

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ASFALT KARIŞIMLARDA ATIK DÖKÜMHANE KUMLARININ
KULLANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer ŞAHİN

ARALIK 2025
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ASFALT KARIŞIMLARDA ATIK DÖKÜMHANE KUMLARININ
KULLANIMI**

Ömer ŞAHİN

ORCID :

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 17 / 11 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 15 / 12 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Atakan AKSOY

ORCID :

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Asfalt Karışımlarda Atık Dökümhane Kumlarının Kullanımı” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

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 Prof. Dr. Atakan AKSOY’a ve tez çalışmam süresince akademik bilgi ve deneyimleriyle önemli katkılarda bulunan, her zaman destek ve motivasyon sağlayan değerli eşim Doç. Dr. Ceyda UZUN ŞAHİN’e teşekkürlerimi sunarım.

Ömer ŞAHİN

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Asfalt Karışımlarda Atık Dökümhane Kumlarının Kullanımı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Atakan AKSOY’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 15/12/2025

Ömer ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Döküm İşlemi Hakkında Genel Bilgiler.....	3
2.2. Döküm Yöntemleri.....	3
2.3. Döküm Sektöründe Uygulanan Süreçler.....	3
2.3.1. Model Yapımı	4
2.3.2. Maça Yapımı.....	4
2.4. Bileşenler Bazında Döküm Kumu.....	5
2.4.1. Kum.....	5
2.4.2. Eklentiler	6
2.5. Döküm Sektörünün Türkiye ve Dünyada Durumu	6
2.6. Çevresel Etkiler Açısından Döküm Sektörü	7
2.7. Atık Dökümhane Kumlarının Tekrar Kullanımına Yönelik Çalışmalar	8
2.8. Materyal ve Yöntem.....	12
2.8.1. Atık Döküm Kumu.....	12
2.8.2. Numunelerin Hazırlanması	13
2.8.3. Deney Adımları.....	14
2.8.4. Marshall Su Hasarı Deneyi	20
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	22
3.1. Stabilite ve Akma Deneyleri	22
4. SONUÇLAR.....	37

5. ÖNERİLER.....	39
6. KAYNAKLAR	40
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ASFALT KARIŞIMLARDA ATIK DÖKÜMHANE KUMLARININ KULLANIMI

Ömer ŞAHİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Atakan AKSOY
2025, 42 Sayfa

Döküm kumu; otomotiv, demir-çelik, alaşım üretimi ve metalürji gibi pek çok sanayi dalında yoğun biçimde kullanılan temel bir üretim malzemesidir. Döküm süreci tamamlandıktan sonra bu kumlar işlevini yitirerek atık niteliği kazanmaktadır. Artan üretim miktarına paralel olarak döküm kumu atıkları da giderek büyüyen yığınlar oluşturmakla birlikte depolama alanlarında geniş yer kaplamaktadır. Bu durum sektör için ek ekonomik yük yaratmaktadır. Sanayinin gelişimiyle birlikte bu atıkların çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesi veya yeniden kullanılabilir hâle getirilmesi giderek daha kritik bir konu haline gelmiştir.

Bu çalışmada, Hekimoğlu Döküm Tesislerinden temin edilen atık döküm kumları asfalt karışım içerisine belirli oranlarda katılarak asfalt briketler üretilerek briketler üzerinde stabilite akma deneyleri yapılacaktır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda günümüzün büyük sorunu haline gelmiş olan döküm kumlarının asfalt karışımlarda kullanımının geri kazanım açısından herhangi bir çevresel risk oluşturup oluşturmadığı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık döküm kumu, geri kullanım

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF REUSE METHODS OF WASTE FOUNDRY SAND PRODUCED IN FOUNDRIES

Ömer ŞAHİN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Atakan AKSOY
2025, 42 Pages

Foundry sand is a fundamental production material used extensively in many industries such as automotive, iron and steel, alloy production, and metallurgy. After the casting process is completed, this sand loses its functionality and becomes waste. Parallel to the increase in production volume, foundry sand waste forms increasingly large piles and occupies a significant amount of space in storage areas. This situation creates an additional economic burden for the sector. With the development of industry, the disposal of this waste without harming the environment or making it reusable has become an increasingly critical issue.

In this study, waste foundry sand obtained from Hekimoğlu Foundry Facilities will be added to asphalt mixtures in specific proportions to produce asphalt briquettes and stability flow tests will be conducted on the briquettes. Based on the results obtained, it has been evaluated whether the use of foundry sand in asphalt mixtures poses any environmental risks in terms of recovery, given that foundry sand has become a major issue in today's world.

Key Words: Waste foundry sand, reuse

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Şantiyede depolanan atık döküm kumu ve laboratuvar atık döküm kumu	13
Şekil 2. Elek analizi	14
Şekil 3. Deneyde kullanılacak kalker agregasının elek analizi.....	14
Şekil 4. Kalker agregası gradasyonu ve döküm kumuna denk kumun gradasyonunun belirlenmesi	15
Şekil 5. Briketlerde kullanılacak kalker agregası ve agrega grupları	15
Şekil 6. Karışımdaki katkısız bitüm penetrasyonunun miktarı ve briketlerde kullanılacak bitüm miktarı.....	15
Şekil 7. Briketlerde kullanılacak %10 ve %15 ADK oranının belirlenmesi.....	16
Şekil 8. Briketlerde kullanılacak %20, %25 ve %50 ADK oranının belirlenmesi	16
Şekil 9. Karışımın etüvde ısıtılarak hazırlanması	16
Şekil 10. Etüvde ısıtılan sıcak karışımların mikser karışım cihazında karıştırılması	17
Şekil 11. Kalıpların aynı sıcaklıkta ısıtılıp yağlanması ve karışımın kalıplara dökülmesi.....	17
Şekil 12. Briket üretimi için kalıplara dökülen karışımın Marshall cihazında 75 kez tokmaklanması	17
Şekil 13. Briketlerin 24 saat süreyle kalıpta bekletilip kriko yardımıyla kalıptan çıkarılması.....	18
Şekil 14. Katkısız ve her bir ADK karışım (%10-15-20-25-50) için üretilen briketler.....	18
Şekil 15. Standart üretim ve %10 ADK karışım briketler	18
Şekil 16. ADK oranı %15 ve %20 olan briketler.....	19
Şekil 17. ADK oranı %25 ve %50 olan briketler.....	19
Şekil 18. Üretilen briketlerin 30 dakika, 60°C su kürüne tabi tutulması	20
Şekil 19. Üretilen briketlerin 48 saat, 60°C su kürüne tabi tutulması	20
Şekil 20. Üretilen briketlerin (katkısız ve %10 ADK'li numune) Kaltest cihazıyla stabilite akma dayanımlarının tespiti	22
Şekil 21. Üretilen briketlerin (%15 ve %20 ADK'li numune) stabilite akma dayanımlarının tespiti	22
Şekil 22. Üretilen briketlerin (%25 ve %50 ADK'li numune) stabilite akma dayanımlarının tespiti	23

Şekil 23.	Üretilen briketlerin (katkısız ve %10 ADK'li numune-48 saat ve 60°C su küründe) stabilite akma dayanımlarının tespiti.....	25
Şekil 24.	Üretilen briketlerin (%15 ve %20 ADK'li numune-48 saat ve 60°C su küründe) stabilite akma dayanımlarının tespiti.....	26
Şekil 25.	Üretilen briketlerin (%25 ve %50 ADK'li numune-48 saat ve 60°C su küründe) stabilite akma dayanımlarının tespiti.....	26
Şekil 26.	Üretilen briketlerin (%5,4 bitüm-30 dakika ve 60°C) stabilite karşılaştırmaları	28
Şekil 27.	Üretilen briketlerin (%5,4 bitüm-30 dakika ve 60°C) akma karşılaştırmaları	28
Şekil 28.	Üretilen briketlerin (%5,4 bitüm-48 saat ve 60°C) stabilite karşılaştırmaları	29
Şekil 29.	Üretilen briketlerin (%5,4 bitüm-48 saat ve 60°C) akma karşılaştırmaları	29
Şekil 30.	Üretilen briketlerin ortalama stabilite değerlerinin karşılaştırması	30
Şekil 31.	Üretilen briketlerin ortalama akma değerlerinin karşılaştırması	30
Şekil 32.	Üretilen briketlerin ortalama stabilite/akma değerlerinin karşılaştırması	31
Şekil 33.	Üretilen briketlerin (katkısız, %5,2 bitümlü-30 dakika ve 60°C su küründe) stabilite akma dayanım tespiti	31
Şekil 34.	Üretilen briketlerin (%5,2 bitümlü, %10 ve %15 ADK'li-30 dakika ve 60°C su küründe) stabilite akma dayanımlarının tespiti.....	32
Şekil 35.	Üretilen briketlerin (%5,2 bitümlü, %20 ve %25 ADK'li-30 dakika ve 60°C su küründe) stabilite akma dayanımlarının tespiti.....	32
Şekil 36.	Üretilen briketler ve katkısız %5,2 bitümlü 48 saat ve 60°C su küründe stabilite akma dayanımlarının tespiti	32
Şekil 37.	Üretilen briketlerin (%5,2 bitümlü, %10 ve %15 ADK'li-48 saat ve 60°C su küründe) stabilite akma dayanımlarının tespiti.....	33
Şekil 38.	Üretilen briketlerin (%5,2 bitümlü, %20 ve %25 ADK'li 48 saat ve 60°C su küründe) stabilite akma dayanımlarının tespiti.....	33
Şekil 39.	Stabiliteye bağlı olarak hesaplanan karışım/kontrol ortalamaları	35
Şekil 40.	Stabilite/akmaya bağlı olarak hesaplanan karışım/kontrol ortalamaları.....	36

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Kalıp kumu türleri.....	5
Tablo 2. Döküm kumların fiziksel, kimyasal ve teknolojik özellikleri	5
Tablo 3. Dünya döküm üretimi 2020 yılı ilk 10	7
Tablo 4. Dünyanın ilk 10 ülkesi ve Türkiye’de üretim ortalamaları	7
Tablo 5. Karışım oranları raporu.....	13
Tablo 6. Bitüm oranı %5,4 olarak hazırlanan 30 dakika 60°C briketlerin yükleme akma dayanımları.....	23
Tablo 7. Bitüm oranı %5,4 olarak hazırlanan 48 saat 60°C briketlerin yükleme akma dayanımları.....	26
Tablo 8. Bitüm oranı %5,2 olarak üretilen briketlerin stabilite ve akma dayanımları	33
Tablo 9. Bitüm oranı %5,4 olarak üretilen briketlerin stabilite ve akma dayanımları	34
Tablo 10. Bitüm oranı %5,4 olarak hazırlanan briketlerin 30 dakika ve 48 saat sonundaki yükleme akma dayanımları	34

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ADK	: Atık Döküm Kumu
AFS	: Amerikan Dökümcüler Birliği
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım
CAM	: Bilgisayar destekli üretim
CNC	: Bilgisayar destekli üretim
HMA	: Sıcak karışımli asfalt
PCC	: Portland Çimento Betonu
RAP	: Geri kazanılmış asfalt kaplama
WFS	: Atık döküm/dökümhane kumu

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Döküm; ergimiş metalin, içerisinde boşluk bulunan bir kalıba dökülüp katılaştırılmasıyla oluşturulmaktadır. Başta otomotiv sektörü olmak üzere birçok endüstri dalında döküm kumu yüksek miktarlarda kullanılmaktadır. Bu alanlardaki yoğun üretim faaliyetleri, döküm kumu tüketimini artırmakta ve buna bağlı olarak önemli düzeyde atık oluşumuna neden olmaktadır.

Karayolları yol ağının büyümesi, kentleşmeyi ve sosyoekonomik kalkınmayı az gelişmiş bölgelere getirir. Mineral agregalar gibi büyük miktarlarda doğal kaynak talep ederler. Bu nedenle daha ucuz ve daha sürdürülebilir alternatif inşaat malzemelerinin kullanımına ihtiyaç vardır. Atık Döküm Kumu (WFS), dünya çapında büyük miktarlarda üretilen endüstriyel bir yan üründür. Bu anlamda son on yıllarda sıcak karışım asfaltta (HMA) ince agreganın WFS ile kısmen değiştirilmesini inceleme amacıyla çeşitli araştırmalar yürütülmüştür. WFS'nin fiziksel, kimyasal ve çevresel özelliklerinin ve asfalt matrisindeki mekanik davranışının geleneksel agregalara benzer olduğunu göstermektedir. Ancak yeniden kullanımın sağladığı faydaları ele alan birkaç çalışma vardır; bu da dünya çapında önemli çevresel ve ekonomik faydalar sağlar. Bu inceleme, son kırk yılda HMA'da WFS'nin yeniden kullanımı üzerine yapılan ana çalışmaları bir araya getirerek, farklı araştırmaların bir panoramasını tartışmış ve yeniden kullanımın çeşitli avantajlarını özetlemiştir. Böylelikle bu temadaki araştırma fırsatlarının vurgulanması ve dünya çapında gerçek yol projelerinde yeniden kullanımı teşvik eden yeni çalışmaların yapılması hedeflenmiştir.

Sürekli artan yoğunluk ve haddeme stoklarından kaynaklanan yükler nedeniyle asfalt beton kaplamalara yönelik yüksek talepler söz konusu olmaktadır. Temel olarak, asfaltın kayma deformasyonlarına karşı stabilitesi mukavemet özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, numuneler yüksek sıcaklıkta test edilirken asfalt betonunun mukavemeti ne kadar yüksekse yol yüzeyinin kayma stabilite kararlılığı da o kadar yüksek olur. Bir otoyol inşa etmenin maliyetini düşürmenin bir yolu, muhtemelen kaplamanın yapısal katmanlarında endüstriyel atık kullanımınıdır. Tez kapsamında, atık döküm kumu kullanılarak yapılan asfalt beton testlerinin sonuçları sunulmaktadır.

Atık döküm kumunun asfalt betonunda doğal kum gibi geleneksel mineral malzemeler yerine kullanılması sadece ekonomik yararlar sağlamakla kalmayıp çelik sektörünün geri dönüşümü ve doğal mineral kaynaklarının kullanımından kaçınılması nedeniyle çevresel yararlar da sağlamaktadır.

Bu araştırma kapsamında Trabzon bölgesinde temin edilen atık dökümhane kumunun asfalt kaplamaya ikame edilmesi durumunda performans analizleri gerçekleştirilmektedir. Gerek normal geleneksel karışımların üretilmesinde gerekse geri dönüşüm karışımlarının üretilmesinde atık dökümhane kumlarının kullanılabileceği öngörülmektedir. Atık dökümhane kumu içerisinde bulunan reçine maddesinin geri dönüşüm stratejileri göstereceği etkiler ve düşük orandaki RAP uygulamaları için gençleştirici özellik gösterip göstermeyeceği irdelenmektedir.

Asfalt karışımlarının bileşiminde bulunan ince mineral agrega yerine geçebilen atık döküm kumu rezervleri vardır ve bu da doğal mineral olmayan hammaddelerin tüketimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Çalışma kapsamında, kontrol ve maça kumu katkılı karışımlar üretilerek, dizaynlar yapılarak, maça kumunun RAP katkılı ve RAP katkısız karışımlarda Marshall parametreleri üzerindeki etkisi araştırılacaktır. Bu kapsamda stabilite ve akma deneyleri incelenecektir. Her bir seçenekte çok sayıda standart örnek üretilerek örneklerin performans değişim aralığı standart sapması sorgulanacaktır. Genel anlamda özellikle yüksek sıcaklık koşulları için deformasyon özellikleri ve donma çözülme üzerine araştırma derinleştirilecektir.

Deneyde kullanılacak dökümhane kumu Hekimoğlu Döküm Tesislerinde yapılan üretim sonucu oluşan atık dökümhane kumudur. Deneyler Trabzon Büyükşehir Belediyesi Asfalt şantiyesinde yapılmıştır.

Deney için performans analizlerinde kullanılacak silindirik asfalt briketler, standart dizayndaki koşullar ve bitüm oranları değiştirilmeden uygun granülometri değerine yakın ince mineral agrega malzemesinin yerine %10, %15, %20, %25 ve %50 oranlarında kullanılmış dökümhane kumunun (atık döküm kumu) katılmasıyla üretilmiştir. Mevcut üretim dizaynında bitüm oranı %5,4 olarak korunmuştur. Ayrıca, dökümhane kumunun bitüm üzerine etkisini irdelemek açısından diğer karışım oranları değiştirilmeden aynı deneyler %5,2 bitüm kullanılarak üretilen asfalt briketler üzerinde de yapılmıştır. Asfalt briketlerin laboratuvar testleriyle, 30 dakika ve 48 saat sonundaki stabilite ve akma dayanımlarının tesis edilmiş olup, Mukavemet ve su geçirmezlik performansı açısından en iyi sonuç, %15'lik bir atık döküm kumu içeriğiyle elde edilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Döküm İşlemi Hakkında Genel Bilgiler

Döküm işlemi, ergitilmiş metalin içinde boşluk bulunan bir kalıba dökülerek katılaştırılması esasına dayanan bir imalat yöntemidir. Özellikle otomotiv, demir-çelik, alüminyum ve bakır alaşımlarının üretildiği sanayi kollarında yoğun şekilde kullanılmaktadır. Ancak süreç, yüksek sıcaklıklarda çalışmayı gerektirdiği için enerji tüketimi açısından oldukça yoğun olup çevre dostu bir yöntem olarak değerlendirilmemektedir.

Ergitme aşamasında gerekli sıcaklıklara ulaşmak için büyük miktarda enerji harcanmasını gerektirmesi nedeniyle üretim maliyetleri de yüksek olmaktadır. Avrupa Birliği çevre standartları ve çevre mevzuatları çerçevesinde, döküm tesislerinde kirliliği önleyici sistemlerin kurulması zorunlu tutulmakta, bu da sektör açısından önemli bir ekonomik yük oluşturmaktadır. Ayrıca, döküm sektöründe ortaya çıkan atıkların geri dönüştürülmesine yönelik uygulamaların sınırlı olması, depolama sorunları ve çevresel kirlilik riskleri yaratmaktadır.

2.2. Döküm Yöntemleri

Döküm yöntemleri, kullanılan kalıpların yeniden kullanılabilirliğine göre harcanabilir ve kalıcı kalıplı döküm yöntemleri olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Harcanabilir kalıp olarak kabuk, kum, seramik, alçı ve hassas kalıba döküm teknikleri yer almaktadır. Kalıcı kalıp olarak ise metal, savurma, sürekli ve basınçlı döküm teknikleri yer almaktadır (Hawaman, 2009). Bu iki yöntem arasındaki temel fark, kalıbın dökümden sonra yeniden kullanılıp kullanılamaması ve üretim malzemesidir.

2.3. Döküm Sektöründe Uygulanan Süreçler

Harcanabilir kalıplarla yapılan döküm üretimi genellikle altı ana aşamadan oluşmaktadır: model ve maça yapımı, kum-kalıp hazırlığı, kalıplama işlemi, metalin ergitilmesi, dökümün gerçekleştirilmesi ve son olarak temizleme aşamasıdır.

2.3.1. Model Yapımı

Döküm üretiminin ilk ve en önemli adımı modelin hazırlanmasıdır. Model, üretilecek parçanın fiziksel bir örneğini temsil eder ve nihai ürünün boyutsal doğruluğunu doğrudan etkiler. Bu nedenle model tasarımı sürecin en kritik aşamalarından biridir (Yiğit, 2013). Model, dökülecek metalin katılaşma özellikleri, çekme davranışı ve işlenebilirliği dikkate alınarak tasarlanır. Günümüzde model yapımında bilgisayar destekli tasarım (CAD), bilgisayar destekli üretim (CAM) sistemleri ve CNC tezgâhları yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan model malzemeleri arasında metal, plastik, ahşap ve alçı en çok tercih edilen türlerdir (Yiğit, 2013; Başar, 2012).

2.3.2. Maça Yapımı

Maçalar, döküm sırasında kalıp boşluklarına yerleştirilen ve parçanın iç kısmında boşluk oluşturulmasını sağlayan elemanlardır. Döküm sürecinde erimiş metal tarafından sarılan maçalar; ısı şok, metal sızması, kırılma ve aşınma gibi olumsuz etkiler karşısında dayanıklılık göstermelidir. Ayrıca döküm sonrası kolayca dağılabilir olmaları istenir. Maçalar genellikle kum esaslı olup bazı durumlarda kalıbın tamamını oluşturacak şekilde de kullanılabilir. Maçaların kullanılması, döküm sırasında kalıp boşluklarına yerleştirilen ve parçanın iç kısmında boşluk oluşturulmasını sağlayan elemanlardır. Döküm sürecinde erimiş metal tarafından sarılan maçalar; ısı şok, metal sızması, kırılma ve aşınma gibi olumsuz etkiler karşısında dayanıklılık göstermelidir. Ayrıca döküm sonrası kolayca dağılabilir olmaları istenir. Maçalar genellikle kum esaslı olup bazı durumlarda kalıbın tamamını oluşturacak şekilde de kullanılabilir.

Kalıp kumları genel olarak doğal ve sentetik olmak üzere iki grupta incelenir. Doğal kumlar, doğrudan doğadan elde edilir ve genellikle doğal kil oranına sahiptir. Sadece su eklenerek bağlayıcılık kuvvetlendirilebilir. Nem tutma özellikleri yüksektir ancak bileşimlerinin homojen olmaması, özelliklerinin değişken olmasına neden olur. Sentetik kumlar ise düşük kil oranına sahip doğal kumlara bentonit gibi bağlayıcıların eklenmesiyle elde edilir. Bu tür kumlar yüksek refrakterlik, kontrollü tane boyutu ve tekrarlanabilir özellikleri sayesinde endüstride daha çok tercih edilmektedir. Kum taneleri genellikle 0,05–2 mm boyut aralığındadır. Döküm uygulamalarında en yaygın kullanılan bileşim silisyum dioksit (SiO_2) esaslı kumlardır. Silis kumu, kolay temin edilebilirliği, düşük maliyeti ve yüksek sıcaklık dayanımı sayesinde avantajlıdır. Bu avantajına karşın yüksek genleşme katsayısına sahip olduğundan ölçü toleransları açısından dikkatli kullanılmalıdır. Silis kumunun dışında zirkon, olivin ve kromit gibi mineral içerikli kumlar da kullanılmaktadır (Solmaz, 2008). Zirkon kumları düşük genleşme ve yüksek ısı iletkenliği özellikleriyle öne çıkmasına karşın yoğunluklarının fazla olması maliyet açısından dezavantaj yaratabilmektedir. Olivin $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ ve kromit $(\text{Fe,Mg})\text{Cr}_2\text{O}_4$ gibi mineraller ise

alternatif refrakter malzemeler olarak tercih edilmektedir. Tablo 1 ile kalıp kumu türleri ve özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 1. Kalıp kumu türleri (Solmaz, 2008)

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) ₂ SiO ₄	3500	7	Yeşil-Sarı
Kromit	(Fe,Mg)Cr ₂ O ₄	4500	5.5	Siyah

2.4. Bileşenler Bazında Döküm Kumu

2.4.1. Kum

Döküm endüstrisinde kullanılan kum türleri, uygulanan döküm tekniğine ve üretilecek parçanın özelliklerine göre değişmektedir. Ana bileşeni olan kum, refrakter bir malzeme niteliği taşır ve genellikle toplam karışımın %85–95’ini oluşturmaktadır. Bu malzeme yaklaşık 1700°C sıcaklığa kadar erimeden dayanım gösterebilmektedir (Başar, 2012). Yer kabuğundaki kayaçların büyük kısmı (%95) silika (SiO₂) bileşimlidir, üç temel kristal formu bulunmaktadır. Bu formlar, farklı sıcaklık koşullarında kararlı hâle gelmekte ve döküm sürecindeki davranışlarını belirlemektedir. Kum tanelerinin incelik derecesi AFS (Amerikan Dökümcüler Birliği) standartlarına göre ifade edilmektedir. Bu numara birim inç karedeki elek sayısını temsil etmektedir. Yuvarlak taneli kumlar kalıp hazırlama sürecini kolaylaştırmakta ve ürünün yüzey kalitesini iyileştirmektedir (Solmaz, 2008).

Tablo 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

Tablo 2'nin devamı

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

2.4.2. Eklentiler

Kalıp kumlarının teknik özelliklerini geliştirmek ve döküm işlemi sırasında performansını artırmak amacıyla karışıma çeşitli katkı maddeleri eklenmektedir. Bu ilâveler fiziksel ve kimyasal dayanımı yükseltmenin yanı sıra kalıbın yeniden kullanılabilirliğini sağlamaya yöneliktir (Solmaz, 2008).

Sıcak ortamlarda kalıp dayanımını artırmak için silis tozu ve demir oksit, karışımın akışkanlık ve plastiklik özelliklerini geliştirmek ve homojen dağılımı için fuel oil tercih edilmektedir. Kalıbın yaş ve kuru mukavemetini yükseltmek amacıyla mısır unu kullanılmaktadır. Dökümden sonra kumun yapısının bozulmadan yeniden kullanılmasına olanak tanımak için pulverize kömür ilavesi yapılmaktadır. Kalıbın ısı kararlılığını düzenlemek ve yüksek sıcaklıklarda parçalanmayı önlemek için odun talaşı eklenir. Odun talaşı, yüksek ısıya maruz kaldığında yanarak kalıbın gevrekliğini azaltır ve mukavemetin daha dengeli dağılmasını sağlar. Grafit tozu, döküm yüzeyinin kalitesini artırmak için kullanılan bir diğer önemli katkıdır. Grafitin yüksek yüzey gerilimi, sıvı metalin kalıp yüzeyine yapışmasını engeller, böylece daha pürüzsüz bir yüzey elde edilmektedir. Yüksek sıcaklık koşullarında kalıbın termal genişlemesini önleyerek kullanım ömrünü artırmak için ise perlit kullanılmaktadır.

2.5. Döküm Sektörünün Türkiye ve Dünyada Durumu

Dünyanın önde gelen sanayileşmiş ülkelerinin üretim altyapısında önemli bir yer tutan döküm endüstrisi Türkiye'de ise büyüyen bir potansiyele sahip olup özellikle otomotiv ve makine imalat sektörlerinde kapasitesini artırmaktadır. Atık döküm kumlarının geri kullanımı ve çevre dostu üretim süreçleri konularında Avrupa ülkelerine kıyasla gelişim süreci devam etmesine karşın tesis üretim ortalamasında Almanya ve ABD'nin veriminin diğer ülkelere kıyasla ön planda olduğu görülmektedir (Yıldız, 2018).

Tablo 3. Dünya döküm üretimi 2020 yılı ilk 10 (TÜDOKSAD, 2021)

Sıra No	Ülke	Üretim (Ton)	Ülke Ton Değişim (%)
1	Çin	51.950.000	6
2	Hindistan	11.314.360	-1.5
3	ABD	9.748.881	-13.7
4	Rusya	4.200.000	Güncel değil
5	Almanya	3.482.883	-29.6
6	Japonya	3.446.903	-34.7
7	Meksika	2.855.650	Güncel değil
8	G. Kore	2.380.200	0
9	Türkiye	2.170.759	-6
10	Brezilya	2.073.173	-9.4

Tablo 4. Dünyanın ilk 10 ülkesi ve Türkiye’de üretim ortalamaları (TÜDOKSAD, 2021)

Sıralama	Ülke	Üretim Ortalaması (Ton)
1	Almanya	6.883
2	ABD	5.869
3	Rusya	3.684
4	Meksika	3.570
5	Güney Kore	2.714
6	Hindistan	2.514
7	Brezilya	2.413
8	Türkiye	2.280
9	Çin	1.998
10	Japonya	1.346

2.6. Çevresel Etkiler Açısından Döküm Sektörü

Döküm sanayi tesislerinde üretim süreci sonunda ortaya çıkan atık döküm kumları, çoğunlukla inorganik bileşenler içermekte olup çevresel kirlilik açısından potansiyel risk taşımaktadır. Ortalama olarak 1 ton döküm ürünü elde etmek için 4–5 ton kalıp kumu kullanılmaktadır. Bu miktar, dökümü yapılan metalin türüne, parça boyutuna ve kalıplama yöntemine göre değişkenlik gösterir. Yaklaşık olarak her 1 ton döküm üretiminde 0,6–0,8 ton atık ortaya çıkarken bunun da 0,4–0,6 tonunun kullanılmış kumlardan oluştuğu bildirilmektedir. Türkiye’de 2011 yılı verilerine göre 1.433.050 ton döküm üretimi gerçekleştirilmiş, bunun sonucunda yaklaşık 450.000 ton atık ortaya çıkmıştır. Bu atıkların yaklaşık %65’i atık döküm kumu, %15’i toz-çamur, %10’u cüruf, kalan %10’luk kısmı ise boya, yağ, refrakter, varil ve taş gibi diğer atıklardan oluşmaktadır (Başar, 2012).

Kalıp kumları, birkaç döngüden sonra fiziksel ve kimyasal özelliklerini yitirerek yeniden kullanılamaz hâle gelir. Bu durumda, söz konusu atıkların düzenli depolama yöntemiyle bertaraf edilmesi hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli bir sorun teşkil etmektedir. Her yıl binlerce ton atık döküm kumunun depolama alanlarını doldurması, sektör için ek maliyet oluşturmaktadır. Kumun içeriğindeki ağır metaller, yeraltı sularına sızarak kirliliğe yol açabilmektedir. Bu nedenle, ADK'nin stabilize edilmesi ve geri kazanımının araştırılması sürdürülebilir üretim açısından kritik öneme sahiptir.

2.7. Atık Dökümhane Kumlarının Tekrar Kullanımına Yönelik Çalışmalar

Küresel döküm üretim hacminin her geçen yıl artması atık döküm kumlarının bertaraf maliyetini yükseltmekte ve depolama alanlarının yetersizliği nedeniyle bu malzemenin geri kazanımı konusundaki araştırmaları zorunlu hâle getirmektedir.

Bakis vd. (2006), WFS'yi ve asfalt beton karışımlarında katkı maddesi olarak kullanımının uygunluğunu araştırmak amacıyla asfalt beton üretiminde agrega miktarının belirli bir kısmını WFS ile değiştirerek döküm atık kumunun yeniden kullanılmasına ilişkin bir laboratuvar çalışması gerçekleştirmişlerdir. Asfalt beton numuneleri üzerinde yapılan deneylerin sonucunda, WFS'nin %10'dan fazla miktarda ilave edilmesinin Marshall stabilitesini önemli ölçüde düşürdüğü, %0 WFS ile 12,1 kN olan stabilitenin %10 WFS ilavesi ile 10,9 kN'a düştüğü sonucuna varmışlardır ve bu nedenle pratik kullanım için asfalt betonda katkı maddesi olarak WFS'nin oranı %10 veya daha az ile sınırlandırılması gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca döküm atık kumunun kimyasal ve fiziksel özellikleri laboratuvar da analiz edilerek incelenen atık döküm kumunun depolama alanının çevresindeki çevreyi önemli ölçüde etkilemediğini belirtmişlerdir. Dolaylı çekme mukavemeti test sonuçlarına göre asfalt betona eklenen WFS yüzdesinin artmasıyla karışımların mukavemetinin neredeyse doğrusal bir şekilde azaldığını, %0 WFS ilavesi için 13,9 kPa'dan %10 WFS ilavesi için 11,8 kPa'ya kadar değiştiğini belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmalardan elde ettikleri deneysel sonuçlara göre asfalt betonda ince agrega yerine kısmen WFS kullanmanın pratik uygulamada maksimum yaklaşık %10 ile sınırlandırılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Solmaz (2008), atık döküm kumlarının geçirimsiz perde uygulamalarında kullanılabilirliğini araştırmıştır. Türkiye'deki döküm tesislerinden temin edilen 15 farklı ADK numunesi üzerinde yapılan deneylerde, indeks ve kompaksiyon özellikleri, hidrolik

iletkenlik ve bentonit oranları belirlemiştir. Ayrıca AAS ve ICP analizleri ile ağır metal içerikleri değerlendirmiş ve sonucunda ADK'nin evsel atık depolama sahalarında geçirimsizlik tabakası olarak kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Alonso-Santurde vd. (2011), kil tuğla üretiminde ADK geri dönüşümünü ele almıştır. Yaptığı deneylerde ham karışıma %35'e kadar ADK ilave etmiştir. Elde ettiği sonuçlarda kil tuğlalarda ADK kullanımının %30'a kadar teknik bir dezavantaj yaratmadan uygulanabileceğini öne sürmektedir. Buna karşın ürün performansının, hammadde bileşimine ve üretim koşullarına bağlı olduğunu belirtmiştir.

Arulrajah vd. (2017), dökümhanelerden çıkan atık döküm kumlarının (ADK) sürdürülebilir biçimde yeniden kullanım potansiyelini ayrıntılı biçimde araştırmışlardır. Araştırmalarında, metal içeriği ve çevresel risk algısı nedeniyle genellikle düzenli depolama sahalarına gönderilen ADK'nin, uygun mühendislik ve çevresel değerlendirmelerle inşaat sektöründe alternatif dolgu malzemesi olarak değerlendirilebileceği vurgulamışlardır. Özellikle yol dolguları, boru yataklama tabakaları ve altyapı dolguları gibi geoteknik uygulamalarda kullanılabilirliği deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, ADK'nin tane boyutu, özgül ağırlığı ve kompaksiyon özelliklerinin doğal zemin malzemelerine yakın değerler sergilediği; ayrıca kimyasal bileşim ve sızıntı analizlerinin yerel çevre standartlarıyla uyumlu olduğunu belirlemişlerdir. Bu kapsamda yapılan çevresel testler, ADK'nin ağır metal sızıntısı veya toksisite açısından risk teşkil etmediğini ve ADK'nin uygun ön arıtma veya karıştırma yöntemleriyle stabilize edilmesi hâlinde çevresel açıdan güvenli ve ekonomik bir inşaat malzemesi olarak kullanılabileceğini bu durumun da hem döküm endüstrisinin atık bertaraf yükünü azaltacağını hem de doğal kaynak kullanımını sınırlandırılabileceğini ortaya koymuşlardır.

Torres vd. (2017) atık döküm kumlarının Portland çimentosunda alternatif agrega olarak kullanılabilirliğini değerlendirmişlerdir. Araştırmalarında döküm endüstrisinde büyük miktarlarda ortaya çıkan atık kumların, geleneksel agrega yerine kullanılmasının çevresel ve ekonomik bakımdan sağlayacağı yararları incelemişlerdir. Farklı oranlarda ADK ikâme edilerek hazırlanan beton karışımları üzerinde yapılan mekanik dayanım testleri sonucunda atık döküm kumunun agrega yerine kullanılması durumunda basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülü değerlerinde %20–30 arasında değişen ancak kabul edilebilir düzeyde bir performans değişimi gözlemlenmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre döküm atıklarının işlenme maliyetini ve üretim süresini düşürerek beton üretiminde geri dönüştürülmüş malzeme kullanımını artırabileceğini belirtmektedirler.

Shuaibu vd. (2019), asfalt betonda alternatif dolgu malzemesi olarak atık döküm kumu (WFS) içeren asfalt betonun mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini araştırmışlardır. Numune hazırlama ve test için Marshall tasarım yöntemi kullanmışlardır. Asfalt Enstitüsü ve Nijerya Karayolları ve Köprüler Genel Şartnamesi'ne uygun olarak optimum bitüm içeriğini belirlemek için %4,5, %5,0, %5,5, %6,0 ve %6,5 oranlarında değişen bitüm içeriklerinde mukavemet ve hacimsel özellik testleri için on beş sıkıştırılmış numune hazırlamışlardır. Optimum bitüm içeriğini %5,5 olarak belirledikten sonra çalışmalarında kullanmışlardır. Esnek kaplamanın aşınma tabakasının mukavemeti ve dayanıklılığı için gerekli olan asfalt betonda optimum WFS içeriğini belirlemek için on sekiz farklı briket hazırlamışlardır. Asfalt betonda dolgu maddesi olarak kullanılan çimento, elde edilen optimum bitüm içeriği kullanılarak %10, %20, %30, %40, %50 ve %60 oranlarında kısmen WFS ile değiştirmişlerdir. Toplam otuz üç standart numune hazırlamışlardır. Marshall stabilite-akış ve boşluk yoğunluğu sonuçlarına göre %60 WFS dolgu maddesi ve %5,5 optimum bitüm içeriği ile hazırlanan numune, esnek kaplamanın aşınma tabakasında kullanım için Nijerya Karayolları ve Köprüler Genel Şartnamesi hükümlerini karşıladığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında elde ettikleri sonuçların analizi ve standart şartnamelere göre yaptıkları mantıksal karşılaştırmaya göre asfalt betona %60'a kadar atık döküm kumu (WFS) ilavesi, birincil inşaat malzemelerinin önemli ölçüde korunmasına, çöp sahalarından önemli miktarda atığın uzaklaştırılmasına ve sürdürülebilir asfalt beton yapımı için gerekli dolgu malzemesi için ucuz bir alternatif sunduğu sonucuna varmışlardır.

Tyuryukhanov & Pugin (2020), asfalt beton karışımının bileşiminde diğer küçük agregalarla karşılaştırmalı olarak atık metalurji tesisi atıkları ve atık döküm kumu kullanımını ele almışlardır. Doğal kum, kuvars kumu ve atık döküm kumu kullanılarak yapılan asfalt beton testlerinin sonuçlarına göre yaptıkları analizlerde ortalama yoğunluğun artması, su doygunluğunun ve kalıntı gözenekliliğin azalmasının, ince agrega olarak atık döküm kumu kullanılarak asfalt betonun mineral çekirdeğindeki tanelerin daha iyi bir düzeni olduğunu görmüşlerdir. Asfalt betondaki serbest gözenek sayısının azalması, demiryolu araçlarının etkisi altında meydana gelen kesme deformasyonlarına karşı daha iyi bir direnç olduğunu belirtmişlerdir. 50 °C ve 0 °C'de elde edilen sonuçlar arasında çekme mukavemeti açısından daha küçük bir fark olduğu varsayarken atık döküm kumu içeren asfalt betonun sıcak ve soğuk iklimlere sahip farklı iklim koşullarında daha yaygın olarak kullanıldığını belirtmişlerdir. Asfalt betonda atık döküm kumu kullanımı doğal kum gibi geleneksel mineral malzemeler yerine sadece ekonomik faydalar sağlamakla kalmayıp çelik

endüstrisinin geri dönüşümü ve doğal mineral kaynakların kullanılmamasından kaynaklanan çevresel faydalar sağladığını belirtmişlerdir.

Dyer vd. (2021), endüstriyel atık döküm kumu (WFS) ve ince agrega olarak WFS içeren sıcak karışım asfalt karışımları (HMA) örnekleri üzerinde fiziksel, mekanik ve mikroskobik analizler gerçekleştirmişlerdir. HMA, ince agrega (4,38 mm elekten geçen) ağırlıkça %50 ve %100 oranında WFS ile değiştirerek kaplama tabakaları için uygun yoğun gradasyona sahip olacak şekilde üretilip WFS içermeyen bir “kontrol” karışımı kullanmışlardır. Dolaylı çekme mukavemeti (ITS), esnek modül (MR), modifiye lottman testi (MLT) ve dört noktalı eğilme yorulma testi (FTP-4) gibi tipik yol mühendisliği testlerinin sonuçları, WFS içeren asfalt karışımlarının asfalt kaplamalarda yüzey tabakası olarak kullanılmak için gerekli kriterleri karşılayan mekanik davranışa sahip olduğu sonucuna varmışlardır. WFS'nin taş ocağı kumlarınıninkine çok benzer fiziksel özelliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları araştırmada WFS'nin mikroyapısal özelliklerini analiz etmek için optik stereoskop ve X-ışını enerji dağılım sensörüne bağlı bir taramalı elektron mikroskobu (SEM/EDS) kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre WFS'nin düşük reaktivite göz önüne alındığında, normalde gerekli kriterleri karşılayan petrografik özelliklere sahip olduğunu ortaya koyarken asfalt bağlayıcının WFS'yi kapsülleyerek serbest patojenik maddelerin varlığını ortadan kaldırdığını da göstermişlerdir. Sonuç olarak, WFS'nin HMA'da kullanımının teknik olarak uygulanabilir olduğu ve yol projeleri için sürdürülebilir bir alternatif olduğu sonucuna varmışlardır.

Dyer & de Lima (2022), sıcak karışım asfaltlarda atık döküm kumu kullanımına dair inceleme çalışması yapmışlardır. Atık döküm kumunun fiziksel özellikleri HMA'da kullanılan ince agrega ile benzer olduğunu ve homojenlik, parçacık boyutu ve şekil dağılımı gibi mikroyapısal özellikleri, HMA'nın mekanik özelliklerine fayda sağladığını belirtmişlerdir. Atık döküm kumunun kullanımının çevreye etkileri bakımından döküm işleminden kaynaklanan düşük konsantrasyonlarda metal ve fenolik reçineler içeren silikadan oluştuğunu ve başka hiçbir toksik madde içermediğini belirtmişlerdir. İnce agrega olarak atık döküm kumu içeren HMA'nın mekanik özelliklerinin çoğu çalışmada ana teknik kriterleri, ağır araç trafiği, tekrarlı yükler ve hava koşullarına karşı dirençli olma kriterlerini karşıladığını belirtmişlerdir. Asfalt bağlayıcı, atık döküm kumu parçacıklarını izole ederek HMA'dan sızan atık suyla kirlenme riskini ortadan kaldırdığını ve çevreye zarar vermeyen bir yol ürettiğini belirtmişlerdir. Atık döküm kumunun yeniden kullanımının ekonomik ve çevresel fayda sağladığını belirtmişlerdir.

Gambalonga vd. (2023), yaptıkları çalışmada sınıflandırma, potansiyel, üretilen atık ve uygulanabilirlik için sistematik kriterler kullanarak WFS'nin sıcak karışım asfalt karışımlarında (HMA) agrega olarak değerini irdelemişlerdir. Amaçları doğrultusunda kalıp kumu (MS) ve ince egzoz tozu (FDE) karakterize edilerek asfalt kütlelerinde agrega olarak kullanım potansiyellerini belirlemişlerdir. HMA için agregaların normatif granülometrik aralıklarına göre farklı MS, FDE ve Karışım (BL) içerikleri inceleyip asfalt karışımı için önemli özellikleri doğrulamak amacıyla Marshall yöntemi ile numuneler almışlardır. Ekotoksikite testleri de yapıldıktan sonra elde ettikleri sonuçlar, %10 ağırlıkça BL içeren bir bileşimin %3,3 hava boşluğu hacmi, 658 kgf stabilite, 2,5 mm sünme ve 0,93 MPa dolaylı çekme mukavemeti gösterdiğini ortaya koymuştur. Teknik ve çevresel açıdan, %10 ağırlıkça BL içeriği HMA'ya geri kazanım için uygun bulmuşlardır. Daha düşük miktarlarda BL, normatif sınırların dışında sonuçlar vermiştir. WFS'yi geri kazanılabilir ve HMA'da hammadde olarak kullanılabilir olarak yorumlamışlardır.

2.8. Materyal ve Yöntem

2.8.1. Atık Döküm Kumu

Çalışmada, Trabzon ilinde faaliyet gösteren Hekimoğlu Döküm Tesislerinde yapılan üretim sonucu oluşan atık dökümhane kumudur. Döküm tesislerinde yapılan üretimler sonucunda günlük ortalama 5 ton civarında atık dökümhane kumu çıkmaktadır.

Çalışmada kullanılan döküm kumları, demir, çelik ve diğer metal alaşımlarının üretimi sırasında yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen döküm işlemleri sonucunda, kalıplardan elde edilen endüstriyel yan ürünler niteliğindedir. Döküm işleminde kullanılan metal türüne ve döküm tekniğine bağlı olarak ortaya çıkan atık döküm kumlarının bileşimi ve özellikleri değişkenlik gösterebilmektedir. Araştırmada kullanılan atık döküm kumları yeniden kullanılabilir nitelikte olup kimyasal ve fiziksel özelliklerini büyük ölçüde korumuştur ve tane boyutu 0–1 mm aralığındadır.

Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik'te belirtilen kısıtlar doğrultusunda yapılan testlere göre atık döküm kumları tehlikeli olmayan atık olarak sınıflandırılmaktadır.

2.8.2. Numunelerin Hazırlanması

Briket numuneler; atık dökümhane kumlarının asfalt muhtevasına oransal olarak farklı hacimlerde %10, %15, %20, %25 ve %50 karıştırılarak elde edilmiştir. Hazırlanan atık döküm kumu numuneleri Şekil 1 ve Şekil 2’de gösterilmektedir.

Karışımın elek analizi ve karışım oranları raporu Tablo 5 ve Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Şantiyede depolanan atık döküm kumu ve laboratuvar atık döküm kumu

Tablo 5. Karışım oranları raporu

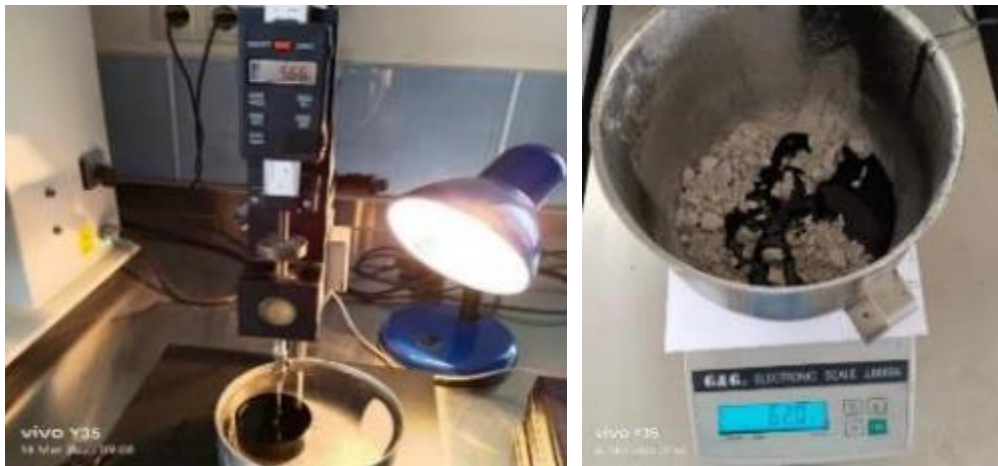
19.03.2025					KARIŞIM ORANLARI RAPORU								
NUMUNE CİNSİ: Aşınma ALINDIĞI YER: Soğuk Silo													
TANE BOYU	%	%	%	%	%	%	Hesapl.	K.T.Ş AŞINMA TİP-1 KISIM 407 LİMİTLERİ					
	12-19	7-12	0-7	D	E	F	Ortalama	İŞYERİ KARŞM GRD.	TOLERANS		ŞARTNAME		
	10%	34%	56%				100%						
1	100,0	100,0	100,0				100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
3/4	94,3	100,0	100,0				99,4	99,4	95,4	103,4	100,0	100,0	
1/2	72,7	89,6	100,0				93,7	93,7	89,7	97,7	83,0	100,0	
3/8	1,3	62,1	100,0				77,2	77,2	73,2	81,2	70,0	90,0	
No:4		9,9	88,1				52,7	52,7	48,7	56,7	40,0	55,0	
No:10		1,3	59,8				33,9	33,9	30,9	36,9	25,0	38,0	
No:40			21,2				12,9	12,9	9,9	15,9	10,0	20,0	
No:80			15,0				8,4	8,4	5,4	11,4	6,0	15,0	
No:200			10,9				6,8	6,8	4,8	8,8	4,0	10,0	



Şekil 4. Kalker agregası gradasyonu ve döküm kumuna denk kumun gradasyonunun belirlenmesi



Şekil 5. Briketlerde kullanılacak kalker agregası ve agrega grupları



Şekil 6. Karışımdaki katkısız bitüm penetrasyonunun miktarı ve briketlerde kullanılacak bitüm miktarı



Şekil 7. Briketlerde kullanılacak %10 ve %15 ADK oranının belirlenmesi



Şekil 8. Briketlerde kullanılacak %20, %25 ve %50 ADK oranının belirlenmesi



Şekil 9. Karışımın etüvde ısıtılarak hazırlanması



Şekil 10. Etüvde ısıtılan sıcak karışımların mikser karışım cihazında karıştırılması



Şekil 11. Kalıpların aynı sıcaklıkta ısıtılıp yağlanması ve karışımın kalıplara dökülmesi



Şekil 12. Briket üretimi için kalıplara dökülen karışımın Marshall cihazında 75 kez tokmaklanması



Şekil 13. Briketlerin 24 saat süreyle kalıpta bekletilip kriko yardımıyla kalıptan çıkarılması



Şekil 14. Katkısız ve her bir ADK karışım (%10-15-20-25-50) için üretilen briketler



Şekil 15. Standart üretim ve %10 ADK karışım briketler



Şekil 16. ADK oranı %15 ve %20 olan briketler



Şekil 17. ADK oranı %25 ve %50 olan briketler

Hazırlanan briketlerin yükleme akma dayanımı tespitleri öncesinde su kürüne tabi tutulmasına yönelik adımlar Şekil 18 ve Şekil 19’da gösterilmektedir.



Şekil 18. Üretilen briketlerin 30 dakika, 60°C su kürüne tabi tutulması



Şekil 19. Üretilen briketlerin 48 saat, 60°C su kürüne tabi tutulması

2.8.4. Marshall Su Hasarı Deneyi

Bu deney yönteminde bitümlü karışımın sıkıştırılmış silindirik numunesinin plastik deformasyona karşı direnci, numuneye dakikada 50 mm'lik bir deformasyon hızında çap yönünde yük uygulanarak ölçülmektedir. Marshall karışım tasarım yönteminin iki temel özelliği vardır. Bu temel özelliklerden ilki yoğunluk-boşluk analizi ve ikincisi stabilite-akma testleridir. Karışımın Marshall stabilitesi 60°C standart test sıcaklığında numune tarafından taşınan maksimum yük olarak tanımlanmaktadır. Akma değeri, test numunesinin maksimum yüke kadar yükleme sırasında maruz kaldığı deformasyondur ve akma 0,25 mm birimlerinde

ölçülmektedir. Bu test yönteminde kullanılan agreg a karışımı türü ve beklenen trafik yoğunluğu için optimum bağlayıcı içeriği elde edilmeye çalışılmaktadır.

Marshall tasarım yönteminde ilk olarak uygun agreg a gradasyonu belirlenir ve buna bağlı olarak tasarım sınıflandırması için agreg a boyut oranları belirlenir. Daha sonra agreg a karışımının ve asfalt çimentosunun özgül ağırlıkları tespit edilir. Farklı asfalt içeriklerine sahip deneme numuneleri hazırlanarak sıkıştırılır ve her numunenin özgül ağırlığı ölçülür. Ardından stabilite testleri uygulanır. Uygulanan stabilite testlerine göre boşluk yüzdeleri ile bitümle dolu boşluk oranları hesaplanır. Bu verilerden yola çıkılarak optimum bağlayıcı içeriği seçilir ve elde edilen sonuçlar tasarım gereksinimleriyle karşılaştırılarak karışımın uygunluğu değerlendirilir.

Stabilite testi yapılırken numune 60°C (+1 veya -1 değişebilir) sıcaklıktaki su banyosuna 30 dakika süreyle tamamen daldırılır ve işlemin ardından Marshall stabilite makinesine yerleştirilir. Yerleştirilen numunede kırılma meydana gelene kadar dakikada 51 mm sabit deformasyon hızında yükleme yapılır. Numunenin kırılmasına neden olan değer kN cinsinden Marshall stabilitesi olarak alınır. Maksimum yükte 0,25 mm'lik birime göre oluşan deformasyon miktarı akma değeri olarak belirlenir. Numunenin su banyosundan çıkarılması ile testin tamamlanması arasındaki toplam süre 30 saniyeyi geçmemelidir.

Karışım tasarımının temel amacı şartname sınırları içerisinde karışımı oluşturan farklı bileşenlerin optimum birleşimini belirlemektir. Bu kapsamda elde edilen karışımın, kaplamanın dayanıklılığını sağlayacak yeterli asfalt içeriğine, trafik yükleri altında bozulma ve deformasyona karşı yeterli stabiliteye, akmaya veya stabilite kaybına neden olmadan kontrollü sıkışmayı mümkün kılacak boşluk oranına ve uygulama sırasında ayrışmayı önleyecek düzeyde işlenebilirliğe sahip olması beklenmektedir. Optimum şartname koşullarını sağlamadığı durumlarda ise farklı yollar izlenebilmektedir. Boşluğun çok olması durumunda kaba agreg a oranının arttırılması, boşluğun az olması durumunda mineral filler oranının arttırılması ve düşük stabilite durumunda ise agreg a kalitesinin gözden geçirilmesi önerilmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Stabilite ve Akma Deneyleri

Hazırlanan briketlerin yükleme akma dayanımlarının tespit edilmesine yönelik yapılan çalışmalar Şekil 20, Şekil 21 ve Şekil 22’de gösterilmiştir.



Şekil 20. Üretilen briketlerin (katkısız ve %10 ADK’li numune) Kaltest cihazıyla stabilite akma dayanımlarının tespiti



Şekil 21. Üretilen briketlerin (%15 ve %20 ADK’li numune) stabilite akma dayanımlarının tespiti



Şekil 22. Üretilen briketlerin (%25 ve %50 ADK'li numune) stabilite akma dayanımlarının tespiti

Yapılan laboratuvar çalışmasının ilk aşamasında %5,4 bitüm oranı korunarak 9 adet katkısız (ADK yok) olmak üzere her bir numuneden %10, %15, %20, %25 ve %50 ADK oranında briket üretilmiştir. Üretilen briketlerin 4 adeti 30 dakika süreyle, 5 adedi ise 48 saat süreyle olmak üzere 60°C suda küre tabi tutulmuştur. Belirtilen sürelerin sonunda ADK'siz ve ADK'li her bir numunenin Kaltest cihazında stabilite akma dayanımları tespit edilerek tablo değerleri oluşturulmuş ve Tablo 6'da gösterilmiştir.

Oluşturulan karışımlar; katkısız, %10-15-20-25 ve 50 oranları için özdeş olarak hazırlanan ve 30 dakika, 60°C sıcaklıkta bekletilen briketlerin mekanik değerlendirmeleri aşağıda sunulmaktadır.

Tablo 6. Bitüm oranı %5,4 olarak hazırlanan 30 dakika 60°C briketlerin yükleme akma dayanımları

Numune	Dökümhane Kumu Karışım Oranı (%)	Yükleme (30 dk, 60°)	Ort. Yük. Değeri (KN)	Akma (mm)	Ort. Akma Değeri	Ort.Yük/ Ort.Akma Değeri Oranı
1	KATKISIZ	10,49	10,465	4,51	5,23	2,00096
2	KATKISIZ	11,08		4,89		
3	KATKISIZ	10,78		7,04		
4	KATKISIZ	9,51		4,48		
5	KATKISIZ					

Tablo 6'nın devamı

1	10%	11,7	10,825	4,82	4,46	2,42713
2	10%	9,91		4,41		
3	10%	11,85		4,56		
4	10%	9,84		4,05		
5	10%					
1	15%	10,82	11,275	4,42	4,3325	2,60242
2	15%	11,14		4,96		
3	15%	11,43		4,15		
4	15%	11,71		3,8		
5	15%					
1	20%	8,75	9,2	3,53	3,95	2,32911
2	20%	8,66		3,91		
3	20%	8,3		4,64		
4	20%	11,09		3,72		
5	20%					
1	25%	10,91	11,61	4,22	4,11	2,82482
2	25%	10,33		4,19		
3	25%	13,04		3,96		
4	25%	12,16		4,07		
5	25%					
1	50%	5,35	5,9425	2,06	2,2325	2,66181
2	50%	4,1		2,32		
3	50%	6,5		2,19		
4	50%	7,82		2,36		
5	50%					

Tablo 6 incelendiğinde standart üretimle kıyaslandığında karışıma eklenen ADK ilavesinin %20 ADK oranına kadar akma dayanımlarının pozitif yönde etkilendiği gözlenmiştir.

Katkı oranının %10-15-20-25 değerlerinde ortalama yük değerleri genellikle birbirine yakın değerler vermektedir. Hiç katkı içermeyen numune ile %10-15-20 ve 25 katkılı numunelerin ortalama yük değerleri kıyaslandığında; %10'luk katkı için %3,4 artış, %15'lik katkı için %7,7 artış, %20'lik katkı için %12 azalma ve %25'lik katkı için %11 artış olduğu görülmektedir. Numunelerin ortalama akma değerleri kıyaslandığında ise; %10'luk katkı için %14,7 azalma, %15'lik katkı için %17'lik azalma, %20'lik katkı için %24,5'lik azalma ve %25'lik katkı için %21'lik azalma olduğu görülmektedir. Bu verilerden hareketle en

düşük katkı etkisinin hem stabilite hem de akma yönünden %20'lik katkıda olduğu görülmektedir. Oran olarak %50 katkı içeren numunelerde ise stabilite ve akma kaybı %50'nin üzerine yükselmektedir.

Bu kapsamda veriler dayanım değerleri olarak yorumlandığında dayanım parametreleri yönünden %20-25 değerlerine kadar kullanımın söz konusu olabileceğini göstermektedir.

Ortalama akma değerlerine bakıldığında %10-15-20-25 ve 50 oranlarında artan dökümhane kumu oranıyla birlikte genellikle akma değerlerinin azaldığı görülmektedir. Özellikle %50 oranında katkı içeren numunenin akma değeri katkısız karışıma göre %57 azalma göstermektedir.

Stabilite/akma oranları değerlendirildiğinde %10 katkılı numune için 2,42'ye çıkmakla birlikte %15 katkılı numune için 2,60 olmaktadır. Stabilite/akma oranının oluklanma mukavemetinin bir göstergesi olarak kullanılması durumunda %10 ve %15 oranlarında stabilite/akma oranının artması oluklanma mukavemetinin artması olarak yorumlanmaktadır.

Stabilite/akma oranı %20-25 ve 50 katkılı numunelerde de oran olarak artış göstermesine karşın bir kontrol mekanizması olarak özellikle dayanım değerlerinin düşmesi dikkate alındığında bu oranların yüksek değerler olduğu bu irdleme kapsamında ileri sürülmektedir.



Şekil 23. Üretilen briketlerin (katkısız ve %10 ADK'li numune-48 saat ve 60°C su küründe) stabilite akma dayanımlarının tespiti



Şekil 24. Üretilen briketlerin (%15 ve %20 ADK'li numune-48 saat ve 60°C su küründe) stabilite akma dayanımlarının tespiti



Şekil 25. Üretilen briketlerin (%25 ve %50 ADK'li numune-48 saat ve 60°C su küründe) stabilite akma dayanımlarının tespiti

Oluşturulan karışımlar; katkısız, %10-15-20-25 ve 50 oranları için özdeş olarak hazırlanan ve 48 saat, 60°C sıcaklıkta bekletilen briketlerin mekanik değerlendirmeleri aşağıda sunulmaktadır.

Tablo 7. Bitüm oranı %5,4 olarak hazırlanan 48 saat 60°C briketlerin yükleme akma dayanımları

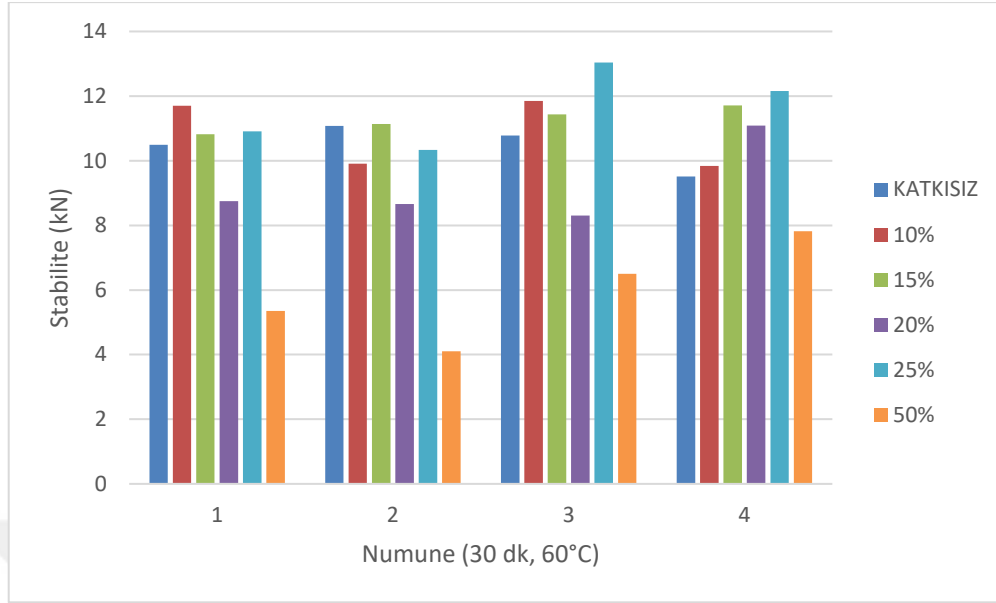
Numune No	Dökümhane Kumu Karışım Oranı (%)	Yükleme (48 saat, 60°)	Ort. Yük. Değeri (KN)	Akma (mm)	Ort. Akma Değeri	Ort.Yük/ Ort.Akma Değeri Oranı
1	KATKISIZ	10,36	10,326	5,21	6,086	1,696681
2	KATKISIZ	12,3		5,64		
3	KATKISIZ	10,05		6,7		
4	KATKISIZ	9,91		6,75		
5	KATKISIZ	9,01		6,13		

Tablo 7'nin devamı

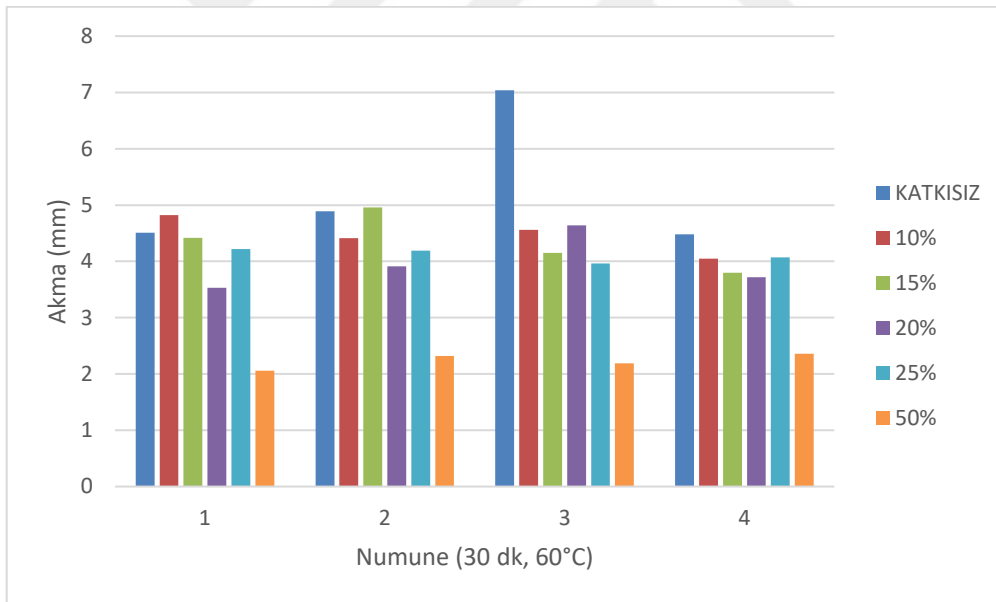
1	10%	10,33	10,256	4,62	4,532	2,263019
2	10%	9,57		4,44		
3	10%	10,87		4,16		
4	10%	10,21		4,73		
5	10%	10,3		4,71		
1	15%	11,19	11,224	4,71	4,856	2,311367
2	15%	10,84		4,55		
3	15%	11,6		5,18		
4	15%	11,8		4,99		
5	15%	10,69		4,85		
1	20%	8,59	9,9	4,26	4,31	2,296846
2	20%	10,2		4,71		
3	20%	9,17		4,18		
4	20%	10,62		4,14		
5	20%	10,94		4,27		
1	25%	11,06	10,664	5,13	4,34	2,457143
2	25%	10,48		4,19		
3	25%	9,53		3,67		
4	25%	9,88		4,36		
5	25%	12,37		4,35		
1	50%	6,79	6,312	2,33	2,39	2,641004
2	50%	6,78		2,48		
3	50%	6,19		2,45		
4	50%	6,09		2,4		
5	50%	5,71		2,29		

Tablo 7’de verilen 48 saat süre ve 60°C suda bekletilen briketlerin stabilite değişim oranları incelendiğinde; %10’luk katkı için %0,7 azalma, %15’lik katkı için %8,7 artış, %20’lik katkı için %4 azalma ve %25’lik katkı için %3,3 artış görülürken %50 atık dökümhane kumu karıştırılan numune için stabilite kaybının %39 düzeyinde olduğu görülmektedir.

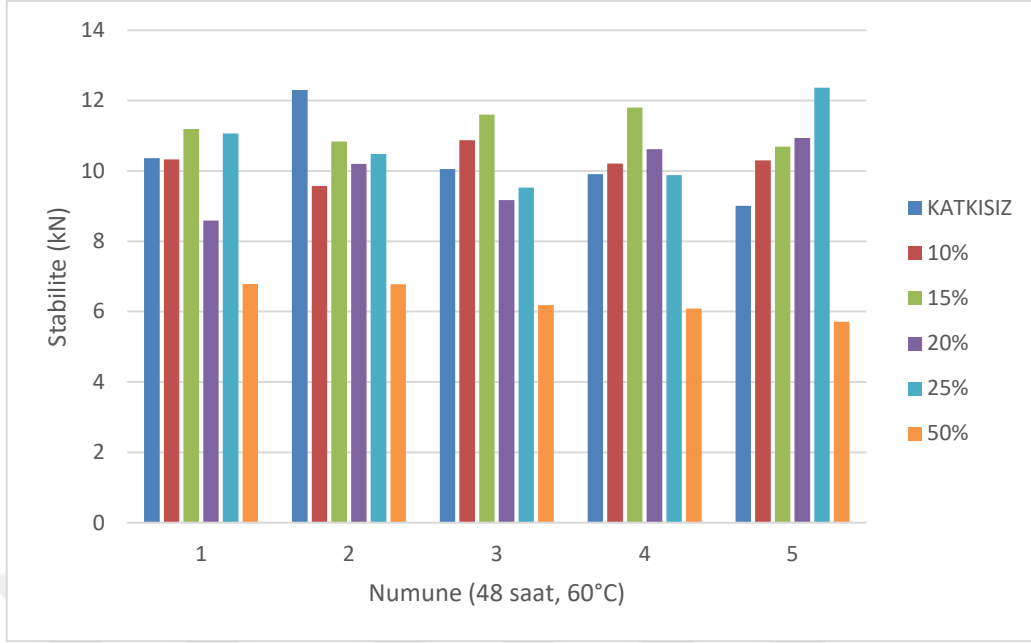
Ortalama akma değerlerine bakıldığında %10-15-20-25 ve 50 oranlarında artan dökümhane kumu oranıyla birlikte genellikle akma değerlerinin azaldığı görülmektedir. Özellikle %50 oranında katkı içeren numunenin akma değeri katkısız karışıma göre %60 azalma göstermektedir. Diğer katkı oranları için akma değerinde azalmaların sırasıyla %25-20-29 ve 28 olduğu görülmektedir.



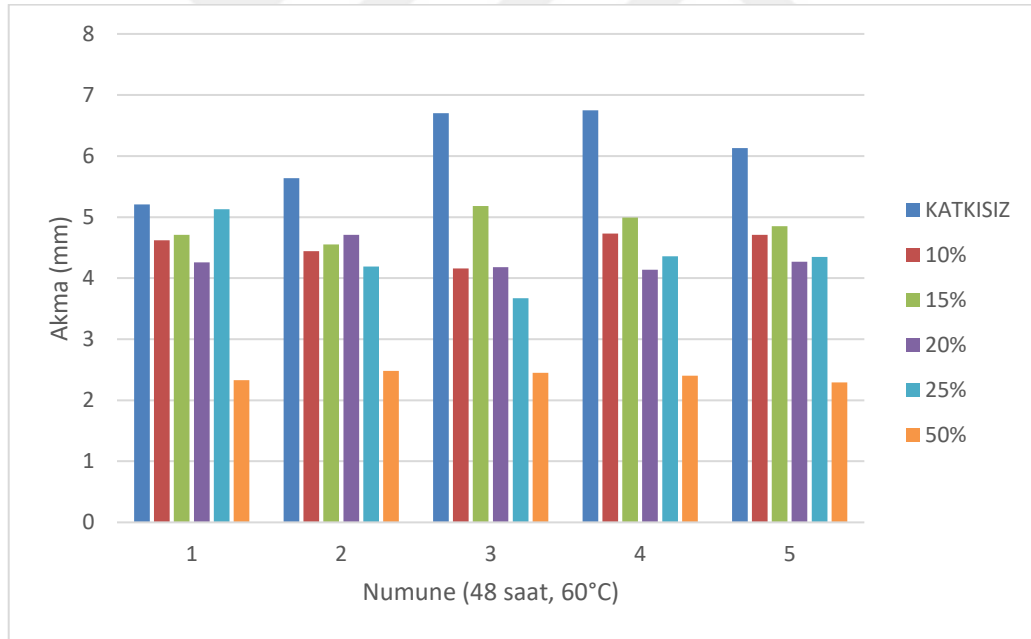
Şekil 26. Üretilen briketlerin (%5,4 bitüm-30 dakika ve 60°C) stabilite karşılaştırmaları



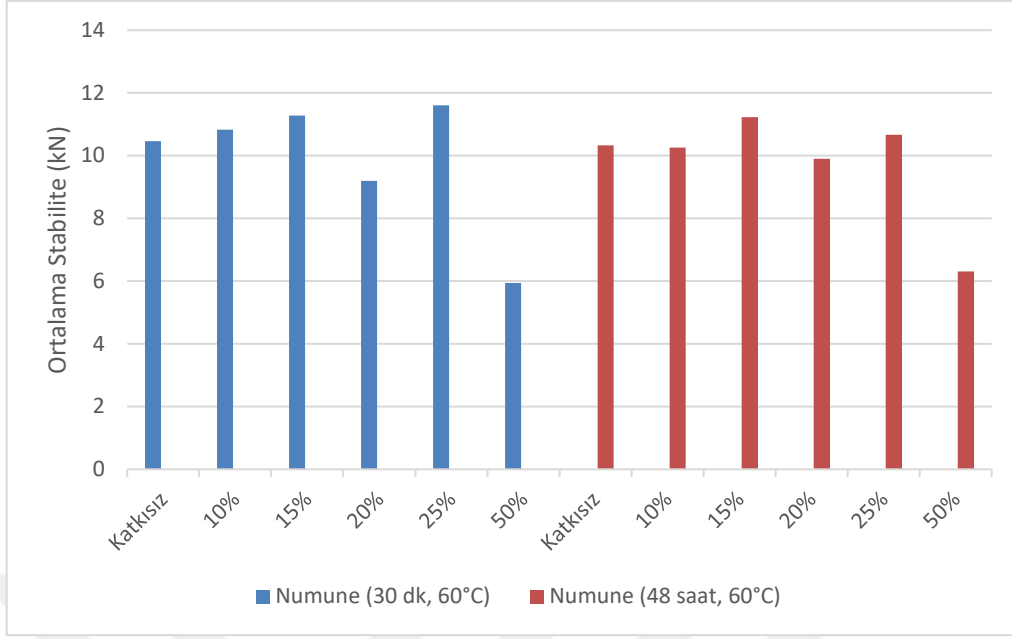
Şekil 27. Üretilen briketlerin (%5,4 bitüm-30 dakika ve 60°C) akma karşılaştırmaları



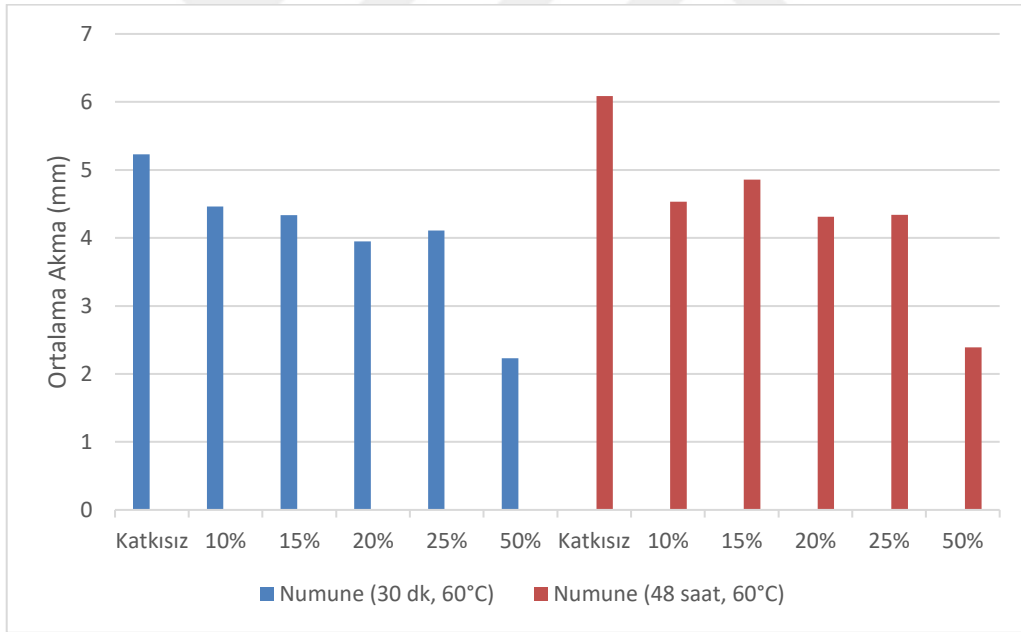
Şekil 28. Üretilen briketlerin (%5,4 bitüm-48 saat ve 60°C) stabilite karşılaştırmaları



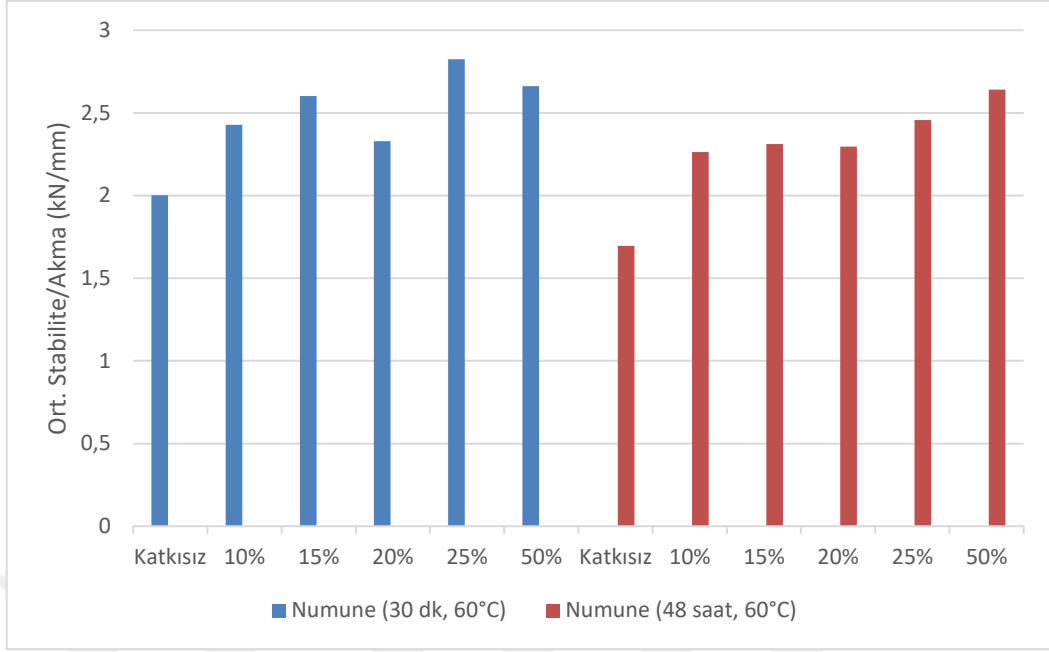
Şekil 29. Üretilen briketlerin (%5,4 bitüm-48 saat ve 60°C) akma karşılaştırmaları



Şekil 30. Üretilen briketlerin ortalama stabilite değerlerinin karşılaştırması



Şekil 31. Üretilen briketlerin ortalama akma değerlerinin karşılaştırması



Şekil 32. Üretilen briketlerin ortalama stabilite/akma değerlerinin karşılaştırması

Bitüm oranının azaltılmasının stabilite akma dayanımı üzerindeki etkisinin tespiti için yapılan deneyler Şekil 33'ten Şekil 38'e dek gösterilmektedir.



Şekil 33. Üretilen briketlerin (katkısız, %5,2 bitümlü-30 dakika ve 60°C su küründe) stabilite akma dayanım tespiti



Şekil 34. Üretilen briketlerin (%5,2 bitümlü, %10 ve %15 ADK'li-30 dakika ve 60°C su küründe) stabilite akma dayanımlarının tespiti



Şekil 35. Üretilen briketlerin (%5,2 bitümlü, %20 ve %25 ADK'li-30 dakika ve 60°C su küründe) stabilite akma dayanımlarının tespiti



Şekil 36. Üretilen briketler ve katkısız %5,2 bitümlü 48 saat ve 60°C su küründe stabilite akma dayanımlarının tespiti



Şekil 37. Üretilen briketlerin (%5,2 bitümlü, %10 ve %15 ADK'li-48 saat ve 60°C su küründe) stabilite akma dayanımlarının tespiti



Şekil 38. Üretilen briketlerin (%5,2 bitümlü, %20 ve %25 ADK'lu 48 saat ve 60°C su küründe) stabilite akma dayanımlarının tespiti

Tablo 8. Bitüm oranı %5,2 olarak üretilen briketlerin stabilite ve akma dayanımları

ADK Karışım Oranı (%) Bitüm oranı %5.2	Yüklemeye (30 dk, 60°), Bitüm %5.2	Akma bitüm %5.2	Yüklemeye (48 Saat, 60°), Bitüm %5.2	Akma bitüm %5.2
KATKISIZ	10,7	4,94	9,90	6,91
10%	11,38	4,77	11,67	5,66
15%	9,18	4,05	11,65	6,24
20%	11,04	5,15	12,49	5,71
25%	10,97	4,47	12,73	5,06

Tablo 9. Bitüm oranı %5,4 olarak üretilen briketlerin stabilite ve akma dayanımları

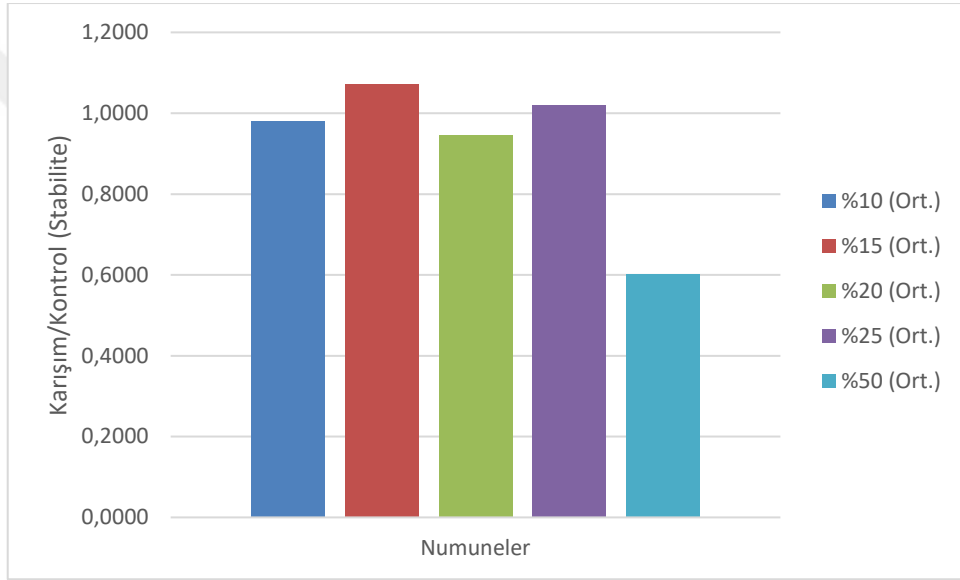
ADK Karışım Oranı (%) Bitüm oranı %5.4	Ort. Yükleme Değeri (30 dk, 60°)	Ortalama Akma Değeri	Ort. Yükl. Değeri (48 Saat, 60°)	Ortalama Akma Değeri
KATKISIZ	10,465	5,23	10,326	6,086
10%	10,825	4,46	10,256	4,532
15%	11,275	4,3325	11,224	4,856
20%	9,20	3,95	9,90	4,31
25%	11,61	4,11	10,664	4,34

Tablo 10. Bitüm oranı %5,4 olarak hazırlanan briketlerin 30 dakika ve 48 saat sonundaki yükleme akma dayanımları

Numune	ADK Karışım Oranı (%)	Yükleme (30 dk, 60°)	Ort. Yükl. Değer	Akma	Ort. Akma Değer	Ort. Yükl./Ort. Akma Değeri Oranı	Yükleme (48 saat, 60°)	Ort. Yükl. Değer	Akma	Ort. Akma Değer	Ort. Yükl./Ort. Akma Değeri Oranı
1	Katkısız	10,49	10,465	4,51	5,23	2,000956023	10,36	10,326	5,21	6,086	1,696680907
2	Katkısız	11,08		4,89			12,3		5,64		
3	Katkısız	10,78		7,04			10,05		6,7		
4	Katkısız	9,51		4,48			9,91		6,75		
5	Katkısız						9,01		6,13		
1	10%	11,70	10,825	4,82	4,46	2,427130045	10,33	10,256	4,62	4,532	2,263018535
2	10%	9,91		4,41			9,57		4,44		
3	10%	11,85		4,56			10,87		4,16		
4	10%	9,84		4,05			10,21		4,73		
5	10%						10,30		4,71		
1	15%	10,82	11,275	4,42	4,3325	2,602423543	11,19	11,224	4,71	4,856	2,311367381
2	15%	11,14		4,96			10,84		4,55		
3	15%	11,43		4,15			11,60		5,18		
4	15%	11,71		3,80			11,80		4,99		
5	15%						10,69		4,85		
1	20%	8,75	9,20	3,53	3,95	2,329113924	8,59	9,90	4,26	4,31	2,296846011
2	20%	8,66		3,91			10,2		4,71		
3	20%	8,3		4,64			9,17		4,18		
4	20%	11,09		3,72			10,62		4,14		
5	20%						10,94		4,27		

Tablo 10'un devamı

1	25%	10,91	11,61	4,22	4,11	2,824817518	11,06	10,664	5,13	4,34	2,457142857
2	25%	10,33		4,19			10,48		4,19		
3	25%	13,04		3,96			9,53		3,67		
4	25%	12,16		4,07			9,88		4,36		
5	25%						12,37		4,35		
1	50%	5,35	5,9425	2,06	2,2325	2,66181411	6,79	6,312	2,33	2,39	2,641004184
2	50%	4,1		2,32			6,78		2,48		
3	50%	6,5		2,19			6,19		2,45		
4	50%	7,82		2,36			6,09		2,4		
5	50%						5,71		2,29		

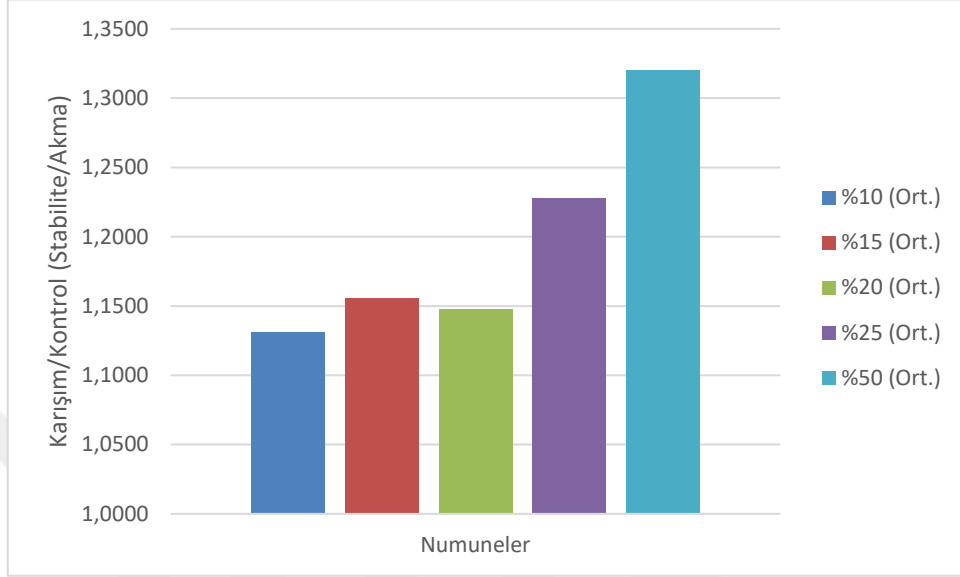


Şekil 39. Stabiliteye bağlı olarak hesaplanan karışım/kontrol ortalamaları

Atık dökümhane kumu ile %10-50 aralığında farklı oranlarda hazırlanan karışım kombinasyonları Şekil 39 ve Şekil 40'ta su hasarı oranı bakımından koşullu/koşulsuz olarak stabilite ve stabilite/akma oranları göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır.

Yalnızca stabilite yönünden incelendiğinde en iyi sonucun %7 oranındaki artış ile %15'lik katkı oranında olduğu görülmektedir. %25'lik atık dökümhane kumu katkısının da %2 oranında pozitif etkisi olmasına karşın %10 ve %20'lik katkı oranlarında bu oranın %2 ve %5 oranlarında kayıplar olarak ortaya çıktığı görülmektedir. %10-25 oranları arasındaki numuneler için pozitif ve negatif kayıpların yakın değerlerde olmalarına karşın %50'lik atık döküm kumu katkı oranı için kontrol karışıma göre %40 gibi yüksek oranda kayıp olduğu görülmektedir. Bu verilere göre değerlendirme yapıldığında %15 katkı oranında diğer katkı

oranlarına göre su hasarı direncinin arttığı görülürken %50 katkı oranında büyük kayıplar yaşandığı ve karışım için uygun bir oran olmadığı görülmektedir.



Şekil 40. Stabilite/akmaya bağlı olarak hesaplanan karışım/kontrol ortalamaları

Stabilite/akma yönünden incelendiğinde %32’lik artış ile en yüksek kazanımın %50 katkı oranına sahip karışım için olduğu görülse de stabilite bakımından değer kaybının yüksek oluşunun bu oran üzerindeki etkisinden dolayı %50 katkılı karışım grafikteki gösterimin aksine su hasarına direnç bakımından uygun olarak nitelendirilmemektedir. Diğer karışım oranları için de %13 ile %22 arasında farklı oranlarda kazanımlar bulunmaktadır. Hem stabilite hem de stabilite/akma oranları göz önüne alındığında özellikle %15 ve %25’lik katkı oranına sahip karışımların su hasarına direnç açısından verdiği sonuçların pozitif düzeylerde kaldığı görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Atık dökümhane kumu (WFS) içeren asfalt karışımlarının laboratuvar değerlendirmesi; mekanik, hacimsel ve dayanıklılıkla ilgili özellikleri üzerinde belirgin etkiler ortaya koymaktadır. Doğal ince agrega farklı oranlarda WFS (5%, 10%, 15%, 20% ve 25%) ile değiştirildiği durumda performans parametrelerinde tutarlı bir değişim meydana geldiği görülmektedir. Marshall stabilite değerleri, WFS içeriğinin artmasıyla kademeli bir düşüş gösterirken %15-20'ye kadar ikame içeren karışımların çoğu ulusal ve uluslararası spesifikasyonlar tarafından tanımlanan şartname aralıklarında kabul edilebilir aralıktaki stabilite seviyelerini koruduğu görülmektedir. Kontrol karışımının maksimum stabilite değeri yaklaşık 12,5 kN iken %10 ve %15 WFS içeren karışımlar sırasıyla 11,8 kN ve 11,3 kN stabilite değerleri sergilediği görülmektedir. Bu da referans karışımla karşılaştırıldığında %10'dan az bir azalma olduğunu ortaya koymaktadır.

Benzer şekilde karışımların akma değerlerinin 2,5-3,5 mm arasında değişen standart sınırlar içinde kaldığı ve bu durumun atık dökümhane kumu ilavesinin karışımın plastik deformasyon kapasitesini önemli ölçüde etkilemediğini göstermektedir. Karışımların yoğunluğu kontrol numunesinde 2,42 g/cm³ iken %20 WFS'de 2,38 g/cm³'ye düşerek 0,04 g/cm³'lük bir düşüş eğilimi göstermektedir; bu durum atık dökümhane kumu parçacıklarının daha düşük özgül ağırlığı ve daha yüksek gözenekliliğine atfedilebilmektedir. Toplam karışımdaki boşluklar ve bitümle doldurulmuş boşlukların sağladığı parametreler de bu durum ile orantılı olarak değişiklikler göstermektedir; toplam karışımdaki boşluk oranı %4,2'den %5,1'e %0,9'luk bir artış gösterirken bitümle doldurulmuş boşluklar da %72'den %68'e %4'lük bir düşüş göstermektedir. Bu da daha yüksek ikame seviyelerinde karışımın içindeki hava boşluklarında düşük bir miktar artış ve bitüm kaplama verimliliğinde azalma olduğunu göstermektedir.

Dayanıklılık ve su hasarına karşı direnç açısından Marshall su hasarı testi, %15'e kadar WFS içeren karışımların orijinal stabilitelerinin %90'ından fazlasını muhafaza ettiğini ve nem etkilerine karşı yeterli direnci sunduğunu göstermektedir. Atık dökümhane kumu katkısı oranının %15'ten fazla olduğu durumlarda stabilite değerlerinin %85'in altına düştüğü ve aşırı WFS kullanımının su hassasiyetine maruz kaldığı görülmektedir. Ekonomik açıdan bakıldığında ise ince agregayı döküm kumu ile ikame etmek, yerel agrega fiyatlarına ve atık dökümhane kumlarının erişim kolaylığına bağlı olarak malzeme tedarikinde yaklaşık

%8-12 oranında maliyet azaltımı sağladığı görülmektedir. Sonuçlar genel olarak, atık dökümhane kumunun makul bir oranda karışıma dâhil edildiğinde, mekanik bütünlüğü ve inşaat uygulanabilirliği açısından büyük ölçüde karışımı negatif etkilemeden asfalt üretiminin sürdürülebilirliğini artırabileceğini doğrulamaktadır.



5. ÖNERİLER

Bu çalışmada, atık dökümhane kumunun asfalt karışımlarda ince agregaya alternatif olabilme potansiyeli vurgulanmaktadır. Buna karşın pratikte uygulama noktasında daha fazla deneysel ve saha bazlı doğrulama gerektiği de belirtilmektedir. Gelecekteki araştırmalarda hızlandırılmış kaplama testleri veya tam ölçekli deneme bölümleri kullanılarak bu tür karışımların tekrarlı yükleme, sıcaklık değişimleri ve farklı nem döngüleri altında uzun vadeli performanslarına odaklanmalıdır. Atık dökümhane kumu ve bitüm arasındaki yüzey temasına bağlı olarak davranışı analiz etmek, adezyon ve stabilitede gözlemlenen değişiklikleri açıklayabilmek adına taramalı elektron mikroskobu ve X-ışını difraksiyonu gibi gelişmiş karakterizasyon tekniklerinin kullanılması önerilmektedir.

Atık malzemenin artan yüzey alanı ve emme kapasitesini telafi etmek için daha yüksek katkı seviyeleri için bitüm içeriğinin optimizasyonu yeniden gözden geçirilmelidir. WFS'nin kimyasal bileşimi de önem arz etmektedir ve bu önem nedeniyle işlemin dikkatle takip edilmesi önerilmektedir. Döküm işleminden kaynaklanan kalıntı metal oksitler veya bağlayıcı kalıntıları asfalt bağlayıcının yaşlanma özelliklerini etkileyebilmekte veya sızıntı gibi çevresel sorunlara yol açabilmektedir. Ek olarak, karışımın yapısal performansını daha kapsamlı bir şekilde anlamak için çekme mukavemeti oranı, Hamburg tekerlek izi deneyi ve dört nokta eğilme yorulma testleri gibi testler yoluyla nem hassasiyeti, tekerlek izi direnci ve yorulma ömrü tespiti için analizler yapılmalıdır.

Mekanik testlere ekonomik ve çevresel değerlendirmeler eşlik etmelidir. Yaşam döngüsü maliyet analizi ve yaşam döngüsü değerlendirmesi doğal agregaların farklı oranlarda WFS katkı ile karıştırılması durumunda karbon emisyonları ve kaynak tüketimindeki potansiyel azalmayı ölçmeye yardımcı olabileceği öngörülmektedir. Laboratuvar bulgularını doğrulamak ve sahadaki uygulama kolaylığını, sıkıştırma davranışını ve yüzey dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla küçük ölçekli kaplama denemeleri yapılması tavsiye edilmektedir. Son olarak WFS içeriği, kalite gereksinimleri ve önerilen test prosedürleri dâhil olmak üzere standartlaştırılmış kılavuzlar ve spesifikasyonlar geliştirmek, atık dökümhane kumunun asfalt teknolojisinde güvenli ve yaygın bir şekilde benimsenmesini kolaylaştırmak adına önemli bir adım olacağı düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abichou, T., Benson, C. H., & Edil, T. B. (1998). Using waste foundry sand for hydraulic barriers. *Recycled Materials in Geotechnical Applications (GSP 79)*, ASCE, Reston, 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., Andrés, A., Viguri, J. R., Raimondo, M., Guarini, G., Zanelli, C., & Dondi, M. (2011). Technological behaviour and recycling potential of spent foundry sands in clay bricks. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 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. *Sustainable Cities and Society*, 28, 343–349.
- Bakis, R., Koyuncu, H., & Demirbas, A. (2006). An investigation of waste foundry sand in asphalt concrete mixtures. *Waste Managament & Research*, 24(3), 269–274.
- Başar, H. M. (2012). *Dökümhanelerden kaynaklanan atıkların uygun geri kazanım/tekrar kullanım ve bertaraf yöntemlerinin incelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Başar, H. M., & Deveci Aksoy, N. (2012). Atık döküm kumunun geri kazanım uygulamaları. *Sigma: Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 30(2), 205–224.
- Dungan, R. S., & Dees, N. H. (2009). The characterization of total and leachable metals in foundry molding sands. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 539–548.
- Dyer, P., Coppio, G., Silva, A. S., Cividanes, L. S., Klinsky, L. M. G., & de Lima, M. G. (2021). Mechanical and microstructural assessments of waste foundry sand in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 311, 125329.
- Dyer, P., & de Lima, M. G. (2022). Waste foundry sand in hot mix asphalt: A review. *Construction and Building Materials*, 359, 129342.

- Gambalunga, B., Nicolini, J. L., Inocente, J. M., Pich, C. T., Angioletto, E., Pereira, F. R., Montedo, O. R. K. & Arcaro, S. (2023). Valorization of waste foundry sand aggregates in hot-mix asphalt. *Process Safety and Environmental Protection*, 173, 277-288.
- Gedik, A. (2008). *Atık döküm kumlarının karayolu malzemesi olarak kullanımı*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- 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(9), 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*. London: Pentech Press.
- 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. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(3), 364–374.
- 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.
- Klein, A., & Sarsby, R. W. (2000). Problems in defining the geotechnical behaviour of wastewater sludges. *Geotechnics of High Water Content Materials*, 74-87.
- Lin, D. F., Luo, H. L., Lin, K. L., & Liu, Z. K. (2017). Effects of waste glass and waste foundry sand additions on reclaimed tiles containing sewage sludge ash. *Environmental Technology*, 38(13), 1–31.

- Shuaibu, A. A., Otuoze, H. S., Mohammed, A., & Lateef, M. A. (2019). Properties of asphalt concrete containing waste foundry sand as filler material. *Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment*, 15(3), 662-677.
- Siddique, R., Kaur, G., & Rajor, G. (2010). Waste foundry sand and its leachate characteristics. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1027–1036.
- Solmaz, P. (2008). *Atık döküm kumunun geçirimsiz perde yapılarak tekrar kullanılması*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- 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.
- Torres, A., Bartlett, L., & Pilgrim, C. (2017). Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, 135, 674–681.
- TÜDÖKSAD. (2021). *TÜRKDÖKÜM/TÜRKCAST Dergisi*. İstanbul: Kültür Sanat Basımevi.
- Tyuryukhanov, K. Yu., & Pugin, K. G. (2020). An impact of waste foundry sand on asphalt concrete mixture. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 753(2), 022079.
- Usta Benli, A. (2017). *Resource efficient and cleaner production in selected foundries through environmental performance evaluation*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Yaşar, O. (2009). Türk imalat sanayiinde lokomotif bir sektör: Demir-çelik sanayi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 20, 42–78.
- Yıldız, A. (2018). Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalar. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 546-556.
- Yiğit, Ç. (2013). *Life cycle assessment in ferrous foundry industry*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Özdil Mahallesinde, Lise öğrenimini Trabzon Affan Kitapçıoğlu Lisesinde tamamladı. 2001 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesinde İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Vatani görevini 2001-2002 yılları arasında İstanbul Tuzla Piyade Okulunda Yedek Subay olarak tamamladı. 2004-2005 yılları arasında Özdil Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğünde inşaat mühendisi olarak, 2005-2008 yılları arasında MSB Erzurum İnşaat Emlak ve NATO ENF. Bölge Başkanlığında İnceleme ve Kontrol Mühendisi olarak, 2009-2019 yılları arasında DSİ 22. Bölge Müdürlüğünde kontrol mühendisi ve Şube Müdürlüğü görevlerinde bulundu. 2019 Aralık ayında Trabzon Büyükşehir Belediye Başkanlığı TİSKİ Genel Müdürlüğüne kurumlar arası geçiş yaptı. 2019-2023 yılları arasında sırasıyla kontrol mühendisliği, Proje Şube Müdürlüğü, Etüt ve Planlama Daire Başkan Vekilliği, Yatırım ve inşaat Daire Başkanlığı görevlerinde bulundu. 2023 yılında TİSKİ Genel Müdürlüğünde Elektrik Merkezleri Daire Başkanlığı görevine atandı ve halen aynı görevine devam etmektedir. Evli olup 2 kız çocuğu bulunmaktadır.