.

Genellikle demir dışı metallerin dökümünde kullanılan kokil döküm yöntemiyle üretilen parçalara örnek olarak soğutucu kompresör gövdeleri, hidrolik fren silindirleri, biyel kolları, alüminyum daktilo parçaları ve mutfak eşyaları gösterilebilir.

Kalıcı kalıplara bir diğer örnek de grafit kalıplardır. Bu kalıplar alüminyum, magnezyum gibi alaşımlardan az sayıda parça için tercih edilirler. Döküm sıcaklığı arttıkça kalıp ömrü azalır. Ancak çok çabuk aşındıklarından sadece özel uygulamalarda kullanılırlar.

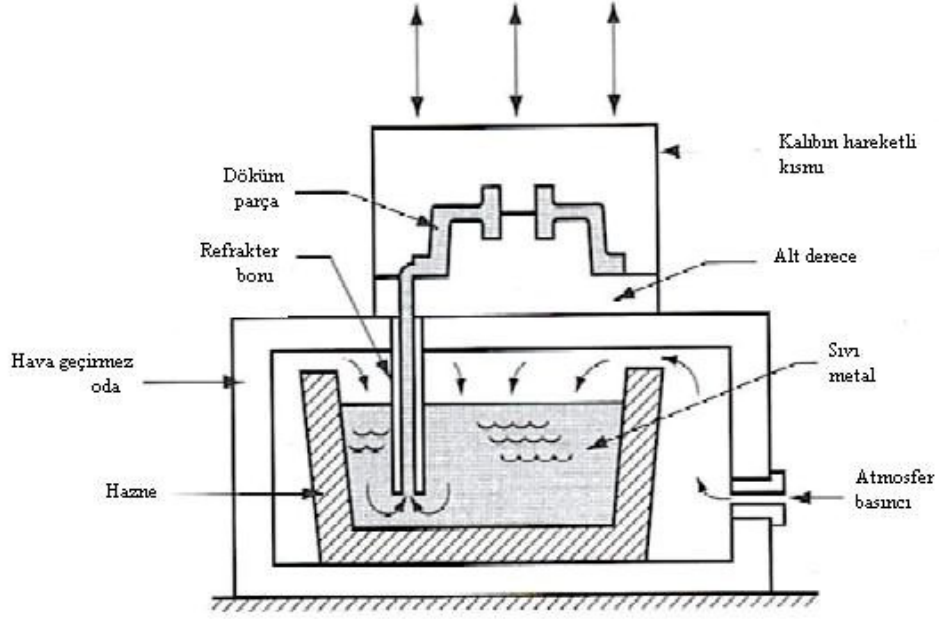
Pasta döküm yöntemi ise içi boş parça elde etmek için yüzey kısmen katılaştıktan sonra merkezdeki metalin geri akıtılması prensibine dayanan bir yöntemdir. Yüzey soğuk olduğundan katılaşma yüzeyde başlayıp içeri doğru ilerler. Kabuğun kalınlığı merkezdeki sıvı metalin geri akıtılmasından önce geçen zamanla ayarlanır. Pasta döküm heykel, lamba tabanı ve kurşun, kalay, teneke gibi erime noktaları düşük malzemelerden oyuncak yapımında kullanılır. Bu parçalarda dayanım ve iç yapıdan ziyade dış görünüm önemlidir.



Şekil 2.7 : Kokil Kalıba Döküm (Dışpınar, 2005)

Temel kalıcı kalıba döküm yöntemlerinde malzemenin kalıba dolmasını yerçekimi sağlar. Alçak basınçla yapılan dökümde ise sıvı metal, kalıba alçak basınç sayesinde yaklaşık $0,1 \text{ MPa (N/mm}^2\text{)}$ aşağıdan yukarıya doğru dolar. Bu yöntemin geleneksel döküm yöntemlerine göre avantajı; haznedan kalıba dolan sıvı metalin atmosfere açık sıvı metale göre daha temiz olmasıdır. Bu sayede gaz gözenekleri ve oksitlenme asgariye indirilirken, mekanik özellikler iyileşir.

Alçak basınçlı dökümün bir çeşidi olan vakumlu kalıcı kalıba döküm sıvı metalin kalıba vakumla doldurulması esasına dayanır. Genel olarak prensibi alçak basınçlı dökümle aynıdır. Farkı; hava basıncının sıvı metalin altından pozitif yönde uygulanması yerine, kalıptaki hava basıncını vakumla düşürülmesi ve sıvı metalin kalıba dolmasının sağlanmasıdır. Alçak basınçlı döküm yerine vakumun kullanılmasının çeşitli avantajları vardır; gaz gözenekleri ve ilgili kusurlar azaltılır ve bu sayede daha yüksek dayanımda döküm parçası elde edilir.



Şekil 2.8 : Alçak Basıncılı Döküm (Aran, 1999)

Basıncılı döküm ise sıvı metalin çok yüksek basınç altında metalden yapılmış bir kalıba doldurulması esasına dayanır. Uygulanan basınç sayesinde fazla miktarda sıvı metalin kalıba çok hızlı bir şekilde doldurulması sağlanır. Katılaşma tamamlanıncaya kadar basınç uygulanmaya devam edilir ve ardından kalıp açılarak itici çubuklar yardımıyla parça kalıptan çıkarılarak işlem tamamlanır. Bu yöntem sayesinde çok karışık şekilli parçaların dökümü mümkün olur. Genellikle dökülecek malzemelerin erime sıcaklığı 1000 °C'nin altındadır. İşlemler tamamıyla makineler tarafından gerçekleştirildiği için yüksek üretim hızlarına erişilebilir (100-800 parça/saat). Kullanılan basınç 10 - 80 atmosfer arasında değişir.

Basıncılı döküm yöntemin üstünlükleri;

Karmaşık biçimli küçük parçaların dökümüne uygundur. İnce cidarlı parçalarda kalıbın tam olarak dolması sağlanır. Üretim hızı yüksektir. Yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti çok yüksek olduğundan ek bitirme işlemlerine genellikle gerek kalmaz. Hızlı soğuma sonucu oluşan ince taneli içyapının mekanik özellikleri iyidir.

Basıncılı döküm yöntemin sınırları;

Sadece küçük parçaların üretimi mümkündür. Kalıp tasarımı güçtür. Döküm makinesi için yüksek bir ön yatırım gereklidir. Kalıp masrafı nedeniyle ancak seri üretimde ve çok sayıda parça için ekonomiktir. Yüksek sıcaklıkta eriyen malzemelerin dökümü yapılamaz.



Şekil 2.9 : Basınçlı Döküm Örnekleri-1



Şekil 2.10 : Basınçlı Döküm Örnekleri-2



Şekil 2.11 : Basınçlı Döküm Örnekleri-3

Sıcak Hazneli Basınçlı Döküm:

Kalay kurşun ve çinko gibi düşük sıcaklıkta eriyen metallerin dökümünde kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde hazne potanın içinde bulunur. Erimiş metalin içindeki hazneye dolan sıvı metal bir piston veya basınçlı hava yardımıyla kalıp boşluğuna basılır. Katılaşma tamamlanıncaya kadar basınç uygulanmaya devam eder. Ardından kalıp açılır ve itici çubuklar tarafından parça kalıptan ayrılır.

Soğuk Hazneli Basınçlı Döküm:

Yüksek sıcaklıkta eriyen ve makinenin çalışan parçaları ile sürekli temas halinde bulunması sakıncalı olan alaşımlarda (bakır, alüminyum ve magnezyum alaşımları)

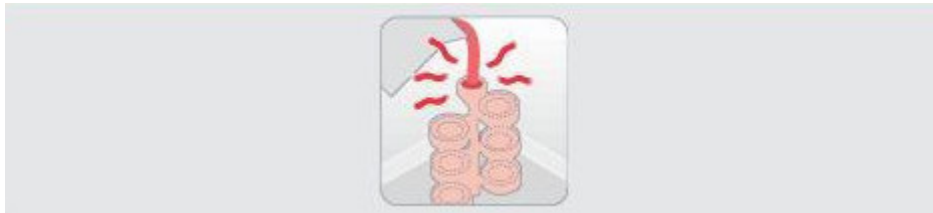
soğuk hazneli basınçlı döküm yöntemi kullanılır. Bu yöntemde ocakta eritilen metal bir kepçe yardımıyla istenilen miktarda alınarak hazneye konulur. Sonra piston bu erimiş metali sıkıştırarak kalıba doldurur ve katılaşma işleminin sonuna kadar basınç uygulanmaya devam eder. Ardından sıcak haznelide olduğu gibi kalıp ayrılır, iticiler yardımıyla parça çıkarılır ve işlem devam eder. Şekil 2.9, Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de basınçlı döküm örnekleri görülmektedir.

2.2.4. Hassas Döküm

İngilizce’de “Investment Casting” , “Ceramic Shell Casting” (seramik kabuk dökümü) veya “Lost Wax Process” (kaybedilmiş mum prosesi), Almanca’da “Feinguss” veya “Schalenguss”, Fransızca’da ise “Fonde a Cire Perdue” ismiyle anılan hassas döküm asırlardan beri bilinen çok eski bir döküm yöntemidir. Yöntemin günümüzden 3000 yıl önce Mısır’da ve Şang Hanedanı döneminde Çin’de kullanıldığı bilinmektedir. Hassas döküm tekniğinin prensibi, mum ve benzer modeller kullanılarak hazırlanan kalıpların ısıtılması ve eriyen model malzemesinin kalıptan dışarı akıtılarak kalıp boşluğunun oluşturulmasıdır.

Hassas döküm teknikleri temelde ikiye ayrılır: “Hassas Kabuk Döküm” (Investment Shell Casting) tekniğinde, seramik kalıp, ince cidarlı bir kabuk şeklinde modelin etrafını örterken, “Dereceli Hassas Döküm”(Investment Flask Casting) tekniğinde ise bir kabın içindeki kalıp boşluğu haricindeki tüm hacim seramik/alçı malzeme ile doldurulur.

Hassas kabuk döküm için yapılan işlemleri kısaca şöyle sıralayabiliriz: Öncelikle, metalden dökülmesi istenilen parçanın mum veya benzeri bir malzemeden modeli hazırlanır. Genellikle alüminyum (kuyumculukta ise silikon) bir kalıp imal edilir ve plastik enjeksiyon yöntemi ile istenildiği kadar mum model elde edilir. (Döküm sonrası soğuma ve büzülme tahmini yapılarak model aslından biraz büyük imal edilebilir)



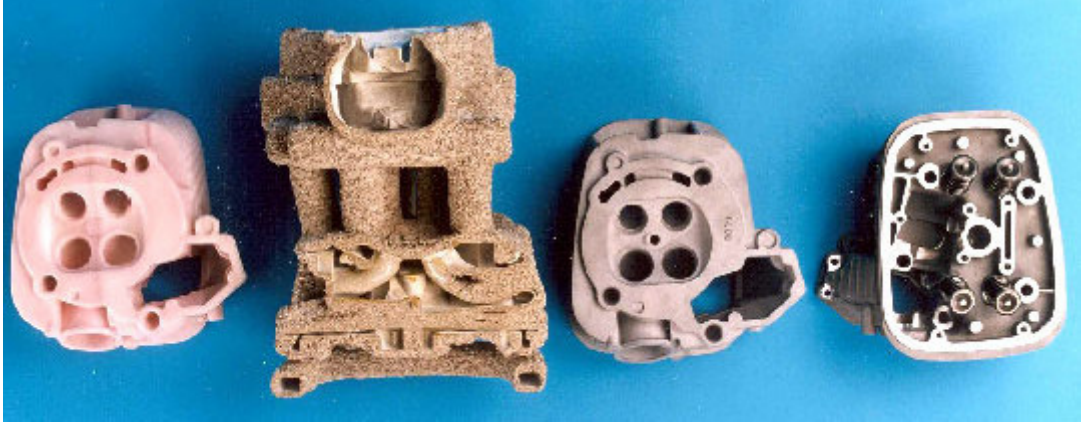
Şekil 2.12 : Hassas Döküm (Dışpınar, 2005)

Parçalar yine mumdan yapılmış bir gövdeye yapıştırılarak "mum salkım" hazırlanır. Mum malzeme, 70-90 °C arasında olabilen düşük ergime sıcaklığına sahip ve seramik kabuğu çatlatmaması için düşük ısıl genleşme özelliğine sahip bir malzemedir. Daha sonra model, seramik banyosuna batırılarak (sulu alçı görünümünde bir sıvı) çevresine ince bir tabaka kaplanması sağlanır. Seramik tabaka kuruyup katılaşıncaya kadar bir fırında bekletilir. Yeteri kalınlıkta seramik kaplanıncaya kadar son iki işlem tekrarlanır. Dış tabakalarda daha kalın seramik tozu kullanılır. Dış cidarı sert seramik kaplı parça bir fırına sokularak modelin eriyip dışarı akması sağlanır. Seramik malzeme ise yüksek sıcaklığa dayanıklı olduğundan şeklini muhafaza eder. Bu esnada mum modelin akarak çıkmayan kısımları da tamamıyla buharlaşır. Ardından, fırın sıcaklığı yükseltılarak belli bir süre içinde seramik kabuk pişirilerek sinterlenir ve sonraki döküm işlemlerine dayanacak şekilde mukavemetinin artması sağlanır.

Mum salkımdan kalan boşluğa (daha önce bırakılmış bulunan bir ağızdan) ergimiş halde metal dökülür. Metal soğuyup katılaştıktan sonra darbe ile dış cidardaki seramik kırılarak parça ortaya çıkarılır. Parçalar ana gövdeden dairesel bir testere ile kesilerek alınır, bir başka deyişle göbek bağları kesilir.

Ardından, gerekli çapak alma, temizleme ve yüzey parlatma işlemleri yapılır. Son olarak ise kalite kontrol işlemleri yapılır. Dökümde tahmin edilemeyen boyutsal çekme veya çarpılmalar varsa bunu kompanse edecek şekilde mum modeller tekrar tasarlanıp üretilebilir.

Dereceli Hassas Döküm türünde ise öncelikle mum modeller model ağacına eritilerek yapıştırılır. Silindirik bir gömlek (fanus) model ağacı etrafına geçirilir. Gömlek ile model ağacı arasındaki tüm boşluklara alçı/seramik karışımı dökülür. Fırında ısıyla karışım kurutulur ve kalıp ters çevrilerek içindeki mum modellerin eriyip akması sağlanır. Sıcak kalıp ergimiş metal ile doldurulur. Vakum veya merkezkaç kuvvetiyle döküm kolaylaştırılabilir. Basınçlı su püskürterek kalıp malzemesi temizlenir. Döküm ağacından koparılan parçalar malzeme giriş çapakları temizlenerek döküm sonrası kullanıma hazır hale getirilirler.



Şekil 2.13 : Hassas Döküm Uygulama Örnekleri (Dışpınar, 2005)

Hassas döküm tekniği 2. Dünya Savaşına kadar ticari olarak sadece kuyumcu ve dişçiler tarafından uygulanmış; daha sonra özellikle uzay, havacılık ve savunma ,tıbbi ve ortopedik cihaz , otomotiv ve motor, tekstil, mekanik ve elektromekanik sanayinde hassas parçalara duyulan ihtiyaç, yöntemin endüstriyel uygulamasını yaygınlaştırmıştır.

Hassas Dökümün Üstünlükleri:

Küçük ve karmaşık biçimli parçaların üretimi uygundur. Boyut hassasiyeti ve yüzey kalitesi mükemmeldir. Genellikle ek işlemlere gerek kalmadığından, işlenmesi güç malzemelerin dökümünde tercih edilir. Kalıp tek parçalı olduğundan parça yüzeyinde bölüm düzleminin izi kalmaz. Mum tekrar tekrar kullanılabilir.

Hassas Dökümün Sınırları:

Her bir parça için ayrı bir modelin üretilmesi gerekir. Yöntem mekanizasyona uygun olmayıp, üretim hızı ve kapasitesi düşüktür. Model ile kalıp malzemelerinin pahalı olması ve üretimin çok sayıda işlem içermesi nedeniyle parça maliyeti yüksektir. Sadece 5 kg'dan küçük parçaların dökümüne uygundur.

2.2.5. Alçı Kalıba Döküm

Alçı kalsiyum sülfat hemihidrat bileşiği olan ve ıslatılıp kurutulduğunda sertleşerek çabuk donan, beyaz renkli ince alçıtaşı tozudur. Kalsiyum sülfat dihidrat ya da alçıtaşının 120-180°C'ye kadar ısıtılmasıyla elde edilir. Bileşimin donmasını geciktirici bir katkı maddesi eklendiğinde kaba ya da ince sıva adını alır.

Alçı kalıba döküm demir dışı metallerin şekillendirilmesinde kullanılan özel bir döküm yöntemidir. Adından da anlaşılacağı gibi ana kalıplama malzemesi alçıdır.

Bu yöntem ilk olarak M.Ö. 3000-4000 yıllarında Çin'de pirinç heykellerin dökümünde kullanılmıştır.

Günümüzde bu yöntemin tercih edilmesinin temel nedeni yüksek boyutsal hassasiyeti, düzgün döküm yüzeyi ve diğer yöntemlere göre ince detayların verilebilmesidir.

Alçı kalıba dökülerek üretilen parçalar her zaman kum kalıba yapılan dökümlerden daha pahalıdır. Bu nedenle alçı kalıba dökümler yalnızca kum kalıp veya diğer yöntemler ile istenilen özellikler elde edilmediği durumlarda tercih edilir.

Alçı kalıp ile üretilen parçalara örnek olarak jet motor kompresörleri, çeşitli elektrik donanım parçaları,

çeşitli kauçuk ve lastik kalıplar verilebilir. Bu parçalar diğer kalıplama ve döküm yöntemleri ile üretilmek istenildiğinde işleme maliyetleri çok yüksek olduğu için alçı kalıp kullanılarak dökülmektedirler.

Önce model oluşturulur: ya teknik resim çizimi vardır ya da bilgisayar destekli çizim programları ile çizilmiş parça resmi vardır. Bu resimlerden el ile veya makinede işleme ile model oluşturulur.

Model oluşturulduktan sonra üst ve alt dereceler oluşturulur. Yani kalıp boşluğumuzu oluşturacak negatifler elde edilir. Daha sonra kalıp içine alçı dökümü yapılarak, alçı kalıplar hazırlanır. Son olarak alçı kalıplar arasında metal dökümü yapılarak ürün elde edilir.

Alçı kalıba dökümler, yüksek hassasiyette boyut toleransı, çok düzgün yüzey ile yüksek kaliteli alüminyum, bakır ve çinko dökümünde kullanılır. Estetik açıdan görünüş kalitesinin kritik olduğu parçalarda tercih edilir, bazı parçalarda döküm sonrası işleme öncesi protip kullanımında kolaylık sağlar. Düşük sayıda yapılacak ufak boyuttaki dökümlerde tercih edilir,

Genel olarak tüm alçı kalıpların ısı kapasiteleri düşüktür. Dolayısıyla alçı kalıba yapılan dökümler çok yavaş soğurlar. Alçı kalıplar çil kullanıma uygun olduğundan sıcaklık gradienti çok kolay bir şekilde kontrol edilebilmektedir.

Alçı kalıpların düşük ısı kapasiteleri aslında 0.6 mm inceliğinde kesitlerin bile dökümüne izin vermektedir.

Alçı kalıp yapımı için dünya piyasalarında yalnız su ile karıştırılıp kullanılmaya hazır özel bileşimler satılmaktadır. Küçük işlemler için bu hazır karışımların kullanılması ekonomik olsa da seri üretimler için her dökümhanenin kendi kuru karışımını hazırlaması daha pratiktir. Alçı kalıplarda alçı bileşimleri genellikle %70-80 arasındadır.

Alçıdan sonra ikinci önemli kalıp elemanı talk'tır. Kalıplardaki talk oranı ise %20-30 arası değişmektedir. Fiberli bir yapısı olan talk, hem yaş hem kuru durumdaki kalıp mukavemetini ve geçirgenliğini artırır, genleşme özelliklerinin kontrolünde yardımcı olur.

Bazı uygulamalarda özellikle kalıpların ısı kapasitelerini arttırmak veya maliyeti düşürmek amacıyla %50'ye kadar silis veya zirkon kumu ilaveleri yapılır. Katılaşma süresi, kalıp mukavemeti ve kalıp genleşmesini kontrol etmek için küçük oranlarda ilaveler de yapılır. En çok kullanılan ilaveler kireç portland çimentosu, yüksek mukavemetli gypsum çimentosu, asbest ve 'terra alba'dır (Dışpınar,2005).

Alçı kalıplar büyük oranla bakır ve alüminyum alaşımları gibi düşük sıcaklıkta eriyen demir dışı malzemelerin dökümünde kullanılır. Eğer kalıp modellemesi için mum gibi düşük dayanımlı malzemeler tercih edilirse, kum gibi dövülerek sıkıştırılan kalıp malzemeleri uygun olmadığından başlangıçta sulu harç halinde olan alçı tercih edilir.



Şekil 2.14 : Alçı Kalıp Örneği

Alçı kalıba dökümün üstünlükleri:

Bu yöntemle üretilen parçaların döküm yüzeyleri çok temiz olup, 0,008 – 0,010 mm'ye ulaşan dar toleranslar elde edilebilir. Alçının ısı iletimi düşük olduğundan, soğuma yavaş ve üniform olur. Büyük kesit farklılıklarının bulunduğu karmaşık

parçaların dökümü için uygundur. Hızlı soğumanın gerektiği bölgelerde soğutma plakaları yerleştirilebilir.

Alçı kalıba dökümün dezavantajları: Alçı kalıpların en zayıf yönü gaz geçirgenliklerinin düşük oluşudur. (Geçirgenliği arttırmak amacıyla değişik teknikler geliştirilmiştir.) Bu yöntemle 10 kg' dan daha düşük parçalar üretilebilir. Kalıplar kırılgandır. Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'de alçı kalıp ve döküm örnekleri görülmektedir.

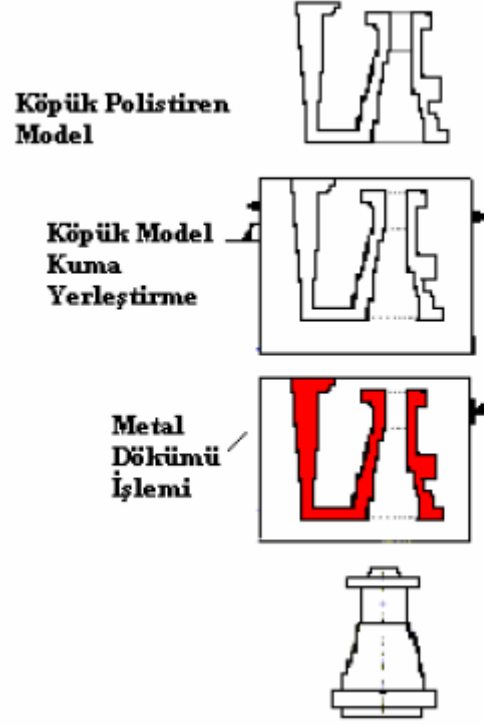


Şekil 2.15 : Alçı Kalıp ve Döküm Örnekleri

2.2.6. Dolu Kalıba Döküm

Ergimiş metalin, köpük modeli buharlaştırması esasına dayanan dolu kalıba döküm yöntemi ve bu yöntemin kusurlarını gidermek amacıyla geliştirilmiş olan Replicast CS tarzındaki yöntemler özellikle otomotiv, gemi ve makine imalat sanayilerine yönelik parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Dolu kalıba döküm yönteminde yaygın olarak, köpük modeller, bağlayıcı içermeyen kum içerisine yerleştirilerek döküm yapılmaktadır. Köpük modellerin yapımında, Polistiren (PS), Polimetilmetakrilat (PMMA) veya ikisinin belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilen ortaklaşım polimerleri kullanılır. Bu yöntemde, yolluklar, çıkıcılar ve diğer tüm kalıp elemanları köpükten yapılır ve kumda kalıplanır. Modelin kalıptan çıkarılması söz konusu olmadığından, kalıbın iki parçalı yapılmasına, modele eğimler verilmesine ve maça kullanılmasına gerek kalmaz. Kalıplama esnasında, köpüğün şeklinin değişmemesi için dövülerek sıkıştırılan kum kalıplar yerine, havada kendiliğinden sertleşen kalıp malzemeleri kullanılması daha uygundur. Kalıplama tamamlandıktan sonra modelin dıştan ulaşılabilen kısımları bir gaz alevi ile yakılır. Modelin kalan kısımları sıcak metal ile temas sırasında artık kalmayacak şekilde yanar. Sıvı metal, hidrokarbonlar içeren yanma gazlarının herhangi bir patlamaya neden olmaması için, başlangıçta yavaş yavaş dökülmelidir. Dolu kalıba döküm tekniği, özellikle sadece bir adet üretilecek büyük parçaların dökümünde

kullanılmaktadır. Örneğin, otomotiv endüstrisinde kullanılan pres kalıpları bu yöntemle üretilmektedir. Teknik ve ekonomik olarak önemli avantajları bulunan bu yöntemin, küçük parçaların seri üretiminde de kullanılmasını sağlayacak araştırmalar sürdürülmektedir (Aran, 1999). Şekil 2.18’de dolu kalıba döküm işlemi görülmektedir.



Şekil 2.16 : Dolu Kalıba Döküm Yöntemi (Saridikmen ve diğ., 2002)

3. DÖKÜM KUMU VE İÇERİĞİ

3.1. Döküm Kumu Hakkında Genel Bilgiler

İçerisinde % 90'ın üzerinde SiO₂, % 7-15 Kil (bentonit veya kaolinitik kil) ihtiva eden ve sinterleşme sıcaklığı 1500 °C'nin üzerinden bulunan kumlar döküm kumu olarak tanımlanır.

Döküm kumları doğada serbest taneler halinde bulunurlar ve gevşek karakterli bir yapıya sahiptirler.

Tablo 3.1 : Kırıntılı Tortulların Dane Boyu Sınıflandırması(Wentworth, 1922)

A.B.D. STANDART ELEK NO	mm	MİKRON	Ø	KIRINTI	
5	4		-2		Ç A K I L
6	3.86			İNCE ÇAKIL	
7	2.83				
8	2.38				
10-----	2.00		- 1.0		K
12	1.68		- 0.75	ÇOK İRİ KUM	
14	1.41		- 0.50		
16	1.19		- 0.25		
18-----	1.00		+ 0.25		
20	0.84		0.25	İRİ KUM	U
25	0.71		0.50		
30	0.59		0.75		
35-----1/2	0.50	500	1.00		
40	0.42	420	1.25	ORTA BOY KUM	
45	0.35	350	1.50		
50	0.30	300	1.75		
60-----1/4	0.25	250	2.00		
70	0.210	210	2.25	İNCE KUM	
80	0.177	177	2.50		
100	0.149	149	2.75		M
120-----1/8	0.125	125	3.00		
140	0.105	105	3.25	ÇOK İNCE KUM	
170	0.088	88	3.50		
200	0.074	74	3.75		
230-----1/16	0.0625	62.5	4.00	İRİ MİL	ÇAMUR
325	0.044	44	4.50		

Başlıca Demir-Çelik endüstrisi ile alüminyum ve bakır ağırlıklı alaşımların imalinde kullanılırlar. Dünya genelinde döküm kumu tüketimleri ilk sıralarda yer alan ülkeler Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Başlıca Demir-Çelik Döküm Sanayi ve bazı metalürji kollarında büyük miktarlarda döküm kumu tüketilmektedir. Ayrıca Gemi Sanayisi’nde raspa kumu ve sanayi atık sularının filtrasyonunda filtre kumu olarak da kullanım alanları mevcuttur.

Demir ve Çelik Döküm Sanayisi’nde üretimi gerçekleştirilen döküm mamulleri, kalıplama ve döküm proseslerine göre, üretim yöntemleri bazında çeşitli sınıflamalara sahipse de; kimyasal pozisyon, mikro yapı ve fiziki görünümü bazında yapılan sınıflama daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tablo 3.2 : Dünya Döküm Kumu Tüketimi(DPT Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Çalışma Raporu, 1995)

Ü L K E	TÜKETİM (bin ton)
Rusya	10.800
A.B.D.	6.032 Sh. ton
Çin	53.5
Almanya	2.745
Fransa	1.428
İtalya	1.245
Brezilya	871
Çekoslovakya	860
İngiltere	853
Kore	837
Polonya	755
Romanya	609
Tayvan	561
Meksika	508
İspanya	501
Kanada	300
Türkiye	300
Avusturya	151
Belçika	146

Döküm sektöründe üretilen döküm mamullerinin kullanıcı sektörlerine göre ürün tanımları aşağıda gösterilmiştir.

Devlet Planlama Teşkilatının 1995 yılı raporuna göre Türkiye'nin döküm kumu tüketimi 320.000 ton/yıl'dır. Bu tüketimin sektörlerine göre dağılımı şöyledir.

a) Demir ve Çelik Döküm Sanayi : 300.000 ton/yıl

b) Diğer Sanayi Kuruluşları : 20.000 ton/yıl (DPT Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Çalışma Raporu, 1995)

Bu rakamın günümüz itibariyle 450.000 ton/yıl olduğu düşünülmektedir.

Döküm yolu ile üretilen mamullerin sınıflandırılması ise Tablo 3.3 'deki gibi olmaktadır.

Tablo 3.3 : Döküm Yolu ile Üretilen Mamullerin Sınıflandırılması (DPT Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Çalışma Raporu, 1995)

S. NO	KULLANICI SEKTÖR	MAL TANIMLARI
1	Otomotiv Sanayi	Otomobil, Traktör, Kamyon, Otobüs, Çekici, Minibüs, Treyler üretiminde kullanılan döküm parçalar
2	İnşaat Sanayi	Filttings, Radyatör, Kazan, Küvet, Soba, Kanalizasyon ızgarası v.s.
3	Makina İmalat Sanayi	İş Makinaları, Takım Tezgahları, Tarım alet ve makinaları, Çimento, Tuğla ve Refrakter İmalat Sanayi, Kaldırma Makinaları, Pompa, Vana, Kimya Sanayi Parçaları, Dişli ve Makaralar, Kompresörler v.s.
4	Çelik Sanayi	İngot Kalıbı, Merdane Taban Plakaları v.s.
5	Basınçlı Döküm Boru	Pik ve Sfero Döküm Boruları
6	Diğer	Enerji Nakil Sanayi, Dayanıklı Tüketim Malları Sanayi, El Aletleri, Elektrik Motorları, Cam Kalıpları v.s.

Ülkemizde çökel kayaların ayrışmasıyla serbest hale gelen kuvars taneleri akarsularla taşınma esnasında bir miktar kil ile birlikte karasal havzalarda çökelmişlerdir. Şile yöresi kuvars kumu yataklanmaları bakımından çok zengin olup, Türkiye'nin en önemli maden havzalarından birisidir. Bu yöreden üretilen kuvars kumları; Türkiye döküm kumu ihtiyacının tamamını karşılamaktadır. Döküm Kumu üretimi açık işletme metodu ile yapılmaktadır. Üretim yapılacak alanda 20-30 metre eninde ve 50-100 metre boyunda panolar seçilmekte olup, ilk önce 2-4 metre kalınlığındaki örtü tabakası paletli kepçe veya hidrolik ekskavatörlerle, altında döküm kumu

bulunmayan veya önceden döküm kumu alınmış pano boşluğuna itilerek dökülmekte, daha sonra aynı makine ve teçhizatla döküm kumu üretimi yapılarak damperli kamyonlara yüklenmekte, buradan da bu kamyonlar vasıtasıyla Entegre Döküm Kumu Hazırlama Tesislerine taşınmaktadır. Türkiye döküm kumu tüketiminin büyük bir kısmını (% 53'ünü) karşılayan Siltaş Silis Kumları San. ve Tic. A.Ş.'nin Şile yöresindeki iki tesisten birincisi 1973 yılında, ikincisi Entegre Döküm Kumu Hazırlama Tesisi ise 1986 yılında faaliyete geçmiştir.

Türkiye Döküm kumu tüketiminin % 19'unu karşılayan Kumsan A.Ş.'ne ait işletme tesisi 1988 yılında, % 16'sını karşılayan Çelikaş A.Ş.'ye ait diğer bir işletme tesisi de 1985 yılında faaliyete geçmiştir.

İşletme Tesisleri; Alman teknolojisi ile dizayn edilmiş olup, ocaktan üretilerek bu işletme tesislerine verilen döküm kumları ilk önce lastik tekerlekli kepçe ile siloya beslenmekte, tromel elekte su ile karışımı sağlandıktan sonra pompalar vasıtasıyla siklonlardan geçirilerek karıştırıcılara verilmekte, daha sonra yıkama, yüzdürme ve tasnif ünitelerine gelmekte ve buradan hava emişli filtre ünitelerinde rutubet % 7 seviyelerine indirilerek, mamul kum silolarına aktarılmakta ve daha sonra da kantar üzerinde beklemekte olan araçlara yüklenmektedir.

Sektörde üretim yapan önemli kuruluşları şu şekilde sıralayabiliriz.

1- Siltaş Silis Kumları A.Ş.

2- Kumsan A.Ş.

3- Çelikaş A.Ş.

Ülkemizde Döküm kumu kullanan imalatçılardan bazıları aşağıdadır.

İstanbul : Döktaş, Emaş, Akmetal, Silvan Sanayi, Yakacık Makine, Sinmak, Hisar Çelik, Ferro

Döküm, Auer, Asilçelik, Haymak

Kocaeli : Gölcük Tersanesi, Anadolu Döküm, Mannesman

Bursa : Burçelik, T.Demir Döküm.

İzmir : Ak Döküm, Cevher Döküm, Pınar Döküm, B.M.C.

Eskişehir : Şeker San.Fab. D.D.Y Makine Fab. Entil

Konya : İlarıslan, Özdemirler Çelik Döküm

Kayseri : Taksan Takım Tezgahları

Ankara : Türk Traktör, Döksan, Ertunt, T.Demir ve Çelik Fab. Yazar Pompa (**DPT Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Çalışma Raporu, 1995**).

3.2. Döküm Kumunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Kum kalıba dökümde hatasız ve kaliteli üretim yapmak; alaşım bileşimi, ergitme yöntemi, döküm şekli, katılaşmayı kontrol eden soğuma şeklinin yanı sıra kalıplama tekniği ve bilhassa kalıp malzemesinin özelliklerine önemli ölçüde bağlıdır.

Kalıp malzemesinin esas görevi döküm boşluğunun şeklini meydana getirmek ve bu şekli, sıvı metal dökülüp katılaşana kadar saklayabilmektir.

Kalıp malzemesi başlıca üç bileşenden oluşur:

- i) gerekli refrakter özelliği sağlayan kum taneleri
- ii) kum içinde doğal olarak bulunan veya sonradan ilave edilebilen bağlayıcı
- iii) bağlayıcı etkisi ise kum tanelerinin birbirine tutunmasına imkan veren ve dolayısıyla kumu uygun bir kalıp malzemesi haline getiren su.

Kalıp kumları doğal ve sentetik olarak iki gruba ayrılır. Doğal kalıp kumları isminden de anlaşılacağı gibi doğal oranlarında kil içerirler ve oldukları gibi kullanılırlar. Sadece bağlanmayı kuvvetlendirmek için su ilavesi yapılır. En büyük avantajı nem miktarını uzun süre koruyabilmesidir. Buna karşın en büyük dezavantajı ise özelliklerinin çok değişken olmasıdır. Sentetik kumlar ise doğada buldukları haliyle düşük kil oranı içeren dolayısıyla bağlayıcı özelliklerini arttırmak için bentonit gibi bağlayıcı ve su ilavesi gerektiren kumlara verilen

isimdir. En büyük avantajları daha üniform tane boyutu, daha yüksek refrakterlik özelliği ve kontrol edilebilir özelliklere sahip olmasıdır. En tipik anlamı ile kum, 0.05-2 mm boyutlarındaki mineral tanesi olarak bilinir. Döküm proseslerinde en çok bilinen ve kullanılan kum SiO_2 bileşimindedir. Silis kumunun döküm kumu olarak tercih edilmesinin en önemli nedenleri kolay bulunuşu, ucuz olması ve yüksek refrakterlik özelliği göstermesidir. Ancak yüksek genleşme gösterir. Dolayısıyla boyut toleranslarında hesaba katılma gerekliliği vardır. Buna alternatif olarak tercih edilen diğer kum bileşimi ise zirkon kumudur. En başlıca özelliği yüksek iletkenliği

(silisin iki katı) ve düşük genleşmesidir. Ancak dezavantajı ise yüksek yoğunlukta olmasıdır (silisin iki katı).

Bunlar dışında kullanılan diğer kumlar ise olivin (magnezyum demir silikattır- $(Mg,Fe)_2SiO_4$) ve kromittir (demir magnezyum kromat- $(Fe, Mg)Cr_2O_4$).

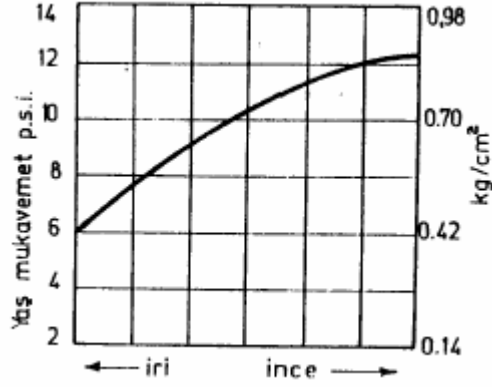
Tablo 3.4 : Kalıp Kumu Türleri (Dışpınar, 2005)

Kum	Kimyasal formülü	Yoğunluk (kg/m^3)	Sertlik (Mohs)	Renk
Silis	SiO_2	2650	7	Sarı
Zirkon	$ZrSiO_4$	4700	7.5	Kahverengi
Olivin	$(Mg,Fe)_2SiO_4$	3500	7	Yeşil-sarı
Kromit	$(Fe, Mg)Cr_2O_4$	4500	5.5	siyah

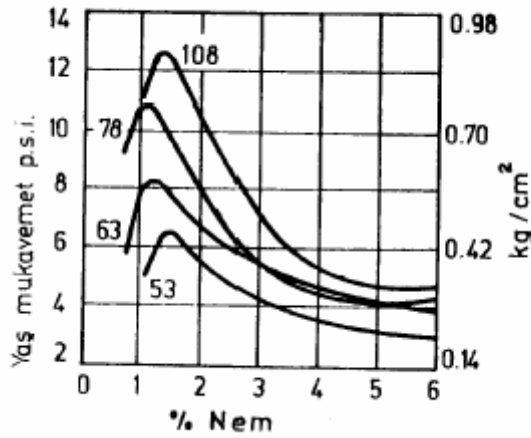
Kalıp kumunda beklenen özellikler çok sayıdadır. Bunlar arasında kum hazırlamada kontrol edilebilen başlıca özellikler şunlardır: yaş mukavemet; kuru mukavemet; geçirgenlik; nem miktarı; kil miktarı; dane çapı ve dağılımı

Yaş Mukavemet: Kalıp kumuna su ilavesinden hemen sonraki mukavemetidir. Bu, kalıbın hazırlanması ve sıvı metalin döküldüğü andan itibaren şeklini koruyabilmesi için gerekli mukavemettir. Standart deney numunesi üzerinde basma mukavemeti olarak ölçülür. Yaş mukavemeti etkileyen faktörler şu şekildedir: tane inceliği, tane şekli, bağlayıcı cinsi ve miktarı, nem miktarı.

Dane Çapı: Belirli bir kum hacim için daneler ne kadar küçük boyutlu ise daneler arası temas yüzeyi o kadar büyüktür. Dolayısıyla ince daneli bir kumun yaş mukavemeti daha yüksek olacaktır. Şekil 3.1'de dane çapının yaş mukavemetine etkisi görülmektedir (Dışpınar, 2005).

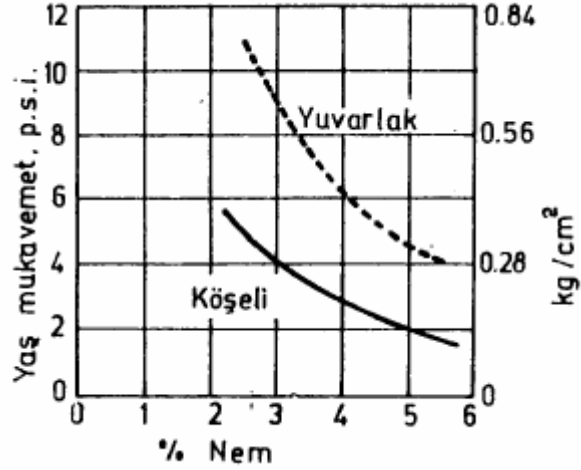


Şekil 3.1 : Dane Çapının Yaş Mukavemetine Etkisi (Dışpınar, 2005)



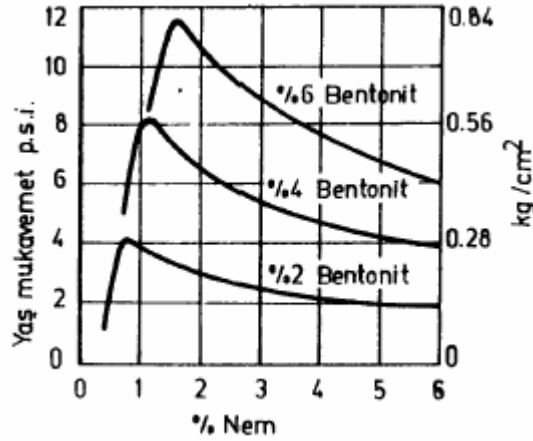
Şekil 3.2 : Farklı Dane Çapının Artan Nem ile Yaş Mukavemetine Etkisi (Dışpınar, 2005)

Dane Şekli: Kum danelerinin birbirine temas etme alanları artarsa yaş mukavemetin artacağından bahsetmiştik. Bu temas yüzeyi doğal olarak kum danelerinin şekline de bağlıdır. Yuvarlak şekilli daneler sivri ve keskin danelere göre daha sıkı ve dolayısıyla daha mukavemetli olmalarına neden olacaktır. Şekil 3.3’de dane şeklinin yaş mukavemetine etkisi grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Dane Şeklinin Yaş Mukavemetine Etkisi (Dışpınar, 2005)

Bağlayıcı miktarı: Yaş mukavemet, kuma ilave edilecek bağlayıcı miktarından doğrudan etkilenecektir. Doğal olarak artan bağlayıcı miktarı ile mukavemet artacaktır. Şekil 3.4’de bu durum görünmektedir.

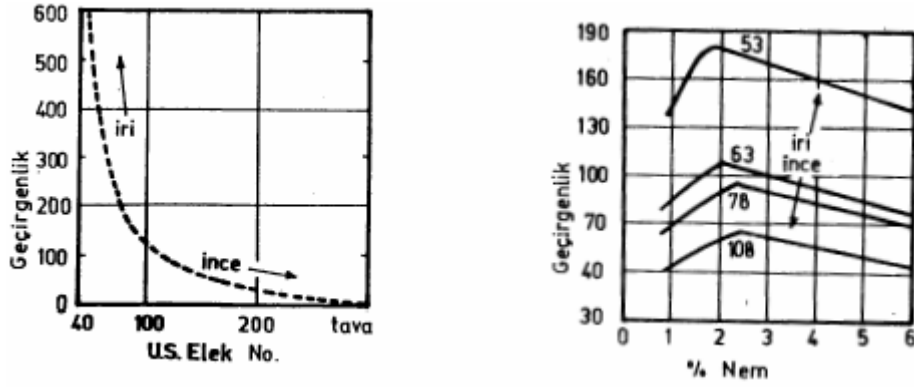


Şekil 3.4 : Bağlayıcı miktarının yaş mukavemetine etkisi (Dışpınar, 2005)

Nem miktarı: Yaş mukavemet nem miktarı ile önce artış gösterir daha sonra bir düşüş gösterir. Mukavemetin artış gösterdiği noktaya kadar olan neme “temper suyu”, düşüşe geçtiği bölgedeki neme ise “serbest su” adı verilir.

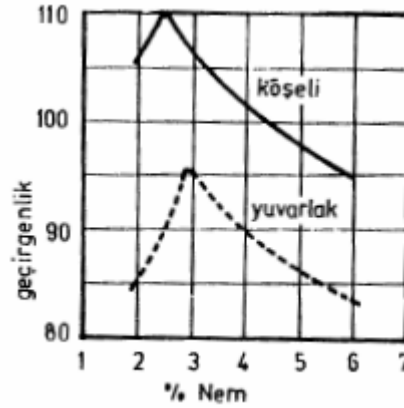
Gaz Geçirgenliği: Kalıp kumunun hava, gaz veya buharın geçişine izin verme kabiliyetidir. Kum taneleri arası açıklık arttıkça artan ve standart basınç altında kum içinden havanın geçiş hızı ile ilgili bir sayı ile ifade edilir. Kalıp kumuna bu özelliği kazandıran kum taneleri arası boşluklardır. Bunu da kontrol eden dört tane faktör vardır; tane inceliği, tane şekli, bağlayıcı cinsi, ve nem miktarı.

Dane Çapı: Yaş mukavemet üzerine dane çapının etkisini incelerken daneler birbirine ne kadar temas ederse yani ne kadar sıkı olarak dizilirlerse mukavemet artar demiştik. Ancak bu sıkı düzenlenme sonucu gaz geçirgenliği azalır Şekil 3.5’de bu durum görülmektedir.



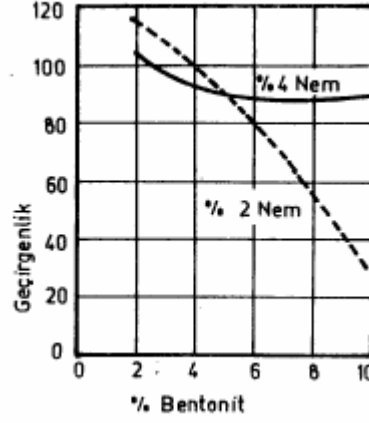
Şekil 3.5 : Dane çapının gaz geçirgenliğine etkisi (Dışpınar, 2005)

Dane şekli: Benzer durum karşılaştırması burada da yapılabilir. Yaş mukavemeti arttırmak için yuvarlak daneler istenilirken gaz geçirgenliği için bu sefer sivri ve köşeli taneler tercih edilecektir. Dane şeklinin gaz geçirgenliğine etkisi Şekil 3.6’da görülmektedir.



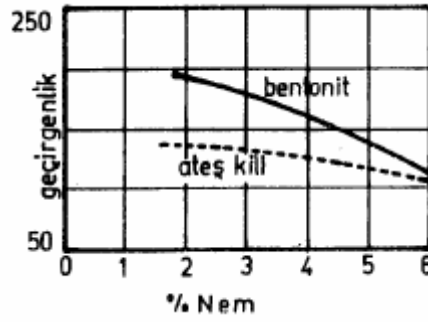
Şekil 3.6 : Dane Şeklinin Gaz Geçirgenliğine Etkisi (Dışpınar, 2005)

Bağlayıcı miktarı: Bağlayıcı miktarı arttıkça geçirgenlik de azalacaktır. Taneler arası bağ (silika jel örneği) ve tutunma arttıkça gaz geçirgenliği de azalacaktır.



Şekil 3.7 : Bağlayıcı miktarının gaz geçirgenliğine etkisi (Dışpınar, 2005)

Nem miktarı: Bağlayıcıların etkilerine benzer şekilde, temper suyu arttıkça gaz geçirgenliği artacaktır ancak serbest su miktarı arttıkça geçirgenlik azalacaktır. Şekil 3.8’de nem miktarının gaz geçirgenliğine etkisi görülmektedir.



Şekil 3.8 : Nem miktarının gaz geçirgenliğine etkisi (Dışpınar, 2005)

Kuru Mukavemet: Genel olarak kalıp kumunun kuru mukavemeti ile yaş mukavemeti benzer faktörlerden etkilenirler. Ancak kuru mukavemeti en etkin belirleyen faktör bağlayıcı cinsidir. Örneğin Ca bentonitler Na bentonitlere göre daha düşük kuru mukavemet özelliğine sahiptirler.

Dane Çapı: Yaş ve kuru mukavemet üzerine etki eden faktörlerden bahsederken dane çapının tüm etkilerini detaylı olarak görmüştük. Bunlar dışında dikkat edilmesi gerekli çok önemli bir husus vardır, o da döküm parçasını yüzey düzgünlüğüdür.

Dane çapı arttıkça daha düzgün yüzey elde edilecektir. Deformasyon: Kum kalıplar yük altında düşük kuvvetlerle kolaylıkla deforme olabilmektedirler. Eğer kuvvet miktarı çok yüksek ise döküm şeklini koruyamayabilir. Dolayısıyla kum kalıp arzu ettiğimiz modelin şeklini alabilecek kadar kolay deforme olabilmeli, ancak döküm şeklini koruyabilecek kadar da mukavemetli olmalıdır. Bu amaçla, kum kalıpların

deformasyon özellikleri basma yükü altında kırılmadan büzüldüğü miktar ile tanımlanır.

Sıcak mukavemet: Kum kalıbın ergitilmiş metalin sıcaklığına eriştiği andaki mukavemetidir ve sıvı metal katılaşıncaya kadar şeklini koruyabilmesi için gereklidir. Sıcak mukavemet ile kuru mukavemet hemen hemen aynı faktörlerden etkilenir ve sıcak mukavemet doğal olarak döküm yapılacak olan ergimiş metal sıcaklığında yapılan test ile tespit edilir.

Akıcılık ve plastiklik: Deformasyon özellikleri ile aynı kavramları kapsar. Yani, kum kalıp, modelin şeklini alabilecek kadar akıcı ve şekli aldıktan sonra onu koruyabilecek kadar plastik olmalıdır. Bu özellik, kum danelerinin çapı, dane şekli ve bağlayıcı cinsine göre değişmektedir.

Dağılılabilmek: Kumun bu özelliğinin sıcak mukavemet ile beraber düşünülmesi gereklidir. Ancak aralarında ters bir ilişki vardır. Sıcak mukavemet arttıkça dağılılabilmek özelliği azalır.

3.3. Bileşenler Bazında Döküm Kumları

3.3.1. Kum

Döküm endüstrisinde döküm tipine göre farklı döküm kumları kullanılabilir. Fakat çoğunlukla kullanılan tip silikadır. Silika, yer kabuğunu ve bildiğimiz kaya türlerinin %95'ini oluşturan maddedir. Silikanın kuvars, tridimit, ve kristobalit olmak üzere üç ana kristalin çeşidi vardır. Özellikleri ise Tablo 3.5'de verilmiştir.

Dane inceliği AFS standartlarına göre belirlenir ve AFS numarası denilen bir kavram kullanılır. AFS numarası olarak bilinen tane inceliği, birim inç karedeki elek sayısıdır. AFS numarası arttıkça daha ince taneli kum olduğu anlaşılır. Ayrıca yuvarlak dane şekilli kumlar daha az bentonite ihtiyaç duyulması bakımından döküm sanayisinde tercih edilir.

Tablo 3.5 : Döküm Kumlarının Fiziksel, Kimyasal ve Teknolojik Özellikleri (DPT Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Çalışma Raporu, 1995)

Sinterleşme Sıcaklığı : 1500 °C üzerinde
Yanma Kaybı (%) : 0,011 - 0,30
Kil Oranı (%) : 0,16 - 1,27
Kum Köşeliği : 1,25 - 1,27
Öğülme (%) : 40,8
H ₃ PO ₄ 'te yanma kaybı (%) : 0,1
Kızdırma Kaybı (%): 0,36
SiO ₂ : % 97 - 99
Al ₂ O ₃ : % 0,5 - 1,2
Fe ₂ O ₃ : % 0,18 - 0,40
MgO : % 0,015 - 0,030
K ₂ O : % 0,03 - 0,08
Na ₂ O : % 0,02 - 0,09
TiO ₂ : % 0,01 - 0,04

3.3.3. Su

Su kil partiküllerinin kum danelerini sarması için kullanılmaktadır. Su ayrıca diğer eklenenlerinde dağılımına yardım eder. Üniform dağılım döküm işleminin kalitesi açısından önemlidir.

3.3.4. Bağlayıcılar

Kum kalıplarda kullanılan bağlayıcılar cinsine göre iki ana gruba ayrılır:

- 1) Anorganik bağlayıcılar,
- 2) Organik bağlayıcılar

Aynı zamanda mukavemet kazanma mekanizmasına göre 3 farklı sınıfta da incelenirler:

- 1) Donma esnasında mukavemet kazananlar
- 2) Oda sıcaklığında mukavemet kazananlar
- 3) Isıtma ile mukavemet kazananlar

Anorganik Bağlayıcılar:

Bentonit (%3-6): Kalıp kumlarında en çok kullanılan anorganik killerdir ve en tipik örneği bentonittir ve %85-90 oranlarında montmorillonit minerali içerir ve iyon değiştirme özelliğine sahip

çok ince taneli plastik bir kildir. İyon değiştirme özelliğine göre Na-bentonit ve Ca-bentonit olarak iki sınıfta incelenir.

CO₂ (%3-4): Gaz sertleştiricili silikat yöntemidir. Yöntemde sodyum silikat (NaSiO₄) ile bağlanan kum kalıptan CO₂ gazı geçirilerek sertleştirme yapılır. Gaz-silikat reaksiyonu sonucu silisik asit hidrojelii oluşur pişirmeye gerek kalmadan sertleştirme yani bağlanma sağlanır.

Toz Sertleştiricili sodyum silikat (%4-6): SiO₂Na₂O cam suyuna %4-6 civarında silisyum tozu, kalsiyum karbür, ferrosilis veya silikat bazlı tozlar ilave edilir ve kendi kendine katılaşmaya bırakılır.

Sıvı sertleştiricili sodyum silikat (%3-4): Sertleştirici olarak organik esterler kullanılır. Önce ester, silikat ile reaksiyona girerek hidrolize olur. Daha sonra hidroliz sonucu ortaya çıkan asit silika hidrojel oluşturur ve bağlanmayı sağlar.

Organik Bağlayıcılar:

Furan: Bağlayıcı olarak furfuril asit ile modifiye edilmiş üre, formaldehid ve/veya fenol formaldehid bazlı reğineler kullanılır. Bu bağlayıcılar asit katalizör ile temas ettirildiklerinde yoğunlaşma mekanizması ile polimerizasyon başlar. Sertleşme esnasında polimer reçine filmi kuru kum tanelerini sararak birbirine bağlar.

Soğuk kutu: Kumun iki ayrı bağlayıcı ile karıştırıldıktan sonra gaz katalizör ile pişirilmeksizin sertleştirildiği yöntemdir. Sertleşme hızı yüksektir. Bağlayıcı olarak aromatik hidrokarbür içerisinde eriyik olarak bulunan reçine ve izosiyanat kullanılır.

Pep-set: Soğuk kutu yöntemine benzer ancak tek farkı sertleştirme işlemi için gaza ihtiyaç duyulmamasıdır. İki farklı reğinenin kum ile karıştırılması sonrası oda sıcaklığında havada sertleştirmenin sağlandığı yöntemdir. Genellikle birinci bağlayıcı polibenzenik eter fenolik reçine olup diğeri poliizosiyanattır.

Fascold: Özel olarak dizayn edilmiş Fascold makinelerinde kum-sıvı katalizör ve kum-sıvı reçine ayrı ayrı hazırlanır. Bu karışımlar makine ağzında püskürtme yöntemiyle kalıba doldurulur ve karıştırılmış olunur. Oda sıcaklığında açık havada 1 dakika beklendikten sonra kalıp hazırlanmış olur.

Alkid-yağ: Diğer adıyla yağ-üreten sistemi pişirmesiz kalıp hazırlama yöntemidir. Kum, sentetik yağ bağlayıcı ve kimyasal aktivatörler karıştırılır ve polimerizasyon sonucu havada sertleşme sağlanır ve kalıp hazırlanmış olur (Dışpınar, 2005).

3.3.4. Eklentiler

İlavelerin temel amacı daha önce listelediğimiz kalıp kumu özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılır. Örneğin;

- Silis tozu sıcak mukavemeti arttırmak
- Demir oksit sıcak mukavemeti arttırmak
- Fuel oil akışkanlık ve plastiklik özelliğini arttırmak
- Mısır unu yaş ve kuru mukavemeti arttırmak
- Pulverize kömür döküm sıcaklığında kum tanelerinin çevresinde gaz filmi oluşturarak birbirine kaynaşmasını engeller böylelikle kumun yeniden kullanılabilmesini sağlar
- Odun talaşı yüksek sıcaklıklarda yanarak kumun sıcak mukavemetini düşürür ve ısıl kararlılığını artırır
- Grafit tozu döküm yüzey kalitesini arttırmak için kullanılır çünkü yüksek yüzey gerilimi sayesinde sıvı metalin ıslatma özelliğini düşürür
- Perlit alumina silikat minerali olan perlit sayesinde yüksek sıcaklık kararlılığı artar.

3.4. Bentonit Hakkında Genel Bilgiler

Bentonit volkanik külün yerinde ayrışmasıyla oluşan kolloidal özellik gösteren, plastisitesi yüksek bir kil çeşididir. Büyük ölçüde montmorillonit minerali içerir. Başlangıçta Wyoming'de (USA) Ford - Benton yakınlarında bulunmuştur. Montmorillonit mineralinin baskın olduğu bentonitler, içinde yoğun miktarda camsı gereç bulunan volkanik kül, tuf ve lavların (bazik ve ultrabazik kayaların) magnezyumlu suların etkisi ile kimyasal ayrışım sonucu oluşurlar. Ticari anlamda ise gelişmiş sıvı emici ve kolloidal özelliği olan her kile bentonit denir. TS 5360 (Nisan 1996)'a göre ise; bentonit;volkanik tuf ve küllerin bozuşması sonucunda meydana gelen içerisinde bol miktarda montmorillonit bulunan, yoğunluğu 2.2-2.7 gr/cm³ olan, su emerek şişme özelliği gösteren ve yüksek plastisiteye sahip olan doğal bir kildir. Bentonit sözcüğü ilk defa 1898 yılında Knight tarafından, A.B.D.'nde Wyoming'de Fort Benton yakınındaki yüksek kolloidal özellikli plastik killer için kullanılmıştır. Oluşum mekanizmaları bakımından bentonitleri;

a-) Volkanik oluşumlu bentonit yatakları,

b-) Sedimenter oluşumlu bentonit yatakları ve

c-) Hidrotermal oluşumlu bentonit yatakları olarak sınıflandırılabiliriz.

Bentonit kristal yapısı itibariyle, yapraksı ve katlı bir yapıdadır. Bentonitin Tikotropi özelliği, su ile temasa geçtiğinde jel, çalkalandığında sıvı hale gelebilme özelliğidir. Bentonite bu özelliği veren ana mineral Montmorillonittir. Montmorillonitin bileşimi; hem kafes yapısındaki ve hem de değişebilir iyonların bünyesindeki farklılıklardan dolayı birinden diğerine değişiklik gösterir.

Çok değişik renklerde gözlenebilen bentonitin iyon(katyon) değiştirme

kapasitesi oldukça yüksektir. Genellikle çevresel bağların kopma doygunluğuna atfedilen montmorillonitteki çevresel katyonlar, toplam katyon değişim kapasitesinin ancak %20'si kadardır (**Günay ve diğ., 2001**).

Bentonitleri sülfürik asite karşı gösterdikleri reaksiyona göre ;

a-) Alkali Bentonitler (Asit ile kolayca yer değiştiren bazlar içeren bentonitler),

b-) Alkali Yarı Bentonitler (Asit ile kolayca yer değiştiren bazlar içerir ancak bu durumda özelliklerini kaybederler),

c-) Toprak Alkali Bentonitler (Kolayca yer değiştiren toprak alkali bazına sahiptirler),

d-) Toprak Alkali Yarı Bentonitler (Kolayca yer değiştiren toprak alkali bazına sahiptir. Asitle muamele edildiğinde alkali bentonit özelliğini kaybeder)

e-) Aktifleştirilmiş Bentonit olmak üzere de gruplandırabiliriz.

Yine bentonitler değişebilen katyonuna göre de;

a-) Na- Bentoniti,

b-) Ca- Bentoniti,

c-) Li- Bentoniti

d-) Nötr Bentonit olmak üzere 4 gruba ayrılabilirler. Bentonitlerin kimyasal bileşimleri hangi tip bentonit oldukları konusunda kesin bir bilgi vermez. Kağıt, deterjan ve seramik endüstrisi bentonitin en çok kullanıldığı alanların başında gelir. Daha sonra ise sondaj-dolgu, zirai ilaç ve döküm alanlarında kullanılmaktadır. Her

sektör için kullanım amacı farklı olup,dolayısıyla bentonitten istenen özellikler de farklı olmaktadır.

TSE 1987'ye göre bir döküm bentonitinin sahip olması gereken özellikler;

a-) Kimyasal Analiz % (ağırlık olarak)

SiO₂ 58-68

Al₂O₃ 18-25

Fe₂O₃+Fe₀ 0-6

MgO 0-4,5

b-)pH değeri: 8-10.5

c-) Seri kireç miktarı kaynama olmamalıdır.

d-) Montmorillonit miktarı en az %75 olmalıdır.

e-) Kızdırma kaybı en çok % 6.5 olmalıdır.

f-)Tane Boyutu:

149 mikron kuru elek altı en az % 97

74 mikron kuru elek altı en az % 90

149 mikron yaş elek altı en az % 100

74 mikron yaş elek altı en az %98 olmalıdır.

g-) Nem miktarı en çok % 10 olmalıdır.

h-) Likit limit en az % 350 olmalıdır.

j-) Jelleşme katsayısı en az 12 olmalıdır.

k-) Kolloidal özellik: En az %3 çökelti olmalıdır.

l-) Suda şişme: En az 3-4 kat olmalıdır.

m-) Sinterleşme : Min. 1300 °C'de olmalıdır.

n-) Termal Durabilite: 537 C'de en az %50 olmalıdır.

o-) Yaş dayanım: en az 1200 gr/cm olmalıdır.

p-) Kuru dayanım: en az 900 gr/cm olmalıdır.

r-) Gaz geçirgenliği, en az 175 cm /s olmalıdır.

Bentonitin çok geniş bir kullanımı vardır. Başlıca kullanıldığı sanayi alanları ya da işlevleri aşağıda özetlenmeye çalışılmıştır.

· Döküm kumu bağlayıcısı olarak kalıp hazırlanması ve demir tozunun peletlenmesinde,

· Kağıt Sanayisinde dolgu maddesi olarak,

· Sondajlarda sondaj çamurunu ağdalaştırıp kırıntıların yukarı çıkmasında,

· Sondajlarda su kaçaklarını önleme amacıyla,

· İnşaat Mühendisliğinde temel ve baraj yapılarında su ve sıvı sızdırmazlığı elde etmede,

· Lastik Sanayisinde,

· Gıda Sanayisinde,

· Gübre Sanayisinde,

· Berraklaştırma işleminde (şarap, Meyve suyu, Bira)

· İlaç Sanayisinde,

· Katalizör olarak,

· Seramik Sanayisinde,

· Boya Sanayisinde,

· Yağ Sanayisinde ağartma amacıyla,

· Atık suların temizlenmesinde.

Dünyanın en önemli bentonit rezervleri Amerika Birleşik Devletleri, Rusya, Yunanistan, Almanya, Japonya, İtalya, İspanya ve İngiltere'de bulunmaktadır.

Dünya bentonit rezervleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6 : Dünya Bentonit Rezervleri (DPT Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Çalışma Raporu, 2001)

	(milyon ton)
<i>AMERİKA</i>	950
K.Amerika	900
ABD	800
Diğer	100
G.Amerika	50
<i>AVRUPA</i>	720
SSCB	250
Türkiye	370
Diğer	100
<i>AFRIKA</i>	by
<i>ASYA</i>	by
<i>AVUSTRALYA</i>	50
<i>DİĞER</i>	150
<i>TOPLAM</i>	1870

Bentonit yataklarının çok büyük bir bölümü açık işletme yöntemiyle işletilmektedir. Ancak çok kaliteli bir bentonit yatağı, üzerindeki örtünün kalınlığı nedeniyle, Bavyera bentonit ocaklarından bir tanesinde olduğu gibi, kapalı işletme yöntemiyle işletilebilir (DPT Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Çalışma Raporu, 2001).

Piyasada bentonit ham, öğütülmüş yığın ve torbalanmış ve aktifleştirilmiş halde satılmaktadır. Ülkemizde özellikle 1960'lardan itibaren bentonit tüketimi giderek artmıştır.

Bentonit işletme ocaklarında oluşan işletme çukurları su ile dolmakta, işletme panolarında heyelan ve düşmeler, toprak akmaları sık sık ortaya çıkmaktadır. Ayrıca kaldırılan örtü gelişigüzel çevreye yığılmaktadır. İşleme tesislerinde öğütmeden kaynaklanan bentonit tozları genelde filtrelerle tutulmadığından çevreye yayılmaktadır. İşletmenin sona erdiği bentonit ocaklarında çukurların doldurulmadığı, çevresinde güvenlik önlemlerinin alınmadığı bir gerçektir. İşletme alanlarının tesviye edilerek tarıma uygun hale getirilmesinde önemli yararlar vardır.

Büyük çapta bentonit ticareti en ucuz nakliye aracı olan deniz taşımacılığı olanağına sahip ülkelerde gelişmektedir. Yunanistan ve İtalya örneğin de olduğu gibi ada da üretilip hemen gemilere yüklenebilen bentonit en ucuz biçimde tüm Akdeniz ve Avrupa ülkelerine pazarlanabilmektedir. Wyoming bentonitinin sondaj çamuru için istenen yüksek kaliteyi sürekli sağlayabilmesi, Almanya'da "Tonsil" adı altında üretilen ağartma toprağının sıvı yağları ağartmaktaki performansını bu ülkeleri

bentonit ticaretinde öne çıkarmaktadır. Diğer taraftan İngiltere'nin aktiflendirme tekniği ile geliştirdikleri bentonitler Afrika ve Batı Avrupa'da tanınmıştır. Bunun yanısıra İtalya ve Yunanistan'ın doğal ve aktiflendirilmiş bentonitleri de coğrafik konumları nedeniyle bu piyasada etkin olmalarını kolaylaştırmıştır.

Türkiye aktiflendirme tekniklerine yeterince önem verirse büyük bentonit potansiyelini yurt içi ve yurt dışı pazarlarda değerlendirilebilir. Demiryolu ulaşım ağının geliştirilmesi bu rekabet ortamına girebilmek için kaçınılmazdır. Doğal aktiflendirilebilir bentonit yataklarının aranıp bulunmasından sonra işletme aşamasında bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu sorunların en önemlilerinden biri işletilen bentonit yatağında standart özelliklerinin dağılımının iyice belirlenmeden işletmeye geçilmesi ve bu nedenle kalitede beklenmeyen olumsuz değişmelerin ortaya çıkmasıdır. Bunu önlemek için ayrıntılı arazi çalışmaları ile laboratuvar çalışmaları gereği gibi yapılmalıdır (**DPT Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Çalışma Raporu, 2001**).

4. KUM-BENTONİT KARIŞIMLARININ HİDROLİK İLETKENLİKLERİ HAKKINDAKİ İNCELEMELER

Döküm kumu temel olarak kum-bentonit karışımıdır. Bu nedenle hidrolik özellikleride kum-bentonit karışımlarına benzerlik göstermektedir. Kum bentonit karışımları bentonitin yüksek şişme potansiyelinden dolayı düşük hidrolik geçirgenlik gösterebilmektedir.

Kum bentonit karışımlarının hidrolik bariyer olarak kullanılması ile ilgili bir çok çalışma yapılmıştır (**Haug ve Wong, 1992, Kenney ve diğ., 1992, Howell ve Shackelford, 1997, Kraus ve diğ., 1997**).

Kum bentonit karışımları dane boyutu, hidrolik geçirgenlik, kimyasal aktivite ve mukavemet açısından farklılık gösteren iki ayrı zeminin karıştırılması ile elde edilir. Teorik olarak kum ve bentonit karışımı yüksek mukavemeti ve düşük hidrolik iletkenliği elde etmek için değişik yüzdelerde oranlanabilir.

Düşük bentonit muhtevasında kum bentonit karışımları; büzölmeye dayanıklı, güçlü yük destekleyebilen kum daneleri iskeletine sahip ve düşük hidrolik geçirgenlikli olabilir.

Yapısal olarak bentonit kum danelerinin arasındaki boşluklarda ve danelerin yüzeylerinde birikir. Suyun varlığında bentonit hidrate olur ve şişer. Bentonitin boşluk oranının serbest şişme kapasitesinden az olduğu zaman bentonit kum danelerinin arasındaki boşluğu doldurur ve danelere karşı az miktarda basınç uygular (**Kenney ve diğ., 1992**).

Kum ortamındaki boşlukların miktarı bentonitin serbest şişme kapasitesinden fazla olduğu zaman kumun içindeki boşluğun tamamı bentonitle dolmaz ve boşluklarda biraz serbest su olur. Bentonit yüzdesi arttığı ve kum danelerinin arasındaki tüm boşlukları doldurduğu durumda karışım “ideal karışım” olarak adlandırılır. İdeal karışımın hidrolik geçirgenliği bütünüyle bentonitin hidrolik geçirgenliği tarafından kontrol edilir çünkü kum daneleri hidrate olmuş bentonit tarafından sarılmıştır.

Buna rağmen Arazi koşullarında, kum bentonit karışımları sıklıkla kumun içindeki boşlukları doldurmaya yetecek kadar bentonit içermez ya da bentonit karışımının içerisinde elverişsiz biçimde dağılmıştır (**Chapuis, 1990**). İki durumda da karışımın hidrolik geçirgenliği artar ve kumun hidrolik geçirimsizliği değerine kadar ulaşabilir. Bu yüzden düşük hidrolik geçirimsizlikte kum bentonit karışımı elde etmek, uygun bentonit muhtevası ve karışım içerisinde uygun bentonit dağılımı gerektirir.

Çeşitli çalışmalar geçirimsizlik tabakası inşasında kum-bentonit karışımlarının kullanımını incelemiştir (**Chapuis, 1981, Abeele, 1996, Kenney ve diğ., 1992, Abichou, 1999**). Bu çalışmalar bir kum ve bir bentonit seçmekten oluşan kum bentonit karışımı tasarımı ile ilgili olarak, uygun mukavemet ve hidrolik geçirimsizliği sağlayan optimum bentonit muhtevasını bulmak için hidrolik geçirimsizlik testleri yapmayı önermektedir.

Bu nedenle araştırmacılar kum bentonit karışımlarının hidrolik geçirimsizliğini tahmin eden methodlar geliştirmeye yönelmiş; kumlu silt-bentonit, zemin-bentonit ve kum-bentonit karışımlarının hidrolik geçirimsizliğini tahmin etmek için modeller geliştirmişlerdir. Bu çalışmaların her biri kum içerisindeki bentonitin şişmesinin karışımın hidrolik geçirimsizliğini kontrol ettiğini doğrulamaktadır.

4.1.Kompaksiyon Koşullarının Etkisi

Su muhtevası kum bentonit bariyer tabakalarının tasarımında ve inşasında kritik bir faktör değildir (**Haug ve Wong, 1992**). Yapılan çalışmalar göstermiştir ki hidrolik geçirgenlik optimum su muhtevasına yakın su muhtevalarında hazırlanan numunede, optimum su muhtevasından %9 daha kuru su muhtevasında hazırlanan numuneden yalnızca beş kat daha azdır. Haug ve Wong'un teorisinde göre kum-bentonit karışımlarında topaklanmanın çözülmesinde ve yeniden biçimlenme aşamasında suya fazla ihtiyaç yoktur.

Kenney ve diğ. (1992) bentonit yüzdeleri 4, 8, 12 ,16 ve su muhtevaları sırayla %7, %12, %17, %22 olan kum-bentonit karışımlarını sıkıştırarak numunelerin permeabilitelerini ölçmüşlerdir. Bu çalışmada varılan sonuca göre belirli bir bentonit muhtevasında kum bentonit karışımın hidrolik geçirgenliği karışımın su muhtevasından etkilenmektedir. Bu durum özellikle sıkıştırma su muhtevası optimum su muhtevasından oldukça düşük olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır.

Bu davranış bentonitin düşük su muhtevalarında uniform dağılımını engelleyen kümelenmeleriyle ilişkilendirilebilir. Bu üniform olmayan dağılım numune içinde açık kanallara ve dolayısıyla yüksek hidrolik geçirgenliğe yol açmaktadır. Bu çalışma sonunda kum-bentonit karışımlarının hidrolik geçirgenliğini etkileyen en önemli faktörün karışımdaki bentonit içermeyen boşlukların sayısı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca hazırlanış su muhtevasının hidrolik geçirgenliği etkilediğini çünkü bunun bentonit dağılımını etkilediği halbuki kuru birim hacim ağırlığının hidrolik geçirgenlik üzerinde özellikle önemli olmadığı sonucuna varılmıştır.

Kraus ve diğ. (1997) sıkıştırılmış kum bentonit karışımlarında hidrolik geçirimsizlik ve kompaksiyon su muhtevası arasındaki ilişkiyi standart ve modifiye Proctor enerjilerinde tespit etmiştir. Ortalama %12 bentonit içeren sekiz numune hazırlamışlardır. Bunlardan dördü standart dördü de modifiye Proctor enerjisiyle hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde yapılan deneyler kum-bentonit karışımının hidrolik geçirimsizliğin hazırlanış su muhtevasına ve kompaksiyon enerjisine fazla duyarlı olmadığını göstermiştir.

Komine ve diğ. (1991) kum bentonit karışımlarının hidrolik geçirgenliği üzerinde kuru birim hacim ağırlığın ve kompaksiyon enerjisinin etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada %10 bentonit içeren numunelerin hidrolik geçirgenliğinin yüksek sıkıştırma enerjisi ile biraz azalma gösterdiği sonucuna varılmıştır. Buna rağmen yüksek bentonit muhtevası içeren numunelerin hidrolik geçirgenliği kompaksiyon enerjisi ile bir değişiklik göstermemiştir. Ayrıca yüksek bentonit muhtevası içeren numunelerin düşük enerji ile sıkıştırılsa bile her zaman daha düşük hidrolik geçirgenlikte olduğunu gözlemlenmiştir.

4.2. Donma-Çözünme Döngüsünün Etkisi

Haug ve Wong (1991) çalışmalarında kum-bentonit karışımlarının üstündeki donma çözülme etkilerini incelemiş ve bu çalışma bünyesinde %4.5, %6, %13 ve %25 bentonit içeren numuneler hazırlamışlardır. Standart Proctor enerjisi ile sıkıştırılan numunelerin önce esnek cidarlı permeabilite cihazı kullanılarak hidrolik geçirgenlikler ölçümleri yapılmış, daha sonra -20°C de minimum 6 saat tutularak dondurulmuş ve arkasından oda sıcaklığında çözülmesi sağlanmıştır.

Haug ve Wong çalışmalarında donma çözülme sonrası numunelerin hidrolik geçirgenliklerini yeniden kontrol ettiklerinde bu değerin düştüğünü ayrıca bentonit yüzdesi düşük olan numunelerde bu düşüşün daha çok olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak donma çözülme döngüsünün bentonitin hidrasyonuna yardımcı olduğu teorisini kurdular.

Kraus ve diğ. (1997) ise bu konuda hem saha hem de laboratuvar araştırmalarında bulunmuşlardır. Bu çalışma bünyesinde su muhtevaları %0 ila %5 arasında değişen numuneleri %95 ve daha büyük standart Proctor enerjisi ile sıkıştırıldıktan bir kış sonra infiltrometre kullanılarak hidrolik geçirgenlikler tespit edildi. (İnfiltrasyon yönteminin esası, belirli bir su yükü altında toprağa giren su miktarının zamana göre ölçülmesidir.) Bu deneylerden permeabilite değeri 1×10^{-8} cm/sn bulunmuştur. Saha araştırmalarına ek olarak laboratuvarda yaptıkları çalışmalarda numuneleri 24 saatte dondurup oda sıcaklığında ASTM D 6035'e bağlı olarak çözdüler. Bu çalışmanın sonunda kum bentonit karışımlarının donma çözülme döngülerinden fazla etkilenmediği sonucuna vardılar.

4.3.İslanma-Kuruma Döngüsünün Etkisi

Kum bentonit karışımlarında kurumanın etkisi hakkındaki çalışmalar oldukça sınırlıdır. **Albrecht (1996)** çalışmasında %10 bentonit içeren zemin bentonit karışımları hazırlamıştır. Bu numuneler üzerinde yapılan üç ıslanma kuruma döngüsünden sonra zeminin hidrolik geçirgenliği neredeyse aynı kalmıştır. Araştırmacılar bu durumu bentonitin eski haline geri dönebilme özelliği ile bağdaştırmışlardır.

4.4.Kimyasal Maddelerin Etkisi

Evans ve Fang (1985) organik akışkanların hidrolik geçirgenliği nasıl etkilediğine dair bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada zemin bentonit karışımını hazırlayarak farklı pH değerlerindeki asetik asit solüsyonu ile permeabilite deneyine tabi tutmuşlardır. Çalışma sadece pH değeri 1 olduğunda hidrolik geçirgenliğin arttığını göstermiştir. Bununla birlikte kum bentonit karışımının hidrolik geçirgenlik değeri konsantre anilin (organik madde) kullanılarak yapılan deneyde çok yükseldiğini fakat

anilinin suyla çözülerek deneyde kullanıldığında hidrolik geçirgenliği nerdeyse etkilemediği görülmüştür.

Kenney ve diğ.(1992) çalışmalarında hidrolik geçirgenlik deneyinde geçen sıvı olarak damıtık su ve NaCl karıştırılarak kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda geçen sıvı kimyasının hidrolik iletkenlik üzerindeki etkisinin önemsiz boyutta olduğu belirtmişlerdir. Bu durumu bentonitin kum matrisi içinde sarılmış durumda bulunmasına bağlamışlardır.

Boutwell (1995) araştırmasında Wyoming bentonitinin hidrolik geçirgenliği üzerinde geçen sıvının nitrik asit olması durumdaki etkiler araştırılmıştır. %100 Wyoming bentoniti olan dört örnek sıkıştırılmış ve farklı pH değerlerine sahip nitrik asitler geçen sıvı olarak kullanılarak hidrolik geçirgenlik deneyleri yapılmıştır. Deney sonucunda hidrolik geçirgenliğin, pH değeri 2 olana kadar değişmediği ve pH değeri 1 olduğunda 4,5 kat arttığı gözlemlenmiştir.

4.5.Kum Bentonit Karışımlarının Şişmesi

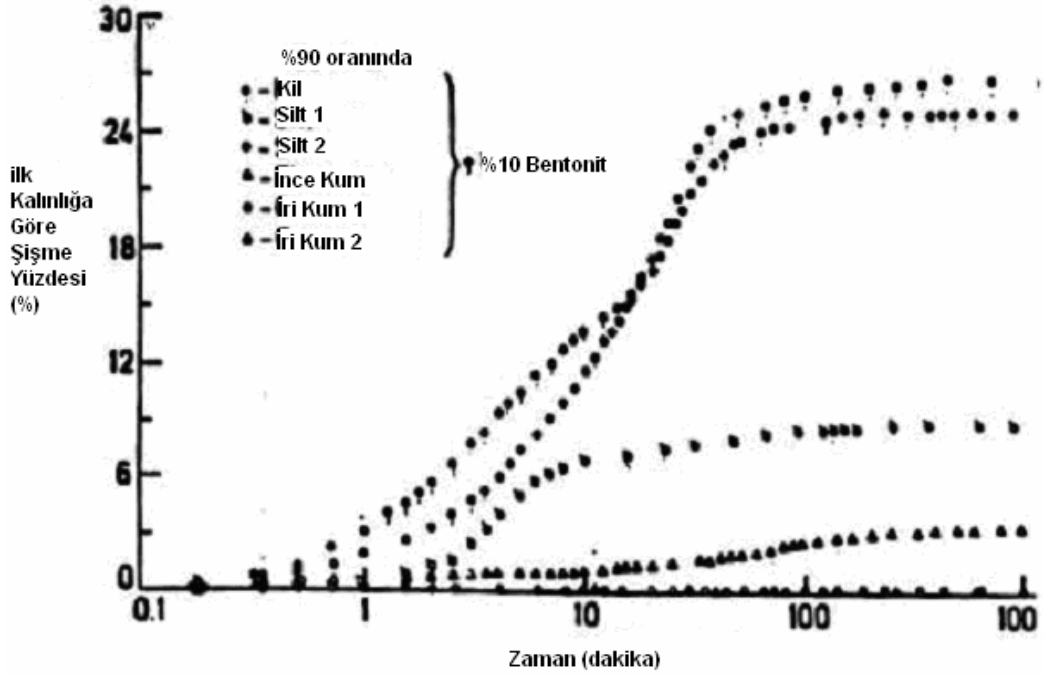
Kum-bentonit karışımlarının şişmesi, şişebilen zeminlerin davranışının incelenmesi sırasında çalışılmıştır. Şişen zeminler konusunda yapılan araştırmalar genellikle deformasyon, şişme basıncı, numunenin hazırlanmasında kullanılan su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık konularına odaklanmıştır. Bununla birlikte kum bentonit karışımında herhangi bir hacim değişikliği olmadan bentonitin şişmesini gözlemleyen birkaç araştırma vardır.

Thurrairajah (1970) çalışmasında şişme ile zamanın karekökü arasında lineer bir ilişki olduğunu bildirmiştir. **Dakshanamurty (1978)** araştırmasında şişme ile zaman arasında hiperbolik ilişki gözlemlemiştir. Dakshanamurty bu çalışmasında şişmeyi iki aşamaya ayırmış ve büyük hacim değişimlerinin ikinci aşamada oluştuğunu gözlemlemiştir.

Şişen zeminlerde kil olmayan kısmın boyut, şekil, tip ve miktarının etkisini araştıran çalışmalarda bulunmaktadır. Bu çalışma bentonit (kil kısım) ile değişik yüzde ve tipte daha kaba danelerin (kil olmayan kısım) karışımının şişme davranışını belirlemeyi hedeflemiştir. Ödömetre kullanılarak yapılan bu çalışmada kum-bentonit karışımı kuru olarak hazırlanmış, maksimum kuru birim hacim ağırlığında

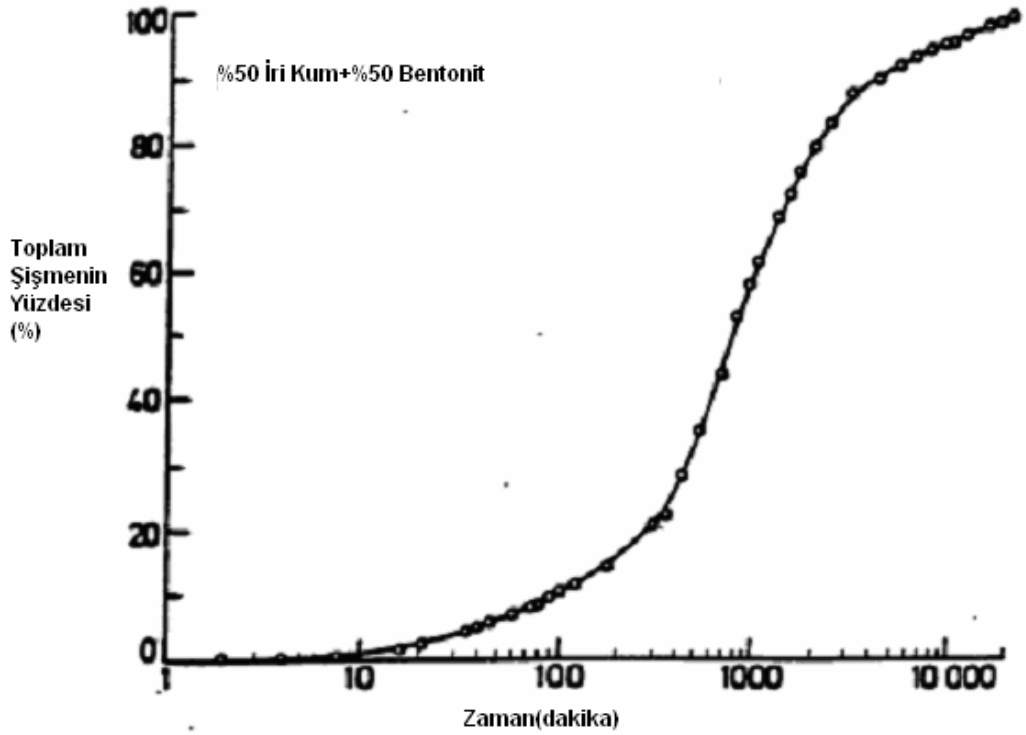
sıkıştırılmış ve daha sonra iki ucunda poroz taş olmak üzere konsolidasyon ringine yerleştirilmiştir. Odömetrede 5 kPa sürşarj uygulanmıştır.

Karışımlar şişmek üzere damıtılmış suda bekletilmiştir. Şişme numunenin ilk kalınlığındaki artış yüzdesi olarak tanımlanabilir.



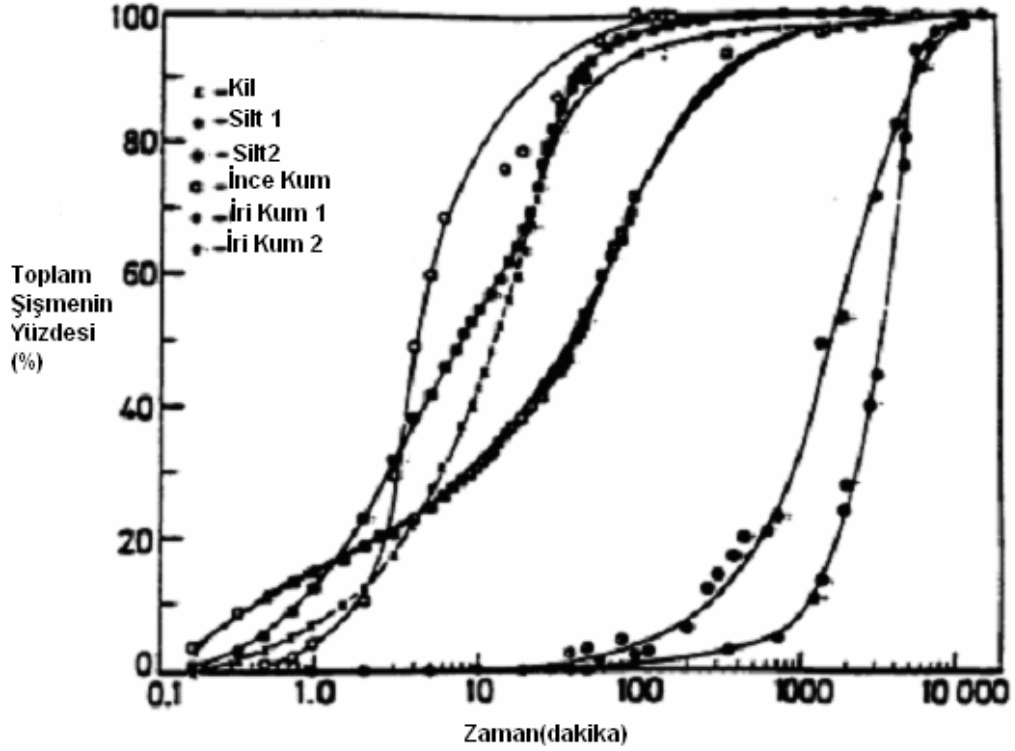
Şekil 4.1 : Tipik Zaman-Şişme İlişkisi (Sivapullaiah ve diğ., 1996)

Şekil 4.1 %10 bentonit içeren farklı karışımların tipik zaman-şişme ilişkisini göstermektedir. Şişme yavaşça artar, sonra hızla yükselir ve son olarak asimptot değerine ulaşır (Sivapullaiah ve diğ., 1996).



Şekil 4.2 : Zaman-Şişme İlişisini Gösteren S Eğrisi (Sivapullaiah ve diğ., 1996)

Şekil 4.2’da şişme zaman ilişkisini gösterir ama şişme toplam şişmenin yüzdesi olarak ifade edilmiştir. Bu eğrinin S şekli tipiktir. Sivapullaiah ve diğ. (1996) şişmeyi üç ayrı faza ayırmıştır. İlk şişme genellikle toplam şişmenin %10’u dur ve boşluklardaki bentonitin şişmesinden kaynaklanır. Bu şişme kum-bentonit karışımının hacminde bir artışa sebep olmaz. İlk şişmenin akabinde primer şişme oluşur. Bu şişme daha hızlıdır çünkü boşluklarda bentonitin şişmesine daha fazla yer kalmamıştır. Primer şişme tamamlandıktan sonra , daha yavaş olarak ikincil şişme oluşur.

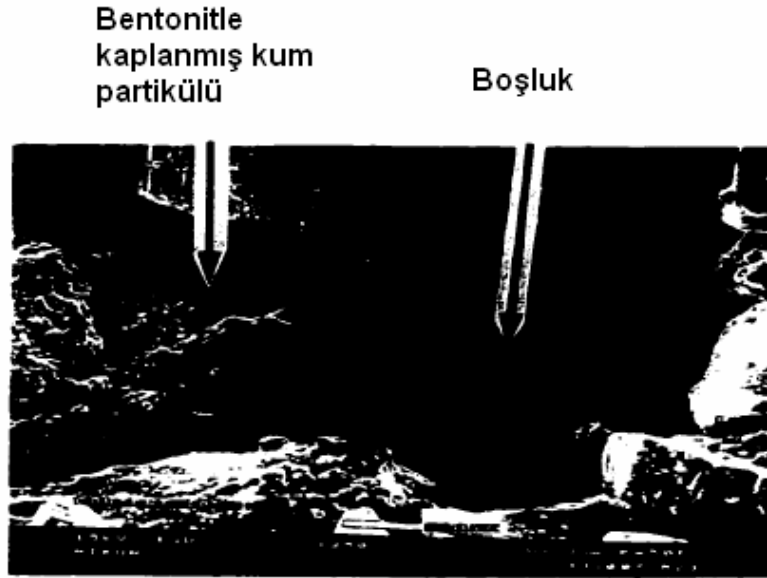


Şekil 4.3 : %10 Bentonit İçeren Farklı Zemin Karışımlarının Tipik S Eğrileri
(Sivapullaiah ve diğ., 1996)

Şekil 4.3'de %10 bentonit içeren farklı zemin karışımlarının tipik S eğrilerini gösterir. İri kum ve bentonit karışımının şişme hızı çok yavaştır. Ayrıca toplam şişmenin %10'unun oluşması için 1000 dakikadan fazla bir süre gerekmektedir. Alternatif olarak ince kum ve silt içeren karışımlarda şişme hızı çok daha yüksek olmaktadır. Büyük boşlukları olan malzemelerin, bentonitin boşluklar içerisinde kaba danelere baskı uygulamadan şişmesine izin verdiği görülmektedir. Bentonit içeriği artığı zaman ve/veya şişmeyen kısım daha ince olduğunda, şişmenin oluşabileceği boşluklar azalır ve hacim değişimi çok daha hızlı gerçekleşir. Boşluk hacmi kuru bentonit (yüksek bentonit içeriği veya çok ince kum) ile dolu olduğu zaman hacim değişimi suyla temastan hemen sonra gerçekleşir (Sivapullaiah ve diğ., 1996).

Komine ve Ogata (1996) çalışmalarında hidrolik geçirgenlik ile bentonitin şişmesi arasındaki ilişkiyi açıklamaya yönelmişlerdir. Elektron mikroskobu ile (SEM- Scanning Electron Microscope) örnek etrafındaki sıcaklık ve basınç sabit tutularak yapılan bu incelemelerde 6 numaralı Mikawa silikat kumu kullanılmıştır. Çalışmadaki tüm numuneler standart Proctor enerjisine göre belirlenen optimum su muhtevasında sıkıştırılmıştır. Numuneler %5, %10, %20, %50 bentonit içerecek

şekilde hazırlanmışlardır. Şekil 4.4, Şekil 4.6, Şekil 4.8, Şekil 4.10 sırasıyla %5,%10,%20 ve %50 bentonit içeren henüz hazırlanmış karışımların optimum su muhtevastaki hallerini göstermektedir. Şekil 4.5, Şekil 4.7, Şekil 4.9 ve Şekil 4.11 ise sırası üstteki gibi olan karışımların su ile temasından bir süre sonraki hallerini göstermektedir.

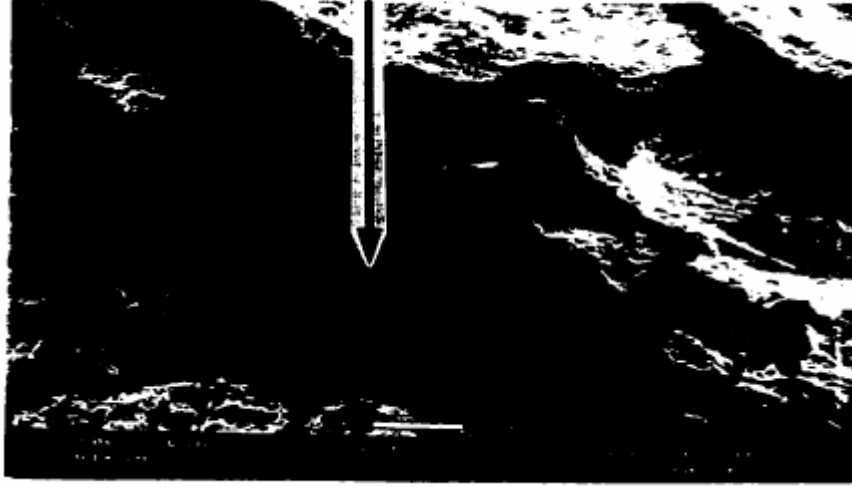


Şekil 4.4 : %5 Bentonit İçeren Yeni Hazırlanmış Kum-Bentonit Karışımının SEM Görüntüsü (Komine ve Ogata, 1996)



Şekil 4.5 : %5 Bentonit İçeren Kum-Bentonit Karışımında Bentonitin Şişerek Boşlukları Küçültmesi (Komine ve Ogata, 1996)

Boşluk



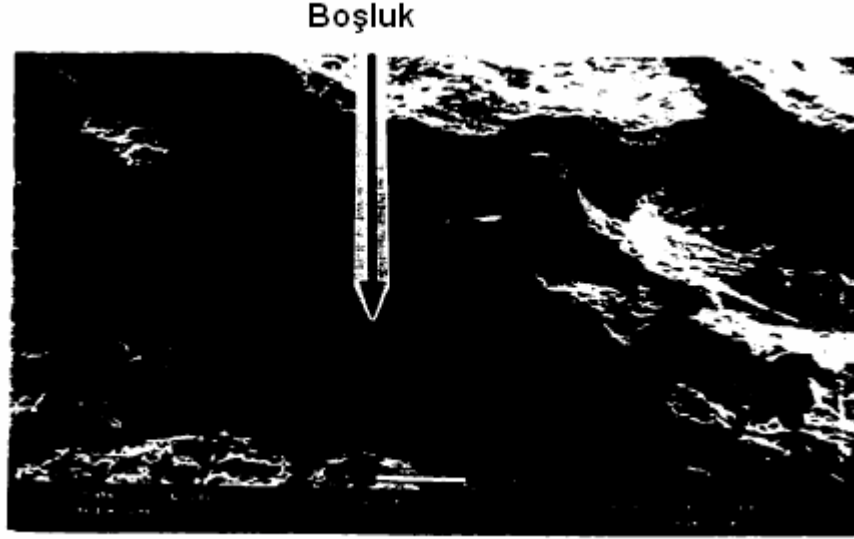
Şekil 4.6 : %10 Bentonit İçeren Yeni Hazırlanmış Kum-Bentonit Karışımının SEM Görüntüsü (Komine ve Ogata, 1996)

Boşlukların azalması

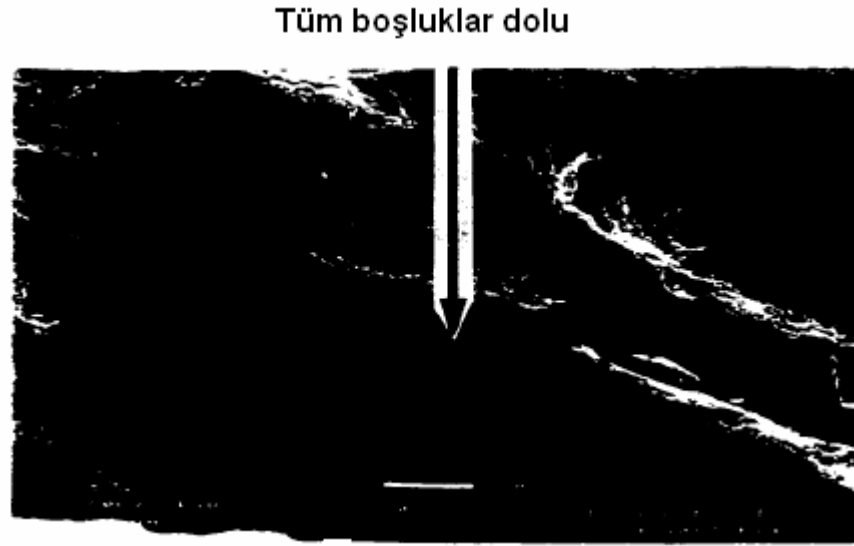


Şekil 4.7 : %10 Bentonit İçeren Kum-Bentonit Karışımında Bentonitin Şişerek Boşlukları Küçültmesi (Komine ve Ogata, 1996)

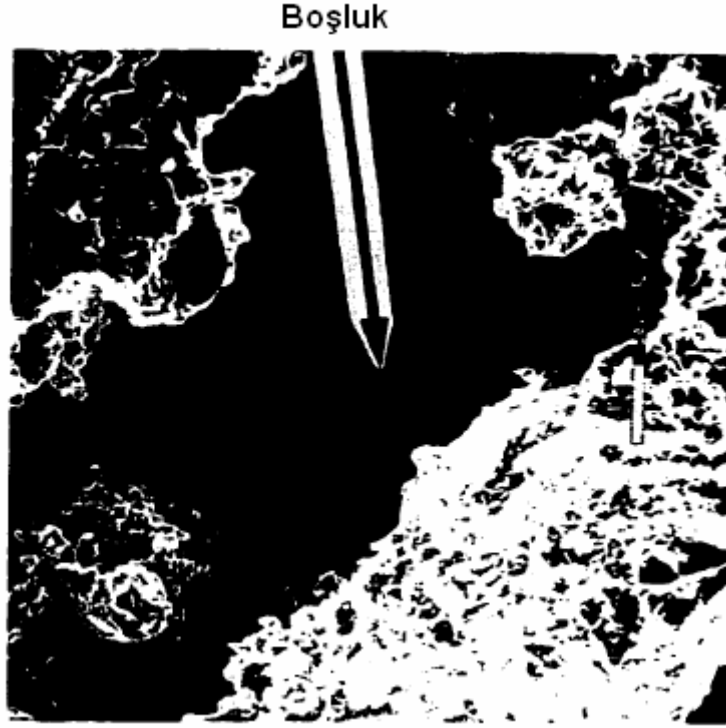
Şekillerden de görüldüğü üzere numune içindeki boşluklar suyun akışı için bir kanal vazifesi görmektedir. Ayrıca yine şekillerden anlaşılabilirdiği gibi %5 ve %10'luk bentonit içeren karışımlarda boşluklar tamamen dolmamışken, %20 ve %50 bentonit içeren karışımlardaki boşluklar tamamen dolmuş olarak görülmektedir.



Şekil 4.8 : %20 Bentonit İçeren Yeni Hazırlanmış Kum-Bentonit Karışımının SEM Görüntüsü (Komine ve Ogata, 1996)



Şekil 4.9 : %20 Bentonit İçeren Kum-Bentonit Karışımında Bentonitin Şişerek Boşlukları Doldurması (Komine ve Ogata, 1996)



Şekil 4.10 : %50 Bentonit İçeren Yeni Hazırlanmış Kum-Bentonit Karışımının SEM Görüntüsü (Komine ve Ogata, 1996)



Şekil 4.11 : %50 Bentonit İçeren Kum-Bentonit Karışımında Bentonitin Şişerek Boşlukları Doldurması (Komine ve Ogata, 1996)

5. ATIK DÖKÜM KUMLARININ YENİDEN KULLANIMINA YÖNELİK ÇALIŞMALAR

5.1. Atık Döküm Kumunun Geçirimsizlik Amacıyla Yeniden Kullanımı

Kunes ve Smith (1983) atık döküm kumunun dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği üzerine çalışmalar yaptılar. Setçikleri tipik bir numune üzerinde dane boyutu dağılımı, kompaksiyon ve hidrolik geçirgenlik ölçümlerini yaptılar. Sonuç olarak numunenin çakıl yüzdesi 0.7, kum yüzdesi 88.3, silt yüzdesi 7.5 ve kil yüzdesi ise 3.6 olarak belirlendi ve standart Proctor enerjisi kullanılarak optimum su muhtevası %9 ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı 20.6 kN/m^3 bulundu. % 93 Standart Proctor sıkılığında ve % 15 su muhtevası ile hazırlanan numunenin hidrolik geçirgenliği 1.3×10^{-6} ila 5×10^{-6} cm/sn olarak belirlendi. Çalışma sonucunda numunenin geçirimsizlik amacıyla kullanılan sistemlerde kullanılan malzemelere benzer özellikler gösterebileceği belirtilmiştir.

Ayrıca bu çalışma boyunca seçilmiş bazı döküm kumları da zeminle karıştırılarak dolgu örtülerinde bulunan bitkisel toprak olarak kullanılmıştır.

Iroquois Döküm Şirketide yeniden kullanıma yönelik bir çalışma yaptırmıştır. Yaptırdıkları çalışmanın amacı atık döküm kumunun hidrolik bariyerde ki kil yerine kullanılabilirliğinin gözlenmesidir. Çalışmada üç ayrı test numunesi hazırlanmıştır. Tablo 5.1’de test numunelerinin özellikleri verilmiştir.

1 Numaralı Numunede 300 mm kalınlığında yalıtılmış zemin ve altına da 600 mm kalınlığında sıkıştırılmış döküm kumu , 2 numaralı numunede sadece 900mm kalınlığında sıkıştırılmış döküm kumu , 3 numaralı numunede ise 300 mm kalınlığında yalıtım tabakası ve altına da 600 mm kalınlığında sıkıştırılmış döküm kumu kullanılmıştır. Tüm numunelerin üstüne 150 mm kalınlığında bitkisel toprak serilmiştir.

Tablo 5.1 : Iroquois Döküm Şirketinin Test Numunelerinin Özellikleri (Abichou, 1999)

Numune No	Katmanlar	Özellikler
1	600 mm sıkıştırılmış döküm kumu 300 mm yalıtılmış zemin 150 mm üst zemin	Düşük hidrolik geçirgenlikli bariyer tabakası Kök zonu/yalıtılmış tabaka Bitkisel toprak
2	900 mm sıkıştırılmış döküm kumu 150 mm üst zemin	Düşük hidrolik geçirgenlikli bariyer tabakası Bitkisel toprak
3	600 mm sıkıştırılmış kil 300 mm yalıtılmış zemin 150 mm üst zemin	Düşük hidrolik geçirgenlikli bariyer tabakası Kök zonu/yalıtılmış tabaka Bitkisel toprak

Döküm kumu yerleştirilirken dozerle serilmiş ve titreşimli silindirle sıkıştırılmıştır. Standart Proctor enerjisine göre optimum su muhtevasına getirilmiştir ve %95 Proctor sıklığında hazırlanmıştır. Kil bariyer yerleştirilirken su eklenmesine gerek duyulmamıştır ve %95 Proctor sıklığında yerleştirilmiştir.

Her bariyer tabakasından örnekler alınarak dane boyutu dağılımı , Atterberg limitleri, kompaksiyon ve hidrolik geçirgenlik deneyleri yapılmıştır. Hidrolik geçirgenlikler 8.1×10^{-5} ile 3.5×10^{-5} cm/s arasında değişmektedir. Fakat numunelerin çıkarılması sırasında zarar gördüğü düşünülmektedir. Kil bariyerden alınan numunenin hidrolik geçirgenliği ise 3.9×10^{-8} cm/s olarak ölçülmüştür.

Deney yapılan yerlerden sızmalar gözleendiğinde ise 2 numaralı deneyde sızmanın en düşük olduğu görülmüştür. Bu da döküm kumunun kilden daha iyi performans sergileyebileceğini göstermiştir (Abichou, 1999).

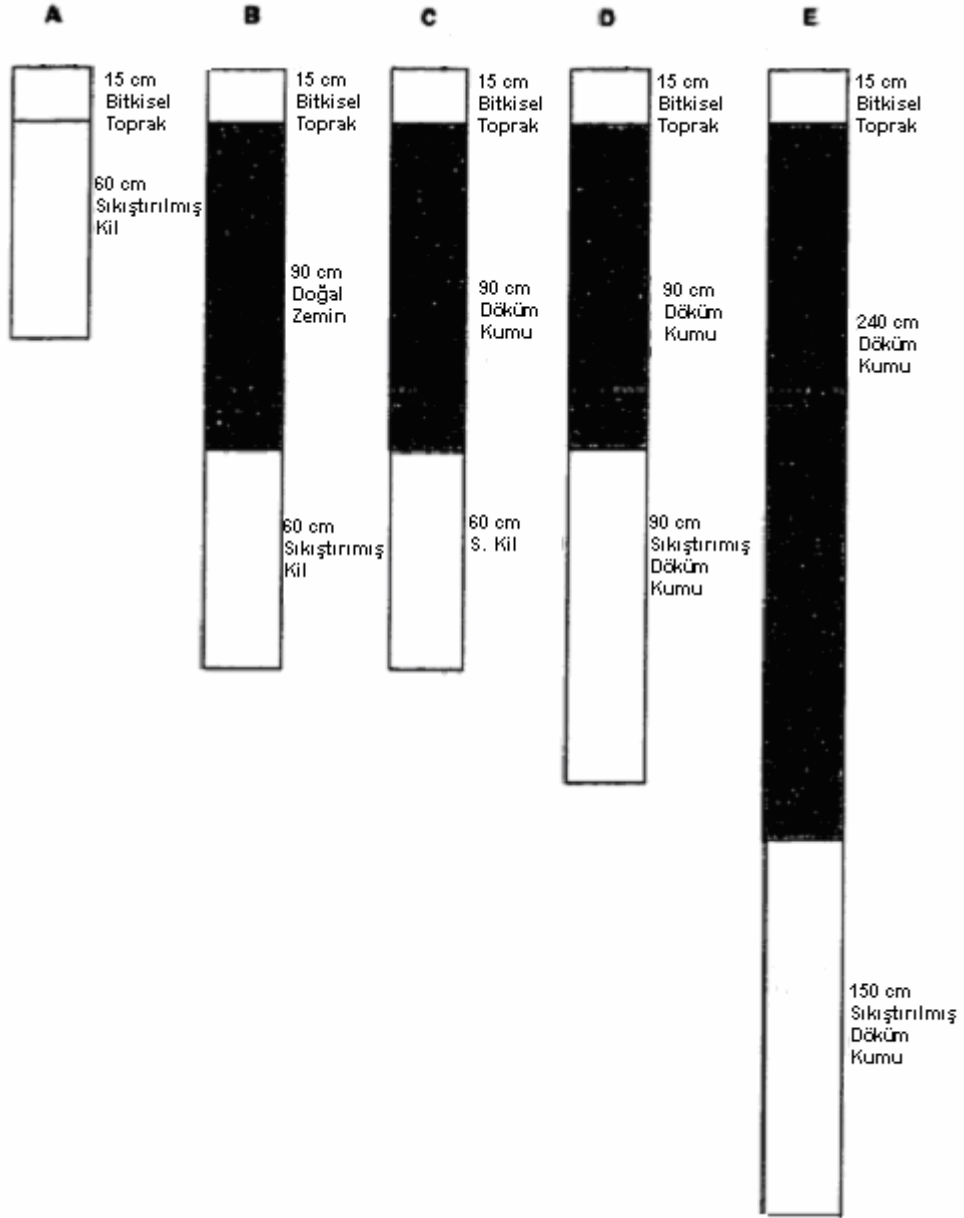
Wisconsin’de bulunan Grede Döküm Şirketi atık döküm kumunun geçirimsizlik amaçlı kullanımına yönelik bir arazi çalışması yapmıştır. Bu çalışma 5 adet gerçek ölçekli testi

içermektedir. Bunlardan ikisi bariyer tabakası olarak sıkıştırılmış kili diğer üçü ise döküm kumunu kullanmıştır. Test kesitleri aşağıdaki tablolarda görülmektedir. Tüm deney kesitlerinde 150 mm kalınlıklı üst zemin tabakası bulunmaktadır.

Kil bariyer tabakaları en az % 90 modifiye Proctor sıklığında, döküm kumuyla hazırlanmış bariyerler ise En az % 95 standart Proctor sıklığında hazırlanmıştır .

Yıllık sızma oranları aşağıdaki tabloda görülebilir. Sızma ile ilgili olarak ise sonuçlarda gruplaşma olmuştur. İlk grup döküm kumu ile hazırlanmış olan C, D, E numuneleri, ikinci grup ise sızma oranları ilk gruptan 2 kat kadar yüksek olan ve kil içeren A, B numuneleridir. Ayrıca deney sonuçlarına göre C, D ve E numunelerinin sızma oranları tabaka kalınlıklarına bakmaksızın benzerdir. Bu sonuçlar Grede döküm şirketlerinin atıklarının sıkıştırmaya da bakmaksızın kilden daha iyi bir performans gösterdiğini söylemektedir.

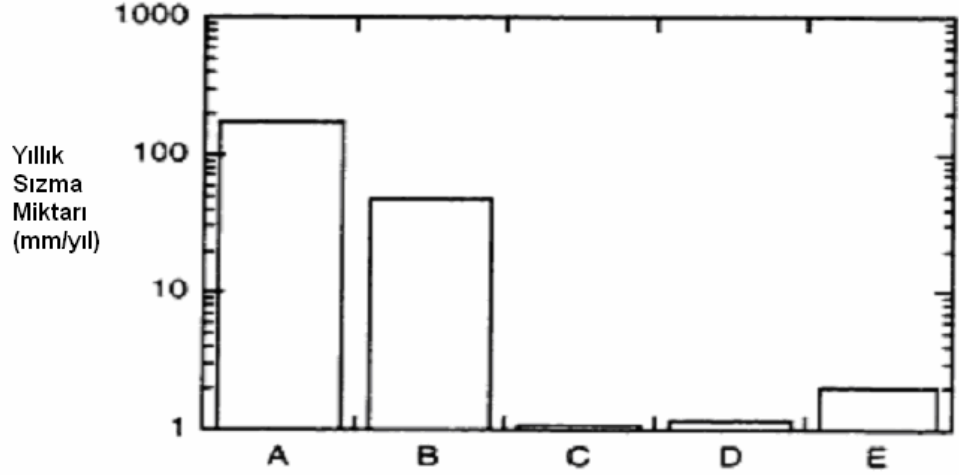
Yaz ve kış boyunca devam eden çalışmalar sonucu neden kilin daha düşük performans gösterdiği ortaya çıkmıştır. Hava koşullarına bağlı olarak donma çözülme döngüleri sonucu sıkıştırılmış kilde çatlaklar olmakta fakat döküm kumu kullanıldığında su iletilerek donma ve dolayısıyla çatlak oluşumu olmamaktadır (**Vierbicher Associates, 1996**).



Şekil 5.1 : Grede Döküm Şirketi Test Kesitleri (Vierbicher Associates, 1996)

Tablo 5.2 : Grede Döküm Şirketi Test Kesit ve Özellikleri (Vierbicher Associates, 1996)

Kesit Adı	Katmanlar	Özellikleri
A	600 mm sıkıştırılmış kil 150 mm üst zemin	Düşük hidrolik geçirgenlikli bariyer tabakası Bitkisel toprak
B	600 mm sıkıştırılmış kil 900 mm doğal zemin 150 mm üst zemin	Düşük hidrolik geçirgenlikli bariyer tabakası Kök zonu/yalıtılmış tabaka Bitkisel toprak
C	600 mm sıkıştırılmış kil 900 mm döküm kumu 150 mm üst zemin	Düşük hidrolik geçirgenlikli bariyer tabakası Kök zonu/yalıtılmış tabaka Bitkisel toprak
D	900 mm sıkıştırılmış döküm kumu 900 mm döküm kumu 150 mm üst zemin	Düşük hidrolik geçirgenlikli bariyer tabakası Kök zonu/yalıtılmış tabaka Bitkisel toprak
E	1500 mm sıkıştırılmış döküm kumu 2400 mm döküm kumu 150 mm üst zemin	Düşük hidrolik geçirgenlikli bariyer tabakası Kök zonu/yalıtılmış tabaka Bitkisel toprak



Şekil 5.2 : Grede Döküm Şirketi Test Kesitlerinin Yıllık Sızma Miktarları (Vierbicher Associates, 1996)

Abichou (1999) tez çalışmasında döküm kumları üzerinde kapsamlı araştırmalar yaparak hidrolik iletkenliği etkileyen parametrelerin etkilerini bulmaya çalışmıştır. Numuneleri farklı enerjilerde sıkıştırarak, donma çözünme, ıslanma kuruma döngülerine maruz bırakarak ve farklı kimyasallar kullanarak hidrolik iletkenliklerini tayin etmiştir.

Tablo 5.3 : Hafifletilmiş, Standart ve Modifiye Proctor Enerjileri için Hidrolik İletkenlik Değerleri (Abichou, 1999)

Numune No	Hafifletilmiş Proctor			Standart Proctor			Modifiye Proctor		
	Optimum Su Muh.	Max. Kuru Birim Ağırlık	Hidrolik İletkenlik (cm/s)	Optimum Su Muh.	Max. Kuru Birim	Hidrolik İletkenlik (cm/s)	Optimum Su Muh.	Max. Kuru Birim	Hidrolik İletkenlik (cm/s)
1	-	-	-	9,6	18,39	$5,4 \times 10^{-7}$	8	18,84	$3,2 \times 10^{-7}$
2	15,40	16,48	$1,8 \times 10^{-8}$	12,5	17,89	$9,0 \times 10^{-9}$	11,1	18,72	$7,1 \times 10^{-9}$
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	10,8	17,96	$2,8 \times 10^{-8}$	9,8	18,8	-
5	16,10	16,92	$2,8 \times 10^{-8}$	13	18,19	$2,4 \times 10^{-8}$	11,6	19,27	$9,2 \times 10^{-9}$
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	16,20	16,71	$4,5 \times 10^{-9}$	12,20	17,30	$6,1 \times 10^{-9}$	9,7	18,68	$9,0 \times 10^{-9}$
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	14,70	16,82	$3,5 \times 10^{-8}$	11,60	18,24	$1,6 \times 10^{-8}$	9,4	19,28	$9,5 \times 10^{-9}$
10	16,10	16,57	$9,6 \times 10^{-9}$	12,70	17,90	$3,5 \times 10^{-8}$	10,8	18,5	$9,6 \times 10^{-9}$
11	-	-	-	22,50	14,73	-	-	-	-
12	15,30	16,78	$1,8 \times 10^{-7}$	11,50	18,18	$9,7 \times 10^{-8}$	10,00	19,02	$7,2 \times 10^{-8}$
13	14,80	16,85	$3,1 \times 10^{-8}$	11,00	18,27	$2,2 \times 10^{-8}$	9,80	19,32	$1,1 \times 10^{-8}$
14	13,50	14,40	$5,4 \times 10^{-8}$	15,50	16,20	$8,5 \times 10^{-9}$	-	-	-
15	15,00	16,00	$9,5 \times 10^{-9}$	15,00	16,90	$9,0 \times 10^{-9}$	-	-	-
16	-	-	-	12,30	17,26	$5,3 \times 10^{-5}$	11,1	18,57	-

Tablo 5.3’de bu çalışmaya ait hafifletilmiş, standart ve modifiye Proctor enerjileri için hidrolik iletkenlik değerleri görülmektedir. Buradan sıkıştırma enerjisinin hidrolik iletkenlik üzerindeki etkisi sınırlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Aynı çalışma kapsamında donma çözünme testi sadece hidrolik iletkenliği 1×10^{-7} cm/sn olan numuneler üzerinde yapılmıştır. Tablo 5.4’de bu çalışma sonucu elde edilen hidrolik iletkenlik değerleri yer almaktadır. Tabloda donma çözünmeden önceki hidrolik iletkenlik ve donma-çözünme döngülerinden sonraki hidrolik iletkenliğin ilk hidrolik iletkenliğe oranı (Kr) gösterilmiştir.

Tablo 5.4 : Donma-Çözünme Döngüleri Sonunda Hidrolik İletkenliğin Değişimi (Abichou, 1999)

Döküm Kumu No	Örnek No	İlk Hidrolik İletkenlik Değeri (cm/s)	Hidrolik İletkenlik Oranı (Kr)							
			1 Döngü	2 Döngü	3 Döngü	4 Döngü	5 Döngü	6 Döngü	8 Döngü	10 Döngü
2	1	$6,1 \times 10^{-8}$	1,85	0,87	-	-	0,98	-	-	0,94
	2	$4,7 \times 10^{-8}$	1,24	1,1	-	-	1,84	-	-	1,1
5	1	$3,4 \times 10^{-8}$	-	-	0,95	-	-	0,56	-	-
	2	$3,0 \times 10^{-8}$	-	-	0,65	-	-	1,1	-	-
7	1	$1,6 \times 10^{-8}$	0,85	0,8	0,7	0,9	0,95	-	-	0,9
	2	$1,3 \times 10^{-8}$	0,7	1,05	1,2	0,85	1,1	-	-	1,1
9	1	$6,2 \times 10^{-8}$	-	9,4	-	-	8,77	-	-	-
10	1	$3,5 \times 10^{-15}$	1,02	1,1	1,79	-	0,98	-	-	0,96
	2	$6,1 \times 10^{-8}$	1,7	1,06	2,46	-	1,23	-	-	1,87
13	1	$5,1 \times 10^{-8}$	0,79	-	0,86	-	-	0,75	0,8	-

Tablo 5.4’den de görüldüğü üzere bir numune dışında (9 numaralı) üç donma çözünme döngüsü için Kr değerleri ortalaması 1.14 olmuştur. Benzer şekilde Tablo 5.4’te ise ıslanma kuruma döngüsü sonundaki hidrolik iletkenlikler görülmektedir ve görüldüğü üzere Kr değerleri ortalaması 1.7 olmuştur.

Tablo 5.5 : Islanma-Kuruma Döngüleri Sonunda Hidrolik İletkenliğin Değişimi (Abichou, 1999)

Döküm Kumu No	İlk Hidrolik İletkenlik Değeri (cm/s)	Hidrolik İletkenlik Oranı (Kr)				
		1 Döngü	2 Döngü	3 Döngü	4 Döngü	5 Döngü
2	$1,2 \times 10^{-8}$	1,3	1,4	1,2	1,3	0,75
5	$2,4 \times 10^{-8}$	2,1	3,4	2,3	1,2	2,4
7	$1,4 \times 10^{-8}$	0,45	3,5	0,75	2,1	0,75
9	$6,2 \times 10^{-8}$	4,3	7,8	5,2	11,1	9,7
10	$3,5 \times 10^{-8}$	1,1	0,82	0,55	-	-
12	$6,4 \times 10^{-8}$	2,8	1,4	1,3	-	-
13	$4,8 \times 10^{-8}$	1,74	3,1	1,1	-	-

Tablo 5.6 : Hidrolik İletkenliğin Geçen Sıvıya Bağlı Değişimi (Abichou, 1999)

Döküm Kumu No	Hidrolik İletkenlik (cm/s)			
	Musluk Suyu	Deiyonize Su	0,1 N CaCl ₂ Çözeltisi	Çöp Suyu
2	$6,7 \times 10^{-8}$	$4,7 \times 10^{-8}$	$5,8 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-8}$
5	$4,2 \times 10^{-8}$	$3,2 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-8}$
7	$1,5 \times 10^{-8}$	$2,8 \times 10^{-8}$	$2,8 \times 10^{-8}$	$4,4 \times 10^{-8}$
12	$8,1 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-8}$	$9,2 \times 10^{-8}$	$2,6 \times 10^{-8}$
13	$5,1 \times 10^{-8}$	$6,2 \times 10^{-8}$	$3,6 \times 10^{-8}$	$4,6 \times 10^{-8}$

Tablo 5.6’te ise çalışmada seçilmiş bazı numunelerde hidrolik geçirgenliğin geçen sıvıya bağlı değişimi görülmektedir. Kullanılan sıvılar; musluk suyu, deiyonize su, düşük konsantrasyonlu NaCl₂ çözeltisi ve katı atıklardan süzülen süzüntü suyudur (Çöp Suyu). Hidrolik geçirgenliklere bakarak bu geçen sıvıların hidrolik iletkenliği önemli düzeyde etkilemediği söylenebilir (Abichou ve diğ., 1999).

5.2. Atık Döküm Kumunun Kullanılması Mümkün Diğer Alanlar

Geoteknik ve karayolu inşaatları başta olmak üzere inşaat sektöründe atık döküm kumunun büyük miktarlarda tüketilmesini sağlayacak çeşitli alanlar vardır. Atık döküm kumlarının aşağıda açıklanan şekilde bir çok alanda kullanılması mümkündür.

- Dolgularda

Atık döküm kumu dolgularda hidrolik iletkenliği kontrol ederek ya da etmeyerek kullanılabilir. Şekil 5.3’de yol dolgusunda kullanılması, Şekil 5.4’de ise basamaklandırılmış dolgu yapımında kullanımı görülmektedir.



Şekil 5.3 : Atık Döküm Kumunun Yol Dolgusunda Kullanımı(US Federal Highway Administration, 2004)



Şekil 5.4 : Kademeli Dolgu (US Federal Highway Administration, 2004)

- Karayolu İnşaatlarında

Atık döküm kumunun en çok kullanıldığı alanlardan biride karayolu inşaatlarıdır.Karayolu inşaatlarının çeşitli aşamalarında bu malzemenin kullanılması mümkündür. Sırasıyla yol altyapısında, yol üst yapısında temel tabaksı olarak, kış aylarında yapılan kar ve buz mücadelesinde yol kaplamasının sürtünme katsayısını arttırmak amacıyla kullanılabilir. Şekil 5.5’da yol tabanında kullanımı görülmektedir.



Şekil 5.5 : Atık Döküm Kumunun Yol Tabanında Kullanımı (US Federal Highway Administration, 2004)

- Asfalt Yapımında

Atık Döküm kumu sıcak asfalt karışımında ince agrega olarak başarıyla kullanılmaktadır. Çalışmalar ince agreganın %25'ini teşkil edecek kadar atık döküm kumunun kullanılabileceğini göstermiştir. Şekil 5.6'de Sıcak asfalt karışımla yol kaplaması görülmektedir.



Şekil 5.6 : Sıcak Asfalt Karışımla Yol Kaplaması (US Federal Highway Administration, 2004)

- Çimento Yapımında

Portland çimentosu uygun oranlarda kalsiyum oksit, silisyum ve demir oksitten oluşmaktadır. Bu giriş maddeleri tortulu şist, dolomit ve kireç taşı gibi doğal kayalarda bulunur. Çimento üretiminde silis kaynağı olarak döküm kumunun kimyası dane çapı ve şeklinden daha önemlidir. Portland çimentosu üretimi için kullanılacak döküm kumunun karşılaması gereken özellikler aşağıda belirtildiği gibidir.

- Silis içeriği %80'e eşit veya daha yüksek olmalı
- Düşük alkali malzeme olmalı
- Fazla miktarda kum içermeli
- Dane çapları üniform olmalı

Döküm kumu çimento endüstrisi için en kaliteli silis kaynaklarından biridir. Doğal kumu döküm kumuyla değiştirerek kullanılan doğal kum miktarı azaltılabilir.

- Bitkisel Toprakların Özelliklerinin İyileştirilmesinde

Kıvamı ve koyu renginden dolayı döküm kumu bitkisel toprak üretiminde idealdir. Bitkisel toprakta yüksek kum içeriği gerektiğinden uygun bir malzemedir. Gübrelemede kümelenme oluşumunu azaltır ve sıkıştırmadan kaynaklanan karışmayı önler. Ayrıca bu malzeme içerisindeki hava akışına izin verir. Ohio fidanlığı döküm kumunu toprak ve gübreyle karıştırarak süs bitkileri üzerinde kullanmaktadır. Ohio'dan Kurtz kardeşler golf sahası yeşillendirmesinde de bunu başarıyla kullanmıştır. Bu uygulamalarda kilin varlığı besinlerin alınmasını kolaylaştırdığı için faydalıdır. Döküm kumunun tarımsal uygulamalarda kullanılması ile ilgili düzenlemeler eyaletten eyalete ve durumdan duruma farklılık göstermektedir.

- Harç Yapımında ince agrega olarak kullanılmaktadır.
- Taş Yünü ve fiberglas üretiminde de zengin silisyum içeriğinden faydalanılmaktadır (**US Federal Highway Administration, 2004**).

6. TÜRKİYE’DE ATIK DÖKÜM KUMLARININ GEÇİRİMSİZ PERDE YAPIMINDA KULLANILMASI

6.1. Giriş

Döküm kumları esas olarak kum ve bentonit karışımı olduğundan geçirimsizlik perdesi olarak kullanılabilme olanakları mevcuttur. Geçmiş yıllarda, geçirimsizliği sağlamak için zemin-bentonit karışımları kullanılmıştır (**Chapuis 1981, Abbele, 1986**). Ayrıca kum-bentonit karışımı kullanılarak yapılan geçirimsizlik perdeleri donma-çözünme, ıslanma-kuruma döngüleri sonucunda killi zemin kullanılarak yapılanlardan iyi performans gösterebilmektedir (**Wong ve Haug 1991, Kraus ve diğerleri 1997, Abichou ve diğerleri 2000**).

Döküm kumunun, kompaksiyon sonucu, hidrolik iletkenliği 1×10^{-7} cm/sn veya daha düşük değerlere sahip olabilmektedir. Sızdırmaz perde yapımı için bir endüstriyel hammadde olma potansiyeline sahiptir. Hidrolik iletkenliği çok daha düşük değerlere ulaştırmak, örneğin bentonit ilavesi ile mümkün olabilir. Bu çalışmada, farklı döküm sanayii kuruluşlarından temin edilen kullanılmış döküm kumlarının indeks özellikleri belirlenmiş, farklı sıkıştırma enerjileri kullanılarak sıkıştırılmış, hidrolik iletkenlikleri ölçülmüş, süzüntü sularında ağır metal analizleri yapılmış ve sonuç olarak depolama sahalarında sızdırmaz perde yapımında hammadde olarak kullanımları irdelenmiştir. Bu bölümde bu amaca yönelik laboratuvar çalışmaları ve deney sonuçları anlatılmaktadır.

6.2. Metod ve Malzeme

6.2.1. Örnek Toplama

Türkiye genelinden 14 adet döküm kuruluşundan atık döküm kumu ve bazılarında da kullandıkları bentonit alınmıştır. Ayrıca Reşadiye bentoniti olarak bilinen yüksek

plastisiteli (kaliteli) bentonit temin edilmiştir. Gelen atık döküm kumları yapılan dökümün cinsine göre farklı özellikte olabilmektedir. Atık döküm kumlarının özellikleri Tablo 6.1. de görülebilir. Tablo 6.1'e ek olarak 7 ve 8 numaralı numunelerin bentonit oranları %10'a (7A, 8A) ve %15'e (7B, 8B) çıkartılarak diğer numunelere yapılan tüm deneylere tabi tutulmuştur.

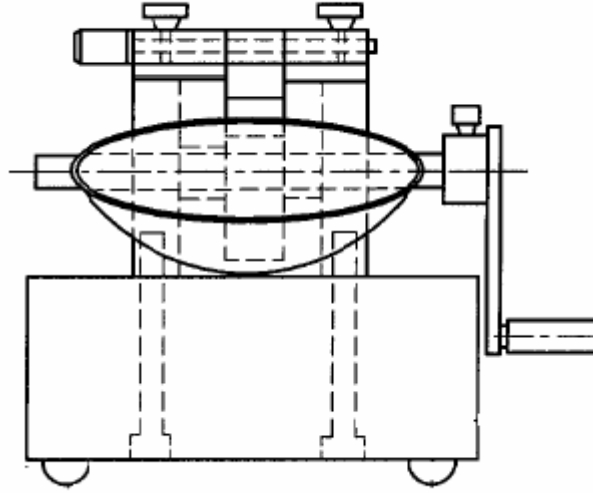
Tablo 6.1. Kullanılan Atık Döküm Kumları ve Özellikleri

Numune No	Bölge	ASTM Sınıflandırması	Bağlayıcı
1	İstanbul	SM	Bentonit
2	Çorum	SM	Bentonit
3	İstanbul	SM	Bentonit
4	İstanbul	SM	Bentonit
5	İstanbul	SM	Bentonit
6	Kocaeli	SM	Bentonit
7	İstanbul	SM	Bentonit
8	İstanbul	SM	Bentonit
9	İstanbul	SM	Bentonit
10	İstanbul	SP	Reçine
11	İstanbul	SM	Bentonit
12	Bursa	SM	Bentonit
13	Tekirdağ	SM-SC	Bentonit
14	Kırklareli	SM	Bentonit
15	Ankara	SM	Bentonit

6.2.2. İndeks Özelliklerinin Belirlenmesi

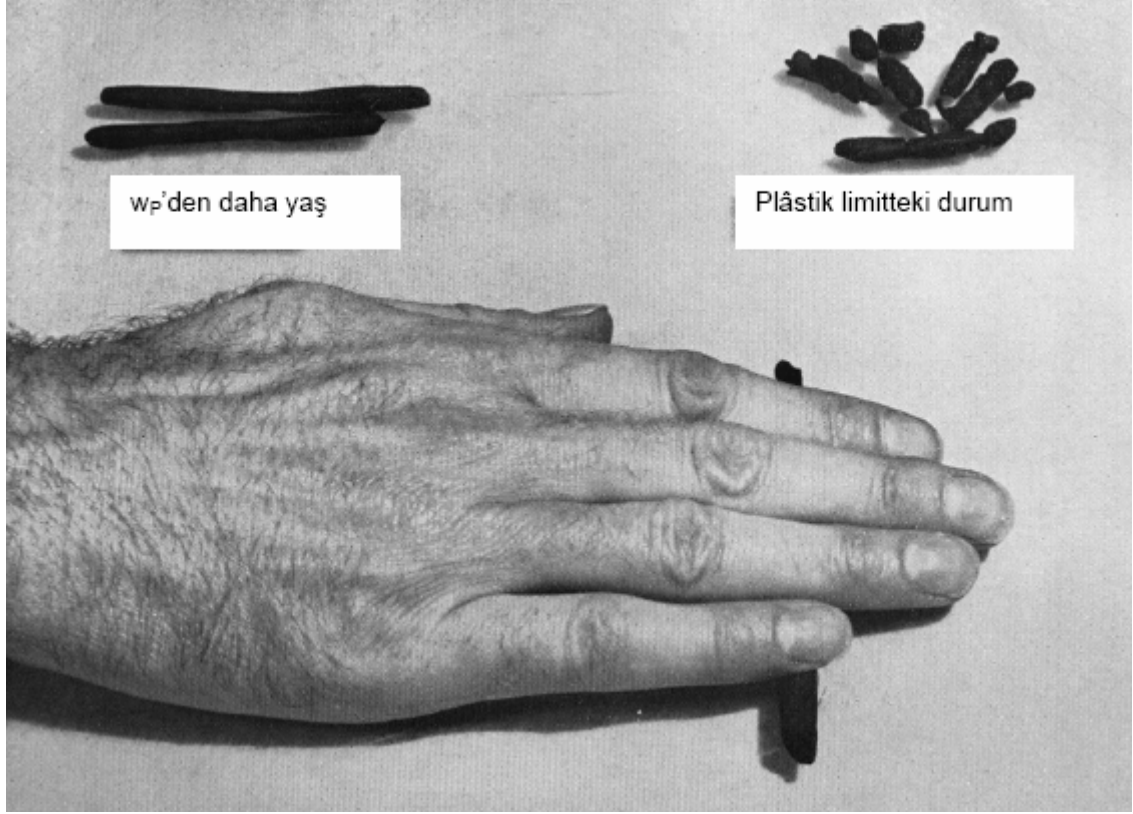
İndeks deneyleri, likit ve plastik limit değerlerinin belirlenmesi, dane boyutu dağılımı ve bentonit yüzdelerinin tespitini içermektedir. Likit ve plastik limit deneyleri ASTM D 4318-95A standardına, dane boyutu dağılımını tespit için yapılan elek analizi ve hidrometre deneyleri ise ASTM D 422 standardına göre yapılmıştır. İndeks deneyleri döküm kumlarına ek olarak mevcut olan dört bentonit numunesi içinde yapılarak özellikleri tayin edilmeye çalışılmıştır.

Likit ve plastik limit deneylerinde döküm kumları hidratasyona tabi tutulmuşlardır. Bu durumun sebebi ise numunelerin döküm işlemlerinden geçmiş olmaları ve geldiklerinde su muhtevalarının çok düşük olmasıdır. Bu süre standartta 16 saat olarak verilmekle birlikte yapılan deneylerde 24 saat olarak uygulanmıştır. Deney prosedürü hakkında bilgi vermek gerekirse; likit limit yapılacak Casagrande aletinin (Şekil 6.1), her deneyden önce temiz, kuru ve iyi çalışır durumda olup olmadığı denetlenmeli, kabın serbestçe düşebilmesine ve menteşede yan oynamaların gereğinden çok olmamasına özen gösterilmelidir. Oluk açma bıçağı da temiz ve kuru olmalı, zorunlu boyutları sağlamalıdır. Deneyde kullanılacak numunenin başlangıç su muhtevasının likit limitten düşük olması gerekir. Örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması metoduna uygun olarak 425 µm'lik elekten (40 numaralı elek) geçen yaklaşık 200 g numune alınır. Numune bir kaba konur; damıtık su katılarak, homojen bir hamur durumuna gelene kadar, palet bıçağıyla iyice karıştırılır. Bazı zeminlerde güvenilir sonuçlar alınabilmesi için deneye başlamadan önce numunenin 40 dakikaya kadar uzayabilen bir süre boyunca sürekli olarak karıştırılması gerekebilir. Elde edilen zemin-su karışımından bir miktar alınarak likit limit aleti içine konur (bu sırada kap tabana oturur konumda olmalıdır), yüzeyi tabana paralel olarak düzlenir ve oluk açma bıçağı, menteşenin ortasından geçen çap boyunca kap içinde hareket ettirilerek, numune ikiye bölünür. Bıçağın hareketi sırasında bıçak, kap yüzeyine dik tutulmalı, bıçağın keskin ucu hareket yönüne bakmalıdır. Böylece numunenin ortasında 'V' kesitli bir oluk açılmış olur. Krank kolu saniyede 2 devirlik bir hızla çevrilerek, iki yanda kalan zemin, oluğun dip kısmında birbirine değene kadar, kap kaldırılıp düşürülür. Oluktaki bu kapanmayı sağlayan düşüş sayısı kaydedilir. Bazı zeminlerde oluk, zemindeki akma yoluyla kapanacağına, zeminin kap yüzeyi boyunca kayması yoluyla kapanma eğilimindedir. Bu gibi durumlarda, elde edilen sonuca güvenilmemeli ve zeminde akma görülene kadar deney tekrarlanmalıdır. Birkaç kez su eklenmesine karşın yine kayma oluyorsa, deneyin bu zeminde uygulanamadığı sonucuna varılır ve deney raporunda likit limitin ölçülemediği belirtilir. Oluğun kapanmış olan kesiminin çevresinden, palet bıçağıyla alınan yaklaşık 30 g numune, (10g'dan daha az olmamalıdır) deney kabına konur ve su muhtevası ölçülür. Deney aleti Şekil 6.1'de görülmektedir.



Şekil 6.1 : Casagrande Aleti

Plastik limit deneyi için ise; örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması metoduna uygun olarak elde edilmiş ve likit limit deneyi için hazırlanmış olan(425 μm 'lik elekten geçen) malzemedan yaklaşık 20 g numune alınır. Numune homojen bir duruma gelene ve küçük bir top biçimini alabilecek gibi plastik olana kadar, damıtık su ile iyice karıştırılır. Küre halindeki numune, 3 mm çapında silindirik bir çubuk şeklini alana kadar el ayası ile bir plaka arasında yuvarlanır. Numunenin çapı yaklaşık 3 mm olduğu anda çatlama ve kopma belirmemişse zemin tekrar topak haline yoğrulur ve yeniden yuvarlanır. Çap tam 3 mm'ye indiği anda, yuvarlanan zeminde çatlayıp dağılmalar görülene değin bu işlem sürdürülür. Çapın doğru olarak belirlenmesinde karşılaştırma ölçeği olarak bir metal çubuk kullanılır. Numunenin dağılan parçaları toplanıp bir numune kabına konur ve su muhtevası ölçülür. Ölçüm için alınan numunenin yaş haldeki kütlesi en az 10 g olmalıdır. Şekil 6.2'de plastik limitin belirlenmesi işlemi görülmektedir.

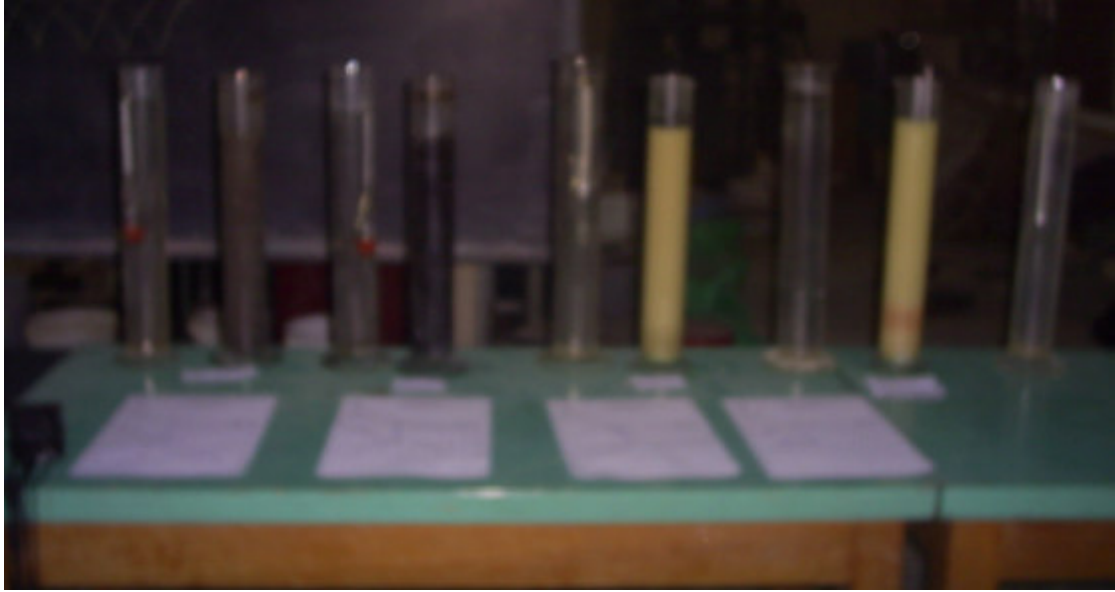


Şekil 6.2 : Plastik Limitin Belirlenmesi

Dane çapı dağılımının belirlenmesi için ise elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. Örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması metoduna uygun olarak temsili numune elde edilir ve etüvde kurutulur. Etüvde kurumuş malzeme tartılır ve bulunan değer kaydedilir. Geniş bir tepsi içine serilir veya bir kova içine konur ve su ile örtülür ve zeminin tamamen ıslanmasını sağlamak için kabın içindekiler iyice karıştırılır. Numune son bir kez karıştırıldıktan sonra bulanık su, yavaş yavaş 75 μm 'lik eleğin (200 numaralı elek) üzerine aktarılır. İri danelerin 75 μm 'lik eleğe zarar vermemesi için 75 μm 'lik eleğin üzerine daha büyük göz açıklıklı ve kalın telli başka bir elek (425 μm veya 2 mm gibi) konularak iri danelerin bu eleğin altına geçmesi önlenir. Numuneye yeniden su katılır. Bulanık su, 75 μm elekten geçirilip atılır. Bu yıkama işlemi, 75 μm elekten geçen su duru hale gelinceye kadar sürdürülür. Eleklerden kalan malzemenin tamamı tepsilere boşaltılır ve $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ sıcaklıklı etüvde kurumaya bırakılır. Etüvde kurutulan malzeme uygun bir elek serisinden elenir. Her elekte kalan miktar tartılır ve elde edilen kütleler kaydedilir. 75 μm 'lik elekten geçen malzemenin miktarı, deneyde kullanılan eleklerde kalan malzeme kütlelerinin toplamının toplam kütlede çıkarılmasıyla elde edilir.

Hidrometre analizinde ise; numune geniş ağızlı konik şişeye konur. Üzerine 150 mL hidrojen peroksit çözeltisi eklenir, birkaç dakika süreyle cam çubukla hafifçe karıştırılır ve ertesi güne kadar bekletilir.

Karışım, damıtık su fişkırtılarak, karıştırma kabına aktarılır. Bu işlem sırasında kullanılan su miktarı 150 mL'yi aşmamalıdır. Zemin süspansiyonu bundan sonra 15 dakika süreyle karıştırılır. Mezürün ağzı lastik bir tıpa ile kapatılır ve homojen bir süspansiyon oluşana kadar sert bir biçimde çalkalanır, en sonunda baş aşağı çevrilir. Çalkalama işlemi durdurulur durdurulmaz mezür, düz bir yüzey üzerine oturtulur ve kronometre çalıştırılır. Hidrometre yüzme durumunun az altına gelene kadar süspansiyona daldırılır ve serbestçe yüzmeye bırakılır. Kronometreye bakılarak 0,5, 1, 2 ve 4'üncü dakikalarda hidrometre okumaları alınır. Bundan sonra hidrometre, yavaşça süspansiyondan çıkarılır, damıtık suyla yıkanır ve zemin süspansiyonu ile aynı sıcaklıkta tutulan damıtık su dolu diğer bir mezür içinde bekletilir. Kronometre 8. dakikaya yaklaşırken (yaklaşık olarak 15 saniye kala) hidrometre yeniden süspansiyona daldırılır ve hidrometre okuması alınıp kaydedilir. Okuma alındıktan sonra hidrometre çıkarılır, yıkanır ve damıtık su içine konur. Aynı biçimde, 15, 30, 60, 120, 480 dakikalarda hidrometre okumaları alınır. Bundan sonra, iki gün süreyle günde 1 veya 2 kez okuma alınır ve bu okumalara karşılık olan çökme süreleri tam olarak kaydedilir. Hidrometrenin her okumadan önce süspansiyona daldırılması ve okumadan sonra da çıkarılması sırasında süspansiyonun çalkalatmamasına özen gösterilmelidir. Hidrometrenin süspansiyona daldırılması ve süspansiyondan alınması işlemlerinin her biri, 10 saniyelik bir süre içinde yapılmalıdır. Süspansiyonun titreşim etkisine uğraması önlenmelidir.



Şekil 6.3 : Hidrometre Analizi

Dane birim hacim ağırlıklarını belirlemek için piknometre deneyi yapılmıştır. Bu deneyde hacim şişesi, sıcaklığı $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ olan etüvde kurutulur ardından soğumaya bırakılır ve 0,001 g doğrulukla tartılır. Örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması metoduna uygun olarak elde edilmiş malzemeden en az 400 g alınır ve gerekirse 4,75 mm'lik elekten geçecek biçimde öğütülür. Bu malzeme yaklaşık 250 g numune elde edilene kadar çeyrekleme metoduyla küçültülür. Elde edilen numune, sıcaklığı $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ olan bir etüvde kurutulur. En az 10 g kütlesindeki zemin numunesi bağıl yoğunluk şişesine aktarılır. Şişe, içerisindeki zemin ve kapağı ile birlikte 0,001 g doğrulukla tartılır Hacim şişesi içindeki numuneyi ancak örtecek miktarda, havası alınmış damıtık su eklenir, bazı zeminler (numunenin, suda eriyebilen tuzlar içeren zeminler) için su yerine gazyağı veya alkol kullanılabilir. Hacim şişesi, içerisindeki zemin numunesi ve suyla, (üzerinde kapağı bulunmaksızın), vakum desikatörüne konur ve emme uygulanarak yavaşça 760 mm eşdeğer cıva basıncına düşürülür. Bu işlem sırasında, zemin içindeki hava kabarcıklarının şiddetli köpürmeye yol açmamasına özen gösterilmelidir. Bu yapılmazsa, karışımdan sıçrayan ufak damlacıklar hacim şişesinin ağzından çevreye saçılarak malzeme kaybına yol açar. Hacim şişesi, numuneden hava çıkışı durana kadar desikatörde bekletilir. Vakum kaldırılır ve desikatörün kapağı açılır. Hacim şişesinin içindeki numune, cam çubuk ile özenle karıştırılır veya hacim şişesi çalkalanır. Spatülün hacim şişesinden çıkarılmasından önce, üzerine yapışmış olan zemin danecikleri, birkaç damla havası alınmış damıtık suyla yıkanır. Desikatörün kapağı kapatılır ve yeniden vakum

uygulanır. Numune, hava kabarcıklarından arındırılana kadar işlem yenilenir. Hacim şişesi, desikatörden çıkarılır ve havası alınmış damıtık su ya da deney sıvısı eklenerek işaret çizgisine kadar doldurulur. Kapağı kapatıldıktan sonra, boyun seviyesine kadar su banyosu içine batırılır ve yaklaşık olarak 1 saat süreyle banyonun sıcaklığına (20 ± 1) °C erişene kadar bekletilir. Hacim şişesi içerisindeki sıvıda gözle görülür bir azalma olursa, kapak çıkarılır ve hacim şişesi işaret çizgisine kadar doldurup kılcal borusundan taşacak kadar havası alınmış damıtık su ya da sıvı eklendikten sonra kapak yeniden kapatılır. Hacim şişesi banyo içerisine konur ve banyonun sıcaklığına yeniden erişene kadar bekletilir. Hacim şişesinin içindeki suda yine azalma oluyorsa, hacim şişesinin işaret çizgisine kadar dolması sağlanana kadar bu işlem tekrarlanır. Kapağı kapalı durumdaki hacim şişesi banyodan çıkartılır ve dış yüzeyi iyice kurulandıktan sonra 0,01 g doğrulukla tartılır .

Yukarıdaki işlemler, aynı zeminden alınan ikinci numune üzerinde tekrarlanır ve böylece iki bağıl yoğunluk değeri elde edilmiş olur. Zeminlerin pek çoğu, aynı büyüklükteki ortalama zemin danesinden daha ağır veya daha hafif daneler içerir. Böyle danelerin çok olduğu zeminlerde, özenle yapılan bağıl yoğunluk deneyleri farklı sonuç verir. Bu gibi durumlarda, iyi bir ortalama değer elde etmek için deneyin bir çok defa tekrarı gerekebilir.

Bunlara ilave olarak yapılan Metilen Mavisi deneyi (ASTM C 837) döküm kumlarındaki bentonit oranını belirlemek için kullanılmıştır. Döküm endüstrisi, kil yüzdesini bulmak için bu metoda güvenmektedir. Bu deney esas olarak katyon değiştirme kapasitesine dayanmaktadır. Killerin fiziksel özelliklerinin, genellikle değişebilen katyonlara bağlı olması nedeniyle kullanım alanları açısından killerin katyon değişim özelliği büyük önem taşımaktadır. Bu test için katı oranı %6 olacak şekilde 1,57 gram 100 mikron altı bentonit numunesiyle, 25 ml saf su yaklaşık 10 dakika karıştırılır. Hazırlanan karışımdan bir şırınga yardımıyla 3ml çekilir ve önceden içerisine 15 ml %3'lük H_2O_2 , 0,5 ml 5 normal H_2SO_4 ve 10 ml saf su eklenmiş erlenmayer içine boşaltılır. Erlenmayer içindeki karışım, yaklaşık 10 dakika ısıtıcılı manyetik karıştırıcı üzerinde sıcaklık çok yüksek olmayacak şekilde ve yavaş devirde karıştırılıp kaynatılır. Kaynadıktan sonra erlenmayer karıştırıcı üzerinden alınır. Karışma hacmi 50 ml oluncaya kadar saf su ilave edilir ve oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulur. Soğumuş karışımın üzerine önceden hazırlanmış metilen mavisi(3,20 gr metilen mavisi ve 1000 ml saf su) karışımından dijital mezur

yardımıyla 1ml eklenir ve karıştırıcı üzerinde 1 dakika karıştırılır. Daha sonra karışımdan cam çubuk yardımıyla 1 damla alınıp Filtre kağıdının üzerine damlatılır. Damla etrafında mavi bir hale oluşmamışsa işlem tekrarlanır. Mavi hale oluştuktan sonra harcanan metilen mavisi miktarı bulunup katyon değişim kapasitesi hesabı aşağıdaki gibi yapılır.

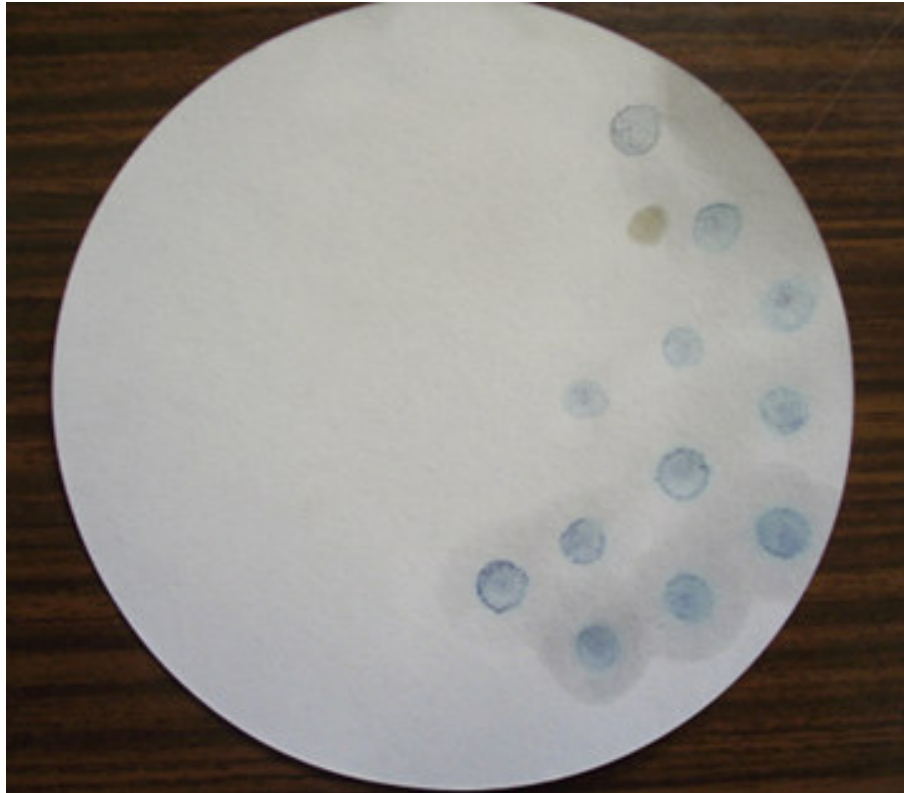
3 ml'lik numunenin alındığı karışımda 25 ml su ve 1,57gr bentonit kullanılmıştır ve bentonitin hacmi yaklaşık yoğunluğu olan $2,4 \text{ gr/cm}^3$ 'e bölünerek 0,654 ml bulunur. Toplam hacim 25,654 ml olur ve bu miktarda 1,57 gr bentonit varsa 3 ml'de 0,1836 gr bentonit olduğu hesaplanır. Deneyde harcanan metilen mavisi miktarı da 100'e bölünerek eşit olduğu meq Na değeri hesaplanır. Bulunan bu meq Na değeri 0,1836 gr bentonit için olduğundan 100 gr bentonit için olan değeri hesaplamak gerekir. Bu da hesaplanan meq Na değerinin 100 ile çarpılıp 0,1836'ya bölünmesiyle bulunur ve bulunan değer numunenin katyon değiştirme kapasitesidir. Şekil 6.4 ve 6.5'da bu deneyin numunesinin hazırlanması, Şekil 6.6 ve 6.7'de ise filtre kağıdı üzerindeki mavi halenin tespit edilmesi görülmektedir.



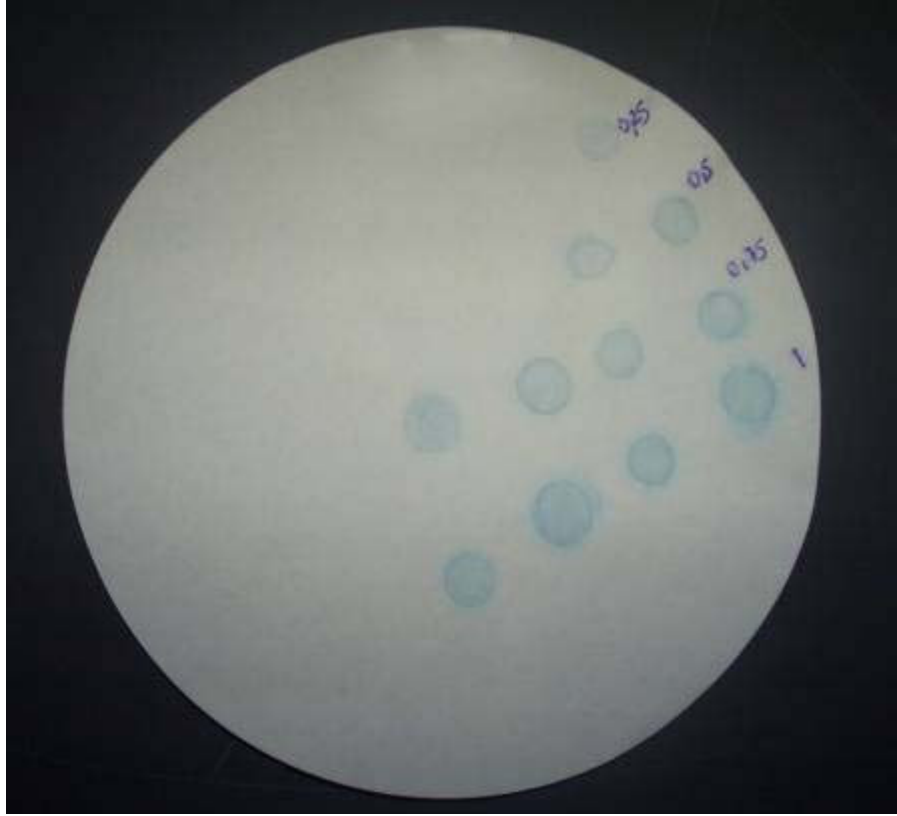
Şekil 6.4 : Manyetik Karıştırıcıda Metilen Mavisi Deneyi Numunesinin Hazırlanması-1



Şekil 6.5 : Manyetik Karıştırıcıda Metilen Mavisi Deneyi Numunesinin Hazırlanması-2



Şekil 6.6 : Filtre Kağıdında Mavi Halelerin Gözlenmesi-1



Şekil 6.7 : Filtre Kağıdında Mavi Halelerin Gözlenmesi-2

6.2.3. Kızdırma Kaybı

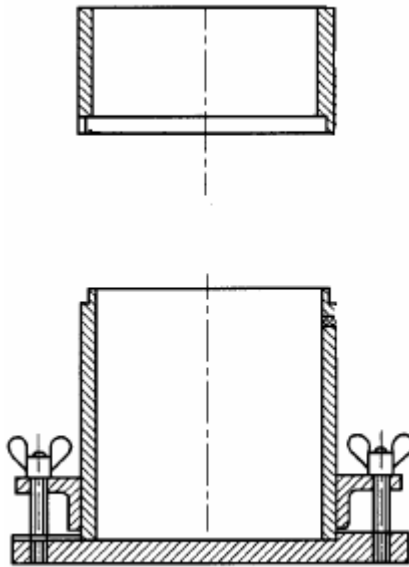
TS 3245'e göre bu deneyin yapılışı aşağıdaki gibi açıklanmıştır. Analiz numunesinden alınan belirli tartımdaki deney numunesi, darası alınmış bir krozede $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ değişmez ağırlığa ulaşınca kadar kızdırılır. Kroze ve içersindekiler soğutulur, tartılır ve tartımlar arasındaki farktan deney numunesinin kızdırma kaybı miktarı tayin edilir.

Kızdırma Kaybı sonucu uçan kısım numune içersindeki organikleri kalan kısım(kül miktarı) ise diğer bileşenleri göstermektedir. Bu çalışmada ise numunelere kızdırma kaybı deneyi yaparak kömür yüzdesini tayin etmeye çalışılmıştır. Deneyin yapıldığı fırın ise Şekil 6.8'de görünmektedir.



Şekil 6.8 : Kızdırma Kaybı Deneyinin Yapıldığı Fırın

6.2.4. Kompaksiyon Deneyleri



Şekil 6.9 : Kompaksiyon Deney Kalıbı

Döküm kumu numuneleri standart, modifiye ve hafifletilmiş Proctor deneylerine tabi tutulmuşlardır. standart, modifiye Proctor deneyleri için sırasıyla ASTM D 698,

ASTM D 1557 standartları kullanılmıştır. Hafifletilmiş deney ise standart Proctor ile aynı özelliklere sahiptir fakat 25 vuruş yerine 15 vuruş yapılmıştır (**Daniel ve Benson, 1990, Abichou ve diğ.,2000**).

Deney, belirli bir metotla sıkıştırılmış bir zeminde, en büyük kuru birim hacim ağırlığı veren su muhtevasının bulunması ile ilgilidir. Standart deneyde 305 mm'den serbestçe düşen 2,5 kg'lık tokmağın sağladığı mekanik iş kullanılmaktadır.

Döküm kumları gönderildiklerinde su muhtevaları çok düşük değerlerdeydi.(%2-%4 mertebelerinde) Hidratasyona gerek olabileceği düşünülerek 2 örnekte 1 haftalık hidrasyon süresi gözetilerek ve hidrasyonsuz kompaksiyon deneyleri yapıldı. Bu kontrollü deneyler sonucunda optimum su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları arasında belirgin bir fark görülmedi. Bu nedenle diğer numunelerin deneyleri 1 günlük hidrasyon süresi gözetilerek yapılmıştır. Ayrıca kompaksiyon deneyi öncesinde atık kum içindeki iri metal parçalar temizlenmiştir. Şekil 6.9'de kompaksiyon kalıbı görülmektedir.

6.2.5. Permeabilite Deneyleri

Kompaksiyon deneyleri sonucu optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlenen bu numunelerin düşen seviyeli permeabilite ölçüm prosedürü (**Head, 1982**) ile hidrolik iletkenlikleri ölçülmüştür. Numunelerden geçen sıvı musluk suyudur.

Bentonit numunelerine tek başına kullanılmayacakları düşünülerek kompaksiyon ve hidrolik iletkenlik deneyleri yapılmamıştır. Fakat bunlar dışındaki deneyler yapılmış, indeks özellikleri belirlenmiştir. Hidrolik geçirgenlik deneyleri yapılırken numunenin doyumluğa ulaşması için 3 ila 4 günlük bir süre numuneden su geçirilerek beklenmiş ve ölçümler stabil olduktan sonra deneye başlanmıştır. Şekil 6.10 ve 6.11'da permeametre ve deney görülmektedir.



Şekil 6.10 : Permeametre

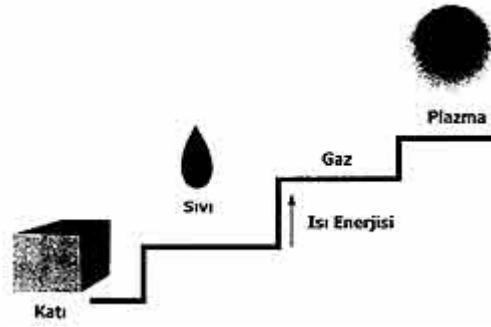


Şekil 6.11 : Hidrolik Geçirgenlik Deneyi

6.2.6. ICP İncelemeleri

Numunelerden herhangi bir şekilde süzülen suyun içinde ağır metal bulunup bulunmadığının tespiti için İndüktif Eşleşmiş Plazma ve Atomik Absorbsiyon Spektrometre aletleri kullanılmıştır. Kullanılmış olan ICP cihazı Perkin Elmer markalı Optima 2100 DV, Absorbsiyon Spektrometre cihazı ise Unicon markalı 929

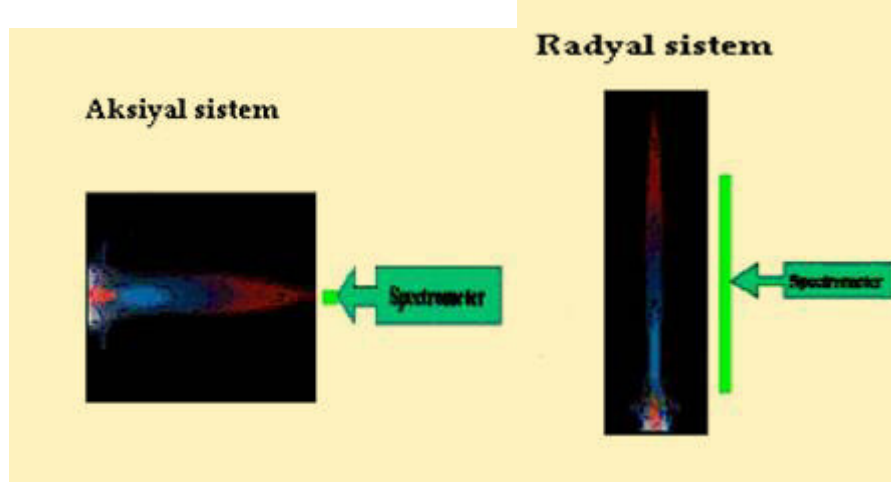
A.A. Spectrum'dır. ICP'de kullanılan örnekler permeabilite sonucu numuneden geçen sudan hazırlanmıştır. Bu su filtre kağıdından süzölmüş ve deneyde bu şekilde kullanılmıştır. Deney sisteminin çalışma prensibinden bahsederek; indüktif eşleşmiş plazma (ICP) kaynağı iç içe geçmiş üç kuvars borudan (torch) yapılmıştır. Bunların arasından dakikada 10-17 mL argon gazı geçer. En geniş borunun çapı 2.5 cm dir. Bu borunun üst kısmında suyla soğutulan radyo indüksiyon bobini bulunur. Radyo indüksiyon jenaratörünün gücü 27 veya 41 Mhz de 0.5-2 kw tır. Akan argonun iyonlaşması bir Tesla bobininden kıvılcım ile başlatılır. Oluşan iyon ve elektronlar indüksiyon bobini tarafından oluşturulan manyetik alan salınımları ile etkileşir. Bu etkileşim sonucunda iyonlar ve elektronlar aynı yöne doğru akmaya başlar. Ortamın bu akmaya karşı gösterdiği direnç ile ortamın sıcaklığı 10000 K e kadar yükselir ve plazma oluşur. Plazma fazına geçiş Şekil 6.12'de görölmektedir.



Şekil 6.12 : Plazma Fazı (Kaluç ve Taban, 2004)

En içteki kuvarz borudan geçen argon gazı akışıyla plazma içerisinde numune taşınır. Numune atomları taşıyıcı argon gazı sayesinde 4000-8000 K sıcaklığındaki bölgeye ulaşır. Burada 2 ms kalırlar. Bu sıcaklıkta atomlaşma olur. Sıcaklığın bu kadar yüksek olması sonucunda diğer yöntemlerde karşılaşılan kimyasal girişim sorunu ile daha az karşılaşırken iyonlaşma girişimi yok denecek kadar az olur.

ICP teknolojisinin ilk yıllarında emisyonların plazmanın yan tarafında gözlemlendiği radyal tekniği kullanılmakta olup daha sonraları, plazmanın torch eksenine doğrultusunda izlenebildiği aksiyal sistemler geliştirildi. Bu sistemler Şekil 6.13'de görölmektedir.

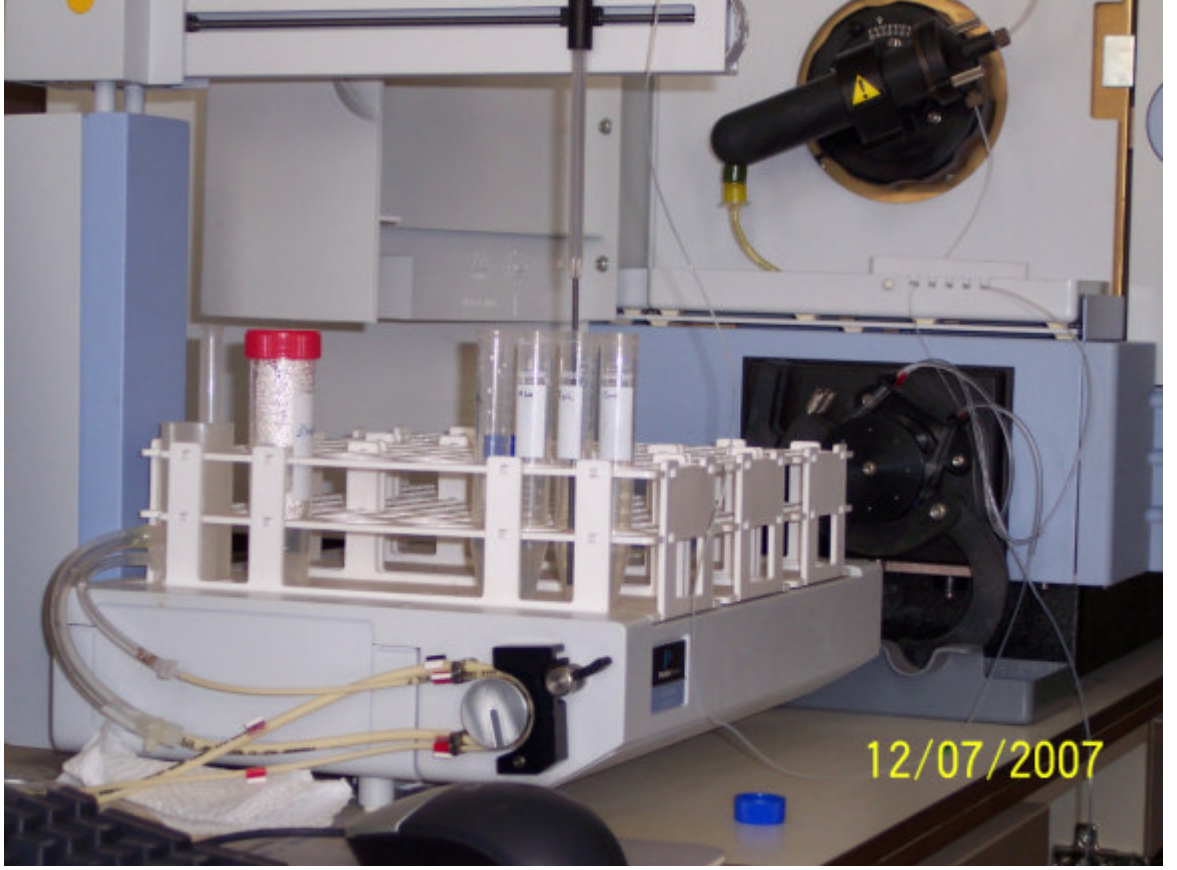


Şekil 6.13 : Aksiyal Sistem ve Radyal Sistem (Kaluç ve Taban, 2004)

Farklı elementlerin sıcak bölgede farklı yüksekliklerde emisyon vermesi nedeniyle radyal plazma tekniğinde gözlem yüksekliği çok önemlidir. Aksiyal sistemlerde ise plazma eksenine boyunca daha yoğun olarak gelen emisyonlar kullanılmakta bu duyarlılığın artmasını fakat çalışabilir üst sınırı düşmesini sağlamaktadır. Bu nedenle düşük konsantrasyonlu ölçümlerde aksiyal sistem tercih edilmelidir.



Şekil 6.14 : ICP Cihazı



Şekil 6.15 : ICP Numune Alıcı

6.2.7. Atomik Absorbsiyon Spektrometrisi

Atomik absorpsiyon cihazı su ve atıklarda element tayinin de kullanılabilir. Numunenin alev ile yakılması neticesinde açığa çıkan ışığın ölçülmesi esasına dayanır. Her bir elementin kendine has ışık spektrosu vardır. Bu spektroda ışık yayan element bilindiğinde numunenin içerisindeki elementlerin cinsi ve miktarı bulunabilmektedir.

Cihazın her element için bir ölçüm hassasiyeti vardır. Örnek olarak bakır okunacak numunede bakırın 0,01 ila 5 mg/L aralığında olması gerekmektedir.

Ölçüm esnasında dikkat edilmesi gereken hususlar ise deneylerde ve çözeltilerin hazırlanmasında damıtık su veya buna eşdeğer saflıkta su kullanılmalıdır. Kullanılan reaktifler saf olmalıdır. Tayinler en az iki numune ile paralel yapılmalıdır. Deneysel hata sınırları içerisinde birbirine uyumlu sonuçlar veren en az iki paralel tayinin aritmetik ortalaması sonuç olarak kabul edilmelidir.

Deney düzeneginde kullanılan araç ve gereçler ise 324,7nm dalga boyunda optik yoğunluk ۆlümü yapabilecek nitelikte atomik absorpsiyon spektrometresi, tek veya çok elementli oyuk katot lambası veya elektrotsuz değarj lambası, asetilendir.



Şekil 6.16 : AAS Cihazı



Şekil 6.17 : AAS Katot Lambası

6.3. Deney Sonuçları ve Analizler

6.3.1. İndeks Deneyleri

İstanbul civarında faaliyet gösteren döküm sanayi kuruluşlarından temin edilen 15 numune üzerinde geoteknik laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu numunelerden sadece bir tanesinde bağlayıcı madde reçine diğerlerinde bentonittir. Bu çalışmada gerçekleştirilen indeks özellikleri deneyleri, likit ve plastik limit deneyleri, dane birim hacim ağırlığın belirlenmesi, dane boyutu dağılımı, bentonit yüzdelерinin tespiti ve kızdırma kaybı deneylerini içermektedir. İndeks deney sonuçları Tablo 6.2. de özetlenmiş halde görülebilir.

Tablo 6.2 : Atık Döküm Kumlarının İndeks Özellikleri

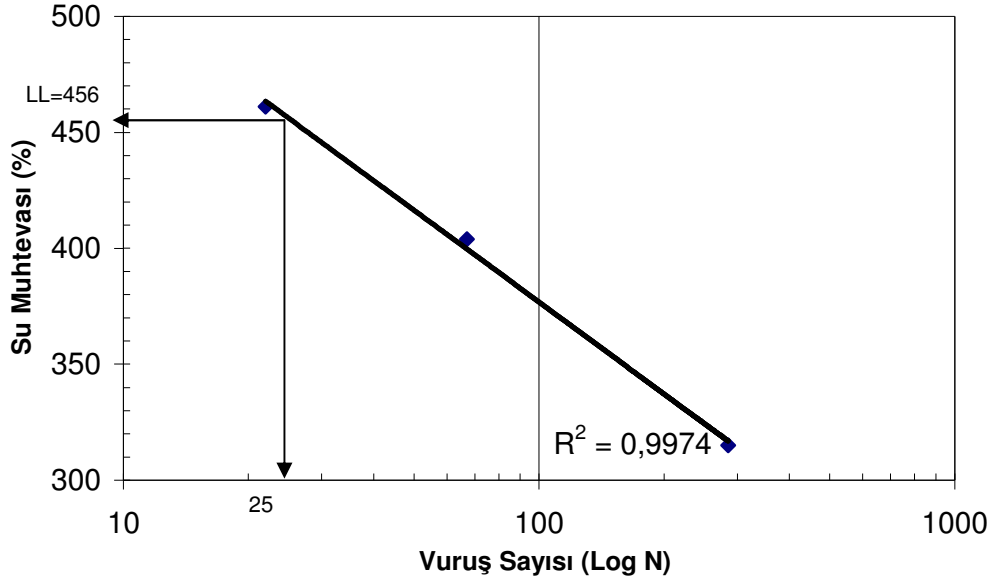
Numune No	Dane Birim Hacim Ağırlığı (gr/cm ³)	Plastisite İndisi	ASTM Sınıflandırması	Bağlayıcı	İnce Dane Yüzdesi (%)	Bentonit Yüzdesi (%)
1	2,53	NP	SM	Bentonit	28.3	6,79
2	2,46	NP	SM	Bentonit	13.6	4,08
3	2,48	NP	SM	Bentonit	19.4	4,08
4	2,48	NP	SM	Bentonit	16.7	2,72
5	2,45	NP	SM	Bentonit	16	6,9
6	2,45	NP	SM	Bentonit	16	12,5
7	2,56	NP	SM	Bentonit	12.8	5,43
8	2,53	NP	SM	Bentonit	13.5	6,11
9	2,58	NP	SM	Bentonit	12.1	4,07
10	2,61	NP	SP	Reçine	2.2	-
11	2,45	NP	SM	Bentonit	22.9	8,15
12	2,59	NP	SM	Bentonit	15.8	5,43
13	2,59	NP	SM-SC	Bentonit	6	2,71
14	2,6	NP	SM	Bentonit	17.2	6,8
15	2,49	NP	SM	Bentonit	19.2	11,2

Tablo 6.3 : Bentonitlerin İndeks Özellikleri

Bentonitlerin Zemin Özellikleri ve Mineralojisi	1	2	3	4
Özgül ağırlık	2,6	2,55	2,55	2,42
ASTM Sınıflandırması	CH	CH	CH	CH
Atterberg limitleri (%)				
Likit limit (LL)	456	155	167	225
Plastik limit (PL)	37	34	33	32
Plastisite İndeksi (PI)	419	121	134	193
Şişme İndeksi (mL/2g)	20,5	15,5	14,5	16,8
Katyon değişim kapasitesi, (KDK), (meq/ 100g)	86,96	70,65	70,65	77,6

Tüm döküm kumu numunelerine likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmaya çalışılmış ancak plastik limit hiçbir numunede tespit edilememiş, likit limit ise bentonit yüzdesi daha fazla olan iki numunede tespit edilmiştir. Likit limitin tespit edilebildiği bu iki numunede değerler 21 ve 24 çıkmıştır. ASTM D 4318-05'in 19.1.4 numaralı maddesinde belirtildiği üzere plastik limit veya likit limit deneylerinden biri yapılamazsa, plastik limite eşit ya da büyük oluyorsa bu tür zeminler nonplastik olarak isimlendirilebilir. Bu durumda numunelerin tamamı nonplastik olarak isimlendirilmiştir. Bunun sebebi bentonit yüzdesinin azlığı ve kullanılan bentonitin kaliteli bentonit olmayışı olarak görünmektedir. Bentonit yüzdesi numunelerde %3 ile %12,5 arasında değişen değerlerdedir. Dökümcülerin kullandığı bentonit yüzdesinin döküm tipine göre değiştiği bilinmektedir.

Tablo 6.3’de ise bentonitlerin indeks özellikleri görülmekte olup likit limit değerleri 155 ila 456 arasında, plastisite indeksi ise 121 ila 419 arasında değişmektedir. Şekil 6.18’de 1 numaralı bentonit numunesinin likit limit deneyine ait su muhtevası vuruş sayısı grafiği görülmektedir.



Şekil 6.18 : 1 Numaralı Bentonit Numunesinin Su Muhtevası-Vuruş Sayısı Grafiği

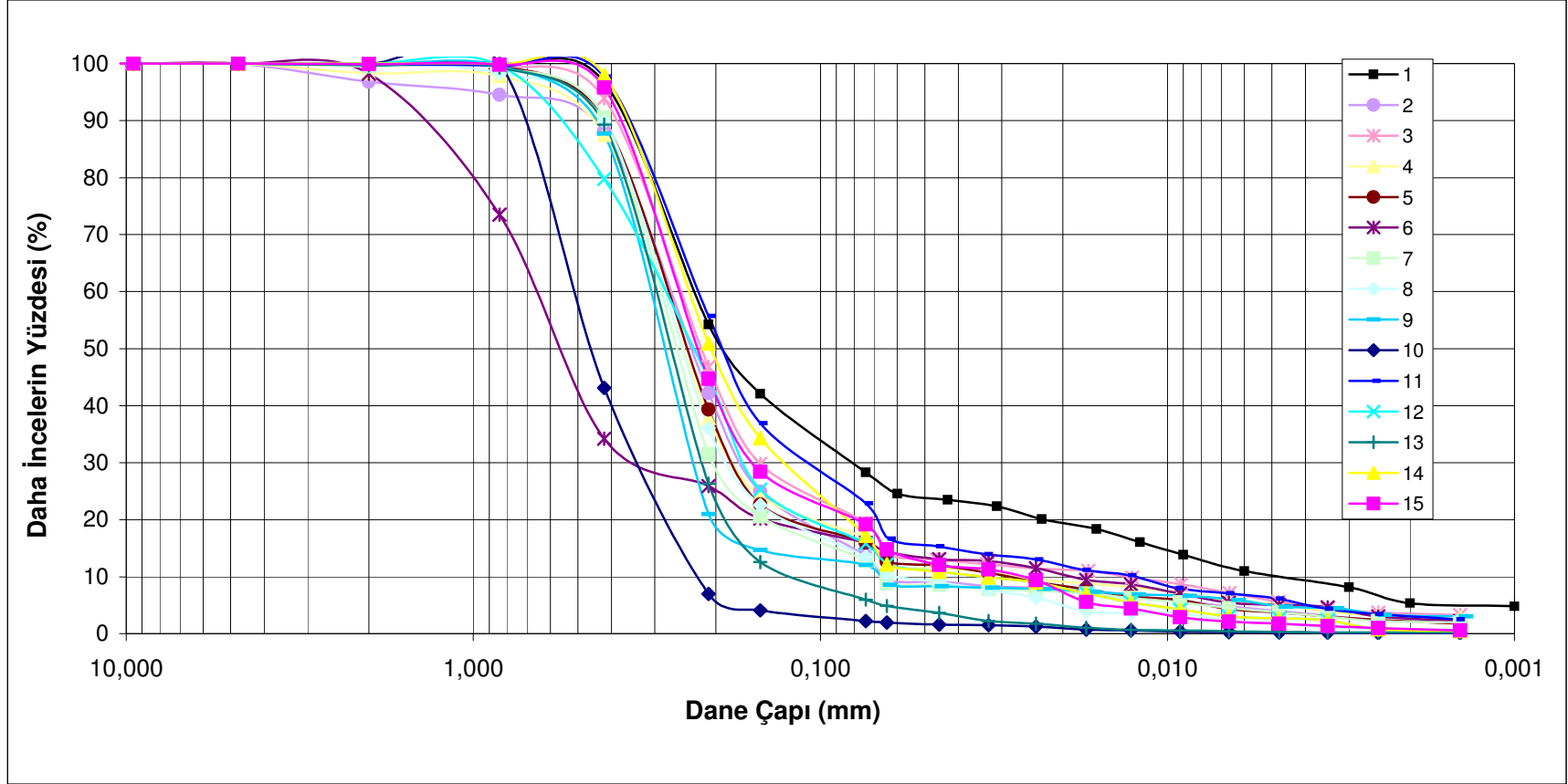
Tüm numunelerin dane birim hacim ağırlıklarını belirlemek için piknometre deneyi yapılmıştır. Döküm kumlarında değerler 2,45 ve 2,61, bentonitlerde ise 2.42 ile 2.6 arasında değişiklik göstermektedir. Özgül ağırlığı etkileyen faktörler numunenin alındığı kaynak ve döküm işlemi gereği eklenenlerin miktarı olarak açıklanabilir.

Dane boyutu dağılımını belirlemek için yapılan elek analizi ve hidrometre deneyleri ise ASTM D 422 standardına göre yapılmıştır. Tüm atık döküm kumlarının granülometri eğrileri Şekil 6.19’de gösterilmiştir. Eğrilerden de görüldüğü üzere dane boyutu dağılımları genelde benzer özellik göstermekte ve ince danelerin yüzdesi (200 nolu elekten geçen) %6 ile %28,3 arasında değişmektedir. Reçineli (bentonit kullanılmayan) numunede ise ince dane yüzdesi beklendiği gibi diğerlerinden düşük çıkmıştır.(%2,2)

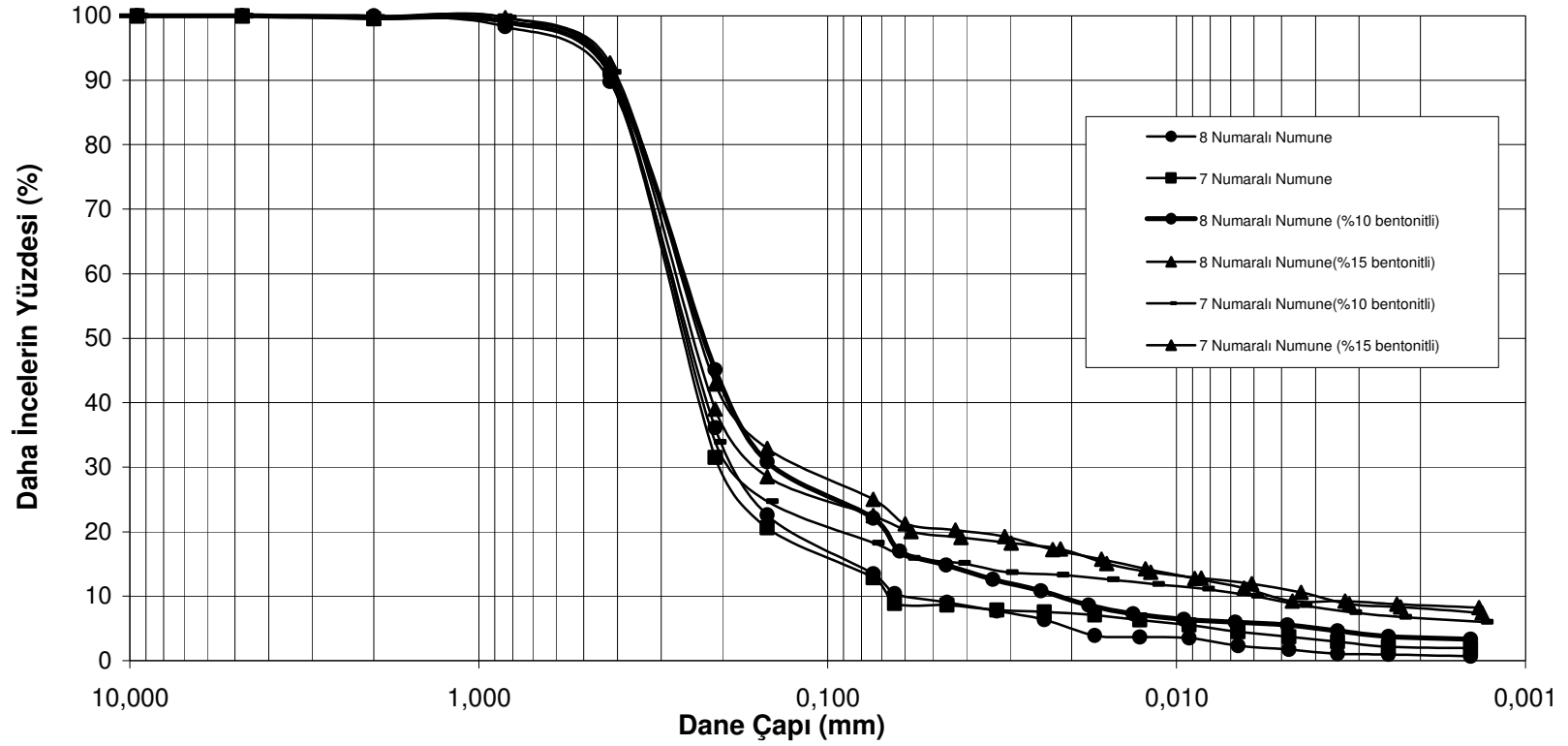
Bentonit içeren döküm kumları Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılmasına göre SM veya SM-SC sınıfına girmektedir. Reçineli döküm kumunun sınıfı ise SP olarak belirlenmiştir. Bentonitler ise CH sınıfına girmektedir.

Bentonitli atık döküm kumu numunelerinde ASTM C 837'ye göre belirlenen bentonit oranları ise %2.7 ile %12.5 arasında değişmektedir.

Ayrıca Şekil 6.20'de ise 7 ve 8 numaralı döküm kumlarının bentonit yüzdesi artımına karşı granülometri eğrilerinin değişimi gösterilmiştir.



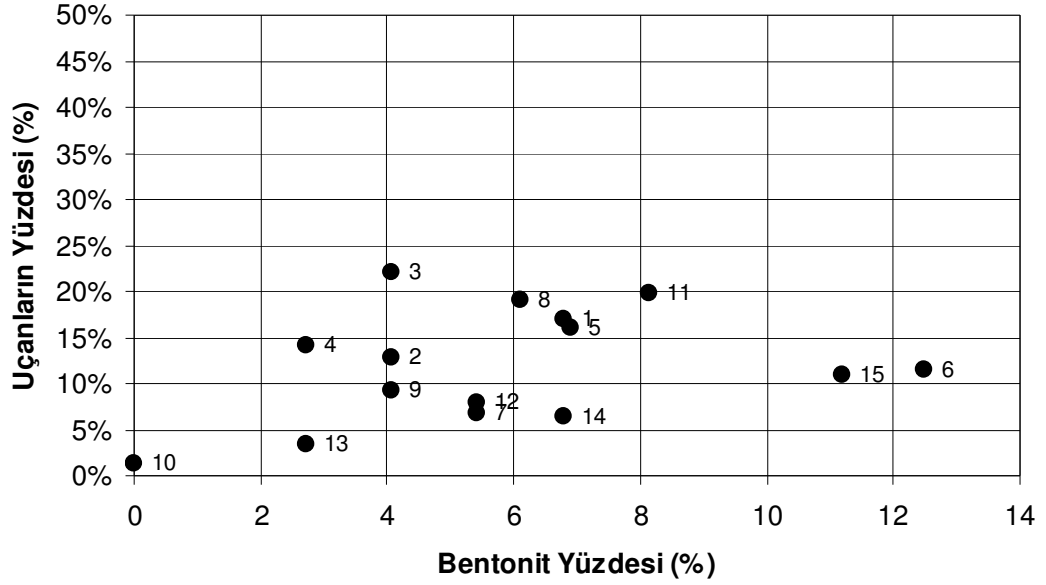
Şekil 6.19 : Granülometre Eğrileri



Şekil 6.20 : 7 ve 8 Numaralı Numunenin Artan Bentonit Yüzdesine Karşı Değişen Dane Boyutu Dağılımı

6.3.2. Kızdırma Kaybı

TS 3245'e göre yapılan kızdırma kaybı tayini ile numunelerin ne kadar organik madde(kömür) içerdiği tespit edilmiştir. Buna göre kül yüzdesi %77 ila %96 arasında ve organik madde miktarı %4 ile %23 arasında değişmektedir.



Şekil 6.21 : Bentonit Yüzdesine karşı Organik Madde Yüzdesinin Değişimi

6.3.3. Kompaksiyon Deneyleri

Kompaksiyon deneyinden önce döküm kumunun içindeki metal parçalar el ile toplanmıştır. Döküm kumlarının standart Proctor deneyleri ASTM D 698'e göre yapılmıştır. Elde edilen tüm standart kompaksiyon eğrileri Şekil 6.23'de görülmektedir. Şekil 6.25'deki kompaksiyon eğrilerine göre incelenen numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlıkları 1,44 ile 1,86 gr/cm³ arasında değişirken optimum su muhtevaları ise %12-%23 arasında değişmektedir.

Sıkıştırma enerjisinin etkisini incelemek amacıyla iki numunede modifiye Proctor ve hafifletilmiş Proctor deneyi uygulanmıştır. Modifiye Proctor deneyleri ASTM D 1557'ye göre yapılmıştır. Hafifletilmiş Proctor ise standart Proctor'da 25 olan düşüş sayısının 15 olmasıdır (Daniel ve Benson, 1990, Abichou ve diğ., 2000). Bu numuneler için hafifletilmiş, standart ve modifiye Proctor deney sonuçları, düşen seviyeli permeametre sisteminde ölçülmüş hidrolik iletkenlik değerleri ile birlikte sırasıyla Tablo 6.4, Tablo 6.5 ve Tablo 6.6'de verilmiştir. Bu tablolara göre sıkıştırma enerjisi arttırıldığında daha yüksek kuru birim hacim ağırlık değerleri daha

düşük su muhtevalarında sağlanmakta, diğer bir deyişle daha iyi bir sıkışma elde edilmektedir. Ayrıca, daha iyi sıkışmış malzemenin hidrolik iletkenlik üzerindeki etkisi oldukça küçüktür. Benzer çalışmalarda da belirtildiği gibi döküm kumlarından geçirimsiz tabaka yapılırken sıkışma enerjisi ve ayrıca sıkışma su muhtevasının hidrolik iletkenlik üzerindeki etkisi sınırlıdır (Abichou ve diğ., 2000, Solmaz ve diğ., 2007).

Tablo 6.4 : Hafifletilmiş Proctor Deney Sonuçları

Numune No	Bentonit Yüzdesi (%)	Hafifletilmiş Proctor Kompaksiyon Deneyleri		
		Optimum Su Muhtevası (%)	Kuru Birim Hacim Ağırlığı (g/cm ³)	Hidrolik İletkenlik (m/s)
7	5,43	17	1,66	1,63E-06
8	6,11	21	1,49	1,48E-05

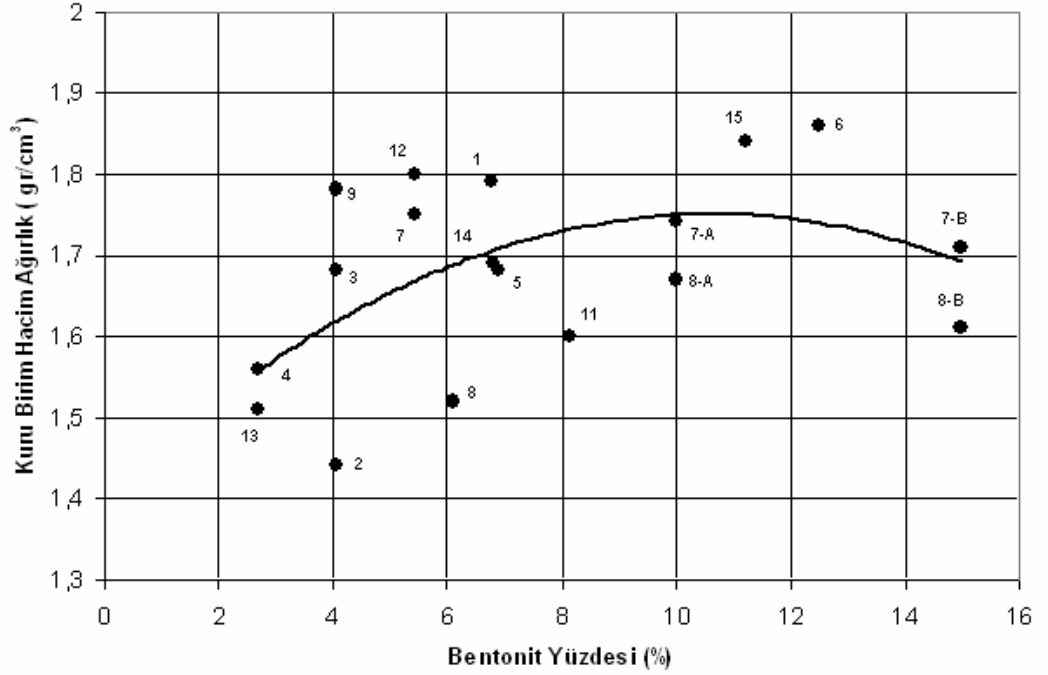
Tablo 6.5 : Standart Proctor Deney Sonuçları

Numune No	Bentonit Yüzdesi (%)	Standart Proctor Kompaksiyon Deneyleri		
		Optimum Su Muhtevası (%)	Kuru Birim Hacim Ağırlığı (g/cm ³)	Hidrolik İletkenlik (m/s)
7	5,43	15	1,75	1,44E-06
8	6,11	22	1,52	1,20E-05

Tablo 6.6 : Modifiye (Ağırlaştırılmış) Proctor Deney Sonuçları

Numune No	Bentonit Yüzdesi (%)	Ağırlaştırılmış Proctor Kompaksiyon Deneyleri		
		Optimum Su Muhtevası (%)	Kuru Birim Hacim Ağırlığı (gr/cm ³)	Hidrolik İletkenlik (m/s)
7	5,43	15	1,77	1,23E-06
8	6,11	17	1,66	5,43E-06

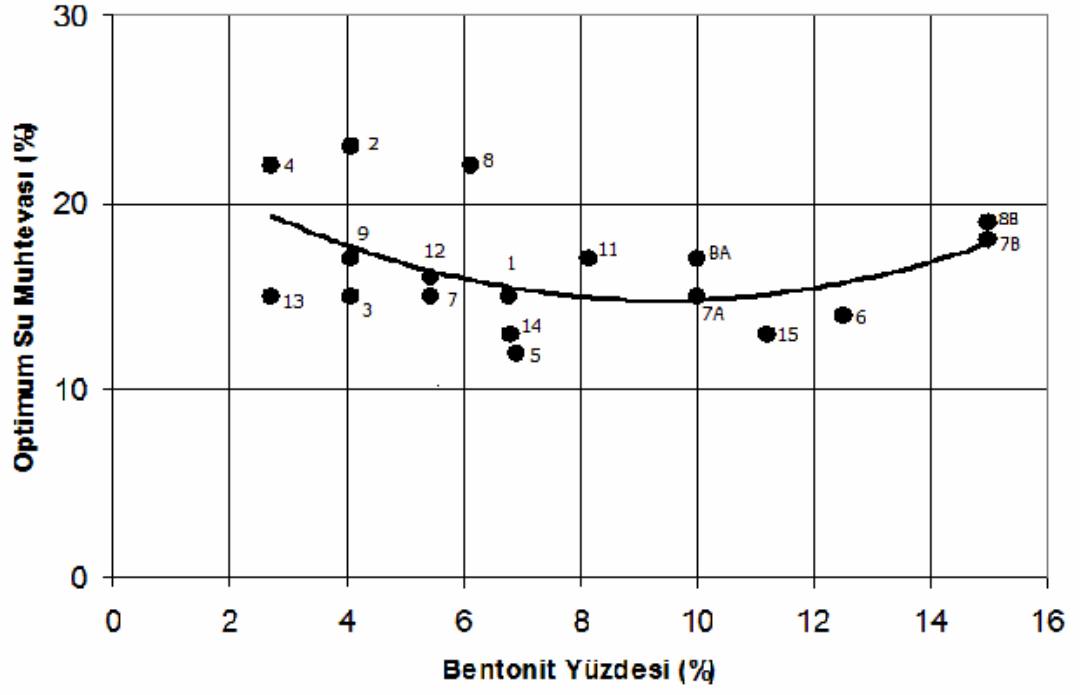
Şekil 6.22’de maksimum kuru birim hacim ağırlığı bentonit yüzdesi grafiği görülmektedir. Literatürdeki benzer çalışmalarda da görüldüğü üzere bentonit oranı belli bir yüzdeye gelene kadar maksimum kuru birim hacim ağırlığı artış eğiliminde iken bir değerden sonra azalma eğilimi göstermektedir (Kenney ve diğ., 1992, Abichou ve diğ.,2000). Bu çalışmada eğrinin trendini değiştiren bu değer %10’ dur.



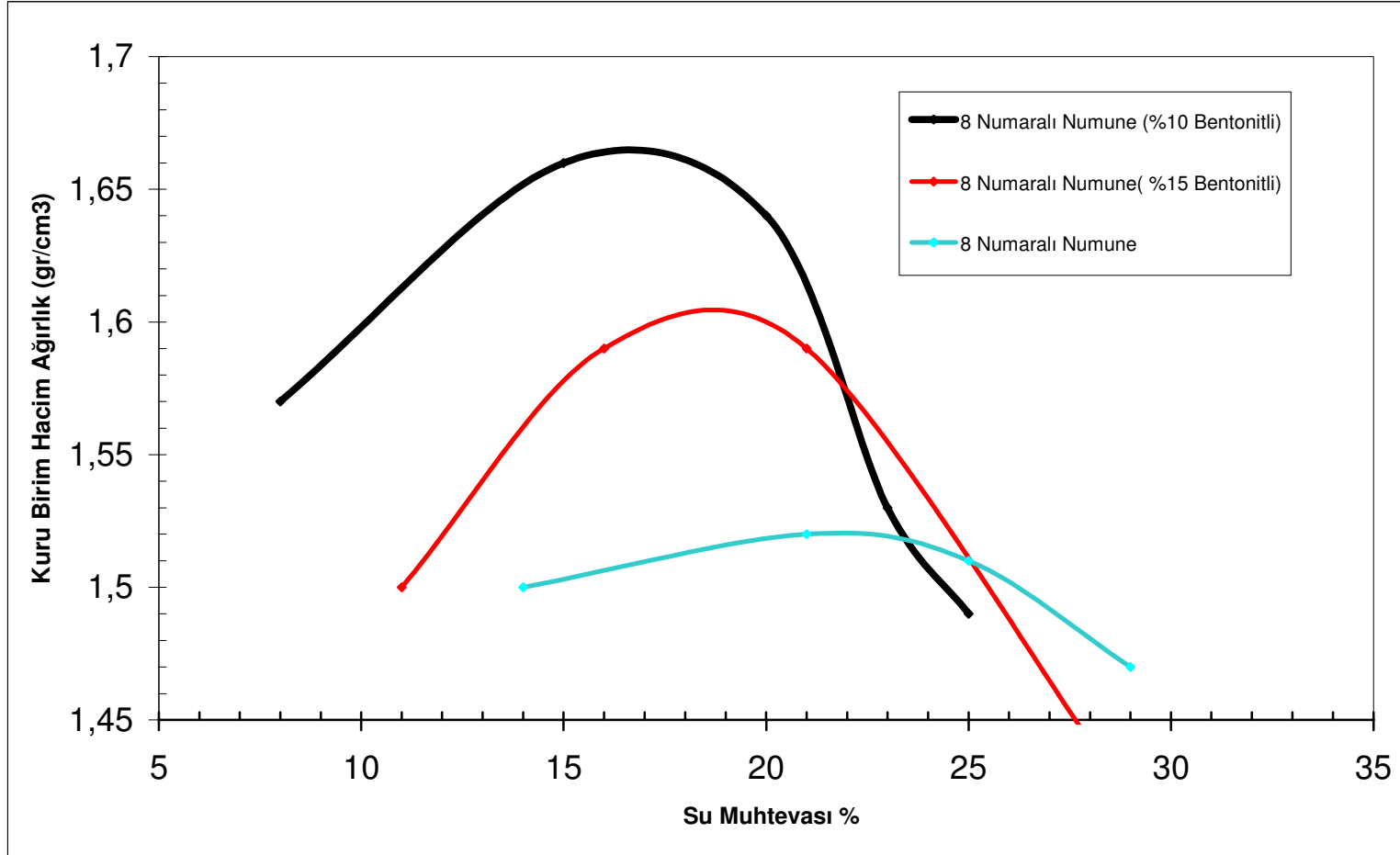
Şekil 6.22 : Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı Bentonit Yüzdesi Grafiği

Optimum su muhtevası bentonit yüzdesi grafiği ise Şekil 6.22’de verilmiştir. Kuru birim hacim ağırlığı grafiğinde olduğu gibi %10’luk bentonit yüzdesi değeri burada da eğrinin yönünü değiştirmektedir. Optimum su muhtevası bentonit oranının %10 olduğu değerlere kadar azalma, bentonit oranının %10’u aşması halinde ise artma eğilimi göstermektedir.

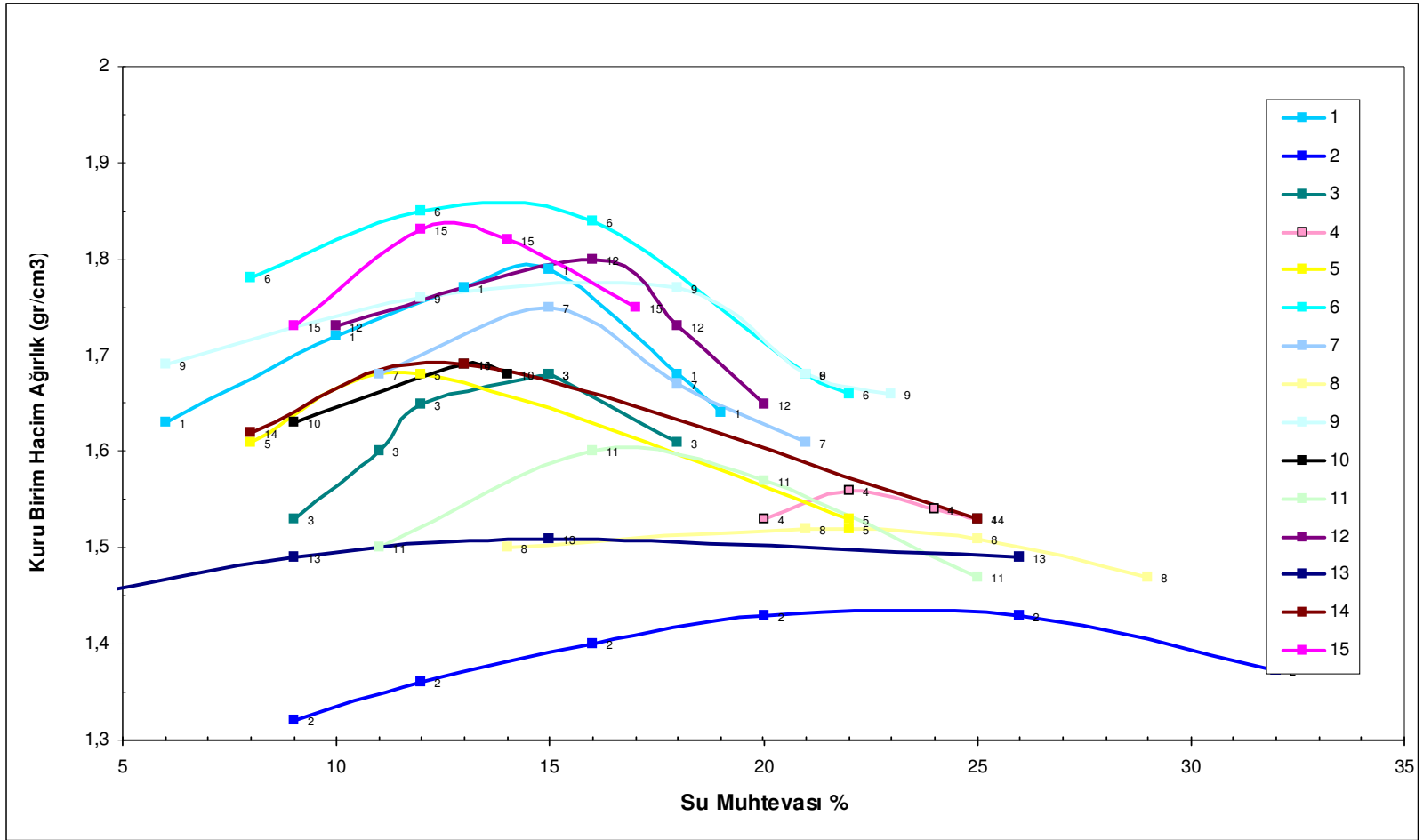
Numunelerden 8 nolu olanın bentonit yüzdesi %6.11 olarak belirlenmiştir. Bu numunede bentonit miktarı ağırlıkça %10 (8A) ve %15 (8B) olacak şekilde artırılarak kompaksiyon özelliklerinin bentonit oranındaki bu artıştan nasıl etkilendiği incelenmiştir. Bentonit oranının %6.11, %10 ve %15 olması durumları için standart Proctor eğrileri Şekil 6.24’te verilmiştir. Şekil 6.24’ten anlaşılacağı gibi bentonit oranı %6.11’den %10’a çıktığında kuru birim hacim ağırlığı da artmaktadır. Fakat bentonit miktarı %15’e çıkarıldığında ise kuru birim hacim ağırlığı azalmaktadır. Optimum su muhtevası ise bentonit oranı %10 iken $W_{opt} = \%16$ ve bentonit oranı %15 iken $W_{opt} = \%19$ olarak artmaktadır. Şekil 6.22’de maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının en büyük değerinin elde edildiği bentonit oranı kumun dane çapı dağılımına ve bentonitin şişme potansiyeline bağlıdır (Abichou ve diğ.,2000, Howell ve Shackelford, 1997, Solmaz ve diğ., 2007). Şekil 6.20 ve Şekil 6.21’ye artırılmış bentonit oranına sahip numunelerin sonuçları da eklenmiştir. Bahsi geçen bu numuneler 7 ve 8 numaralı numunelerdir.



Şekil 6.23 : Optimum Su Muhtevası Bentonit Yüzdesi Grafiği



Şekil 6.24 : 8 Numaralı Numune için %6.11 (mevcut hal), %10 ve %15 Bentonit Oranlı Standart Proctor Eğrileri



Şekil 6.25 :Tüm Standart Kompaksiyon Eğrileri

6.3.4. Permeabilite Deneyleri

Sıkıştırılıp optimum su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları belirlenen numuneler üzerinde düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılarak hidrolik iletkenlik değerleri (k) belirlenmiştir. Deneylerde musluk suyu kullanılmış ve ölçümlerde stabil sonuçlar elde edilene kadar deneylere devam edilmiştir. Tablo 6.7’de hidrolik iletkenlik değerleri görülmektedir.

Tablo 6.7 : Döküm Kumu Numunelerinde Hidrolik İletkenlik Değerleri

Numune Numarası	Hidrolik İletkenlik, m/s
1	3,68E-07
2	1,22E-04
3	5,01E-06
4	9,26E-05
5	1,14E-06
6	1,80E-07
7	1,44E-06
8	1,20E-05
9	9,67E-07
10	9,53E-05
11	3,90E-07
12	7,14E-07
13	5,94E-03
14	4,37E-06
15	4,06E-07

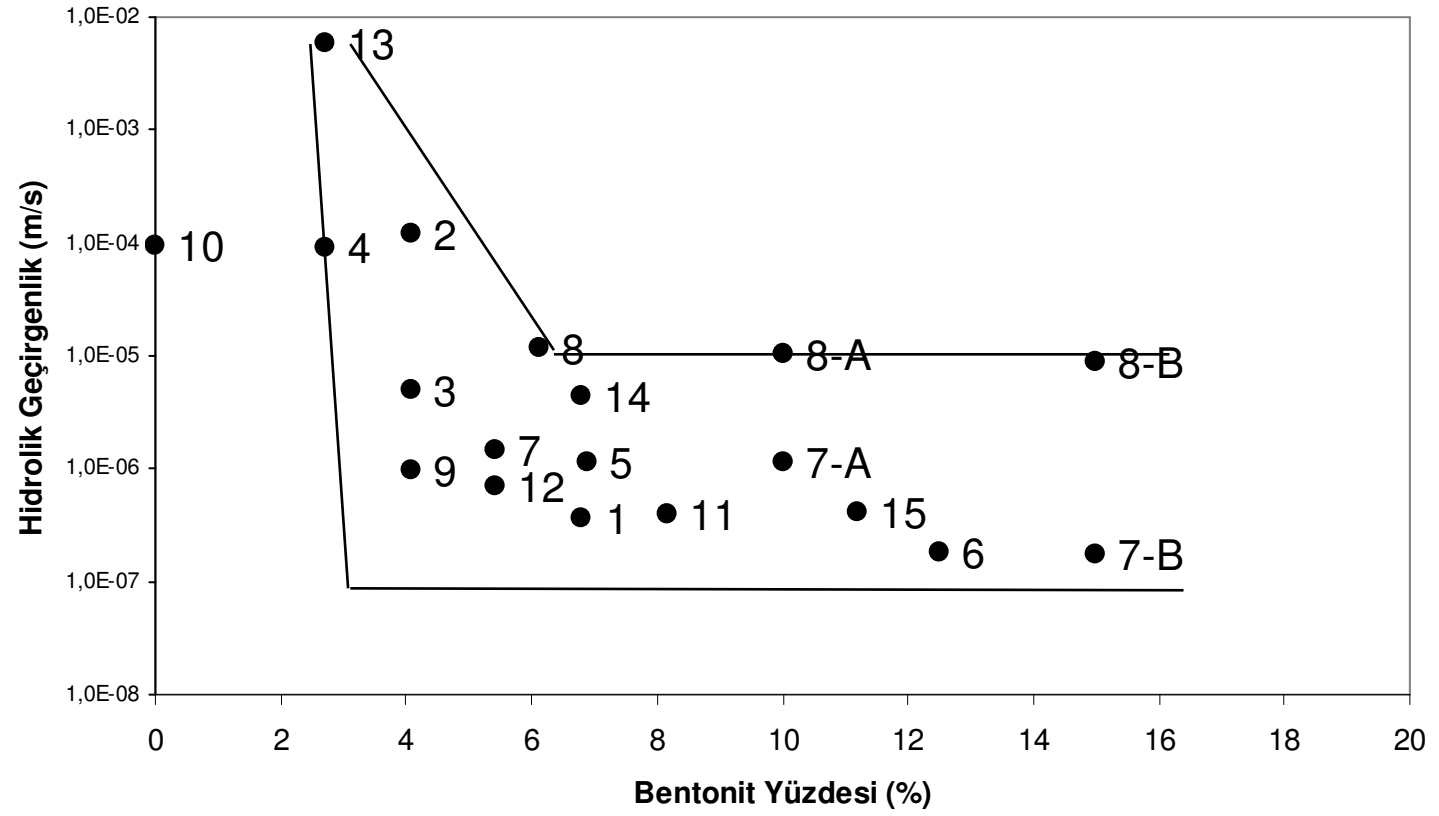
Deney sonuçlarına göre, bentonit yüzdesine bağlı olarak hidrolik iletkenliğin değişimi Şekil 6.26’te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi hidrolik iletkenlik 1×10^{-7} m/sn değerine kadar inmektedir. Hidrolik iletkenlik, %4-%5 bentonit oranına kadar hızla azalmakta, bentonit oranı %4-5’ aştıktan sonra azalım yavaşlamakta 1×10^{-5} m/sn ve 1×10^{-7} m/sn arasında kalmakta ve daha fazla bentonit ilavesi ile bu aralık altına inilememektedir. Hidrolik iletkenliğin bentonit oranına bağlı bu değişimi şekil itibariyle benzer çalışma sonuçları ile paraleldir (Abichou ve diğ., 2000, Kenney ve diğ., 1992). Bentonit oranının bir değerinden sonra artık boşluklar bentonit ile

doldurulmuş olduğundan hidrolik iletkenlik değeri bentonitin hidrolik iletkenlik değerine yakınsaması beklenir.

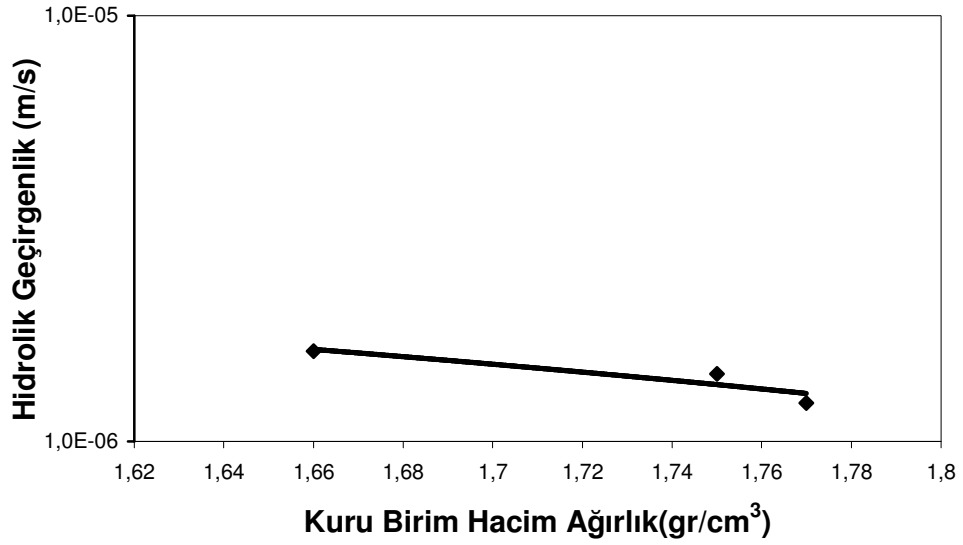
Şekil 6.26'te %15 bentonit oranı için yakınsanan değerler 1×10^{-5} m/sn ve 1×10^{-7} m/sn olup yüksektir. Bu durumda bentonitin hidratasyonu için 16 veya 24 saatten uzun süreler verilmesi gerekebilir. Bu çalışmada 24 saat hidratasyon süresi öngörülmüştür. Ayrıca bentonit kalitesi ve organik madde oranının da olası etkileri araştırılmalıdır. Bununla birlikte hidrolik geçirgenlik ölçümleri geçirimsiz şiltenin maruz kalacağı yanal-düşey gerilme şartları altında ve hidrolik eğimler kullanılarak ASTM D 5084-90 standardına uygun esnek cidarlı bir deney sisteminde gerçekleştirilmesi sağlanmalıdır.

Şekil 6.27 ve 6.28'de 7 ve 8 numaralı numuneler için hafifletilmiş, standart ve modifiye Proctor deneyleri sonucunda elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlıklar ile hidrolik geçirgenliğin grafiği görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi kuru birim hacim ağırlıkla hidrolik geçirgenlik arasında ters orantı vardır.

Şekil 6.29'de ise tüm döküm kumu numuneleri için porozitenin hidrolik iletkenlikle değişimi görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi porozite arttıkça hidrolik iletkenlik yükselmektedir



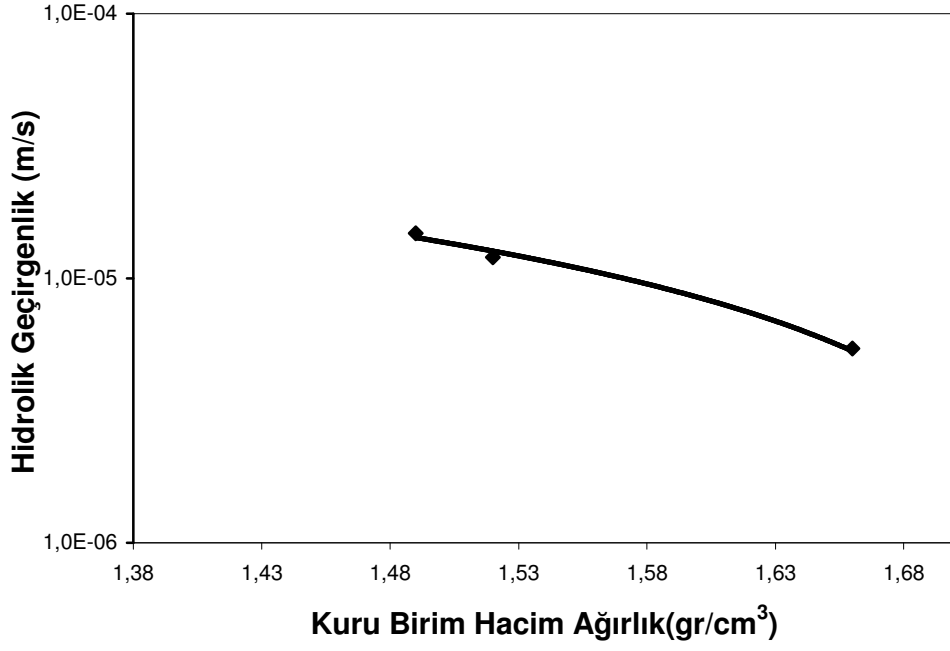
Şekil 6.26 : Bentonit Yüzdesi ile Hidrolik Geçirgenliğin Değişimi



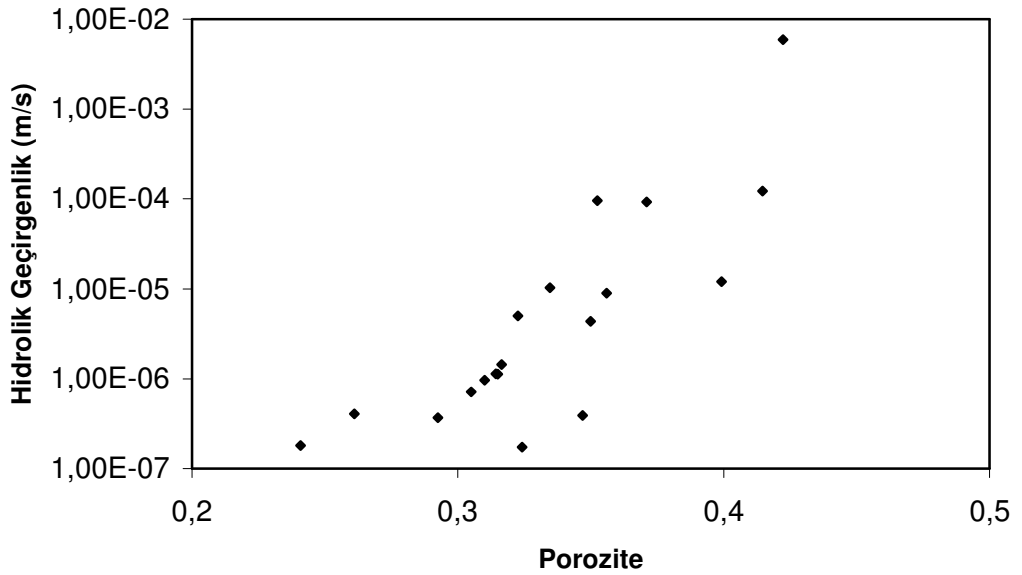
Şekil 6.27 : 7 Numaralı Numunede Hafifletilmiş, Standart ve Modifiye Proctor Deneyleri Sonucunda Elde Edilen Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlıklara Karşı Hidrolik Geçirgenliğin Değişimi

Hidrolik geçirgenlik deneyleri sonuçlarında bazı numunelerin permeabilite değeri 10^{-7} m/s mertebesinde elde edilmiştir. Bu değer katı atık depolama sahalarında tabloda belirtilen bazı özel durumlarda numunenin geçirimsizlik amacı ile kullanılabilceğini göstermektedir. Tablo 6.8’de görüldüğü üzere mineral katı atık depolama yerinde bu değer kullanıma uygun görünmektedir.

Ayrıca, Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından yayınlanan Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliğinde “İnert atıklar evsel atık düzenli depo tesislerinde veya permeabilitenin $k \leq 10^{-7}$ m/s ve en az 1 metre kil’e eşdeğer geçirimsizliğin sağlandığının ve yer altı su seviyesine maksimum 1 metre olduğunun Bakanlığa belgelendiği alanlarda Bakanlığın uygun görüşü alınarak depolanır” denmektedir.



Şekil 6.28 : 8 Numaralı Numunede Hafifletilmiş, Standart ve Modifiye Proctor Deneyleri Sonucunda Elde Edilen Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlıklara Karşı Hidrolik Geçirgenliğin Değişimi



Şekil 6.29 : Tüm döküm kumu numuneleri için porozitenin (n) hidrolik geçirgenlikle (k) değişimi

Tablo 6.8 : Doğal zeminin geçirgenliğinin yeterliliği (Alyanak, 2006)

KAD Tesisi Türü	Doğal zeminin min. geçirgenliği ,m/s		Doğal zeminin tabaka kalınlığı, m	
Tehlikeli atık depolama yeri	1.0 x 10 ⁻⁹		> 3	
Tehlikesiz (evsel) KAD yeri	1.0 x 10 ⁻⁹	1.0 x 10 ⁻⁸	> 1	> 3
Tıbbi atık depolama yeri	-	1.0 x 10 ⁻⁹	-	> 3
Mineral KAD yeri	1.0 x 10 ⁻⁷	-	> 1	-

6.3.5. ICP ve AAS Deneyleri

Döküm kumu numunelerinden permeabilite deneyleri sonucu geçen süzüntü suları üzerinde ICP ve AAS analizleri yapılmıştır. ICP analizleri sonucunda süzüntü suyunda aranacak ağır metallere biri veya birkaçı tespit edilmişse AAS analizi yapılarak bu ağır metalin konsantrasyonu ppm (mg/l) cinsinden elde edilir. Tablo 6.10 ve Tablo 6.11 'de numunelerdeki ağır metal konsantrasyonları görünmektedir. Tablolarda görülen değerlerden sadece 3 numaralı numunede Zn değeri Çevre ve Orman Bakanlığında tarafından yayınlanan Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliğine göre standardın üstünde çıkmıştır. Bununla birlikte laboratuvar imkanlarının kısıtlı olması sebebiyle yönetmelikte bulunan tüm kriterler kontrol edilememiş sadece katot lambası bulunan değerlerin konsantrasyonuna bakılmıştır. Çevre ve Orman Bakanlığında tarafından yayınlanan Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliğine bulunan eluat kriterleri ise Tablo 6.9 olarak aşağıda verilmiştir.

Tablo 6.9 : Ağır Metal Kriterleri (Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, 2005)

		İnert Atık olarak muamele görececek atıklar (mg/lit)
1	Eluat Kriterleri	
	L/S = 10 lt/kg	
1.01	As (Arsenik)	≤ 0,05
1.02	Ba (Baryum)	≤ 2
1.03	Cd (Kadmiyum)	≤ 0,004
1.04	Cr toplam (Krom Toplam)	≤ 0,05
1.05	Cu (Bakır)	≤ 0,2
1.06	Hg (Civa)	≤ 0,001
1.07	Mo (molibden)	≤ 0,05
1.08	Ni (Nikel)	≤ 0,04
1.09	Pb(Kurşun)	≤ 0,05
1.10	Sb (Antimon)	≤ 0,006
1.11	Se(Selenyum)	≤ 0,01
1.12	Zn (Çinko)	≤ 0,4
1.13	Klorür	≤ 80
1.14	Florür	≤ 1
1.15	Sülfat	≤ 100

Tablo 6.10 : Numunelerin Eluat Kriterleri-1

Ağır Metal Miktarı, ppm	1	2	3	4	5	6	7	8
Mn	<0,001	0,059	0,109	0,04	0,089	0,034	0,078	0,089
As	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cd	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cr	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Ni	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Pb	0,05	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cu	<0,001	0,012	0,185	0,041	<0,001	<0,001	0,06	0,066
Zn	<0,001	<0,001	0,75	<0,001	0,091	0,105	0,11	0,127
Hg	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Sb	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Al	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,526	<0,001	<0,001
Fe	<0,001	0,025	<0,001	0,027	<0,001	0,285	<0,001	<0,001
Sn	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Tablo 6.11 : Numunelerin Eluat Kriterleri-2

Ağır Metal Miktarı, ppm	9	10	11	12	13	14	15
Mn	0,06	0,047	0,065	0,075	0,086	0,045	0,028
As	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cd	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cr	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Ni	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Pb	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cu	<0,001	0,179	<0,001	0,019	<0,001	<0,001	<0,001
Zn	0,11	0,578	0,168	0,123	0,292	0,183	0,126
Hg	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Sb	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Al	<0,001	0,475	<0,001	0,719	<0,001	<0,001	0,767
Fe	<0,001	0,345	<0,001	0,372	<0,001	0,175	0,234
Sn	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

7. SONUÇLAR

Kullanılan döküm kumları atıklar sınıfına girmekte ve atıkların geri kazanılması veya başka bir amaç doğrultusunda tekrar kullanımı çevrenin korunması açısından önem kazanmaktadır. Kullanılmış döküm kumlarının büyük miktarda tüketilmesini mümkün kılan araştırmalar dünyada mevcuttur. Esas bileşenleri kum ve bentonit olan döküm kumunun, kompaksiyon sonucu, hidrolik iletkenliği 1×10^{-7} cm/sn veya daha düşük değerlere sahip olabilmektedir ve sızdırmaz perde yapımı için bir endüstriyel hammadde olma potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada atık döküm kumlarının geçirimsiz perde yapımında kullanımını incelemek üzere başlatılan bir deneysel çalışmanın ilk sonuçları sunulmuş ve irdelenmiştir. Çalışmanın ana ekseni indeks özellikleri, kompaksiyon ve hidrolik iletkenlik değerlerinin belirlenmesi olmakla birlikte buna ek olarak ilgili çevre mevzuatı açısından değerlendirme yapmak için ağır metal konsantrasyonları da belirlenmiştir.

Bu amaçla, İstanbul civarında faaliyet gösteren bazı döküm sanayi kuruluşlarından temin edilen 15 ayrı atık döküm kumu numunesi üzerinde indeks özellikleri, bentonit miktarı, kompaksiyon özellikleri, hidrolik iletkenlik değerleri ve ağır metal konsantrasyonlarının belirlenmesi için ICP, AAS analizleri yapılmış ayrıca mevcut bulunan 4 ayrı bentonit numunesinin indeks özellikleri tayin edilmiştir. Deneysel sonuçları tablo ve grafikler halinde sunulmuştur.

Bu deneysel sonuçlarına göre;

Bentonit içeren atık döküm kumu numuneleri ASTM sınıflandırmasına göre SM (siltli kumlar, fena derecelenmiş kum silt karışımları) veya SM-SC sınıfına girmektedir. Reçineli örnek ise ince dane oranı düşük olduğundan SP (kötü derecelenmiş kumlar) sınıfına girmektedir. Dane birim hacim ağırlıkları belirlemek için piknometre deneyi yapılmıştır. Değerler 2,45 ve 2,61 arasında değişiklik göstermektedir

Kızdırma kaybı tayini ile numunelerin ne kadar organik madde(kömür) içerdiği tespit edilmiştir. Buna göre kül yüzdesi %77 ila %96 arasında ve organik madde miktarı %4 ile %23 arasında değişmektedir. Standart kompaksiyon deneyleri sonucu numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlıkları $1,44$ ile $1,86$ gr/cm³ arasında

değişirken optimum su muhtevaları ise %12-%23 arasında değişmektedir. Permeabilite ise 1×10^{-7} m/sn değerine kadar inmektedir. Bu değer katı atık depolama sahalarında bazı özel durumlarda numunenin geçirimsizlik amacı ile kullanılabilceğini göstermektedir. Tablo 6.8'de görüldüğü üzere mineral katı atık depolama yerinde bu değer kullanıma uygun görünmektedir. Ayrıca, Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından yayınlanan Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliğinde “İnert atıklar evsel atık düzenli depo tesislerinde veya permeabilitenin $k \leq 10^{-7}$ m/s ve en az 1 metre kil'e eşdeğer geçirimsizliğin sağlandığının ve yer altı su seviyesine maksimum 1 metre olduğunun Bakanlığa belgelendiği alanlarda Bakanlığın uygun görüşü alınarak depolanır” denmektedir.

Bu sonuçlar ışığında numuneler hakkında aşağıdaki yorumlar sıralanabilir;

Sıkıştırma enerjisi arttıkça kuru birim hacim ağırlık artmakta hidrolik iletkenlik düşmektedir. Fakat optimum su muhtevasında hazırlanmış numuneler üzerinde sıkıştırma enerjisinin etkisi sınırlıdır. Ayrıca bentonit oranı %10'u geçtiğinde maksimum kuru birim hacim ağırlık düşmekte ve optimum su muhtevası yükselmektedir. En iyi sıkışma %10 bentonit oranı civarında sağlanmaktadır.

Hidrolik iletkenlik %4-5 bentonit miktarlarına kadar hızla azalmaktadır. Bentonit oranı %4-5'i aştıktan sonra, azalım çok yavaşlamakta ve %15 bentonit oranı için 1×10^{-7} m/sn olmaktadır. Hidrolik iletkenliğin, bu çalışmada 1 gün olarak alınan hidratadyon süresini uzatarak daha aşağılara çekilmesi mümkün olabilir. Ayrıca kullanılan bentonit daha kaliteli (plastisitesi yüksek) bentonitten seçilirse bu da hidrolik iletkenliğin düşmesini sağlayabilir. Bunlarla birlikte hidrolik iletkenliğin ölçümlerinin geçirimsiz şiltenin maruz kalacağı yanal düşey gerilme şartları altında ASTM D 5084-90 standardına uygun esnek cidarlı bir deney sisteminde gerçekleştirilmesi sağlanmalıdır.

Bu çalışma dahilinde Çevre ve Orman Bakanlığının yayınlamış olduğu yönetmeliğe göre yapılan ağır metal analizi sonucunda sadece 3 numaralı numunede Zn değeri standardın üstünde çıkmıştır. Bununla birlikte laboratuvar imkanlarının kısıtlı olması sebebiyle yönetmelikte bulunan tüm kriterler kontrol edilememiş sadece katot lambası bulunan değerlerin konsantrasyonuna bakılabilmektedir. Bu çevresel etkiler daha detaylı araştırılmalıdır. Konuyla ilgili ileride yapılacak çalışmalarda kullanılacak numunelerin dökümhane ve döküm tipine göre detaylı olarak tasniflenmesi sağlıklı olacaktır. Ayrıca dökümhanelerden periyodik olarak her ay numune alarak deneyleri gerçekleştirmek atık karakteristiğini de ortaya çıkarmış

olur. Son olarak yapılacak bir maliyet analizi ile döküm atıklarının katı atık depolama sahalarında depolanması ve bu işlemin nakliyesi için harcanan tutar belirlenebilir. Bu atığın kullanılması durumunda döküm sanayisi için problem olan bu atık malzeme sorun olmaktan çıkacak ve maddi götürüsü ortadan kalkacaktır.

KAYNAKLAR

- Abeele, W. V.**, 1986. The Influence of Bentonite on the Permeability of Sandy Silts, Nuclear and Chemical Waste Management, **6**, 81-88.
- Abichou, T.**, 1999. Hydraulic Properties of Foundry Sands and their Use as Hydraulic Barriers, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, Madison
- Abichou, T.**, Benson, C. And Edil, T., 2000., Foundry Green Sands as Hydraulic Barriers: Laboratory Study, J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, **126**, 1174-1183
- Albrecht, B.**, 1996. Effect of Desiccation on Compacted Clays, M.Sc. Thesis, University of Wisconsin-Madison, Madison
- Alyanak, İ.**, 2006. Çevre Geotekniği Uygulama Alanlarındaki Gelişmeler, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On birinci Ulusal Kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon
- Aran, A.**, 1989., Metal Döküm Teknolojisi, İ.T.Ü. Makine Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul
- Chapuis, R.**, 1981. Permeability Testing of Soil-Bentonite Mixtures, Proceedings, Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, **4**, 744-745
- Chapuis, R.**, 1990. Sand-Bentonite Liners: Predicting Permeability from Laboratory Tests, Canadian Geotechnical Journal, **27**, 47-57
- Çevre ve Orman Bakanlığı**, 2005. Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, Ankara
- Daniel, D.E., and Benson, C.H.**, 1990. Water Content-density criteria for compacted soil liners, J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, **116**, 1811-1830
- Dakshanamurthy, V.**, 1978. A New Method to Predict Swelling Using Hyperbolic Equation, Journal of Geotechnical Engineering, **9**, 29-38
- Dışınar, D.**, 2005. Döküm Teknolojileri, İstanbul Üniversitesi, İstanbul
- Evans, J. and Fang, H.**, 1985. Organic Fluid Effects on Permeability of Soil Bentonite Slurry Walls, Proceedings National Conference on Hazardous Waste and Environmental Emergencies, 1-6
- Günay Y., Değirmenci S., Şirin B., Akarlar N.**, 2001. Türkiye’de Döküm Bentonitlerinin 2000’lerde İyileştirilmesi, Metalurji Dergisi, **126**, 13-19

- Haug, M.D., and Wong, L.C.,** 1992. Impact of molding Water Content on Hydraulic Conductivity of Compacted Sand-Bentonite, Canadian Geotechnical Journal, **29**, 253-262
- Head, K.H.,** 1982. Manual of Soil Laboratory Testing Volume 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests, Pentech Pres, London
- Howell, J., and Shackelford, C.,** 1997. Hydraulic Conductivity of Sand Admixed with Processed Clay Mixtures, Proceedings. Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, **1**, 307-310.
- Kaluç, E. ve Taban, E.,** 2004. Plazma Arkı ve Endüstriyel Uygulamaları, MakinaTek, **84**,12
- Kenney, T., Van Veen, W., Swallow, M. A., and Sungaila, M. A.,** 1992. Hydraulic Conductivity of Sand-Bentonite Mixtures, Canadian Geotechnical Journal, **29**, 364-374.
- Kraus, J., Benson, C., Erickson, A., and Chamberlain, E. J.,** 1997. Freeze-Thaw Cycling and the Hydraulic Conductivity of Bentonitic Barriers, J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, **123**, 229-238
- Komine H., Ogata, N., Horie, Y., Ishii, T., and Nishio, S.,** 1991. Permeability and Mechanical Properties of Bentonite-Sand Mixture for Sealing LLW Repositories, Trans. 11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, **1**, 271-276
- Komine H. and Ogata, N.,** 1996. Observation of Swelling Behavior of Bentonite by New Electron Microscope, Proceedings of the International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, 563-568
- Kunes. T. and Smith, M.,** 1983. Waste Disposal Considerations for Green Sand Use in the Foundry Industry, AFS-CMI Conference on Green Sand-Productivity
- Sarıdikmen, H., Öndey, M. ve Kuşkonmaz, N.,** 2002. Dolu Kalıba Döküm Teknolojisi, Metalurji, **127**, 20-27
- Sivapullaiah, P., Sridharan, A., and Stalin, V.,** 1996. Swelling Behavior of Soil Bentonite Mixtures, Canadian Geotechnical Journal, **33**, 808-814
- Solmaz P., Benli, B., Lav, M.A., Çelik M. S. ve Lav, A. H.,** 2007. Atık Döküm Kumunun Geçirimsiz Perde Yapılarak Tekrar Kullanımı, 2. Döküm ve Çevre Sempozyumu, 91-101
- T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Çalışma Grubu Raporu,** 1995. Kuvars, Kuvarsit, Kuvars Kumu, Döküm Kumu, Ankara, Cilt 3
- T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Çalışma Grubu Raporu,** 2001. Bentonit, Barit, Diatomit, Aşındırıcılar, Ankara
- Thurairajah, A.,** 1970. A Study of Swelling Characteristics of Remoulded Clay, Journal of Geotechnical Engineering, 29-39.

- US Federal Highway Administration**, 2004. Foundry Sand Facts for Civil Engineers, FHWA-IF-04-004
- Vierbicher Associates**, 1996. Final Report: Beneficial Reuse of Selected Foundry Waste Material, Prepared for Wisconsin Dept. of Natural Resources, Wisconsin
- Wong, L., and Haug, M.**, 1991. Cyclical Closed-System Freeze-Thaw Permeability Testing of Soil Liner and Cover Materials, Canadian Geotechnical Journal, **28**, 784-793
- Wentworth, C.K.**, 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. Journal of Geology, **30**, 377-392.

ÖZGEÇMİŞ

Pınar Solmaz 1984 yılında İstanbul'da dünyaya geldi. Orta Öğrenimini İstanbul'da Şehremini Lisesi'nde tamamladı. 2001 yılında girdiği Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünden 2005 yılında mezun oldu. Halen 2005 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.