

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÖKÜMHANELERDE OLUŞAN ATIK DÖKÜM
KUMUNUN GERİ KULLANIM YÖNTEMLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Miraç GEDİKLİ

Enstitü Anabilim Dalı : ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Gülgün DEDE

Ortak Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL

Mart 2019

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÖKÜMHANELERDE OLUŞAN ATIK DÖKÜM
KUMUNUN GERİ KULLANIM YÖNTEMLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Miraç GEDİKLİ

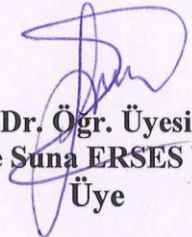
Enstitü Anabilim Dalı : ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 25.03.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.


**Dr. Öğr. Üyesi
Gülgün DEDE
Jüri Başkanı**


**Dr. Öğr. Üyesi
Ayşe Bengü SÜNBÜL
Üye**


**Doç. Dr.
Asude ATEŞ
Üye**


**Dr. Öğr. Üyesi
Aliye Suna ERSES YAY
Üye**


**Doç. Dr.
Utkan MUTMAN
Üye**

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tabrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Miraç GEDİKLİ

25.03.2019



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Gülgün DEDE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Bülent Ecevit Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümündeki bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım sayın danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL'e teşekkür ederim.

Çalışmamın başlangıcından itibaren bugüne kadar yanımda olup, bana her türlü maddi ve manevi desteğini esirgemeyen eşim Okan GEDİKLİ'ye, aileme ve 1'inci Ana Bakım Fabrika Müdürlüğü'ndeki mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2017-50-01-082) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
SUMMARY	viii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	3
2.1. Döküm işlemi hakkında genel bilgiler.....	3
2.1.1. Döküm ile imalatın avantajları.....	3
2.1.2. Döküm ile imalatın dezavantajları.....	4
2.2. Döküm yöntemleri	4
2.2.1. Döküm sektöründe uygulanan süreçler.....	4
2.2.1.1. Model yapımı.....	5
2.2.1.2. Maça yapımı.....	5
2.2.1.3. Kum hazırlama.....	5
2.2.1.4. Kalıp hazırlama ve kalıplama işlemi.....	6
2.2.1.5. Metal ergitme	6
2.2.1.6 Döküm ve parça alma.....	6
2.2.1.7 Temizleme.....	6

2.2.1.8. Taşlama.....	7
2.3. Döküm kumu ve içeriği hakkında genel bilgiler.....	7
2.3.1. Döküm kumunun özellikleri.....	7
2.3.2. Bileşenler bazında döküm kumu.....	8
2.3.2.1. Kum.....	8
2.3.2.2. Su.....	9
2.3.2.3. Bağlayıcılar.....	9
2.3.2.4. Eklentiler.....	11
2.4. Türkiye ve dünyada döküm sektörü.....	12
2.5. Döküm sektörünün çevresel profili.....	16
2.6. Atık döküm kumlarının yeniden kullanımına yönelik çalışmalar.....	18
 BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM	22
3.1. Atık döküm kumu	22
3.2. Arıtma çamuru.....	25
3.3. Numunelerin hazırlanması.....	26
3.4. İndeks özellikleri.....	27
 BÖLÜM 4.	
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	31
4.1. İndeks deneyleri.....	31
4.2. Kompaksiyon ve permeabilite deneyleri	33
 BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	40
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ	46

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AAS	: Atomik Absorbsiyon Spektroskopisi
ADK	: Atık Döküm Kumu
AFS	: Amerikan Dökümcüler Birliği
ICP	: İndüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma
KM	: Katı Madde
LL	: Likit Limit
PI	: Plastisite İndeksi
PCC	: Portland Çimento Betonu
SP	: Kötü Derecelenmiş Kum
WP	: Plastik Limit

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Türkiye’deki döküm üretiminin son 40 yılın döküm türlerine göre dağılımı	14
Şekil 2.2.	AFS 2016 verilerine göre dünya döküm üretiminde ilk 20 ülke.....	16
Şekil 2.3.	Döküm sektörünün temel girdi ve çıktıları	17
Şekil 3.1.	Kullanılmamış döküm kumu.....	23
Şekil 3.2.	Atık döküm kumu (CO ₂).....	24
Şekil 3.3.	Atık döküm kumu (Sertleştirici)).....	24
Şekil 3.4.	% 100 CO ₂ atık döküm kumu.....	25
Şekil 3.5.	Hazırlanan numuneler.....	28
Şekil 4.1.	Sertleştirici ilave edilmiş döküm kumu numunelerinin dane boyu dağılım eğrisi.....	32
Şekil 4.2.	CO ₂ işlem döküm kumu numunelerinin dane boyu dağılım eğrisi.....	32
Şekil 4.3.	Sertleştirici ilave edilmiş döküm kumu numuneleri için Standart Proctor sıkıştırma eğrisi.....	38
Şekil 4.4.	CO ₂ işlem döküm kumu numuneleri için Standart Proctor sıkıştırma eğrisi.....	39

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Kalıp kumu türleri	8
Tablo 2.2. Döküm kumlarının fiziksel, kimyasal ve teknolojik özellikler.....	9
Tablo 2.3. Bağlayıcı kullanılan yöntemler	10
Tablo 2.4. Türkiyede yıllara göre döküm üretim miktarları.....	13
Tablo 2.5. Dünya döküm sektörü verileri	14
Tablo 2.6. 2016 yılı dünya döküm üretim miktarlarının metallere ve ülkelere göre dağılımı.....	15
Tablo 3.1. Sertleştirici (S1) ve CO ₂ (C1) işlem kumlarının bileşimi.....	23
Tablo 3.2. Atık döküm kumlarına ait analiz sonuçları	24
Tablo 3.3. Toprak Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'ne göre toprakta izin verilen ağır metal sınır değerleri (TKKY, 2005).....	25
Tablo 3.4. Deneylerde kullanılan arıtma çamurunun kimyasal ve fizikokimyasal özellikleri	26
Tablo 3.5. Sertleştirici ve CO ₂ işlem kumlarının zemin indeks özellikler.....	28
Tablo 4.1. Sertleştirici ve CO ₂ işlem kumlarının özgül ağırlık değerleri.....	33

ÖZET

Anahtar kelimeler: Atık döküm kumu, geri kullanım, arıtma çamuru.

Döküm kumu başta otomotiv sektörü, demir-çelik sanayisi, alayım üretimi ve metalürji endüstrisi olmak üzere diğer birçok endüstri alanında büyük miktarlarda kullanılmakta olup döküm işleminden sonra oluşan kum, atık malzeme olarak kabul edilmektedir. Gün geçtikçe artan oranlarda oluşan döküm kumları atık yığınlarını oluşturmakta ya da depo alanlarının büyük kısmını işgal etmekte aynı zamanda döküm endüstrisine de ek bir maliyet oluşturmaktadır. Günümüzde endüstrinin büyümesi ve gelişmesiyle ortaya çıkan atık kumunun, doğada yaratmış olduğu tehdit de her geçen gün artmakta ve bundan dolayı da atık döküm kumlarının kullanımı için uygun bir alan ve yöntem aranmaktadır.

Bu çalışmada, iki farklı dökümhaneden temin edilen atık döküm kumlarına belirli oranlarda Karaman Evsel Nitelikli Atıksu Arıtma Tesisi'nden temin edilen arıtma çamuru katılarak, katı atık depolama sahası örtü tabakası olarak kullanılabilirlikleri incelenmiş ve zemin mekaniği testleri ile desteklenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda günümüzün büyük sorunu haline gelmiş olan döküm kumları ve arıtma çamurları için bir geri kullanım metodu risk potansiyelleri ile birlikte, herhangi bir çevresel risk oluşturup oluşturmadığı değerlendirilmiştir.

INVESTIGATION OF REUSE METHODS OF WASTE FOUNDRY SAND PRODUCED IN FOUNDRIES

SUMMARY

Keywords: Waste foundry sand, reuse, sewage sludge.

Foundry sand is mainly used in large quantities in many industries, especially in the automotive industry, iron and steel industry, alloying and metallurgical industries. The waste foundry sand formed after casting is considered to be a waste material. Waste foundry sands, which have been growing at an ever increasing rate, are creating waste stacks or occupying a large part of the storage areas and are also an additional cost to the foundry industry. Today, the threat created by the growth and development of the industry, the threat posed by nature is increasing day by day, and therefore a suitable area and method for the use of waste sands are sought.

In this study, by adding the sewage sludge obtained from Karaman Municipal Treatment Plant in certain ratios to the waste foundry sand sourced from two different foundries. In the light of the results obtained, it has been evaluated whether there is any environmental risk along with the risk potentials of a recovery method for waste foundry sands and sewage sludge's which have become the major problem of today.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Döküm, ergimiş metalin içerisinde boşluk bulunan bir kalıba dökülüp katılaştırılmasıyla istenilen şeklin elde edilmesi yöntemidir. Çeşitli pik demir, çelik hurda ve ferro alaşımların endüksiyon, ark veya kupol ocaklarında ergitilerek kum, seramik veya metal kalıplarda şekillendirilmesiyle, sanayinin ihtiyacı olan pik, çelik, sfero ve temper döküm ürünlerinin ham veya işlenmiş olarak döküm sanayi sektöründe üretilir. 4D döküm sektörü (difficult, dirty, dusty, dangerous) olarak da bilinen zor, kirli, tozlu ve tehlikeli bir sektördür. Buna rağmen, sağladığı istihdam ve ülke sanayisine katkısı sebebiyle dünya genelinde vazgeçilemez sektörlerden biridir (Başar ve ark., 2012). Otomotiv endüstrisi başta olmak üzere bir çok iş kolunda özellikle demir-çelik döküm sanayinde, alüminyum ve bakır içerikli alaşımların üretiminde büyük miktarlarda döküm kumu tüketilmektedir.

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de, sanayileşme ve teknolojik gelişmelere paralel olarak yaşanan kentleşme ve hızlı nüfus artışı insan faaliyetlerinin çevre üzerindeki baskısını hızla artırmaktadır. Üretim faaliyetlerinin genişlemesi, doğal kaynakların yoğun şekilde kullanılmasına sebep olmaktadır. Tüketim eğiliminin sürekli artması sonucu oluşan atıklar hem zararları nedeniyle hem de miktar bakımından çevre ve insan sağlığını ciddi şekilde tehdit eder boyutlara ulaşmıştır. Doğal kaynakların hızla tüketilmesini engellemek ve üretilen atıkları çevre ve insan sağlığı için "tehdit" olmaktan çıkartarak "ekonomik girdiye dönüştürmek" öncelikli olarak hedeflenmelidir. Bu da ancak uygun atık yönetim stratejilerinin etkin politikalarla hayata geçirilmesi ile sağlanabilir. Bu bakış açısı, ülkemizde ve tüm dünyada olduğu gibi öncelikli bir politika hedefi olarak benimsenen sürdürülebilir çevre ve sürdürülebilir kalkınmanın temelini oluşturmaktadır. Bu sebeplerle, ülkemiz için önemli bir potansiyele sahip olan atık döküm kumları (ADK)'nın çeşitli çevre dostu yöntemlerle geri kazanılması ve/veya tekrar kullanılarak döküm endüstrisi

veya farklı bir endüstri için katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi ve bunun sanayide uygulamaya aktarılmasının; doğal kaynaklarımızın korunması, hammadde tasarrufunun sağlanması, ekonomiye katkı sağlanması, çevrenin korunması, atık miktarının azaltılması ve gelecek için yatırım olmasından ötürü, ülkemiz açısından büyük bir fırsat olacağı ön görülmektedir.

Döküm sanayinde oluşan atık döküm kumları tekrar tekrar geri kazanılarak kullanılsa da yine de önemli miktarda atığın bertarafının yapılması gerekmektedir. Atık döküm kumunun yakma veya depolama gibi bertaraf yöntemlerinin haricinde özellikle düzenli depolama sahalarında geçirimsiz tabaka olarak kullanabilmesi, büyük miktarlardaki atığın bertaraf edilmesi ve ayrıca yeni bir ürünün geliştirilmesi açısından oldukça önemlidir (Solmaz, 2008).

Bu çalışma, atık depolama sahası örtü tabakası malzemesinin üretiminde atık döküm kumu ve arıtma çamurunun çeşitli fraksiyonlarında kullanım fizibilitesi araştırılmış olup döküm kumunun endüstriyel bir hammadde olarak yeniden kullanılması hedeflenmiştir.

Çalışmada Sakarya ilindeki dökümhanelerden alınan atık döküm kumu ve belirli hacimsel oranlarda Karaman Evsel Atıksu arıtma çamuru ile hazırlanan numunelerin mekanik, liç ve partikül boyutu gibi indeks özellikleri, kompaksiyon özellikleri, kayma mukavemeti testi, odometre testi, permeabilite ve kıvam limitleri incelenmiştir. Yapılan jeoteknik test sonuçları, arıtma çamuru içeren atık döküm kumunun düzenli depolama sahası örtü tabakası malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Döküm İşlemi Hakkında Genel Bilgiler

Döküm ürünlerine neredeyse tüm endüstriyel sektörlerde ihtiyaç duyulduğundan, dökümhanelerin imalat sektöründe önemli bir yeri vardır. (Usta Benli, 2017). Döküm, istenilen bir şekli elde etmek için seçilen metal veya alaşımlarının eritilerek istenilen şeklin negatif kalıp boşluğuna basınç ve yerçekimi etkisi ile doldurulması ve katılaştırılması işlemidir.

İstenen özelliklerde kaliteli bir döküm elde edebilmek için göz önünde tutulması gereken esasları sayarsak; uygun döküm yönteminin belirlenmesi, belirlenen yöntemle uygun kalıp dizayn edilmesi, maça ve kalıpların hazırlanması, istenilen özelliklerde alaşımın hazırlanması, uygun ergitme yönteminin seçilerek ergitme için gerekli işlemlerin yapılmasıdır.

Döküm ürünlerinde, ‘yöntem-yapı özellik’ ilişkisi döküm teknolojisinin ana uğraşını oluşturur. Belirlenen alaşımdan bir parçanın; hangi yöntem kullanılarak elde edileceği, nasıl bir katılma yapısına sahip olacağı, buna bağlı olarak hangi özellikleri kazanacağı ve döküm hatalarının önlenmesi döküm teknolojisince çözülmesi gereken konuların başlıcalarıdır (Solmaz, 2008).

2.1.1. Döküm ile imalatın avantajları

Döküm yönteminde hem tonlarca ağırlıktaki büyük, hem de çok küçük parçaların üretimine uygun değişik teknikler bulunmaktadır.

- İçi boş ve karmaşık şekilli parçaların ve üretimi mümkündür.
- Neredeyse tüm metal alaşımlarının dökümü mümkündür.

- Seri üretim yapılabilmesi durumunda oldukça ekonomiktir.

2.1.2. Döküm ile imalatın dezavantajları

Dökümün dezavantajları imalat açısından değerlendirildiğinde; İnce kesitli parçaların imal edilesi zordur. Ayrıca ergime sıcaklığı çok yüksek olan metaller için de uygun bir imalat yöntemi değildir.

Dökümün Çevre dostu bir imalat yöntemi olmadığının bir göstergesi olarak;

- Eritme için yüksek sıcaklıklara çıkılması gerektiğinden çok fazla enerji sarfiyatına ihtiyaç duyulması
- Genellikle en pahalı enerji cinsi olan elektrik enerjisi kullanılması,
- Avrupa Birliği çevre politikalarının ve Çevre Mevzuatı düzenlemeleri kapsamında, çevre kirliliğinin önlenmesi maksadıyla yapılan tesislerin yüksek maliyetli olması,
- Döküm sektöründen kaynaklı atıkların geri kullanımına yönelik uygulamalarının yaygın olmaması gösterilebilir (Yaşar, 2009).

2.2. Döküm Yöntemleri

Döküme biçim veren kalıbın tekrar kullanılıp kullanılamayacağı esasına göre döküm yöntemleri ikiye ayrılır.

Harcanan kalıp kullanılan döküm yöntemleri: Bu yöntemin başlıcaları; kabuk kalıba döküm, seramik kalıba döküm, kum kalıba döküm, hassas döküm ve alçı kalıba dökümdür. Kalıcı kalıp kullanan döküm yöntemleri: Bu yöntemin başlıcaları metal kalıba döküm, savurma döküm, sürekli döküm, basınçlı dökümdür (Hawaman, 2009).

2.2.1. Döküm sektöründe uygulanan süreçler

Harcanan kalıp kullanılan yöntemlerin genelinde 6 temel adım takip edilir. Bunlar; model ve maça yapımı; kum ve kalıp hazırlama, kalıplama, metali ergitme, dökme ve temizleme işlemleridir.

2.2.1.1. Model yapımı

Dökümcülük üretiminde ilk adım desen yapımıdır. Desen istenen son ürünün fiziksel bir kopyasıdır. Döküm ürünlerindeki boyutlar yüksek oranda modele bağlı olduğu için dökümde kritik adımdır (Yiğit, 2013). Dökülecek malzemenin katılma prensiplerine göre çekme ve işleme özellikleri göz önünde bulundurularak modeller yapılır. Kalıp yapımında el aletleri, universal makineler ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) / bilgisayar destekli üretim (CAM) sistemi bilgisayar destekli (CNC) makinelerde kullanılır. Modeller tipik olarak metal, plastik, ahşap veya alçıdan yapılır (Yiğit, 2013; Başar, 2012a).

2.2.1.2. Maça yapımı

Maçalar, kalıp boşluklarına yerleştirilmesi ile, bulundukları alanın döküm yapıldıktan sonra boş çıkmasına yarayan şekillerdir. Döküm esnasında kalıp içerisinde maçalar ergimiş metalle sarıldığı için; kırılma, aşınma, metal sızması ve termik şok durumlarına engel olacak özellikte olmalıdır. Ayrıca döküm sonrası da kolayca dağılmalıdır. Metal, seramik gibi malzemelerden üretilen maçalar arasında en çok tercih edilen ve kullanılan kum esaslılardır. Bazı durumlarda, maçalar sadece iç boşluk için değil kalıbın tamamı için de kullanılabilir.

2.2.1.3. Kum hazırlama

Kum hazırlama ve kalıplama için; yeni kum ile ergimiş metalin çeşitli zorlamalarıyla şeklini değiştirmiş ve topaklanmış eski kalıp kumu birlikte kullanılır.

2.2.1.4. Kalıp hazırlama ve kalıplama işlemi

Kalıp hazırlama sırasında kumun içinde sıkıştırıldığı metal çerçevelere "derece" denir. Dereceler kalıpların, basınçla dağılmaması, çevrilebilmesi ve taşınabilmesi amacıyla kullanılır. Model, hazırlanan metalik kutulara konur. Bir kalıbın yapılabilmesi için iki veya daha fazla dereceye ihtiyaç duyulur. Kalıp içine belli bir plastikiğe sahip, özel olarak hazırlanmış kum doldurulur ve sıkıştırılma işlemine tabi tutulur. Model dışarı alındıktan sonra kumdaki kalıp boşluğunda ilgili yerlere maçalar yerleştirilir.

2.2.1.5. Metal ergitme

Metalin kalıp şeklini alabilmesi için sıvılaştırılarak akışkan hale getirilmesi gerekir. Dökümhanelerde, metali istenen hız ve verimle ergiterek döküm sıcaklığına getirilmesinde ergitme fırınları kullanılır. Dökümhane ergitme fırınları yakıtlı ve elektrikli olmak üzere iki çeşittir.

2.2.1.6. Döküm ve parça alma

Döküm yöntemlerine göre ergimiş metalin kalıplara dökülmesi, katılaşması ve kalıpların çıkarılması farklılık göstermektedir. Harcanan kalıp kullanan döküm yöntemlerinde sıvı metalin tamamen katılaşması daha uzun sürelerde gerçekleşirken, kalıcı kalıp kullanan döküm yöntemlerinde bu işlemler daha kısa sürede gerçekleşir. Kalıcı kalıplar tekrar tekrar kullanılabilir ancak harcanan kalıplar her döküm sonrası bozularak içerisinden döküm parça alınır.

2.2.1.7. Temizleme

Özellikle kum kalıp yönteminde olmak üzere, ergimiş metalin kalıpta katılaşmasının akabinde döküm parçaları üzerinde bazı çapaklar görülür. Dökümde çapak oluşması istenmeyen hatalar olduğundan döküm parçaları öncelikle kumalama işlemine tabi

tutulur. Çelik bilya püskürten kumlama makinalarından geçirilerek üzerlerindeki çapaklar temizlenir.

2.2.1.8. Taşlama

Klasik taşlama yöntemiyle parçaların üzerinde bulunan kalıntılar temizlenir (Başar, 2012a).

2.3. Döküm Kumu ve İçeriği Hakkında Genel Bilgiler

2.3.1. Döküm kumunun özellikleri

Hatasız ve kaliteli üretim yapabilmek için; alaşımın içeriği, ergitme ve döküm yöntemi, katılaşmayı kontrol eden soğuma prosesinin yanı sıra kalıplama tekniği ve özellikle kalıp malzemesinin özellikleri oldukça önemlidir. Kalıp malzemesinin asıl amacı parçada olması istenen boşluğun şeklini oluşturmak ve bu şekli, ergimiş metal dökülüp katılaşana kadar koruyabilmektir.

Kalıp malzemesi üç ana bileşenden oluşur:

- İstenen refrakter özelliği sağlayan kum taneleri,
- Bağlayıcı (kum içinde doğal olarak bulunabilir veya sonradan ilave edilebilir)
- Kum tanelerinin birbirine tutunması için bağlayıcı etki gösteren su.

Doğal ve sentetik olmak üzere kalıp kumları iki gruba ayrılır. Doğal kalıp kumları, doğal oranlarında kil içerirler ve doğada bulundukları gibi kullanılırlar. Sadece su ilavesi yapılarak ile bağlanmanın kuvvetlenmesi hedeflenir. İçerisindeki nemi uzun süre koruyabilmesi açısından avantajlıdır ancak özelliklerinin çok değişken yapıda olması dezavantajlarıdır. Doğada bulundukları haliyle düşük kil oranı içeren dolayısıyla bağlayıcı özelliklerini arttırmak maksadıyla bentonit gibi bağlayıcı ve su ilavesi gerektiren kumlara sentetik kumlar denir. Üniform tane boyutu, yüksek

refrakterlik özelliği ve kontrol edilebilir özelliklere sahip olmalarından dolayı avantajlıdır. Kum, 0.05-2 mm boyutlarındaki mineral tanesi olarak adlandırılır. Döküm proseslerinde SiO_2 bileşimindeki kumlar en çok bilinen ve kullanılanlardır. Döküm sektöründe silis kumunun daha çok tercih edilmesinin sebepleri arasında kolay bulunuşu, ucuz olması ve yüksek refrakterlik özelliği göstermesi sayılabilir. Fakat yüksek genleşme özellikleri göstermesinden dolayı boyut toleranslarında hesaba katılma gerekliliği vardır. Silis kumunun yanı sıra tercih edilen diğer kum bileşimi ise zirkondur. Silis kumuna oranla iki kat daha fazla yüksek iletkenlik göstermesi ve düşük genleşmesi başlıca özellikleridir. Bunun yanı sıra en büyük dezavantajı ise silis kumuna oranla iki kat daha fazla yüksek yoğunluğa sahip olmasıdır. Olivin (magnezyum demir silikattır $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$) ve kromit (demir magnezyum kromat- $(\text{Fe, Mg})\text{Cr}_2\text{O}_4$) ise silis ve zirkon haricinde kullanılan diğer kumlardır (Solmaz, 2008). Kalıp kumu türleri Tablo 2.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Kalıp kumu türleri (Solmaz, 2008)

Kum	Kimyasal Formulu	Yoğunluk (kg/m^3)	Sertlik (Mohs)	Renk
Silis	SiO_2	2650	7	Sarı
Zirkon	ZrSiO_4	4700	7.5	Kahverengi
Olivin	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$	3500	7	Yeşil-Sarı
Kromit	$(\text{Fe, Mg})\text{Cr}_2\text{O}_4$	4500	5.5	Siyah

2.3.2. Bileşenler bazında döküm kumu

2.3.2.1. Kum

Döküm endüstrisinde kullanılan kumlar döküm tipine göre farklılık göstermektedir.. Refrakter bir malzeme olan kum döküm kumunun esas bileşenidir (%85-95), ve 1700°C 'ye kadar ergimeden kalabilir. (Başar, 2012a). Bildiğimiz kaya türlerinin ve yer kabuğunun ve %95'ini silika oluşturmaktadır. Silikanın kristobalit, tridimit, ve kuvars olmak üzere üç ana kristalin çeşidi vardır. Özellikleri ise Tablo 2.2.'de verilmiştir. Dane inceliği AFS standartlarına göre tespit edilir ve AFS numarası

olarak adlandırılır. AFS numarası olarak adlandırılan tane büyüklüğü, birim inç (2,54 cm) karedeki elek sayısıdır. AFS numarasının artması kumun daha tane boyutunun incelendiği anlamına gelir. Ayrıca daha az bağlayıcıya ihtiyaç duyulması bakımından yuvarlak dane şekilli kumlar döküm sanayisinde tercih edilir (Solmaz, 2008).

Tablo 2.2. Döküm kumların fiziksel, kimyasal ve teknolojik özellikleri (Solmaz, 2008).

Sinterleşme Sıcaklığı	1500 °C üzerinde
Yanma Kaybı (%)	0,011 - 0,30
Kil Oranı (%)	0,16 - 1,27
Kum Şekli	1,25 - 1,27
Ögölme (%)	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

2.3.2.2. Su

Kalıp kumlarının içindeki nem oranı %2-8 arasında değişiklik göstermektedir. Kalıp kumundaki nemin amacı, kuma plastiklik ve mukavemet kazandırmak, kum tanelerinin birbirine yapışmasını sağlamaktır. Kalıp kumundaki nem "Yeşil" kelimesi ile ifade edilir (Başar, 2012a). Kumun üniform dağılımı döküm işleminin kalitesi açısından önemlidir (Solmaz, 2008).

2.3.2.3. Bağlayıcılar

Kum kalıplarda kullanılan bağlayıcılar cinsleri bakımından organik ve anorganik bağlayıcılar olarak iki ana gruba ayrılır:

Bunun yanı sıra mukavemet kazanma özelliklerine göre 3 farklı sınıfta da incelenirler:

- Donarken mukavemet kazananlar
- Oda ısısında mukavemet kazananlar
- Isıtma yolu ile mukavemet kazananlar

Bağlayıcı kullanılan yöntemler Tablo 2.3.'te verilmiştir (Solmaz, 2008).

Tablo 2.3. Bağlayıcı kullanılan yöntemler (Solmaz, 2008; Hawaman, 2009).

Anorganik Bağlayıcı Yöntemler	Organik Bağlayıcı Yöntemler
Sıvı sertleştiricili sodyum silikat yöntemi	Furan Yöntemi
Toz sertleştiricili sodyum silikat yöntemleri	Pep-set Yöntemi
Bentonit	Soğuk Kutu (Cold Box) Yöntemi
CO₂ Yöntemi	Alkid-ağ Yöntemi
	Fascold Yöntemi

- Anorganik Bağlayıcılar:
- Bentonit (%3-6): Anorganik killeri kalıp kumlarında en çok kullanılan bentonittir. Bileşiminde %85-90 montmorillonit minerali içerir. Ayrıca iyon değiştirme özelliğine sahip çok ince taneli plastik bir kildir. İyon değiştirme özelliği bakımından Ca-bentonit ve Na-bentonit olmak üzere iki sınıfta incelenir.
- CO₂ (%3-4): Kalıbın sertleşmesi için sodyum silikat ya da fenolik resinler ile birlikte CO₂ gazı kullanılır. Bu yöntemin dezavantajı küçük boyutlu kalıpların üretimine uygun olmasıdır. Avantajı ise CO₂ sertleştirme yöntemi ile hem demir döküm hem de demir dışı metallerin dökümü yapılabilmesidir.
- Toz Sertleştiricili sodyum silikat (%4-6): SiO₂Na₂O cam suyuna %4-6 civarında kalsiyum karbür, silisyum tozu, ferrosilis veya silikat bazlı tozlar ilave edilir ve kendi kendine katılaşmaya bırakılır.
- Sıvı sertleştiricili sodyum silikat (%3-4): Bu yöntemde organik esterler sertleştirici olarak kullanılır. Öncelikle ester, silikat ile reaksiyona girerek hidrolize olur. Sonrasında ortaya çıkan asit silika hidrojel oluşturur ve sertleşmeyi sağlar.

- Organik Bağlayıcılar
- Furan: Bağlayıcı ile asit katalizörün teması sonucu oluşan polimer reçine filminin, kuru kum tanelerini sararak birbirine bağlanmasıyla sertleşme gerçekleşir. Orta – büyük boy kalıp üretiminde ve bazen de maça yapımında kullanılır.
- Soğuk kutu: Bu yöntemde kum iki ayrı bağlayıcı ile karıştırıldıktan sonra gaz katalizörü sayesinde pişirilmeden sertleşir. Bu yöntemde solvent içerisinde çözünmüş reçine bulunur. Aktivatör olarak ise izosiyanat içeren bağlayıcı kullanılır. Bitkisel ve aromatik solvent esaslı ikiçeşit cold box yöntemi vardır.
- Pep-set: Bu yöntemde soğuk kutu yöntemine benzer şekilde iki farklı reçine karıştırılır fakat sertleştirme işleminde gaza maruz bırakılmadan havada sertleştirme sağlanır. Genellikle poliizosiyanat ve polibenzenik eter fenolik reçine bağlayıcı olarak kullanılır. Bu yöntemle üretilen maçaların mukavemeti çok fazladır ancak neme karşı çok hassastır.
- Fascold: Bu yöntemde maça kumu karışımı Fascold makinelerinde ani bir reaksiyon sonucu bağ oluşturarak hazırlanır. Sertleşme tamamlanana kadar (maksimum 1 dakika) maça sandığı içerisinde hazırlanır. Sertleşmenin çok hızlı olması nedeniyle seri maça üretimi için oldukça avantajlı bir yöntemdir.
- Alkid-yağ yöntemi: Bu yöntemle kum, kimyasal katkı malzemeleri, sentetik yağ ve bağlayıcı karıştırılır. Polimerizasyon sonucu pişirilmeksizin oda sıcaklığında sertleşme gerçekleşir. Bu yöntem sadece çelik dökümünde kullanılmaktadır.

2.3.2.4. Eklentiler

Kalıp kumu özelliklerini geliştirmek amacıyla çeşitli ilaveler yapılır. Örneğin;

- Sıcak mukavemeti arttırmak için silis tozu ve demir oksit,
- Akışkanlık ve plastiklik özelliğini arttırmak Fuel oil,
- Yağ ve kuru mukavemeti arttırmak için mısır unu,

- Döküm sıcaklığında kum tanelerinin çevresinde gaz filmi oluşturarak birbirine kaynaşmasını engellemek için pulverize kömür kullanılır. Bu sayede kumun yeniden kullanılabilmesine olanak sağlar,
- Isısal kararlılığını arttırması ve yüksek sıcaklıklarda yanarak kumun sıcak mukavemetini düşürmesi maksadıyla odun talaşı,
- Yüzey geriliminin yüksek olması sayesinde sıvı metalin ıslatma özelliğini düşürdüğünden yüzey kalitesini arttırmak maksadıyla grafit tozu kullanılır,
- Yüksek sıcaklıkta kararlılığı artırmak için Perlit alumina silikat minerali olan perlit kullanılır (Solmaz, 2008).

2.4. Türkiye Ve Dünyada Döküm Sektörü

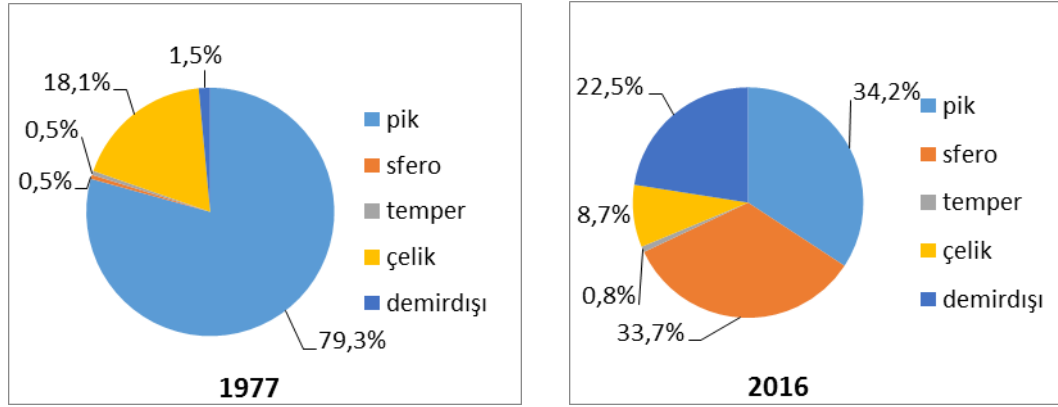
2016 yılı verilerine göre, Türkiye'de döküm sektörü faaliyet gösteren 927 işletme bulunmaktadır. 2016 yılında demir-çelik döküm sektöründe 544 kuruluş, demir dışı döküm sektöründe ise 383 kuruluş faaliyetini sürdürmüştür. Türk döküm sektörünün gerek Avrupa'da, gerekse Dünya'da önemli bir yeri vardır. Türk döküm sanayi, güçlü iç talebe ve ihracat kapasitesine bağlı olarak genişleme aşamasındadır (Tüdoksad, 2017).

1960 - 2005 yılları arasında dökümhane üretimi % 700'den fazla artmıştır. Toplam 161.000 tonluk üretim hacmi 1995 yılında 764.350 tona ulaşmış ve 2005 yılında 1.121.200 ton döküm üretimi ile milyon tonluk eşik sınırını aşmıştır. Üretim, 2007 yılında 1.316.500 ton ile en yüksek seviyesine ulaşmıştır. 2009 yılında küresel ekonomik krizden etkilenerek 1.030.000 tona düşen üretim miktarı 2010 yılında % 26'lık büyümeyle 1.291.000 tona ulaşmıştır. Türk döküm sektörü son 8 yılda; her yıl artan üretim miktarıyla, 2016 yılında 1.898.500 ton üretim hacmine ulaşmıştır (Tüdoksad, 2017). Türkiye'de yıllara göre döküm üretim miktarları Tablo 2.4.'te verilmiştir.

Tablo 2.4. Türkiye'de yıllara göre döküm üretim miktarları (Tüdoksad, 2017).

Yıl	Pik	Sfero	Temper	Çelik	Demir Dışı	Toplam
2000	690.000	130.000	7000	98.000	40.000	965.000
2001	615.000	132.000	7.800	107.000	44.000	905.000
2002	620.000	139.000	7.500	110.000	45.000	921.000
2003	592.000	187.000	6.000	112.000	58.000	955.000
2004	475.000	308.000	6.000	121.000	72.000	982.000
2005	567.000	327.000	6.500	125.000	95.000	1.121.200
2006	586.000	368.000	6.500	132.000	117.000	1.209.500
2007	623.000	394.000	6.500.	144.000	149.000	1.316.000
2008	565.000	400.000	5.000	140.000	155.000	1.265.000
2009	456.000	352.000	2.000	98.000	122.000	1.030.000
2010	591.000	423.000	4.700	124.000	149.000	1.291.000
2011	625.000	480.000	5.500	152.000	170.000	1.433.000
2012	545.000	502.000	8.000	140.000	185.000	1.445.000
2013	600.000	500.000	8.000	135.000	300.000	1.543.000
2014	650.000	600.000	10.000	140.000	350.000	1.750.000
2015	675.000	630.000	15.000	150.000	380.000	1.850.000
2016	650.000	640.000	15.500	166.000	427.000	1.898.00

AFS tarafından günümüze kadar yayınlanmış Dünya döküm üretimi istatistiklerinden derlenen, son 40 yılın döküm üretimi verileri Şekil 2.1.'de yer almaktadır. Grafikte de görüldüğü gibi, pik dökümü hala en yüksek tonaja sahip olmasına rağmen yaklaşık yüzde 80 oranından yüzde 35'in de altına inmiştir. Buna karşılık sfero ve demir dışı (alüminyum) döküm parça üretiminde net bir yükseliş gözlenmektedir.



Şekil 2.1. Türkiye'deki döküm üretiminin son 40 yılın döküm türlerine göre dağılımı (AFS)

AFS'nin 51. Dünya Döküm Üretimi Sayımı'na göre, 2016 yılında Türkiye'nin döküm sanayi üretimi dünya üretiminin % 1,81'ini oluşturmaktadır. Buna göre, Türkiye'nin küresel sıralaması 11'dir ve Türkiye Avrupa Birliği bölgesinde 3. sıradadır. Dünya döküm sektörü verileri Tablo 2.5.' te, 2016 yılı Dünya döküm üretim miktarlarının metaller ve ülkelere göre dağılımı Tablo 2.6.'da verilmiştir.

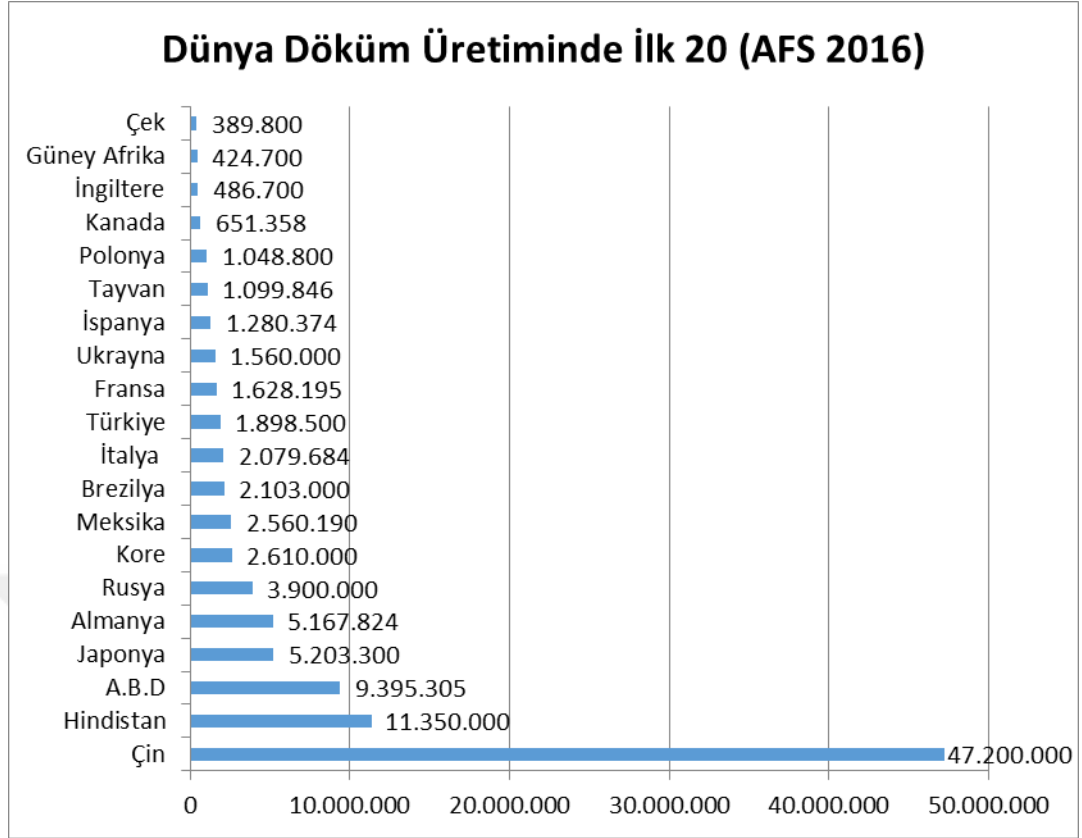
Tablo 2.5. Dünya döküm sektörü verileri (Tüdoksad, 2017)

Yıl	Üretim Miktarı (ton)
2005	85.159.732
2006	92.515.626
2007	94.919.007
2008	93.449.270
2009	80.343.064
2010	91.673.839
2011	98.593.122
2012	100.915.681
2013	103.229.774
2014	103.641.518
2015	104.129.257
2016	104.378.931

Tablo 2.6. 2016 yılı dünya döküm üretim miktarlarının metallere ve ülkelere göre dağılımı (Ton) (Tüdoksad, 2017)

Ülke	Pik	Sfero ve Temper	Çelik	Aluminyum	Bakır, Zamak Diğer	Mg, ve	Toplam
A.B.D	3.210.350	2.531.485	1.245.700	1.686.230	721.450		9.395.305
Almanya	2.234.900	1.509.900	174.20	1.096.707	152.117		5.167.824
Avusturya	42.362	101.770	11.284	140.840	18.603		314.859
Belçika	26.900	7.200	17.400	783	0		52.283
Bosna Hersek	17.500	9.100	1.350	10.500	0		38.450
Brezilya	1.257.825	515.875	164.20	136.000	29.100		2.103.000
Çek	158.000	51.800	61.000	98.000	21.000		389.800
Çin	20.350.000	13.800.000	5.100.0	6.900.000	1.050.000		47.200.000
Danimarka	20.400	52.500	-	3.117	907		76.924
Finlandiya	15.300	33.500	8.400	2.114	2.716		62.030
Fransa	531.500	675.200	57.000	324.102	40.393		1.628.195
Güney Afrika	145.000	163.200	85.000	21.000	7.500		424.700
Hırvatistan	31.100	11.800	50	25.174	261		68.385
Hindistan	7.890.000	1.230.000	1.010.0	1.220.000	0		11.350.000
İngiltere	125.800	178.500	40.700	123.200	18.500		486.700
İspanya	379.900	671.400	65.600	138.591	24.883		1.280.374
İsveç	159.600	49.500	21.215	43.089	16.947		290.351
İsviçre	35.400	22.800	1.100	12.902	3.297		75.499
İtalya	714.200	381.200	57.000	782.691	144.593		2.079.684
Japonya	2.224.000	1.342.300	150.10	1.380.570	106.330		5.203.300
Kanada	330.841	-	90.091	216.189	14.237		651.358
Kore	1.073.500	710.800	163.10	623.200	39.400		2.610.000
Macaristan	21.700	57.900	3.800	118.246	5.180		206.826
Meksika	815.500	375.800	330.79	735.300	302.800		2.560.190
Norveç	10.900	19.200	-	6.373	0		36.473
Pakistan	142.000	24.540	42.600	16.300	14.600		240.040
Polonya	484.000	166.200	50.500	331.500	16.600		1.048.800
Portekiz	39.400	93.400	7.800	32.400	16.000		189.000
Romanya	20.565	4.811	6.893	82.057	8.842		123.168
Rusya	2.000.000	400.000	800.00	450.000	250.000		3.900.000
Sırbistan	26.386	8.220	12.125	10.120	2.053		58.886
Slovenya	74.235	34.086	31.344	47.584	4.532		191.781
Tayland	72.400	58.300	29.800	105.400	50.500		316.400
Tayvan	510.425	187.711	66.028	303.020	32.662		1.099.846
Türkiye	650.000	655.000	166.000	370.000	57.500		1.898.500
Ukrayna	400.000	150.000	580.000	280.000	150.000		1.560.000

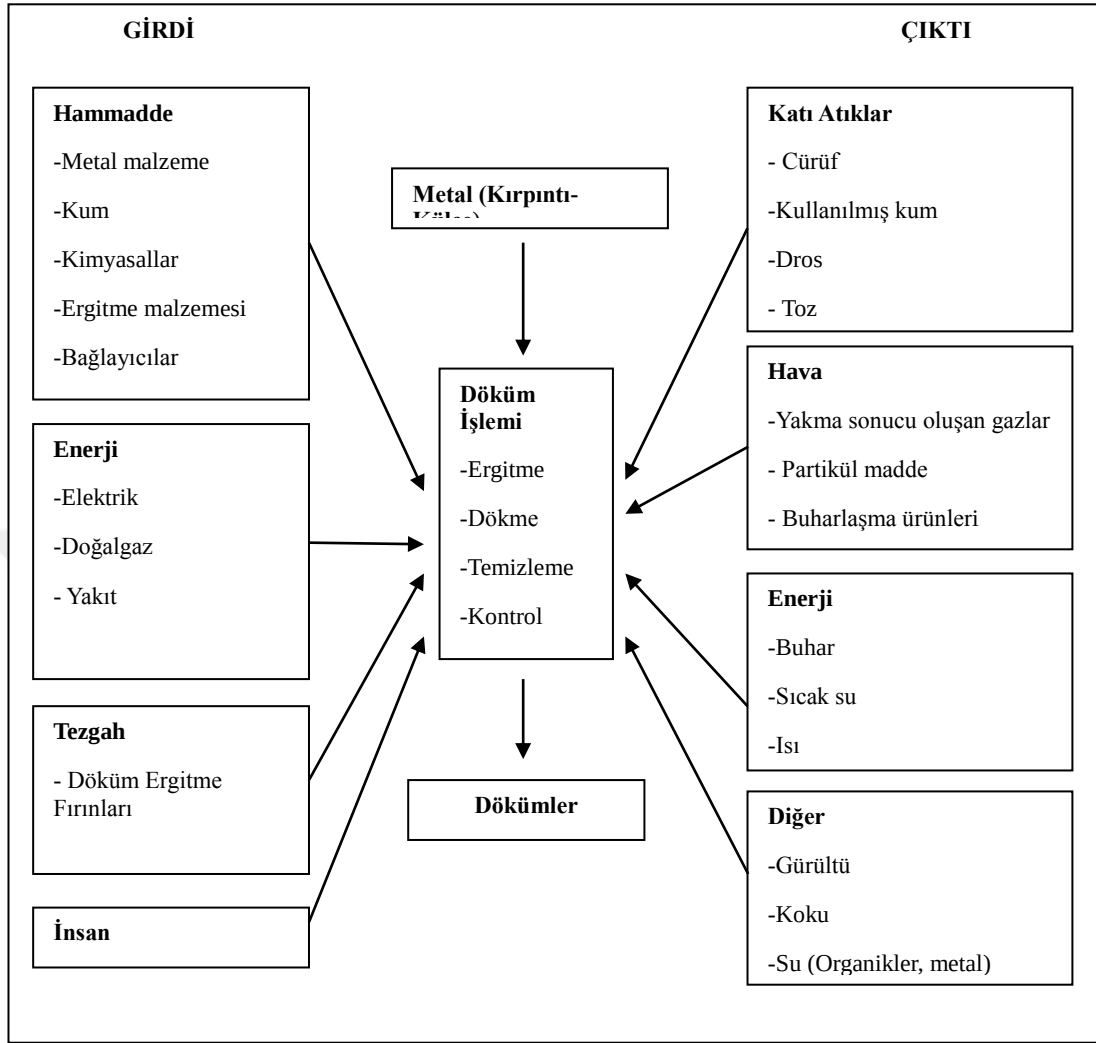
2015 yılında 104.1 milyon ton olan dünya döküm üretimi 2016 yılında küçük bir artışla 104.4 milyon tona ulaşmıştır. Dünya döküm üretimi 2015 yılında, 2014 yılına göre yüzde 0,4 oranında büyüme gösterirken, 2016 yılında AFS tarafından sadece yüzde 0,2'lik bir artış tespit edilmiştir. AFS 2016 verilerine göre Dünya döküm üretiminde ilk yirmi ülke Şekil 2.2.'de verilmiştir.



Şekil 2.2. AFS 2016 verilerine göre Dünya döküm üretiminde ilk 20 ülke

2.5. Döküm Sektörünün Çevresel Profili

Döküm sektöründen kaynaklanan çevre sorunlarının katı, sıvı ve gaz atıklar ile gürültü kirliliği olduğu söylenebilir. Döküm hanelerde oluşan atık döküm kumları, içerdikleri kirlilikler açısından genellikle inorganik bazlı karakterlidir. Döküm sektörünün temel girdi ve çıktıları Şekil 2.3.'te verilmiştir (Başar, 2012a).



Şekil 2.3. Döküm Sektörünün Temel Girdi ve Çıktıları (Başar, 2012a).

Genel olarak 1 ton döküm alabilmek için yaklaşık 4-5 ton kum gerekir. Bu miktar dökülen metal cinsi, parça büyüklüğü ve kalıplama tekniğine göre değişir. Bir ton döküm malzeme üretiminde ~0.6-0.8 ton arası atık ortaya çıkmakta olup 0.4-0.6 tonunu kullanılmış kumlar oluşturmaktadır. Örneğin; 2011 yılı üretim rakamlarına göre Türkiye'de, 1 433 050 ton döküm üretimi yapılmış, bunun sonucunda tahmini 450 000 ton atık oluşmuştur. Oluşan miktarın yaklaşık %10'u cüruf, %15'i toz-çamur %65'i ADK ve %10'u boya, taş, refrakter, yağ, varil vb. atıklardır. (Başar, 2012b).

Döküm sanayinde kullanılan döküm kumları birkaç kullanımdan sonra kalitelerini kaybederek atık haline gelmekte, düzenli depolama yöntemi ile bertaraf edilen atık döküm kumları, döküm endüstrisine ilave bir maliyet oluşturmaktadır. Her sene

binlerce ton oluşan döküm kumu depolama alanlarının büyük bir kısmını doldurmaktadır. Ayrıca döküm kumunun barındırdığı metallere dolayı, yer altı suyunda metal sızıntısı da meydana gelebilmektedir. Bundan dolayı atık döküm kumunun stabilize edilmesi ve tekrar kullanımının araştırılması gerekmektedir.

2.6. Atık Döküm Kumlarının Yeniden Kullanımına Yönelik Çalışmalar

Dünya'daki döküm üretim hacmi göz önünde bulundurulduğunda artan döküm kumu bertaraf maliyeti ve depolama alanlarının kısıtlılığı atık döküm kumlarının yeniden kullanımının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Atık döküm kumu dökümhanelerin temel yan ürünüdür. ADK'da bulunan metaller ve olumsuz kamu algısı nedeniyle, bu malzeme genellikle atık malzeme olarak düzenli depolama sahasına atılır. Bununla birlikte ADK, inşaat mühendisliği altyapı projelerinde inşaat malzemesi olarak yeniden kullanılabilir. ADK'nu sürdürülebilir bir şekilde kullanmak için, bu malzemenin mühendislik özelliklerinin uygun şekilde değerlendirilmesi ve yerel gereksinimlere göre değerlendirilmesi gerekir. Bu amaç doğrultusunda literatürde pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda ADK'nun dolgularda dolgu malzemesi olarak ve boru yataklama uygulamalarında tatmin edici bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Kimyasal bileşim ve sızıntı analizi gibi çevresel test sonuçlarının karşılaştırılması, yerel yönetimlerin gereklilikleri ile bu malzemenin uygulanmasında yol dolguları ve boru yatakları gibi uygulamalarda özel bir tehlike olmadığını belirtmiştir. (Arulrajah ve ark., 2007).

Torres ve ark. (2017); Atık döküm kumu ve Portland çimentosu içeren betonun mekanik özelliklerini inceledikleri bu çalışmada ADK'nın betondaki kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu çalışma, Portland Çimento Betonu'nda(PCC) kullanım için dökümhane atıklarını, işleme süresini / maliyetini düşürerek ve döküm endüstrisi tarafından üretilen tüm atıkları kullanarak geri dönüşüm oranını arttırmak hedeflemiştir. Sonuçlar, genel dökümhanenin kaba, ince veya doğal agregatın kütle ile değiştirilmesiyle birleştirildiği zaman, PCC'nin mekanik performansı üzerinde bireysel değiştirme veya % 20 ile % 30'a arasında bir farklılık olmadığını

göstermiştir. Bu sonuç sadece yıllık olarak geri dönüştürülen ADK miktarını arttırmak için olası bir yol göstermekle kalmaz, aynı zamanda PCC için bakır agregalara olan talebi de azaltır.

Alonso-Santurde ve ark. (2011); Kil tuğlalarda ADK'nun geri dönüşümü fizibilitesi, tabii kum baz alınarak yapılan deneysel çalışmalarda ve endüstriyel denemelerde değerlendirilmiştir. Ham materyallere ağırlıkça % 35 oranına kadar ADK ilave edilerek numuneler elde edilmiştir. Hazırlanan karışımlarda X-ışını floresansı, X-ışını kırınımı, dane boyutu dağılımı ve liç gibi özellikleri araştırmışlardır. Ekstrüzyon, kurutma ve ateşleme davranışı (plastisite, kurutma hassasiyeti, mekanik mukavemet, hacim yoğunluğu, su emme ve büzülme) belirlenmiştir. Mikroyapı, faz bileşimi, dayanıklılık ve liç (EN 12457, granüler malzemeler, son kullanım aşaması, Avrupa Atık Düzenleme Direktifi; NEN 7345, yekpare malzemeler, kullanım ömrü aşaması, Hollanda Yapı Malzemesi Kararı) optimum sıcaklıktaki ateşlemede üretilen tuğlalar için değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar, ADK'nun kil tuğlalarda geri dönüştürülebileceğini göstermektedir. ADK % 30'a varan oranlarda kil tuğlaların üretiminde kullanılmasının teknolojik bir dezavantajı bulunmamakla birlikte ürün fizibilitesi hammaddelerin özelliklerine bağlıdır. ADK'daki tehlikeli öğelerin çoğu, ateşleme sırasında inertleştirilir ve sızıntılardaki tehlikeli bileşenlerin konsantrasyonları, krom ve kurşun hariç standart eşğin altındadır. Bununla birlikte, kullanım ömürleri boyunca çevresel riskleri ihmal edilebilir olarak kabul edilebilir.

Braganca ve ark. (2006); yaptıkları çalışmada beyaz eşyaların silika yerine hammadde olarak dökme demir kalıplardan ve feldispat yerine geri dönüştürülmüş camdan kum kullanılarak üretim fizibilitesini araştırmışlardır. Formülasyonlar % 50'si kil olacak şekilde ADK ve cam atığı kullanılarak hazırlanmıştır. Seramik gövdeler farklı sıcaklıklarda (1100 ila 1300 °C arasında) presleme ve ateşleme ile oluşturulmuştur. Örnekler, ateşlemeden önce yeşil yoğunluk açısından karakterize edilmiş; ateşlemeden sonra bükülme mukavemeti, doğrusal büzülme ve su emme değerleri ölçülmüştür. Mikroyapı, taramalı elektron mikroskobu ile belirlenmiştir. Bu geri dönüşüm sürecinin olası çevresel etkileri de, Brezilya standartlarına göre çözünürlük ve liç testleri ile değerlendirilmiştir. Ateşleme işlemi sırasında gaz

emisy onları da analiz edilmiştir. Sonuçlar, bu tür alternatif hammaddeler kullanılarak üç eksenli seramiğin üretil ebildiğini göstermiştir.

Tarek ve ark.(2002); ADK ile inşa edilen bariyer tabakalarının sahadaki hidrolik iletkenliklerinin belirlenmesi için bir saha çalışması yapmışlardır. ADK ile üç numune yapılmıştır. Sahadaki hidrolik iletkenlik çift halkalı infiltrometreler, iki kademeli sondaj deliği permeametreleri ve büyük blok numuneleri kullanılarak ölçülmüştür. Kış aylarında hava koşullarına maruz kaldıktan sonra donma çözülme döngüsüne ve yaz havalarının kurumaya neden olduğu test alanları üzerinde ek saha hidrolik iletkenlik testleri yapılmıştır. Sahadaki hidrolik iletkenlik verileri, bentonit içeriği ve laboratuvar da gözlemlenen likit limitleri ile aynı eğilimleri izlenmiştir. Bentonit içeriği ağırlıkça % 6'dan fazla olduğ und a, plastiklik endeksi 3'ten büyüktür veya likit limit değeri 20'den büyüktür, hidrolik iletkenlik 1027 cm / s'den azdır. Kış mevsiminden sonra yapılan testler, test pedlerinin derinliğ e bağlı olarak altı adet donma-çözülme döngüsüne maruz kalmasına rağmen hidrolik iletkenliğ inin kış havasından etkilenmediğini göstermiştir. Benzer şekilde, test pedlerinin yaz havalarına maruz bırakılmasının sahadaki hidrolik iletkenlik üzerinde ölçülebilir bir etkisi olmamıştır. Saha çalışması, ADK'nun hidrolik bariyer malzemesi olarak kullanılabilen yararlı bir endüstriyel yan ürün olduğunu doğrulamıştır.

Gedik ve ark.(2008); yaptıkları çalışmada büyük miktarda atık döküm kumunun karayolu malzemesi olarak kullanılab ilirliğini araştırmışlardır. Atık döküm kumları üretim tekniği ve şekline göre sınıflara ayrılarak ve indeks özellikleri tespit edilmiştir. Söz konusu malzeme çeşitli kompaksiyon metodları kullanılarak sıkıştırılmış tır. Atık döküm kumu ağırlıkça %2, %4, %8 ve %10 oranında çimento ve kireçle ayrı ayrı stabilize edilip iyileştirilmiştir. Stabilize edilen numuneler 7-gün, 14-gün, 28-gün, 3-ay ve 6-ay süre boyunca nem odasında kürlenmiştir. Hazırlanan numunelere stabilizasyonun etkisini araştırmak için 3 farklı deney (Ultrasyon Dalga Hızı Testi, Serbest Basınç Mukavamet deneyi ve Taşıma Oranı deneyi) yapılmıştır. Deney sonuçlarının ışığında atık döküm kumlarının klasik yol malzemeleriyle ekonomik karşılaştırılması yapılmış ve amaca uygunluğu irdelenmiştir.

Lin ve ark. (2017); arıtma çamuru içeren kiremitlere atık cam ve atık döküm kumu ilavelerinin etkilerini incelemişlerdir. Arıtılmış kiremitleri üretmek için arıtma çamuru uygulamak, bertaraf problemlerinin çözülmesinde umut verici bir geri dönüşüm teknolojisidir. Bununla birlikte, bu tür geri kazanılmış karoların performansı, orijinal seramik karolarinkinden daha düşüktür. Birçok araştırmacı, bu nedenle geri kazanılmış karo özelliklerini geliştirmek için çeşitli endüstriyel yan ürünleri eklemeyi denemişlerdir. Bu çalışmada, arıtma çamuru ile geri kazanılmış karoların fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla atık cam ve atık döküm kumu içeren çok sayıda malzeme eklenmiştir. Çeşitli kil, ADK, atık cam ve arıtma çamuru kombinasyonlarına sahip örnekler 1000 C derece, 1050 C derece ve 1100 C derece sıcaklıkta fırınlanmıştır. Sonrasında numuneler üzerinde bir dizi test yapılmıştır. Test sonuçları atık camın bükülme mukavemeti, su emme ve ateşleme üzerindeki ağırlık kaybı üzerinde olumlu etkileri olduğunu gösterirken, ADK büzülmeyi azaltmada en fazla katkıyı sağlarken, yüksek fırınlama ısısında fazla miktarda ilave edilmesi durumunda karo bükülme mukavemetini azaltabilmiştir. Bu çalışma, ADK'nun % 10'dan % 15'e, atık camın % 15'ten % 20'ye, arıtma çamurunun 1000 C derece ile 1050 C derece arasındaki bir sıcaklıkta % 10'luk bir oranlamanın uygun bir performansa sahip kaliteli geri kazanılmış karolar elde edilebileceğini göstermiştir.

Solmaz (2008); çalışmasında döküm kumunun geçirimsiz perde yapılarak kullanımını hedeflemiştir. Bu amaçla, ülkemizdeki döküm sanayi kuruluşlarından alınan 15 ayrı atık döküm kumu (1 tanesi reçineli 14 tanesi bentonitli) numunesinin indeks özellikleri, kompaksiyon özellikleri, hidrolik iletkenlik ve bentonit miktarı değerleri belirlenmiş ve sızıntı sularında ağır metal konsantrasyonlarının belirlenmesi amacıyla AAS ve ICP analizleri yapılmıştır. Bunun yanı sıra 4 ayrı bentonit numunesinin indeks özellikleri belirlenmiştir. Yapılan analiz sonuçları, evsel atık depolama sahalarında ADK'nun geçirimsizlik amacı ile kullanılabileceğini göstermektedir.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Atık Döküm Kumu

Çalışmada, Sakarya ilinde faaliyet gösteren iki farklı dökümhaneden sırasıyla sertleştirici (S) ve CO₂ (C) işlemleri uygulanmış alkali fenolik inorganik bağlı atık döküm kumları temin edilmiştir. Sertleştirici yönteminde ester bazlı UNİSER serisi sertleştiriciler ile sertleşen alkali fenolik reçine kullanılmıştır. Sertleşme esnasında herhangi bir gazlama veya ısıya ihtiyaç duyulmamıştır. Bu yöntemde 100 kg kuma 5 kg reçine ve 400 ml sertleştirici ilave edilmiştir. Kullanılan reçinenin ticari ismi UNİSET A23P Havada Sertleşen Alkali Fenolik Reçinedir. Sertleştiricinin ticari ismi ise UNİSER AC29 UNİSET A Serisi Reçine Sertleştiricisidir. CO₂ işleminde, CO₂ ile sertleşen alkali fenolik soğuk kutu reçine kullanılmış ve karbondioksit ile sertleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde 100 kg kuma 3 kg reçine ilave edilmiştir. Yine 100 kg kum için yaklaşık 3 kg karbondioksit gazı uygulanmıştır. Kullanılan reçinenin ticari ismi UNİFEN B17 Karbondioksitle Sertleşen Alkali Fenolik Soğuk Kutu Reçinedir.

Her iki yöntemde de kurutma fırınlarından çıkan kumlar kullanılmış ve nem oranı sıfır kabul edilmiştir. Sadece sertleştirici kullanılan yöntemde kum kalıplarının hazırlanmasının uzun süreceği öngörüldüğü zamanlarda hazırlanan kum karışımına su ilave edilmiştir ancak bizim almış olduğumuz döküm kumu karışımında su ilavesi yapılmamıştır. CO₂ yönteminde de su ilavesi yapılmamıştır. Bunların haricinde kömür tozu veya bentonit ilavesi her iki yöntemde de yapılmamıştır. Kullanılmamış döküm kumu örneği Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kullanılmamış döküm kumu

Çalışmada kullanılan döküm kumları, temiz kumların metal çelik parçaların üretiminde yüksek sıcaklıklarda kalıplanmasından sonra oluşan demir, çelik ve metal döküm tesislerinin atıklarıdır. Bu atık döküm kumları yapılan dökümün cinsine göre farklı özellikte olabilmektedir. Atık döküm kumları, kimyasal ve fiziksel özelliklerini kaybetmeden kullanılmışlardır. Deneylerde kullanılan atık döküm kumlarının her ikisi de karbon içeriği nedeniyle siyah renktedir ve 0-1 mm dane büyüklüğüne sahiptir.

Sertleştirici (S1) ve CO₂ (C1) işlem kumlarının bileşimi Tablo 3.1.'de verilmiştir. % 100 CO₂ ve sertleştirici atık döküm kumları Şekil 3.2. ve Şekil 3.3.'te gösterilmiştir.

S: Kum (100 kg) + alkali fenolik reçine (5 kg) + sertleştirici (400 ml)

C: Kum (100 kg) + alkali fenolik reçine (3 kg) + CO₂ (3 kg)

Tablo 3.1. Sertleştirici (S1) ve CO₂ (C1) işlem kumlarının bileşimi

Bileşen	S1	C1
Silikat, %	96.00	97.00
Su, %	2.00	1.00
Reçine, %	1.00	1.00
Diğer bileşenler, %	1.00	1.00

Şekil 3.2. Atık döküm kumu (CO₂)

Şekil 3.3. Atık döküm kumu (Sertleştirici)

Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (2010) Ek-2’de belirtilen parametrelere yönelik yapılan testler sonucunda, atık döküm kumları tehlikeli olmayan atık olarak sınıflandırılmıştır. Analiz sonuçları Tablo 3.2.’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Atık döküm kumlarına ait analiz sonuçları

Analiz Parametreleri	Analiz Metodu	Birim	Analiz Sonucu (C1)	Analiz Sonucu (S1)	ADDDY Ek-2 III. Sınıf Depolama Tesisleri İçin Sınır Değerler
Fenol İndeksi	TS 6227 ISO 6479	mg/L	<0,1	<0,1	0,1
Mineral Yağlar	TS EN 14039	mg/Kg	25,43	31,27	500
BTEX	EPA 8015 D	mg/Kg	<0,25	<0,25	6
Florür	SM 4110 B	mg/L	<0,5	<0,5	1
Klorür	SM 4110 B	mg/L	5,89	7,03	80
Sülfat	SM 4110 B	mg/L	<10	<10	100
Antimon (Sb)	EPA 200.7	mg/L	<0,005	<0,005	0,006
Arsenik(As)	EPA 200.7	mg/L	<0,1	<0,1	0,05
Bakır (Cu)	EPA 200.7	mg/L	<0,1	<0,1	0,2
Baryum (Ba)	EPA 200.7	mg/L	<0,1	<0,1	2
Cıva (Hg)	EPA 200.7	mg/L	<0,01	<0,01	0,01
Çinko (Zn)	EPA 200.7	mg/L	<0,025	<0,025	0,4
Kadmiyum (Cd)	EPA 200.7	mg/L	<0,001	<0,001	0,004
Toplam Krom (Cr)	EPA 200.7	mg/L	<0,01	<0,01	0,05
Kurşun (Pb)	EPA 200.7	mg/L	<0,01	<0,01	0,05
Molibden (Mo)	EPA 200.7	mg/L	<0,01	<0,01	0,05
Nikel (Ni)	EPA 200.7	mg/L	<0,01	<0,01	0,04
Selenyum (Se)	EPA 200.7	mg/L	<0,01	<0,01	0,01
Kızdırma Kaybı LOI	TS EN 12879	mg/L	<1	<1	-
pH	SM 4500 H B	%	8,89	7,52	-
Poliklorlubifeniller	EPA 8082 A	mg/Kg	<0,036	<0,034	1
Toplam Çözünen Katı	SM 2540	mg/L	42	49	400
Çözülmüş Organik Karbon	TS 8195 EN 1484	mg/L	7,42	8,52	50
Toplam Organik Karbon	TS 12089 EN 13137	%	2,04	2,63	3

3.2. Arıtma Çamuru

Çalışmada kullanılan evsel nitelikli arıtma çamuru, Adapazarı kent merkezi atıksuları ile ön arıtıma tabi tutulmuş ve limit değerleri sağlamış endüstriyel atıksuların arıtımını sağlayan Adapazarı Büyükşehir Belediyesi'ne ait Karaman Evsel Atıksu Arıtma Tesisi'nden temin edilmiştir. Arıtma tesisi uzun havalandırmalı biyolojik arıtma tesisi olmakla birlikte tesise günde yaklaşık 100 bin m³ atıksu girmekte ve arıtım işlemi neticesinde günlük yaklaşık olarak 100 ton KM arıtma çamuru oluşmaktadır. Sistem arıtma tipi açısından uzun havalandırmalı aktif çamur sistemi olduğundan arıtmadan çıkan çamur B sınıfı kategorisindedir. Arıtma çamuru tarımsal amaçlı bertarafta risk oluşturmayacak şekilde limit değerleri sağlamasının yanı sıra içerdiği ağır metal seviyeleri bakımından da tarımsal arazide uygulanmasında bir sakınca bulunmamaktadır. Bunu kanıtlar şekilde çalışmada kullanılan arıtma çamurunun ağır metal içeriği hem Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (2005) tarafından hem de Avrupa Birliği (1986) ve USEPA (2002) tarafından önerilen arıtma çamurlarının toprakta uygulanmasına dair yönetmeliklerdeki sınır değerlerden çok daha düşük bir düzeyde elde edilmiş bu sayede tehlikeli olmayan atık sınıfına girmiştir. Toprak Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'ne göre toprakta izin verilen ağır metal sınır değerleri Tablo 3.3.'te verilmiştir. Deneylerde kullanılan arıtma çamurunun kimyasal ve fizikokimyasal özellikleri Tablo 3.4.'te belirtilmiştir.

Tablo 3.3. Toprak Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'ne göre toprakta izin verilen ağır metal sınır değerleri (TKKY, 2005)

Ağır metal	pH 5-6 mg kg ⁻¹ KM	pH>6 mg kg ⁻¹ KM
Kurşun	50 ²	300 ²
Kadmiyum	1 ²	3 ²
Krom	100 ²	100 ²
Bakır ¹	50 ²	140 ²
Nikel ¹	30 ²	75 ²
Çinko ¹	150 ²	300 ²
Civa	1 ²	1,5 ²

1 pH değeri 7'den büyük ise Bakanlık, sınır değerleri %50'ye kadar artırabilir

2 Yem bitkileri yetiştirilen alanlarda çevre ve insan sağlığına zararlı olmadığı bilimsel çalışmalarla kanıtlandığı durumlarda, bu sınırların aşılmasına izin verilebilir.

Tablo 3.4. Deneylerde kullanılan arıtma çamurunun kimyasal ve fizikokimyasal özellikleri

Parametreler	Ortalama
Kuru madde (%)	18
pH	7.1
İletkenlik ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	1978
Organik madde (%)	55
Kjeldahl azotu (%)	3.34
Fosfor (%)	3,06
Potasyum (%)	0,09
Cd (mg kg ⁻¹)	3,8
Cr (mg kg ⁻¹)	251
Cu (mg kg ⁻¹)	21
Ni (mg kg ⁻¹)	84
Pb (mg kg ⁻¹)	39
Zn (mg kg ⁻¹)	1574

3.3. Numunelerin Hazırlanması

Numuneler; atık döküm kumlarının %75, %80, %85, %90, %95 ve %100 oranlarında arıtma çamurlarıyla çoklu malzeme şeklinde hacimsel olarak karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Hazırlanan CO₂ ve sertleştirici atık döküm kumu numuneleri Şekil 3.4. ve Şekil 3.5.'te gösterilmiştir.

Hazırlanan örnekler;

S1: %100 sertleştirici kum

S2: %95 sertleştirici kum + %5 çamur

S3: %90 sertleştirici kum + %10 çamur

S4: %85 sertleştirici kum + %15 çamur

S5: %80 sertleştirici kum + %20 çamur

S6: %75 sertleştirici kum + %25 çamur

C1: %100 CO₂ kum

C2: %95 CO₂ kum + %5 çamur

C3: %90 CO₂ kum + %10 çamur

C4: %85 CO₂ kum + %15 çamur

C5: %80 CO₂ kum + %20 çamur

C6: %75 CO₂ kum + %25 çamur şeklinde etiketlenmiştir.



Şekil 3.4. %100 CO₂ Atık döküm kumu



Şekil 3.5. Hazırlanan numuneler

Katı atık depolama sahasında dökümhane atıklarının ve arıtma çamurunun yararlı fraksiyonlarını bulmak amacıyla hazırlanan döküm kumu bazlı numunelerin permeabilite, sıkıştırma özellikleri, kayma mukavemeti ve ödometre testi yanında, dane boyut dağılımı, özgül ağırlığı ve kıvam limitleri gibi indeks özellikleri ile mekanik, sızma ve mikro yapısal özellikleri araştırılmıştır.

3.4. İndeks Özellikleri

İndeks deneyleri her bir numune için dane boyutu dağılımı, özgül ağırlık ve kıvam limit testlerini içermektedir. Likit limit (LL), plastik limit (PL) ve plastisite indeksini (IP) içeren kıvam limitleri ASTM D 4318 “Atterberg Limit” testine göre yapılmış ve numuneler non-plastik olarak belirlenmiştir. Atterberg testinin amacı, farklı su

muhtevalarında zeminin kıvamına ilişkin değerlendirme yapmaktadır. Bu sebeple reçine içeriğini aktive etmek için tüm numuneler nem haznesinde en uygun nem içeriğinde bir hafta boyunca tutulmuştur. Ayrıca, reçinenin su ile reaksiyona girmesi sonucu şişme potansiyelini kontrol etmek için, numunelerdeki su içeriği günlük olarak kontrol edilmiştir. Likit ve plastik limit deneylerinde numuneler hidrasyona tabi tutulmuşlardır. Ancak ASTM D 4318 prosedürünün tek sapması, hidrasyon periyodudur. Bunun nedeni, numunelerin döküm işleminden geçmesi sebebiyle su muhtevalarının çok düşük olmasıdır. Kleven (1998) 'in önerilerine dayanarak numuneler Cassagrande deney sistemi vasıtasıyla standartlarda 16 saat olarak alınan süre, yapılan deneylerde 24 saat olarak uygulanmıştır (Goodhue ve ark. 2001; Dungan ve Dees 2009; Gürkan ve Çoruh, 2012; Guney ve diğerleri, 2006, Abichou ve arkadaşları, 2000; Abichou ve arkadaşları, 2002; Abichou ve arkadaşları, 1998; Javed, 1994). Sertleştirici ve CO₂ işlem kumlarının zemin indeks özellikleri Tablo 3.5.'de verilmiştir.

Tablo 3.5. Sertleştirici ve CO₂ işlem kumlarının zemin indeks özellikleri

İndeks	S1	C1
Özgül ağırlık	2.68	2.70
Kuru birim hacim ağırlık, gr/cm ³	1.666	1.589
Optimum su içeriği, %	16	22
>2 mm (çakıl), %	0	0
0.074-2.00 mm (kum), %	99.6	99.9
<0.075 mm (silt ve kil), %	0.4	0.1
Plastisite	Non-plastik	Non-plastik

Dane boyu dağılımı (zemin sınıflandırması), ASTM D 422 sınıflandırma deneyine göre elek analizi ve hidrometre deneyleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dane çapı ve dağılımı, zemin özelliklerinin belirlenmesinde ve kirleticilerin bir yerden başka bir yere taşınımını etkileyen önemli bir faktör olup numunelerin sınıflandırılabilmesi için her bir boyut aralığının nispi oranlarının tespitine dayanır. Hazırlanan tüm numuneler, dane boyutu dağılımı analizinden bir hafta önce suya batırılmıştır. Her bir karışım dane çapı analizine tabi tutulmuştur. Tüm numuneler 200 nolu elekten geçirilerek No.200 elekten geçen kısım ince daneli malzeme, elek üzerinde kalan malzeme ise iri daneli malzeme olarak sınıflandırılmıştır. Elekten geçen kısım

hidrometre analizi için yıkanmıştır (Abichou ve arkadaşları, 1998; Abichou ve arkadaşları, 2000; Goodhue ve ark. 2001; Abichou ve arkadaşları, 2002; Guney ve arkadaşları, 2006; Dungan ve Dees 2009; Gürkan ve Çoruh 2012). Döküm kumlarının dane boyutu belirlenmesi, hem malzemelerin sınıflandırılmasında hem de uygun sıkıştırma tekniğinin belirlenmesinde faydalıdır. Numunelerin özgül ağırlık (dane birim hacim ağırlık) değerleri ASTM D 854 prosedürüne göre tespit edilmiştir. Zeminin özgül ağırlığı, hazırlanan karışımın kimyasal içeriği ve bileşen parçacıklarının iç gözenekliliğine bağlı olarak belirli bir hacimde zeminin veya katıların nispi hacimlerinin su ve havayla faz ilişkilerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu yöntem, numunelerdeki sıkıştırılmış hava içeriğinin piknometre içinde uzaklaştırılmasıdır. Özgül ağırlık, zeminin yoğunluğunun su yoğunluğuna oranı olduğundan, boyutsuz bir parametredir (Javed 1994; Abichou ve ark.; 1998 Abichou ve ark. 2002). Permeabilite (hidrolik iletkenlik, geçirgenlik), zeminin su iletme kabiliyetinin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, numunelerin permeabilite değerleri düşen seviyeli permeabilite metoduna göre belirlenmiştir (Head, 1982). Numunelerden geçen sıvı musluk suyudur. Bu yöntemin başlıca avantajları, yan yüz sızıntısını en aza indirmek, yüksek hidrolik gradyanlara izin vermek ve doygunluğun doğrulanmasını sağlamaktır (Javed, 1994).

Kayma mukavemeti testi ASTM D 1633 sınıflandırma prosedürüne göre belirlenmiştir. Bu test için malzeme tasarımında mukavemetin ortak ölçüsüdür ve genellikle zemin tabakalarının katsayılarının belirlenmesinde kullanılır. Zemin sıkıştırma testleri sırasında %1'lik gerilme oranı sabit tutulmuştur. Farklı atık döküm kumları ve arıtma çamuru ile hazırlanan karışımlara iki farklı sıkıştırma enerjisi uygulanmıştır. Uygulanan sıkıştırma işleminden sonra, numuneler bir hidrolik kriko ile ekstrüde edilmiş, plastik örtü ile kapatılmış ve testten önce %100 bağıl nem ve kontrol edilen sıcaklıkta ($21 \pm 2^\circ\text{C}$) 1 ve 7 gün süreyle kürlenmiştir (Güney ve ark. 2006). Kompaksiyon deneyi, zeminin özelliklerini mekanik enerji bazında geliştiren geoteknik bir uygulamadır. Sıkışmanın ana amacı, kayma mukavemetini, rijitliği ve yoğunluğunu arttırmaktır. Zeminlerin sıkıştırılmasını etkileyen çeşitli faktörler vardır. Bunlar, zemin yapısı ve türü, sınıflandırılması, plastisitesi, su muhtevası, saha koşulları, tabaka kalınlığı ve sıkıştırma enerjisidir. Aslında en önemli faktör, su

muhtevası ve sıkıştırma sırasında uygulanan enerji miktarıdır. Başka bir deyişle, çoğu testin uygulanmasından önce en önemli konu, optimum su muhtevası ile en yüksek kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişkinin belirli bir sıkıştırma enerjisinde ortaya çıkarılmasıdır. Belirtilen bu sıkıştırma enerjisi de, numunelere uygulanan mekanik enerjinin miktarıdır. Uygulanan test, suyun en yüksek kuru birim hacim ağırlığına kadar sıkıştırılması yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sıkıştırma karakteristikleri esnasında su içeriği ile kuru birim hacim ağırlık ilişkisi ASTM D 698'e göre Standart Proctor Testi ile saptanmıştır. Deney, belirli bir metotla sıkıştırılmış bir zeminde, en büyük kuru birim hacim ağırlığı veren su muhtevasının bulunması ile ilgilidir. Standart deneyde numuneler, bir kalıba 30 cm'lik bir mesafeden serbestçe düşen 2,5 kg'lık bir tokmağın sağladığı mekanik güç ile sıkıştırılmıştır. Kalıplar, üç eşit numune tabakası ile doldurulmuş ve her tabaka 25 damla çekice maruz bırakılmıştır (Abichou ve arkadaşları, 1998; Goodhue ve ark. 2001; Abichou ve ark. 2002; Güney ve ark. 2006; Dungan ve Dees 2009; Gürkan ve Çoruh, 2012). Numunelerin sıkışma özelliklerini ve hidrolik iletkenliklerini belirlemek için Odometre testi uygulanmıştır. Numuneler, 50 mm çapa ve 20 mm yüksekliğe sahip olan, %95 nem muhtevasına karşılık gelen kuru yoğunluğa sahip konsolidasyon halkası kullanılarak sıkıştırılmış ve 1 hafta süreyle kürlenmiştir (Abichou ve ark. 1998).

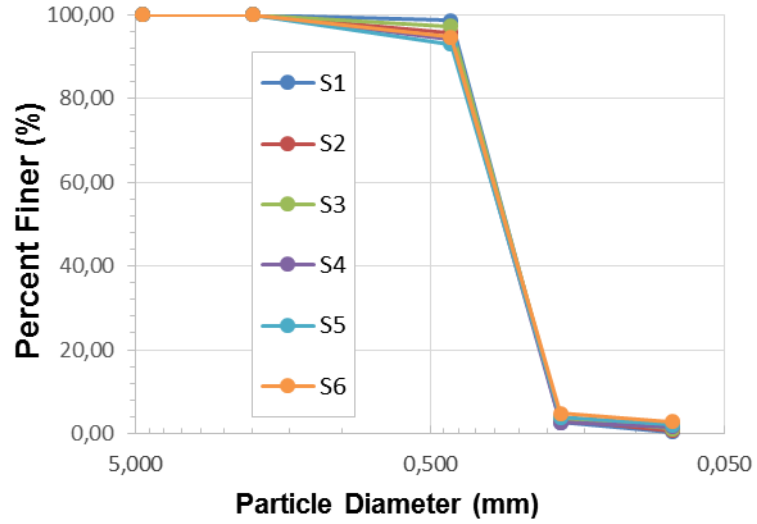
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. İndeks Deneyleri

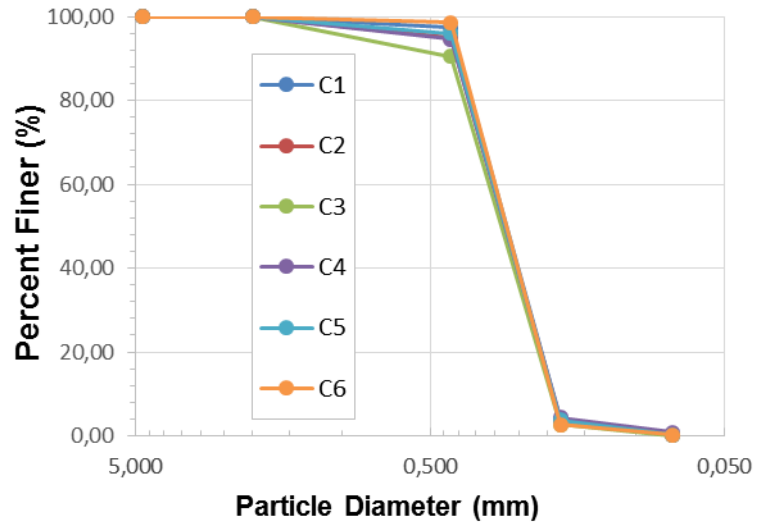
İndeks deney sonuçlarına göre, atık döküm kumları non-plastik malzeme olarak sınıflandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, atık döküm kumunun plastisitesinin, sıcaklık ve katkı maddelerine bağlı olarak arıtma çamuru ile bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir.

Dane dağılımları, döküm kumlarının her ikisinde de benzer elde edilmiş ve TS 1500 Türk Zemin Sınıflandırma Sistemine göre SP (kötü derecelenmiş kum) olarak sınıflandırılmıştır. Her iki kum numunesi için elde edilen dane dağılımları, ince dane oranı haricinde bu dökümhanelerde kullanılan taban kumu ile benzer şekilde saptanmıştır. Her iki kum da esas olarak düzgün ince dane dağılımlı kumdan oluşmaktadır. No. 200 eleğinden geçen numunenin yüzde %10 ile %15 arasında değiştiği Abichou ve ark. (1998) tarafından elde edilen sonuçlara paralel şekilde elde edilmiştir. Sertleştirici ilave edilmiş döküm kumu numuneleri için uniformluk katsayısı (C_u) 1,57 ile 1,62 arasında tespit edilmiş, CO_2 ilave edilmiş işlem kumu numuneleri için ise uniformluk katsayısı (C_u) 1,56 ile 1,63 arasında saptanmıştır. Elde edilen sonuçları numune bazında incelediğimizde, sertleştirici ilave edilmiş döküm kum numunelerinde ilave edilen arıtma çamuru oranlarının artmasıyla C_u değerinin arttığı tespit edilmiştir (1,57-1,62). Ancak bu artışın %20 çamur ilavesine kadar gerçekleştiği (1,62), %25 ilave oranından sonra ise numunede C_u değerinin azalışa geçtiği görülmüş ve 1,61 olarak elde edilmiştir. CO_2 işlem kumu numunelerine baktığımızda ise ilk üç numuneye (C_1 , C_2 , C_3) kadar diğer bir deyişle %0, %5 ve %10 arıtma çamuru ilave oranlarında C_u değerinde artış gözlenmiştir (1,58-1,63). Arıtma çamurunun %15 ve daha yüksek oranlarda (%20, %25) döküm kumuna karıştırılmasıyla ise C_u değerinde azalış belirlenmiştir (1,61-1,56). Hazırlanan atık

döküm kumu numunelerine ait dane dağılım eğrileri Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Sertleştirici ilave edilmiş döküm kumu numunelerinin dane boyu dağılım eğrisi.



Şekil 4.2. CO₂ işlem döküm kumu numunelerinin dane boyu dağılım eğrisi.

Deneylerden elde edilen özgül ağırlık değerleri kumun kaynağına, uygulanan işleme, kalite değişimlerine ve katkı maddelerine bağlı olarak 2,50-2,70 arasında değişiklik

göstermiştir. Her iki tip döküm kumu numuneleri bazında incelediğimizde ise sertleştirici ilave edilmiş numunelerde özgül ağırlık değerinin 2,60 ile 2,68 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Arıtma çamuru oranı arttıkça özgül ağırlığın azaldığı görülmüştür. CO₂ işlem kum örneklerinde de benzer sonuçlar elde edilmiş, özgül ağırlık değeri 2,56-2,70 arasında değişmiştir. Arıtma çamuru oranı arttıkça, sertleştirici kum ile benzer şekilde özgül ağırlık değerinin azaldığı belirlenmiştir. Genel olarak, sertleştirici ilaveli döküm kumlarının özgül ağırlığı, CO₂ işlem kumu numunelerinininkinden daha düşük bulunmuştur. Arıtma çamuru ilave edilmemiş S1 (%100 sertleştirici döküm kumu) ve C1 (%100 CO₂ işlem kumu) numunelerinin özgül ağırlık değerleri sırasıyla 2,68 ve 2,70 olarak bulunmuştur. Sertleştirici ilaveli döküm kumları (S) ve CO₂ işlem kumlarının (C) özgül ağırlık değerleri Tablo.4.1.'de verilmiştir. Bu, gözenekli olduğu bilinen kumun varlığından dolayı olabilmekte, bu da atık döküm kumları için daha düşük özgül ağırlığa neden olabilmektedir.

Tablo 4.1. Sertleştirici ve CO₂ işlem kumlarının özgül ağırlık değerleri

Numune No	S	C
1	2,681	2,703
2	2,611	2,598
3	2,607	2,593
4	2,601	2,567
5	2,604	2,571
6	2,698	2,577

4.2. Kompaksiyon ve Permeabilite Deneyleri

Deneysel çalışmalar neticesinde hazırlanan numunelerin hidrolik iletkenlik (permeabilite) değerleri, 1×10^{-4} cm/sn ile 1×10^{-7} cm/sn aralığında tespit edilmiştir. Hidrolik iletkenlik değerleri geniş bir aralıkta değişmektedir. Ancak esas olarak kullanılan bağlayıcılara ve ilave edilen arıtma çamuru miktarına bağlı ve ayrıca döküm kumlarının içinden geçen yüksek sıcaklık etkisiyle artan reçine aktivitesi sonucu tahribata sebep olan dökme sıcaklığına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen değerler zemin tabaka kalınlığına, atık tipine ve geçirimsizlik katsayısına,

zeminin fiziksel ve kimyasal özelliklerine, bölgedeki yeraltı su kaynaklarının yapısına ve alternatif astar teknolojisinin kullanımına bağlıdır. Genel olarak, atık döküm kumu örneklerinin geçirimsizlik katsayıları düşüktür. Ayrıca, ince danelerin yüzdesinin, kumların geçirimsizliği üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğu da söylenebilir. Atık döküm kum setinin, sıkıştırılmış kil tabanı, yan duvarlar ve 10^{-7} cm/sn'den daha az geçirimsizliğe sahip üst kapak kullanılarak kapsüllenmesi gerekebilir. Kil temel herhangi bir yeraltı suyu kirlenmesini önlemek ve zayıflama mekanizmalarına yardımcı olmak için en az üç metre kalınlığında olabilir. Bununla birlikte, kil temeli gereksinimi duruma göre ele alınabilir. Çok düşük hidrolik iletkenliğe sahip beton döküm kumu veya hali hazırda yeterli kalınlıkta doğal düşük geçirimsizlik içeren saha için, bu geçirimsiz kil şilte gerekliliği ihmal edilebilir. Üst katman ve yan duvarlar, herhangi bir infiltrasyonu büyük ölçüde azaltmak ve düzgün bir şekilde sıkıştırılmak için en az iki fit kalınlıkta olabilir. Kil şilte döşemesi ile temas eden yeraltı suyunu engellemek için, 10^{-7} cm/sn'den daha az geçirimsizliğe sahip, iki ila üç fit sıkıştırılmış kil tabakasının kullanılması tavsiye edilebilir (Javed, 1994).

Hidrolik iletkenlik değerleri, artan çamur oranı ile ters orantılı olarak 1×10^{-7} cm/sn'den daha düşük elde edilmiştir. Bu değerlendirme, numunelerin depolama sahalarında geçirimsizlik amacıyla kullanılabileceğini göstermektedir. Bu depolama sahası örtü tabakasında kullanılan ortam göz önüne alındığında, deneylerden elde edilen geçirimsizlik değerleri kabul edilebilirdir. Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (2010)' te belirtilen geçirimsizlik sınır değerinden çok daha düşük elde edilmiştir. ($\geq 1 \times 10^{-4}$ m/s). Sertleştirici ilave edilmiş döküm kumu numunelerinin geçirimsizliği, CO₂ işlem numunelerine kıyasla düşük olarak tespit edilmiştir. Sertleştirici ilaveli kum numunelerinin bu düşük geçirimsizliği, çok sayıda ince danelerin üretilmesiyle sonuçlanan ve böylece geçirimsizlikte önemli bir azalmaya neden olan kil bağlayıcı maddenin varlığından kaynaklanmıştır.

Standart Proctor Kompaksiyon eğrileri Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'te verilmiştir. Elde edilen grafikler doğrultusunda, her iki tip döküm kumu numuneleri için sıkıştırma enerjisi arttığında, daha düşük kuru birim hacim ağırlıkları daha yüksek su içeriğinde

sağlanmıştır. Sıkıştırma karakteristik test sonuçlarına göre kuru birim hacim ağırlık değerleri 1,50-1,70 gr/cm³ arasında elde edilmiştir. Optimum su içeriği ise %16-27 arasında değişmiştir. Sertleştirici ilave edilmiş döküm kumu numunelerinde ilave edilen arıtma çamuru miktarı arttığında su içeriğinin artmasıyla birlikte kuru birim hacim ağırlıklarının azaldığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde CO₂ işlem kumu örneklerinde de su muhtevasının artmasıyla kuru birim hacim ağırlık değerlerinde azalış gözlenmiştir. Elde edilen verileri numune bazında değerlendirdiğimizde, sertleştirici ilave edilmiş döküm kumu numunelerinde (S1-S6) çamur ilavesinin arttırılması ile su muhtevasının %16-22 aralığında artış gösterdiği, kuru birim hacim ağırlık verilerinin de 1,66-1,64 gr/cm³ aralığında azaldığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde CO₂ işlem uygulanmış döküm kumu numunelerinde (C1-C6) çamur ilavesinin arttırılması ile su muhtevasının %22-27 aralığında artış gösterdiği, kuru birim hacim ağırlık verilerinin de 1,59-1,57 gr/cm³ aralığında azaldığı tespit edilmiştir. Arıtma çamuru ilavesi ile su muhtevastaki bu artış beklenen bir gelişmedir. Genel olarak, daha iyi sıkıştırılmış malzemenin hidrolik iletkenliküzerindeki etkisi de oldukça küçüktür. Benzer çalışmalarda belirtildiği gibi, geçirimsiz tabaka döküm kumundan yapıldığında, sıkıştırma enerjisi ve sıkıştırma suyu içeriğinin hidrolik iletkenliği üzerindeki etkisi sınırlıdır (Abichou ve diğ., 2000).

Hazırlanan her iki döküm kumu numuneleri için hidrolik iletkenlik ile optimum su içeriği arasındaki ilişki, doğal killerin bu özellikleriyle benzerlik göstermiştir. Doğal killerde, hidrolik iletkenlik ile su içeriği arasında ters orantı vardır. Bu sebeple daha düşük hidrolik iletkenlik elde etmek için, genel olarak benzer sıkıştırma şartlarında daha yüksek sıkıştırma enerjisi gerektiği öngörülmektedir. Bunun anlamı daha yüksek su muhtevastında deneyi tekrar etmektir. Geçirimlilik bu deneyin sıkıştırma koşullarından bağımsızdır. Literatürde yapılan çalışmalarda döküm kumlarının hidrolik iletkenliği tipik olarak optimum su muhtevastının kuru ile ıslak arasındaki değişimi ve sıkıştırma enerjisinin tipik aralıklar içindeki değişimi sebebiyle sekiz faktörden daha az değişiklik göstermiştir (Abichou ve diğ., 2000). Sonuçlar, uygulanan bu sıkıştırma enerjisi için, çamur içeriği yaklaşık %15'e ulaşınca ve daha yüksek çamur içerikleri için kuru birim hacim ağırlığının arıtma çamuru

ilavesiyle azaldığını göstermektedir. Bentonit ilavesi için Kenney ve ark.'nın (1992) yaptıkları çalışmada ise karışımların kuru birim hacim ağırlığının bentonit içeriğinin %16'ya ulaşınca kadar arttığını ve daha sonra azaldığını bildirmişlerdir. Optimum su içeriği, daha ince daneli topraklarda daha yüksek sıkıştırma çabaları için daha düşük elde edilmiştir. Bentonit içerikli eğilimler, maksimum kuru birim hacim ağırlık için gözlemlenenlerden daha zayıftır, bu da döküm kumunun optimum su içeriğinin bentonit içeriğine duyarlı olmadığını düşündürmüştür. Elde edilen verilerin, bu çalışma ile benzer bir yaklaşım içerdiği söylenebilir. Elde edilen sonuçlar, uygulanan işlem için, maksimum kuru birim hacim ağırlık yoğunluğunun, sertleştirici ilave edilmiş kum ile karşılaştırıldığında CO₂ işlem kumunda daha yüksek olduğunu göstermiştir.

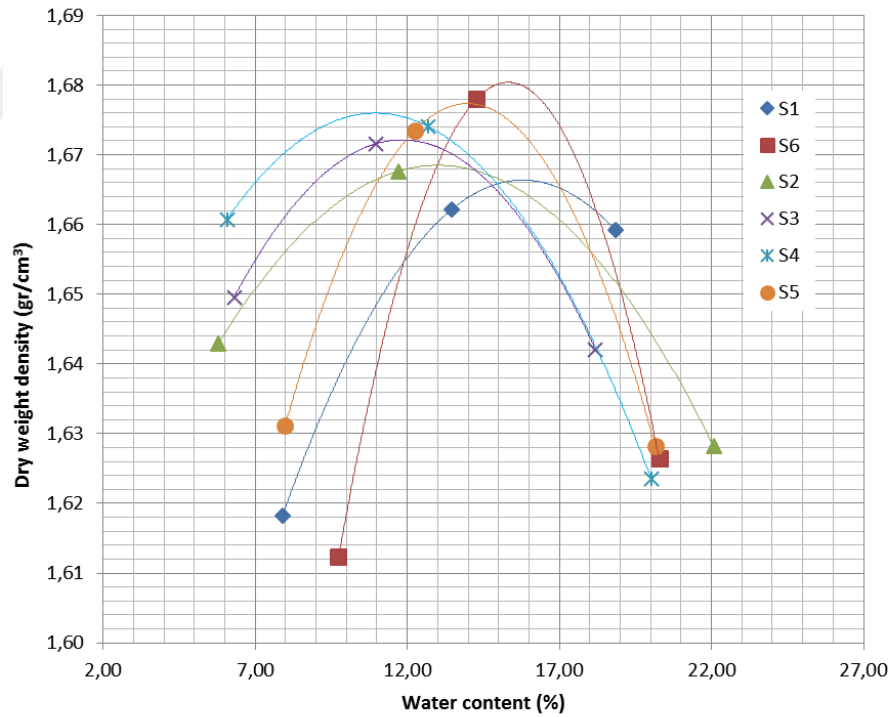
Elde edilen veriler Atterberg limitlerinin değerlendirildiği (plastisite değerleri anlamında) deneylerde Likit Limit (LL) ve Plastisite İndeksi (PI) değerlerinin arıtma çamuru muhtevası ile doğru orantılı artış gösterdiği ve geçirimsizlik katsayısında beklenen şekilde ters orantılı olarak Plastisite indeksinin artışıyla hidrolik iletkenliğin azaldığı tespit edilmiştir. Literatürde uygulanan Standart Proctor Kompaksiyon eğrilerinde sıkıştırma enerjisinden bağımsız olarak $LL \geq 20$ ve $PI \geq 2$ olan döküm kumları için $\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/s hidrolik iletkenlik elde edildiği belirtilmiştir (Abichou ve ark. 2002). Deneylerden elde edilen sonuçlar, her iki döküm kumu numuneleri için de arıtma çamuru ilavesi ile hidrolik iletkenliğin azalttığını göstermiştir. Sertleştirici ilave edilmiş döküm kumu numuneleri (S1-S6) için arıtma çamurunun artan oranlarıyla Likit Limit değerleri %23-27 aralığında artış göstermiş ancak %15 çamur ilave oranından sonra %25-23 aralığında bir düşüş gözlenmiştir. CO₂ işlem döküm kumu numunelerinde de (C1-C6) benzer veriler elde edilmiş, %15 oranındaki çamur ilavesine kadar Likit Limit değerinin %26-45 aralığında arttığı tespit edilirken, %20 ve %25 çamur ilave oranlarında sırasıyla %41 ve %36 Likit Limit değerleri belirlenmiştir. Benzer veriler Plastik Limit değerleri için de elde edilmiştir. Sertleştirici ilave edilmiş döküm kumu numuneleri (S1-S6) için arıtma çamurunun artan oranlarıyla Plastik Limit değerleri %11-12 aralığında artış göstermiş ancak %15 çamur ilave oranından sonra %10-9 aralığında bir düşüş gözlenmiştir. CO₂ işlem döküm kumu numunelerinde de (C1-C6) benzer veriler elde edilmiş, %15 oranındaki

çamur ilavesine kadar Plastik Limit değerinin %15-18 aralığında arttığı tespit edilirken, %16 ve %14 çamur ilave oranlarında sırasıyla %41 ve %36 Plastik Limit değerleri belirlenmiştir.

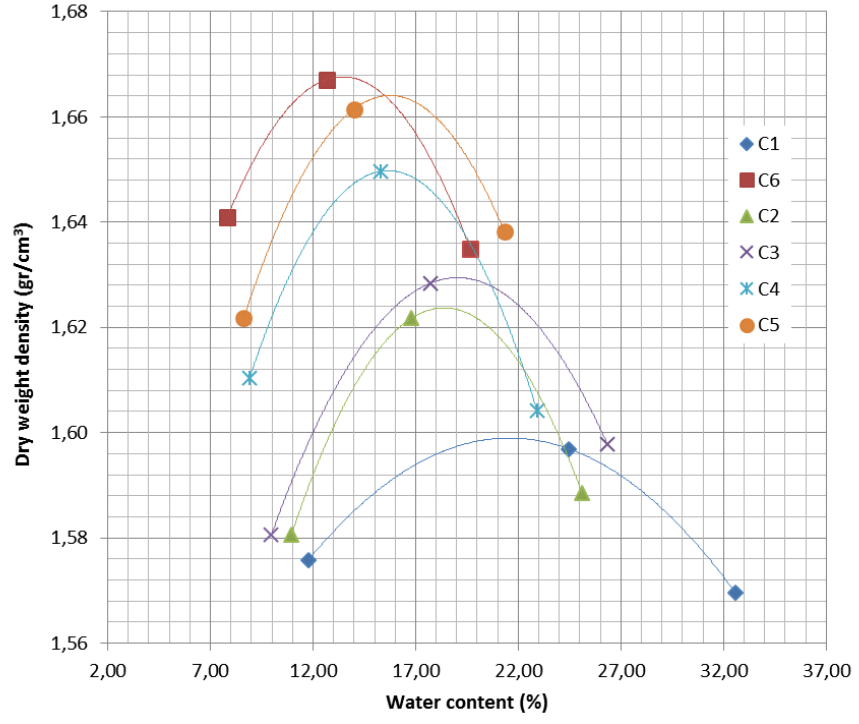
Tüm döküm kumu tipleri için bu aralıktaki hidrolik iletkenlik değerleri ile Atterberg limitleri (Likit Limit (LL) ve Plastisite İndeksi (PI)) arasında negatif bir korelasyon olduğu söylenebilir. Her tabaka kalınlığı için ($\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/sn) hidrolik iletkenlik sınırı, farklı basınç veya gerilme altındaki tüm karışımlar için uygundur. Kayma mukavemeti oranındaki artış, sırasıyla sertleştirici ilaveli döküm kumu için %14-27 ve CO₂ işlem kumu için %17-41'dir. Sonuçlar, bu çalışmada kullanılan arıtma çamurunun CO₂ işlem kumu üzerinde sertleştirici ilaveli kuma göre daha etkili olduğunu göstermiştir. Laboratuvar test sonuçları, atık döküm kumu numunelerinin, başlık katmanlarının yapımı için gerekli olan düşük hidrolik iletkenliğe ulaşmaya yönelik Likit Limite ve Plastisite İndeksine sahip olduğunu göstermiştir. Elde edilen Plastisite İndeks değerleri S1-S6 numunelerinde %12-15 aralığında olmuştur. CO₂ işlem döküm kumu numunelerinde (C1-C6) ise elde edilen Plastisite İndeks değerleri %11-27'dir. Tespit edilen değerler Likit Limit ve Plastisite İndeksi ile benzer şekilde artan çamur oranları ile bir artış göstermiştir. Fakat söz konusu bu artış %20 ve %25 çamur ilave oranlarında bir azalışa (S5 ve S6 numuneleri için %15 ve %14 şeklinde; C5 ve C6 numuneleri için %25 ve %22 şeklinde) dönüşmüştür. Laboratuvarda sıkıştırılmış numunelerin hidrolik iletkenlik testleri, atık döküm kumu örneklerinin çok çeşitli kompakt çalışma ve çok çeşitli su içeriği kullanılarak çok düşük hidrolik iletkenliğe ($\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/sn) kadar sıkıştırılabileceğini göstermiştir.

Farklı basınçlarda elde edilen hidrolik iletkenlik değerleri ($\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/sn) her iki tip döküm kumu numunesi için de uygundur. Kayma mukavemeti sertleştirici ilave edilmiş kum için %14 ve CO₂ işlem kumu için %17'dir. Laboratuvar test sonuçları, atık döküm kumu numunelerinin, geçirimsiz örtü tabakası yapımı için gerekli olan düşük hidrolik iletkenliğe ulaşmaya yönelik bir Likit Limitine ve Plastisite İndeksine sahip olduğunu bizlere göstermiştir.

Sertleştirici ilave edilmiş döküm kumu numunelerinin geçirgenliği, CO₂ işlem numuneleri veya çamur katkılı kumla karşılaştırıldığında düşük bulunmuştur. Betonun düşük geçirgenliği, çok sayıda ince danenin üretilmesiyle sonuçlanan ve böylece geçirgenlikte önemli bir azalmaya neden olan kil bağlayıcı maddenin varlığından kaynaklanır. Doğal killere benzer bir şekilde, sıkıştırılmış su içeriği arttıkça hidrolik iletkenlik azalır. Benzer sıkıştırma su muhtevasında, daha düşük hidrolik iletkenlikler genellikle daha yüksek sıkıştırma çabasıyla elde edilir. Sertleştirici ilave edilmiş döküm kumu numunelerinin geçirgenliği ve çamur katkılı kum, düzgün ince kum ile karşılaştırılabilir olmuştur. Hidrolik iletkenlik değeri %5 ile %15 arıtma çamuru ilave oranlarında belirgin bir şekilde azalmıştır. Atık döküm kumlarına ilave edilen arıtma çamuru oranları %20'ye çıkarıldığında ise, azalma 1×10^{-6} cm/sn ve 1×10^{-7} cm/sn'ye kadar yavaşlamıştır.



Şekil 4.3. Sertleştirici ilave edilmiş döküm kumu numuneleri için Standart Proctor sıkıştırma eğrisi.



Şekil 4.4. CO₂ işlem döküm kumu numuneleri için Standart Proctor sıkıştırma eğrisi.

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde atıksu arıtma tesisleri olarak gerek belediyeler gerekse artan endüstrilere ait işletmelerde üretilen arıtma çamurları hızlı bir şekilde artmakta ve yakın gelecekte ciddi bir çevresel atık sorunu olarak karşımıza çıkacaktır. Bu artışın sebepleri; arıtma teknolojilerinin iyileştirilmesi, kanalizasyon sistemlerinin genişletilmesi ve yeni sanayi tesislerinin inşa edilmesi olarak gösterilebilir. Bu tesislerden üretilen arıtma çamurlarının %80 ve üzerindeki su muhtevaları bunların geri dönüşümü ya da faydalı kullanımlarında sorun oluşturmaktadır. Arıtma çamurları içerdikleri su miktarının yanı sıra sıvı ve gaz fazda bulunan organik ve inorganik maddeleri de içermektedir. Aynı zamanda doğal demir ve alüminyum hidroksilleri açısından da zengin bileşenleri de içerir. Bu sebeple günümüzde arıtma çamurunun kullanımıyla ilgili yeni teknolojilerin uygulanması ve geliştirilmesi çoğunlukla bunların bir substrat olarak değerlendirilmesine dayanmaktadır.

Günümüzde katkı maddesi olarak inşaat sektörü de arıtma çamurlarının kullanılabildiği bir sanayi dalıdır. Arıtma çamurunun inşaat malzemelerinde kullanılması, pahalı ve enerji gerektiren bir uygulamadır. Bunun sebebi çamur içindeki su muhtevası ve kararsız organik bileşiklerdir. Örneğin arıtma çamurlarının çimento harcında kullanılması, bu malzemenin fırından geçirildikten sonra kararlı ve güvenli nihai ürüne dönüştürülmesi ile olmaktadır. Çünkü bu malzemenin fazla su emme özelliği bunların bağlayıcılık kapasitelerini azaltmaktadır. Bu sebeple, mukavemet özellikleri, su direnci, don direnci ve ağır metal liçi ile ilgili araştırmalar, özellikle katılmış numunelerdeki arıtma çamuru miktarı düşük oranda olduğunda onaylanmaktadır. Ancak arıtma çamurlarının sahip oldukları farklı fizikokimyasal özellikleri nedeniyle, uygulanacak yöntemlerin de ayrı ayrı tasarlanması gereklidir. Bu nedenle, inşaat malzemelerinde tek bir genel ve en uygun çamur değerlendirme yönteminin seçilmesi zordur.

Yapılan çalışmalarda arıtma çamurunun bağlayıcı katkı maddeleriyle desteklenmesi, son ürünün dayanıklılığını arttırmıştır. Beton ve harç karışımlarında çamur kullanımı, genellikle çamursuz karışımlara kıyasla, beton dayanımındaki azalma ile ilişkilidir. Karışımındaki bağlayıcı, beton veya harcın dayanımında sorumludur. Seramik ürünler (tuğlalar, fayanslar) ve hafif agregalara sinterleme yapmak için arıtma çamuru umut verici bulunmuştur ancak diğer yöntemlere kıyasla bu tür çözümler daha fazla enerji harcamasını gerektirmektedir. Bununla birlikte, elde edilen ürünler kararludur ve dayanıklılıkları, kontrol numunelerinden daha düşük olmasına rağmen, günümüzde bunların inşaat sektöründe uygulamaları ümit verici bulunmuştur (Swierczek ve ark., 2018).

Arıtma çamuru, katı atık depolama sahalarının zemininde ya da bu sahalarda örtü tabakası amacıyla kullanıldığında geoteknik bir malzeme olarak değerlendirilir ve arıtma çamurlarının 'katı' kısmının floküler doğası ve katı partiküllerin etrafındaki sıvı fazın yüksek adsorpsiyonu sebebiyle öngörülemeyen davranışlar gösterebilir. Literatürde yapılan çalışmalarda, bu çamurların geoteknik mühendisliğini ve oturma değerlerini belirlemek adına yapılan konsolidasyon ve kayma dayanımı testleri dahil olmak üzere bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Gaz fazının büyük etkisi, hem test sonuçları ışığında hem de arıtma çamurunun gerçek bir kaymasında kaynaklanan çamur davranışı açıklamalarına atıfta bulunularak tartışılmıştır. Arıtma çamurunun oturma davranışı için bir model, çamurların floküler yapısı içindeki gözenekli sıvı dağılımının yayınlanmış bir tarifine dayanarak varsayılmıştır. Bu model, çamurlardaki farklı katı, sıvı ve gaz fazlarını, hem katı fazın (çamur blokları) hem de sıvı fazın (viskoz gözenek sıvısı) sıkıştırılabilirliğini dikkate almalıdır. Modelin test ve saha gözlemlerini açıklamada ve gelecekteki davranışları öngörmeye faydalı olması için basitleştirmelerin gerekliliği göz önüne alınmıştır (Klein ve ark., 2000).

Bu çalışmada da, atık döküm kumunun katı atık depolama sahalarında örtü tabakası olarak kullanılmasının araştırılması için yapılan deneysel bir çalışmanın sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır. Çalışmanın ana eksenini olarak, zemin indeks özellikleri, sıkıştırma özellikleri ve hidrolik iletkenlik ile sıkıştırma koşulları arasındaki ilişkiler, en uygun arıtma çamuru oranını saptamak için belirlenmiştir.

Hidrolik iletkenlik ile optimum su içeriği ve döküm kumları için sıkıştırma enerjisi arasındaki ilişkiler, doğal killere benzer eğilimler sergilemiştir. Hidrolik iletkenlik değerleri, artan çamur oranı ile ters orantılı olarak 1×10^{-7} cm/sn'den daha düşük elde edilmiştir. Bu değer, numunelerin depolama sahalarında geçirimsizlik amacıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

Elde edilen veriler doğrultusunda, her iki tip döküm kumu numuneleri için sıkıştırma enerjisi arttığında, daha düşük kuru birim hacim ağırlıkları daha yüksek su içeriğinde sağlanmıştır. En iyi sıkıştırma %15 oranında arıtma çamuru ilavesiyle elde edilmiştir. Hidrolik iletkenlik, çamurun %15'ine hızla düşmüş ve %15'lik çamur oranı için 1×10^{-7} cm/sn elde edilmiştir. Çamur oranı %15-20 oranında arttıktan sonra, hidrolik iletkenlik için hafif bir artış gözlenmiştir. Atık döküm kumu numunelerinin hidrolik iletkenliği, artan Likit Limit, Plastisite İndeksi ve arıtma çamuru ile azalmıştır. Likit Limit > 20, Plastisite İndeksi > 2 veya çamur muhtevası > %15 olan numuneler, $< 10^{-7}$ cm/sn hidrolik iletkenlik elde etmek için sıkıştırılabilir. Her iki kum da örtü tabakasında kullanılmak üzere malzemelerin yanı sıra işlev görece kadar yüksek Likit Limite sahiptir. Bununla birlikte, tüm bu pozitif sonuçlara rağmen, yeterli seviyede düşük bir hidrolik iletkenliğe sahip olan sahada döküm katmanlarının oluşturulabileceğini doğrulamak için alan testi gereklidir. Bu testler, saha koşullarını mümkün olduğu kadar yansıtacak şekilde yapılmalıdır.

Atık döküm kumlarının ve arıtma çamurlarının geri dönüşümü, çevreyi korumak ve sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Bu sebeple bu araştırma atık sorununa bir çözüm sağlayabilir. Sonuçların genel değerlendirmesi, arıtma çamuru içeren her iki döküm kum tipinin de katı atık depolama sahaları için bir örtü tabakası olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Ancak bir sonraki çalışmada, ilgili ağır metal mevzuatı açısından bir değerlendirme yapmak için ağır metal konsantrasyonlarının da belirlenmesi hedeflenmiştir.

KAYNAKLAR

- Abichou, T., Benson, C. H., Edil, T. B., 1998. Using waste foundry sand for hydraulic barriers. *Recycled Materials in Geotech. Applications*. GSP 79, ASCE, Reston, pp 86-99.
- Abichou, T., Benson, C. H., Edil, T. B., 2000. Foundry green sands as hydraulic barriers:field study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(12), 1174-1183.
- Abichou, T., Benson, C. H., Edil, T. B., 2002. Foundry green sands as hydraulic barriers:field study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(3), 206-215.
- Alonso-Santurde, R., Andres, A., Viguri, JR., Raimondo, M., Guarini, G., Zanelli, C., Domdi, M., 2011. Technological behaviour and recycling potential of spent foundry sands in clay bricks. *Meat Sci.*, 92: 994-1002.
- Arulrajah, A., Yaghoubi, E., Imteaz, M., Horpibulsuk, S., 2017. Recycled waste foundry sand as a sustainable subgrade fill and pipe-bedding construction material: Engineering and environmental evaluation. *Meat Sci.*, 28: 343-349.
- Başar, H.M., Ö. 2012a. Dökümhanelerden kaynaklanan atıkların uygun geri kazanım/tekrar kullanım ve bertaraf yöntemlerinin incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi.
- Başar, H.M., Deveci Aksoy, N., 2012b, Atık Döküm Kumunun Geri Kazanım Uygulamaları. *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, Sigma 30, 205-224.
- Braganca, SR., Vicenzi, J., Guerino, K., Bergman, CP., 2006. Technological behaviour and recycling potential of spent foundry sands in clay bricks. *Meat Sci.*, 24: 60-66.
- Dungan, R. S., Dees, N. H., 2009. The characterization of total and leachable metals in foundry molding sands. *Journal of Environmental Management*, 90, 539-548.
- Gedik, A. 2008. Atık döküm kumlarının karayolu malzemesi olarak kullanımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Goodhue, M. J., Edil, T. B., Benson, C. H. 2001. Interaction of foundry sands with geosynthetics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(4), 353-362.

- Güney, Y., Aydılek, A. H., Demirkan, M. M., 2006. Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. *Waste Management*, 26, 932–945.
- Gürkan, E., Çoruh, S., 2012. Tekstil Atıksularının Arıtılmasında Atık Döküm Kumlarının Kullanımı. *Journal of History Culture and Art Research*, 1(4), 531-544.
- Hawaman 2009. Türkiye’de sanayiden kaynaklanan tehlikeli atıkların yönetiminin iyileştirilmesi, Döküm Sektörü Rehber Doküman, LIFE HAWAMAN Projesi, LIFE06 TCY/TR/000292, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Head, K.H., 1982. *Manual of Soil Laboratory Testing Volume 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests*, Pentech Pres, London.
- Javed, S., 1994. Use of waste foundry sand in highway construction. Joint Highway Research Project. JHRP-94/23 Final Report, School of Civil Engineering, Indiana Department of Transportation, Purdue University.
- Kenney, T., Van Veen, W., Swallow, M., Sungaila, M. 1992. Hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures. *Can. Geotech. J. Ottawa* 29(3):364–374.
- Klein, A., Sarsby, R.W. 2000. Problems in defining the geotechnical behaviour of waste water sludges. *Geotechnics of High Water Content Materials*. American Society for Testing and Materials Special Technical Publication. 1374, 74-87. DOI: 10.1520/STP14360S.
- Kleven, J. R., 1998. Mechanical Properties of Excess Foundry System Sand and Evaluation of its Use in Roadway Structural Fill. M.Sc. Thesis. University of Wisconsin-Madison, Madison, WI.
- Lin, DF., Luo, HL., Lin, KL., Liu, ZK., 2017. Effects of waste glass and waste foundry sand additions on reclaimed tiles containing sewage sludge ash. *Meat Sci.*, 38: 13-14.
- Siddique, R., Kaur, G., Rajor, G. (2010). Waste foundry sand and its leachate characteristics, *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 1027-1036.
- Solmaz, P. 2008 Atık Döküm Kumunun Geçirimsiz Perde Yapılarak Tekrar Kullanılması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Swierczek, L., Cieslik, B.M., Konieczka, P. 2018. The potential of raw sewage sludge in construction industry - A review. *Journal of Cleaner Production*. 200, 342-356.
- Tarek Abichou, M. ASCE1; Craig H. Benson, M. ASCE2; and Tuncer B. Edil, M. ASCE3, 2002. Foundry Green Sands as Hydraulic Barriers: Field Study. *Meat Sci.*, 128:3(206).
- Torres, A., Bartlett, L., Pilgrim, C., 2017. Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement Concrete. *Meat Sci.*, 135: 674-681.
- Tüdoksad, 2017. Türkiye Sanayicileri Derneği.
- Tüdoksad, 2017. Türkiye Sanayicileri Derneği, *Türk Döküm Dergisi* 45.

- Usta Benli, A., 2017. Resource efficient and cleaner production in selected foundries through environmental performance evaluation. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi.
- Yaşar, O. 2009. Türk İmalat Sanayiinde Lokomotif Bir Sektör: Demir Çelik Sanayi. Marmara Coğrafya Dergisi, 20, 42-78.
- Yiğit, Ç., 2013. Life cycle assessment in ferrous foundry industry. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi.



ÖZGEÇMİŞ

Miraç Gedikli, 26.02.1990'da Samsun'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Ordu'da tamamladı. 2008 yılında Ünye Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi'nden mezun oldu. 2008 yılında başladığı Atatürk Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nü 2012 yılında bitirdi. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2012 yılında Sakarya'da Milli Savunma Bakanlığı'na bağlı 1'inci Ana Bakım Fabrika Müdürlüğü'nde Çevre Mühendisi olarak çalışmaya başladı. Halen 1'inci Ana Bakım Fabrika Müdürlüğü'nde görev yapmaktadır.