

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İÇME SUYU ARITMA ÇAMURUNUN ASFALT BETON
KARIŞIMLARINDA KULLANIMI

Tuna Eyüp KAHVECİ

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Programı

Danışman

Prof. Dr. Halit ÖZEN

Temmuz, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İÇME SUYU ARITMA ÇAMURUNUN ASFALT BETONU
KARIŞIMLARINDA KULLANIMI**

Tuna Eyüp KAHVECİ tarafından hazırlanan tez çalışması 29/07/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Halit ÖZEN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Halit ÖZEN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa GÜRSOY, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Murat ERGUN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN
İstanbul Gelişim Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sinan Yardım
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Halit ÖZEN sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “İçme Suyu Arıtma Çamurunun Asfalt Betonu Karışımlarında Kullanımı” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Tuna Eyüp KAHVECİ

İmza

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışması süresince beni teşvik eden ve ihtiyaç duyduğumda yardım konusunda her daim her türlü desteği veren danışmanım Prof. Dr. Halit ÖZEN'e, Tez izleme komitesi üyeleri Doç.Dr Mustafa GÜRSOY'a ve Doç.Dr. Murat ERGUN'a, kayıt tarihleri v.s. hususlarında kendisinden yardım istediğimde beni her daim bilgilendiren Y:T:Ü: Fen Bilimleri Enstitüsü sekreteri Süleyman BOLAT'a, deneylerin yapılmasında her türlü desteği veren İSFALT A.Ş. kalite kontrol müdürü M.Emre TEKİN'e ve sevgili aileme çok teşekkür ederim

Tuna Eyüp KAHVECİ



İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
2 İZLENEN YÖNTEM	5
3 BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR	7
3.1 Bitümlü Sıcak Karışımlar	7
3.2 Bitümlü Sıcak Karışımların Tarihçesi	7
3.3 Agregalar	8
3.3.1 Agregaların Sınıflandırılması	8
3.3.2 Agregaların Fiziksel Özellikleri	11
3.3.3 Agregalara Uygulanan Deneyler	12
3.4 Bitüm (Bağlayıcı Madde)	12
3.4.1 Bitümlerin Sınıflandırılması	13
3.4.2 Bitümün Özellikleri ve Davranış Karakteristikleri	14
3.4.3 Bitüme Uygulanan Geleneksel Deneyler	15
3.4.4 Superpave Deneyleri	15
4 BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM (BSK) MODİFİKASYONU	17
4.1 BSK katkı malzemeleri ve aranan özellikler	17
4.2 BSK'lara doğrudan ilave edilen katkı maddeleri	20
4.3 Bitüme Doğrudan ilave Edilen Katkı Maddeleri	20
5 İÇMESUYU ARITMA ÇAMURU	23
5.1 Arıtma Çamurları	23
5.1.1 Arıtma Çamuru Kaynakları	24
5.1.2 Arıtma Çamurlarının Karakterizasyonunda Önemli Parametreler	25
5.2 İçme suyu Atık Çamuru	30
5.2.1 İçme Suyu Arıtma Çamurlarının Genel Özellikleri	30
5.2.2 İçme Suyunun Arıtılma Süreci	33
5.2.3 İçme suyu Arıtma Sürecine Bir Örnek: İstanbul İSKİ Cumhuriyet İçme suyu Arıtma Tesisi	34
5.3 Türkiye Cumhuriyeti'nde İçme Suyu Arıtma Çamuru Üretim Miktarı	40

6 KULLANILAN MALZEMELER VE UYGULANAN DENEYLER	43
6.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	43
6.1.1 Agrega	43
6.1.2 Bağlayıcı.....	45
6.1.3 Katkı Malzemesi.....	46
6.1.4 İçme suyu Arıtma Çamuru (İSAÇ).....	46
6.2 Çalışmada Uygulanan Deneyler	54
6.3 İçme suyu Arıtma Çamurlarına Uygulanan Deneyler ve Çıktıları.....	54
6.3.1 İSKİ Cumhuriyet İçme suyu Arıtma Çamuruna Uygulanan Deneyler	55
6.3.2 İSKİ İkitelli İçme suyu Arıtma Çamuruna Uygulanan Deneyler	60
7 DEĞERLENDİRME	62
8 SONUÇ	68
KAYNAKÇA	70
A DEMİR ÇAMURUNA UYGULANAN DENEY SONUÇLARI	82
B ALUM ÇAMURUNA UYGULANAN DENEY SONUÇLARI	86
C ALUM ÇAMURUNA UYGULANAN, SBS KATKILI DENEY SONUÇLARI	90
D BİTÜM KATKI MADDELERİNİN GENEL SINIFLANDIRMASI	93
E AGREGALARA UYGULANAN DENEYLER	94
F BİTÜMLERE UYGULANAN GELENEKSEL DENEYLER	95
G MARSHALL DİZAYN YÖNTEMİ	96
H DOLAYLI ÇEKME MUKAVEMETİ DENEYİ	100
İ TEKERLEK İZİ DENEYİ	102
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	104

SİMGE LİSTESİ

VABS	Absorbe Su Hacmi, cm^3
St	Çekme Dayanımı, kPa
B	Doygun yüzey-kuru numunenin kısmi vakum uygulanmasından sonraki ağırlığı, g
Vh	Hava Boşluğu Yüzdesi
S2	Koşullu Numunenin Ortalama Çekme Dayanımı, kPa
A	Kuru Numunenin Havadaki Ağırlığı, g
S1	Kuru Numunenin Ortalama Çekme Dayanımı, kPa
Dt	Maksimum Teorik Özgül Ağırlık
P	Maksimum Yük, N
Dp	Marshall Briket Hacim Özgül Ağırlığı, g/cm^3
S	Marshall Briketinin Suyu Doygunluk Derecesi
D	Numune Çapı, mm
T	Numune Kalınlığı, mm
V	Numune Hacmi, cm^3
Vhava	Vakum İşlemi, Donma ve Ilık Su Çevrimine Maruz Bırakılacak Numunelerin Hava Boşluğu Hacmi, cm^3

KISALTMA LİSTESİ

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Standart for Testing and Materials
BBR	Kiriş Eğilme Reometresi Deneyi
BS	British Standards
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
CBR	Kaliforniya Taşıma Gücü Deneyi
DÇM	Dolaylı Çekme Mukavemeti
DSR	Dinamik Kesme Reometresi Deneyi
DTT	Doğrudan Çekme Deneyi
EN	Europeane Norm
HWT	Hamburg Tekerlek izi Deneyi
İSAÇ	İçme suyu Arıtma Çamuru
İSFALT A.Ş.	İstanbul Asfalt Fabrikaları A.Ş.
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
KES	Kapiler Emme Süresi
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	Karayolları Teknik Şartnamesi
LVDT	Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatör
PEN	Penetrasyon
PAV	Basınçlı Oksidasyon Kabı Deneyi
RTFOT	Döner İnce Film Etüvü Deneyi
RV	Dönel Viskometre Deneyi
SBS	Styrene Butadiene Styrene
SHRP	Stratejik Karayolu Araştırma Programı

SUPERPAVE	Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TSR	Çekme Mukavemeti Oranı
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
VFA	Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi
VMA	Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Çalışmada İzlenen Yönteme Ait Akış Şeması	5
Şekil 3.1 Bitümlü bağlayıcı tipleri	12
Şekil 3.2 Asfaltın sıcaklığa göre yük altındaki davranışı	15
Şekil 5.1 Değişik özellikte arıtma çamurları	23
Şekil 5.2 Havalandırma havuzu.....	24
Şekil 5.3 Klasik aktif çamur havuzunun yer aldığı arıtma tesisi akım şeması ve çamur kaynakları	25
Şekil 5.4 Atık Çamuru Kurutma Aşamaları	26
Şekil 5.5 Imhoff konisi düzeneği.....	27
Şekil 5.6 Çamurun akışkanlık özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan cihazlara bir örnek.....	28
Şekil 5.7 Partikül boyut dağılımı analiz cihazı.....	28
Şekil 5.8 Zeta potansiyelini ölçen cihazlara bir örnek.....	29
Şekil 5.9 Havalandırma havuzlarının üstten görünüşü.....	35
Şekil 5.10 Havalandırma havuzunun çalışma prensibi.....	35
Şekil 5.11 Hızlı karıştırma ünitesi	36
Şekil 5.12 Yavaş karıştırma ünitesi	36
Şekil 5.13 Çöktürme ünitesi	37
Şekil 5.14 Çamur yoğunlaştırma havuzu.....	38
Şekil 5.15 Çamur kireç karışım tankı	38
Şekil 5.16 Çamur besleme pompaları.....	38
Şekil 5.17 Çamur basınçlandırma pompaları	39
Şekil 5.18 Çamur filtre pres makinası	39
Şekil 5.19 Susuzlaştırılan çamurun depolara götürülmek üzere kamyonlara yüklenmesi	39
Şekil 6.1 Agrega gradasyonu ve limitleri	44
Şekil 6.2 Çamurların Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi yol ve bitüm laboratuvarında kurutulduğu etüve yerleştirilme biçimi.....	47
Şekil 6.3 Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi yapı malzemeleri laboratuvarında bulunan ve kurutulan çamurların küçük parçalar haline getirildiği Los Angeles deney aleti	47
Şekil 6.4 Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi yapı malzemeleri laboratuvarında bulunan ve küçük parçalar halindeki çamuru filler malzemeye dönüştüren öğütme makinası	48
Şekil 6.5 Kurutulan çamurun içinde bulunan organik maddeleri bertaraf etmek için kullanılan fırın	48

Şekil 6.6 İSKİ Cumhuriyet arıtma tesisinden elde edilen çamurun kurutulmadan önce numune kabındaki görüntüsü	49
Şekil 6.7 İSKİ Cumhuriyet arıtma tesisinden elde edilen çamurun kurutulduktan sonra numune kabındaki görüntüsü	49
Şekil 6.8 Los Angeles deney aletinde küçük parçacıklar haline getirilmiş İSKİ Cumhuriyet arıtma tesisi çamuru	50
Şekil 6.9 Öğütülerek filler malzeme haline getirilmiş İSKİ Cumhuriyet arıtma tesisi çamuru	50
Şekil 6.10 İSKİ Cumhuriyet içme suyu arıtma çamurunun etüvde 110 °C’de kurutulması ile elde edilen kütle kaybı-zaman diyagramı (gram-saat) ..	51
Şekil 6.11 İSKİ ikitelli içme suyu arıtma çamurunun kurutulmadan önce numune kabındaki görüntüsü.....	52
Şekil 6.12 İSKİ ikitelli içme suyu arıtma çamurunun kurutulduktan sonra numune kabındaki görüntüsü.....	52
Şekil 6.13 İSKİ ikitelli içme suyu arıtma çamurunun Los Angeles aşınma kabında küçük parçalara bölünmüş görüntüsü	52
Şekil 6.14 Öğütücüden geçirilerek filler malzeme haline getirilen İSKİ ikitelli içme suyu arıtma çamuru.....	53
Şekil 6.15 İSKİ ikitelli içme suyu arıtma çamurunun etüvde 110 °C’de kurutulması ile elde edilen kütle kaybı-zaman diyagramı (gram-saat) ..	53
Şekil 7.1 BSK karışımları için tekerlek izi eğrisi	65
Şekil 7.2 Karışımların Marshall Stabilitesi (kN) ve DÇM (%)	66
Şekil 7.3 Karışımlar için tekerlek izi derinliği ve sürtünme eğimi deney sonuçları	67
Şekil A.1 %3 Demir çamuru katkılı karışıma uygulanan tekerlek izi deney sonuçları.....	85
Şekil B.1 %3 Alum çamuru katkılı karışıma uygulanan tekerlek izi deney sonuçları.....	89
Şekil C.1 Bitüme %2 katkı ilave edilmiş alum çamurlu karışıma uygulanan tekerlek izi deney sonuçları	92
Şekil G.1 Marshall stabilite testinde akma değerinin belirlenmesi	96
Şekil G.2 Marshall stabilite deneyinde veriler arasında olması beklenen ilişkiler	97
Şekil G.3 Asfalt betonu binder tabakasına ait Marshall dizayn grafikleri örnekleri	98
Şekil G.4 Marshall test cihazı.....	99
Şekil H.1 Dolaylı çekme mukavemeti tespit cihazı	100
Şekil I.1 Tekerlek izi cihazı.....	103
Şekil I.2 Tekerlek izi mikser cihazı.....	103

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Temel tabakası için dane boyutu sınırları	10
Tablo 3.2 AASHTO M 226 ve ASTM D3381'e göre bitüm viskozite sınıflandırması	14
Tablo 3.3 Bitüme uygulanan superpave bağlayıcı deneyleri	16
Tablo 5.1 Çeşitli arıtma kademelerinde oluşan arıtma çamurlarının tipik katı madde yoğunlukları	25
Tablo 5.1 Çeşitli arıtma kademelerinde oluşan arıtma çamurlarının tipik katı madde yoğunlukları (devamı).....	26
Tablo 5.2 İçme suyu arıtma çamurlarının tipik özellikleri.....	31
Tablo 5.3 Döngüsel ekonomi açısından içme suyu arıtma çamurunun yeniden kullanımına yönelik fayda ve engeller.....	32
Tablo 5.3 Döngüsel ekonomi açısından içme suyu arıtma çamurunun yeniden kullanımına yönelik fayda ve engeller (devamı)	33
Tablo 5.4 İçme Suyu Arıtma Tesisleri	40
Tablo 5.5 İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından arıtılarak şehre verilen içme suyu miktarı	41
Tablo 5.6 İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından üretilen içme suyundan elde edilen toplam ve birim çamur miktarı	41
Tablo 5.7 Bu çalışmada çamuru kullanılan içme suyu arıtma tesislerinin ürettiği çamur ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi yıllık üretilen çamur miktarı ile çamurdaki ortalama katı madde oranı.....	41
Tablo 5.8 2022 yılı için Türkiye Cumhuriyeti'nin bütününde üretililecek tahmini yaklaşık sulu çamur ve katı çamur miktarı.....	42
Tablo 6.1 Tane Boyutu Dağılımı (Elekt Analizi) Deney Metodu: TS EN 933-1	44
Tablo 6.2 Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri.....	45
Tablo 6.3 İnce agrega özellikleri.....	45
Tablo 6.4 Karışımda kullanılan bitümün fiziksel özellikleri	46
Tablo 6.5 İSKİ Cumhuriyet içme suyu sulu ham çamurunun çalışmada kullanılabilir çamur haline getirilme süreç sonuçları	51
Tablo 6.6 İSKİ ikitelli içme suyu arıtma tesisi ham çamurunun çalışmada kullanılabilir malzeme haline getirilme süreç sonuçları	54
Tablo 6.7 Referans gradasyon.....	56
Tablo 6.8 %1 Demir çamuru (kırmızı atık) katkılı gradasyon	57
Tablo 6.9 %3 Demir çamuru (kırmızı atık) katkılı gradasyon	58
Tablo 6.10 %5 Demir çamuru (kırmızı atık) katkılı gradasyon	59

Tablo 6.11	Demir çamuru (kırmızı atık) katkılı numunelerin Marshall stabilite ve dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları.....	60
Tablo 7.1	BSK içindeki İSAÇ miktarını belirlemek için yapılan ilk öncül laboratuvar deney sonuçları.....	62
Tablo 7.2	Demir ve alum çamur katkılı BSK için Marshall karışım dizayn sonuçları.....	63
Tablo 7.3	AASHTO T283'e göre DÇM laboratuvar deney sonuçları	64
Tablo 7.4	BSK karışımları için tekerlek izi deneyi sonuçları	65
Tablo 7.5	Özetlenmiş Marshall ve DÇM deney sonuçları.....	66
Tablo A.1	%3 Demir Çamuru (kırmızı atık) ile yapılan Marshall dizaynı	82
Tablo A.2	%3 Demir çamuru katkılı karışım Marshall Stabilite dizayn raporu ...	83
Tablo A.3	%3 Demir çamuru katkılı karışıma uygulanan dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları	84
Tablo B.1	%3 Alum çamuru (yeşil atık) ile yapılan Marshall dizaynı	86
Tablo B.2	%3 Alum çamuru katkılı karışım Marshall Stabilite dizayn raporu	87
Tablo B.3	%3 Alum çamuru katkılı karışıma uygulanan dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları	88
Tablo C.1	Bitüme %2 SBS katkısı ile alum çamurlu karışım dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları	90
Tablo C.2	Bitüme %5 SBS katkısı ile alum çamurlu karışım dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları	91
Tablo D.1	Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırması.....	93

İçme Suyu Arıtma Çamurunun Asfalt Betonu Karışımlarında Kullanımı

Tuna Eyüp KAHVECİ

İnşaat Anabilim Dalı

Ulaştırma Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Halit ÖZEN

Su arıtma süreçleri sırasında, ağırlıkça %95'ten fazla su içeriğine sahip büyük miktarda çamur oluşur. Oluşan çamur atık olarak kabul edilmekte ve düzenli depolama sahasında depolanmaktadır. Su arıtma çamurunun karakteristiği, suyun kaynağına ve arıtma için uygulanan yönteme bağlı olarak değişmektedir. İçme suyunun arıtılması genellikle koagülasyon, flokülasyon, dekantasyon, filtrasyon, pH düzeltme, dezenfeksiyon ve florlama işlemlerinden oluşmaktadır. Koagülasyon sürecinde kullanılan kimyasala bağlı olarak alüminyum, ferrik veya polimerik içeren atık çamuru ortaya çıkmaktadır. Genel olarak, Türkiye'de su arıtma işlemlerinde ortaya "alüminyum çamuru" ve "ferrik çamuru" çıkmaktadır. Su arıtma çamurunun önemli bir kısmı su olduğu için hacmi oldukça büyüktür. Özellikle biyolojik arıtma proseslerinden kaynaklanan içme suyu arıtma çamurlarındaki organik madde muhtevası çok yüksektir ve bu nedenle çürüme ve koku oluşturma eğilimindedir. Bu özelliklerinden dolayı, içme suyu çamurlarının arıtılması ve bertarafı çok sorunlu bir konudur.

Geri kazanım, geri dönüşüm ve yeniden kullanım, çevreyi korumak amacıyla su arıtma çamurunun yönetimi için sürdürülebilir bir çözümdür. İçme suyu arıtma çamurunun (İSAÇ) faydalı bir şekilde yeniden kullanımı sadece uygun maliyetli bir teknolojik çözüm sağlamakla kalmaz, aynı zamanda bu hizmeti veren kamu

kurumları için de etkili bir atık yönetimi seçeneği sunmaktadır. Bu nedenle, su arıtma çamurunun bertaraf edilmesi yerine çeşitli amaçlar için yeniden kullanılması sürdürülebilir atık yönetimi için uygun bir çözümdür. Bu makale, su arıtma çamurunun genel özelliklerini ve inşaat malzemesi olarak kullanımına odaklanarak yeniden kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanım seçeneklerini gözden geçirmektedir. Tezde ayrıca çamurun sıcak karışım asfaltta kullanımı tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İçme suyu, arıtma çamuru, sıcak karışım asfalt, filler



Utilizing Drinking Water Treatment Sludge in Asphalt Concrete Mixtures

Tuna Eyüp KAHVECİ

Department of Civil Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Halit ÖZEN

During water treatment processes, a large amount of sludge is formed with a water content of more than 95% by weight. The resulting sludge is considered waste and stored in a landfill. The characteristics of water treatment sludge vary depending on the source of the water and the method applied for treatment. Treatment of drinking water generally consists of coagulation, flocculation, decantation, filtration, pH correction, disinfection and fluoridation processes. Depending on the chemical used in the coagulation process, waste sludge containing aluminum, ferric or polymeric is produced. In general, "aluminum sludge" and "ferric sludge" emerge in water treatment processes in Turkey. Since a significant part of the water treatment sludge is water, its volume is quite large. The organic content of water treatment sludge, especially from biological treatment processes, is very high and these sludges tend to rot. Due to its characteristics, the treatment and disposal of water treatment sludge is very problematic.

Recovery, recycling and reuse is a sustainable solution for the management of water treatment sludge to protect the environment. The beneficial reuse of drinking water treatment sludge not only provides a cost-effective technological solution, but also provides an effective waste management option for public institutions providing water treatment services. Therefore, reusing water treatment sludge for various purposes instead of disposing of it is a viable solution for sustainable waste management. This article reviews the general characteristics of water treatment

sludge and its use as a construction material, reviewing reuse, recycling, and recovery options. The article also discusses the use of sludge in hot mix asphalt

Keywords: Drinking water, treatment sludge, hot asphalt mixture, filler.



YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

Türkiye Cumhuriyeti gelişmekte olan ve nüfusu çevresindeki ülkelere göre daha hızlı artan bir ülkedir. Artan ve gelişen nüfus, daha fazla ve daha kaliteli içme suyuna erişmek istemektedir. Bu süreç de hem içme suyunun daha fazla arıtılmasını hem de arz edilen içme suyunun miktarının arttırılmasını gerektirmektedir. Bu durum içme suyundan arıtma esnasında üretilen arıtma çamurunun miktarının artarak büyümesine neden olmaktadır. Dolayısı ile artarak büyüyen bu çamur miktarının olumsuz her türlü etkisini minimize etmek ise ancak bu malzemenin kullanılabilirliğinin arttırılması ile mümkün olabilir.

Türkiye Cumhuriyeti Devlet Su İşleri Kurumu Ulusal Su Planı 2019–2023, 2018'de [1], “Türkiye Cumhuriyeti'nde yıllık ortalama yağış hacminin 450 milyar m³ ve toplam yıllık tüketilebilir yüzey ve yeraltı suyu potansiyelinin 112 milyar m³ olduğunu göstermektedir” [1]

Ülke topraklarının ve su kaynaklarının geliştirilmesinden sorumlu kamu kurum ve kuruluşlarının geliştirdiği projeler sonucunda bu suyun çeşitli amaçlarla yıllık su tüketiminin 54 milyar m³'e (%48,2) ulaştığı, 40,0 milyar m³'ünün (%74) sulamada, yaklaşık 7 milyar m³'ünün (%13) içme amaçlı kullanıldığı, 7 milyar m³'ü (%13) ise endüstriyel su ihtiyacını karşılamak için kullanıldığı bildirilmiştir. 2017 yılında tüketilen suyun 39 milyar m³'ü (%72,2) yüzey suları, 15 milyar m³'ü (%27,8) yeraltı suları ile sağlanmıştır [2]

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayımlanan 2022 yılı verilerine göre, Türkiye Cumhuriyetindeki “1391 belediyenin 1390'ında içme ve kullanma suyu şebekesi ile hizmet verildi. İçme ve kullanma suyu şebekesi ile hizmet verilen belediye nüfusunun toplam belediye nüfusuna oranının %98,8 olduğu görülmektedir” [3]. TÜİK verilerine göre “2022 yılında belediyeler tarafından su kaynaklarından 6,7 milyar m³ su çekilmiş olduğu bunun, %43 ü barajlardan, %29,1 i kuyulardan, %16.5 i kaynaklardan ve %3.7 si göl, gölet veya denizlerden sağlanmıştır” [3]. Kaynaklardan çekilen toplam 6,7 milyar m³ suyun 4.1 milyar m³ ü içme ve kullanma suyu arıtma tesislerinde arıtılmıştır.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayınlanan 2017 yılı adrese dayalı nüfus verileri, Belediye Su Göstergeleri [4] 2022 yılı Su ve Atıksu İstatistikleri [2]

kullanılarak hesaplama yapıldığında, Türkiye'de kişi başı yıllık kullanılabilir su miktarı için elde edilen değer 1400 m³ civarındadır.

Türkiye’de İstanbul Büyükşehir Belediyesi mevcut birim arıtma çamuru elde etme verileri esas alınarak yapılan hesaplamada mevcut arıtma miktarı ile yaklaşık yıllık üretilen katı çamur 122.187 ton civarındadır ve yıllık kullanılan toplam içme suyunun tamamı arıtıldığında bu miktarın yılda 200.000 tona ulaşma potansiyeli vardır.

Esnek bir kaplamadaki üst katmanlar, derecelendirilmiş mineral agregalar ve bitümün bir karışımı olan bitümlü sıcak karışım (BSK) olarak inşa edilmiştir. Bitüm, ağır hidrokarbonlar ve türevlerinin bir karışımı olan kahverengi ila siyah katı (veya ortam sıcaklığında yarı katı) bir maddedir [5]. Bitüm, asfaltlama sektöründe bitümlü karışımlar için bağlayıcı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Asfalt için demiryolu raylarının altı veya yalıtım malzemeleri gibi [6] başka kullanımlar da vardır. BSK'daki agregalar iri, ince ve dolgu maddesi olarak derecelendirilir. Dolgu maddeleri, asfalt karışımının %5 ile %12'sini kaplar ve kullanılan standarda bağlı olarak çoğunlukla 0,063 mm veya 0,075 mm elek boyutlarını geçen çok ince malzemelerdir. Bitümlü bir karışımdaki az miktara rağmen, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine etkisi önemlidir [7]. Yüksek yoğunluklu polietilen, mermer ocağı atıkları, bina yıkım atıkları gibi çeşitli atık türleri, öğütülmüş lastik kauçuğu, yemeklik yağ, palmiye yağı, yakıt külü, hindistan cevizi, sisal, selüloz ve polyester lifler, nişasta, plastik şişeler, atık cam, atık tuğlalar, atık seramikler, atık uçucu kül ve sigara izmaritleri asfaltik betonda veya bitüme katılarak geri dönüştürülür [8]. BSK'da atık için kullanılan iki ana yaklaşım vardır. Bunlardan biri, atık malzemelerin mekanik olarak karıştırılarak yüksek sıcaklıklarda bitüm içine dahil edilmesidir [9] [10]. Diğeri ise, kısmi agrega ikamesi veya karışım değiştirici olarak doğrudan bitüm ve agrega karışımına atık eklemektir [11]. Bu çalışmada, atıklar BSK 'a kısmi agrega ikamesi olarak eklenmiştir.

Bugüne kadar yapılan çalışmalara göre İSAÇ kullanım alanlarından bazıları şu şekilde özetlenebilir: İSAÇ, çeşitli alanlarda değerli ve çevreye duyarlı bir çözüm sunar. Balkaya [12], toprak iyileştirme alanında, toprak kalitesini etkili bir şekilde iyileştirebilecek umut verici bir katkı maddesi olarak ortaya çıktığını belirtmektedir. Bu, Boscov ve ark. [13] tarafından yayınlanan makalede belirtildiği gibi, doğal toprakları korumak için sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkıyor. Sabo, A ve ark. [14], İSAÇ'larda aşırı toksik metallerin bulunmamasının, bol

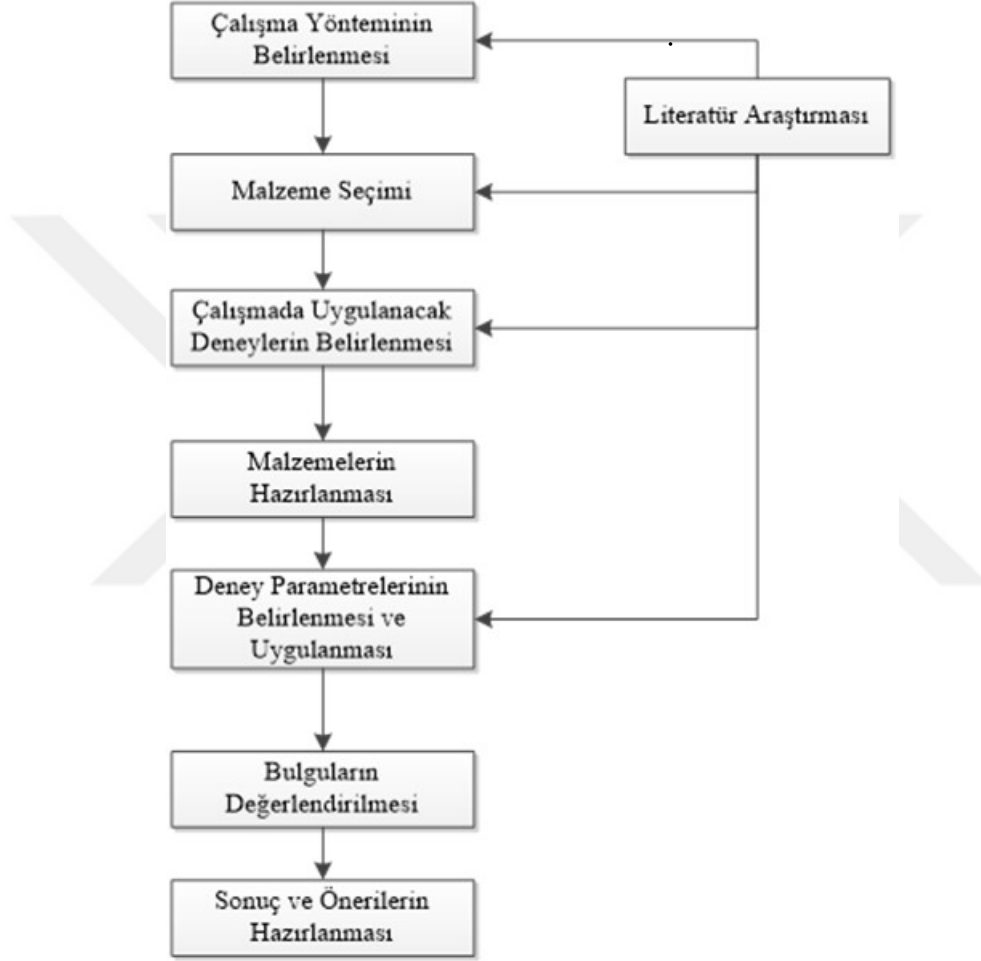
miktarda bitki besin maddesinin temini ve zararlı toksik metallerin eksikliğinin, bozulmuş arazilerin ıslahı sırasında toprak besinlerini zenginleştirmek için değerli bir kaynak olarak uygulanabilirliğini vurguladığını belirtmektedir. Verlicci ve Masotti [15], İSAÇ'ın gençleştirme gibi sucul ekosistemlerde kullanışlılığını ortaya koyduğunu göstermektedir. Ötrofik göller, bu dengesiz ortamları eski haline getirmek için güçlü bir çare sunarak dikkat çekicidir. Ayrıca, çukur doldurma, ıslah ve atık depolama sahalarının kapatılması gibi faaliyetlerde işlevsellik sunarak etkin atık yönetimine katkıda bulunur. Stojmenovic ve ark. [16] ilk kez, bir atık su arıtımından elde edilen atık pres çamurlarının, boya tesisi ve toz emaye tesisinde başarılı bir şekilde uygulanmasının sonuçlarını sunmaktadır. Bu atıklar, inşaat sektöründe ısıtma cihazı üretimi sırasında ortaya çıkmıştır. Zhao ve ark. [17], İSAÇ'ın inşa edilmiş sulak alan arıtma sistemlerinin geliştirilmesinde önemli olduğunu göstermektedir. Kevin ve ark. [18] ve Liu ve ark. [19] çalışmalarında, numunelerin analizine göre, SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'ün, ASTM C618-17a'ya [20] göre çamur külünü puzolan malzeme sınıfı F olarak sınıflandıran çamur külü bileşiminin %90'ını temsil ettiğini ve İSAÇ'ın ek bir çimento malzemesi olarak potansiyelini gösterdiğini ortaya koymuştur. Noruzman ve ark. [21] araştırmalarında, tuğladaki çamurun, kısmi kum ikamesi olarak %5 kullanılarak karıştırıldığında daha iyi performans gösterdiğini gözlemlemiştir. Bununla birlikte, tuğlaya daha yüksek oranda çamur eklenmesi, daha düşük mukavemet ile sonuçlanmıştır. Atık arıtma çamurunun, su arıtma işlemi nedeniyle, tuğla üretiminde kumun kısmi bir ikamesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılabilir. Aynı zamanda bariyer katmanları oluşturmak için de kullanılabilir ve "biotoprakların" oluşumu, doğal malzemelerin tüketimini ve depolama hacimlerine olan talebi azaltır ve Caniani ve ark. [22] makalelerinde bildirildiği gibi Liu ve Zhuge'dan [23] elde edilen sonuçlar, örneğin beton parke bloklarının, yapısal bütünlüklerini ve performanslarını zenginleştirdiği için atık arıtma çamuru katılımından yararlandığını ima etmektedir. Ek olarak, Kizinievic, O ve Kizinievic, V [24], seramik ürünlerin sentezinin, kalitelerini ve faydalarını artıran İSAÇ'ın dahil edilmesiyle yeni bir boyut bulduğunu kanıtlamaktadır. Sarabia-Guarin ve ark. [25], İSAÇ'ın refrakter tuğla üretiminde bir rolü olduğunu ve burada kil için makul bir kısmi ikame görevi gördüğünü ve üretim sürecinin verimliliğini artırdığını göstermektedir. Liu ve Zhuge [23], ye göre, İSAÇ içindeki yüksek alümina içeriği, çamurdaki alüminanın değerinden yararlanarak, yangına ve alkali-silika

reaksiyonlarına karşı daha yüksek direnç gibi üstün özelliklere sahip çamurdan üretilmiş beton ürünler kazandırabileceğini kanıtlamaktadır. Bu, su endüstrisinin atıklarını değerlendirmesini ve daha fazla ticari fayda elde etmesini sağlamaktadır. Zandy ve ark. [26] ve Sofy ve ark. [27] iki farklı çalışmalarında, İSAÇ ve aktif içme suyu arıtma çamurunun %5-10 daha yüksek seviyelerde karışımli çimento üretmek ve betonda kullanım için uygun görüldüğünü belirtmişlerdir . Rodrigues ve ark. [28], İSAÇ'ın seramik üretiminde kurutma ve öğütme nedeniyle enerji harcamasını azalttığını doğrulamaktadır. Zhao ve ark. [17], şap çamuru olarak İSAÇ' hoş olmayan gazların arıtılmasında ve çevre üzerindeki etkilerinin azaltılmasında çok önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Uygun fiyatlı bir adsorban olarak verimliliği, çeşitli kirleticileri hareketsiz hale getirmek ve kirlilik kontrol çabalarına katkıda bulunmakla ilgilidir. Nuria ve ark. [29] atık su arıtımı alanında, İSAÇ' dikey yeraltı akışlı sulak alanlar içinde aktif bir substrat görevi gördüğünü ve gelişmiş atık su arıtımı için güçlü bir araç oluşturduğunu belirtmektedir. El Eneina ve ark. [30], makalelerindeki sonuçlara dayanarak, ağır metalleri adsorbe etme ve dolayısıyla çevresel iyileştirme için etkili bir ajan olarak hareket etme yeteneğinin özellikle dikkate değer olduğunu ifade etmişlerdir. Zhao [31] makalesinde, şap çamuru bazlı inşa edilmiş sulak alan sistemlerinin yenilikçi bir yaklaşım olarak geliştirilmesinin, yalnızca yüksek mukavemetli atık sudan organik madde ve besin maddelerinin uzaklaştırılmasını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda İSAÇ' karmaşık çevresel zorlukların üstesinden gelme konusundaki uyarlanabilirliğini de sergilediğini belirtmektedir. Küçükçongar ve ark. [32], İSAÇ' atık su arıtımında pıhtılaştırıcı olarak çok önemli bir rol oynadığını, verimli bir şekilde uzaklaştırmak için safsızlıkları topladığını ve su kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunduğunu belirtmektedir. Bu çamur üretiminin önemli büyüklüğü göz önüne alındığında, içme suyu arıtımının yan ürünleri için mümkün olan uygulamaları belirlemek ve araştırmak için kapsamlı araştırmalar yapmak zorunlu hale gelmektedir. Bu çalışmada İSAÇ'ın BSK'nın bir bileşeni olarak kullanımının araştırılması amaçlanmıştır.

Bu çalışmadan hem atık yönetimi hem de inşaat malzemeleri alanları için daha verimli ve çevre dostu bir yönlendirme yapması beklenmektedir.

2 İZLENEN YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, içme suyu arıtılması aşamasında ortaya çıkan atık çamurlarının karayolu üstyapısında kullanılabilirliğinin araştırılmasına yönelik bir metodoloji geliştirilmiştir. Bu kapsamda çalışmada izlenen yöneme ilişkin akış şeması Şekil 2.1’de çizilmiştir.



Şekil 2.1 Çalışmada İzlenen Yönteme Ait Akış Şeması

Şekilden de görüleceği üzere tez çalışmasında öncelikli olarak günümüz ve gelecek için sorun teşkil eden ve ülke ekonomisine kazandırılabilir malzeme olarak içme suyu arıtma çamuru seçilmiştir. İçme suyu çamurunun çalışma alanımız olan ulaştırma sektöründe sıcak karışım asfaltta kullanılabilirliğinin araştırılması benimsenmiştir. Bu doğrultuda ülkemiz ve dünya literatürü taranarak çalışıldı. İki tip çamur türünün bu çalışmada kullanılmasına karar verildi. Bu çamurlar içme suyu arıtma prosesinde büyük oranda kullanılan demir III klorür ile elde edilen

demir çamuru ve alüminyum sülfat ile elde edilen alum çamurudur. Bu çamurlar İstanbul Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) nin Beykoz Cumhuriyet ve İkitelli içme suyu arıtma tesislerinden temin edildi. Bu çamurların sıcak karışım asfaltta kullanılıp kullanılamayacağının tespiti için Marshall Stabilitesi, dolaylı çekme mukavemeti deneyleri ile tekerlek izi deneyi uygulanması uygun görüldü.

Bu çerçevede malzemelerin deneylere hazır hale getirilme çalışmaları Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi yol ve bitüm laboratuvarı ve yapı malzemeleri laboratuvarında yapılmış, belirlenen deneylerin uygulanması için İstanbul Büyükşehir Belediyesi İSFALT A.Ş. ile irtibata geçilerek yöneticilerinden onay alınmış ve böylece deneyler İSFALT A.Ş. laboratuvarında kurum görevlilerince yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek bu çalışmanın konusu olmuştur.

BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR

3.1 Bitümlü Sıcak Karışımlar

Standardı yüksek karayolları ve havaalanlarında bitümlü sıcak karışımlar (BSK) kullanılmaktadır. BSK, kaba (mıcır v.b.), ince agrega (kum v.b.) ve mineral fillerin (taş tozu v.b.) belirli dane boyutlarında, uygun miktarda bağlayıcı ile karıştırılması sonucunda elde edilir. Yani BSK'nın ana malzemeleri agrega ve bitümdür. Performansı yüksek BSK elde etmek için uygun oran ve vasıfta bağlayıcı ve agrega kullanılması önemlidir. Bu şekilde, BSK'da görülen başlıca bozulmalar olan; ondülasyon, çökme, tekerlek izi, kabarmalara, çatlama, ayrışma ve parçalanma, cilalanma ve kusmalara karşı direnci yüksek ve uzun ömürlü üstyapıların inşa edilmesi olanaklı hale gelebilecektir [33].

3.2 Bitümlü Sıcak Karışımların Tarihçesi

Bitümün kullanımı insanlık tarihi kadar eskilere dayanır. Milattan önce 3. bin yıllarda Sümerler tarafından kullanıldığı tahmin edilmektedir. Bu dönemlerde bitüm genellikle gemilerde izolasyon malzemesi, bağlayıcı ve koruyucu malzeme olarak mumyalarda vs. kullanılmıştır. Yol malzemesi olarak kullanılması çok daha sonralarda mümkün olabilmıştır ve eldeki veriler ilk olarak milattan sonra 600 lü yıllarda Babil'de kullanıldığını göstermektedir [33]. Kelime kökeni olarak asfalt, Yunanca'da güvenli anlamına gelen “asphaltos” kelimesinden türemiştir. Avrupalılar asırlar sonra 1595 yılında, Venezüella açıklarındaki Trinidad adasında bir asfalt gölü bulmuşlardır, bu göl aynı zamanda ilk defa bulunan doğal asfalt olarak kayıtlara geçmiştir.. Avrupa'da ilk olarak 1824 yılında Paris'te yol malzemesi olarak asfalt bloklar kullanıldığı görülmektedir. New York'taki Columbia Üniversitesi'nde 1872 yılında geliştirilen modern yol asfaltı aynı yıl ilk kez New York'un 5. Cadde'sinde kullanılmıştır.

1900 lu yılların başına kadar yol inşası için kullanılan bitüm doğal olarak elde edilen asfalt malzeme idi. Bitüm, doğal asfaltın yerine 1907 yılından itibaren kullanılmaya başlamıştır. 20. Yüzyılın başından itibaren gelişmeye başlayan otomobil teknolojisi yeni ve sürüş rahatlığı sağlayan yollara ihtiyacı arttırmış, böylece günümüz BSK teknolojisine giden süreç de başlamış oldu [33].

3.3 Agregalar

Agrega, BSK'nın ağırlıkça %90 ve hacimce ise yaklaşık %80'ini oluşturan anahtar bileşendir. Agreganın özellikleri BSK'nın göstereceği performans üzerinde önemli etkiye sahiptir [34]. Agregada, BSK'lar için tüm yüzeyleri kırılmış kırmataş, çakıl veya bunların karışımından ibarettir. Kırma taş veya çakıl temiz, dayanıklı danelerden ibaret olmalı, gerekiyorsa yıkanarak zararlı maddelerden arındırılmalıdır. Agregada içeriğinde kırılmaya yatkın olan ayrışma ürünü maddeler bulunmamalıdır [35]. Karayolu üstyapısında kullanılan agregalar;

Oluşma biçimlerine göre;

- Doğal Agregalar → magmatik, tortul vb. kayalar
- Yapay Agregalar → çimento, cüruf, kireç olarak sınıflandırılırlar

Boyutlarına göre ise; 4 nolu eleğin üstünde kalan agrega kaba, 4 nolu elekten geçen ancak 200 no eleğin üzerinde kalan agrega ince ve 200 no eleğin altında kalan agrega ise filler olarak sınıflandırılmaktadır.

Kaba agreganın fonksiyonu karışımın ana yapısını oluşturmak, ince agreganın fonksiyonu kaba agreganın boşluklarını doldurmak ve bu sayede malzemenin mekanik mukavemetini arttırmak, filler malzemenin fonksiyonu ise, tüm taraflara uygulanan mekanik mukavemetinin eşit olarak dağılmasını temin etmektir [36].

3.3.1 Agregaların Sınıflandırılması

Agregalar; mineralojik yapılarına, boyutlarına, gradasyonlarına, biçimlerine, yüzey yapılarına, porozite oranlarına ve özgül ağırlıklarına göre sınıflandırılabilirler.

3.3.1.1 Yapısal Sınıflandırma

Üstyapıda kullanılan bitümlü karışımlarda agregalar [37], doğal, yapay ve geri dönüştürülmüş agregalar olarak tasnif edilmektedir [34].

Doğal agrega; doğal kaynaktan sağlanır ve mekanik işlem dışında başka hiçbir işleme tabi tutulmaz. Yapay agrega; cüruf vb gibi endüstriyel bir işlem neticesinde elde edilir. Geri dönüştürülmüş agrega ise geri dönüştürülmüş asfalt betonu gibi daha önce kullanılan malzemenin geri kazanılarak tekrar kullanıma uygun hale getirilmesi ile elde edilen agregadır [34]. Asfalt beton üretiminde volkanik, tortul ve metamorfik kayalar kullanılmaktadır [38].

3.3.1.2 Boyut Sınıflandırması

Agregalar boyutlarına göre 3 boyutta incelenmektedir [35]. Bunlar;

- Kaba Agregası

Tarifi yukarıda yapılan kaba agregası BS 812 standardı [39]'na göre deneye tabi tutulduğunda şu şartları sağlaması beklenir; yassılık indeksi % 30'den daha fazla olmamalı, agregası daneleri kübik ve köşeli olmalıdır. Agregaya 'soyulma deneyi uygulandığında soyulmaya karşı mukavemet en az % 60 olmalıdır. Kaba agregada su emme (absorbsiyon) oranı en fazla % 2,5 olmalıdır [35].

- İnce Agregası

Yukarıda tarifi yapılan ince agreganın üretildiği malzeme Los Angeles parçalanma direnci ve hava etkilerine karşı ilgili standartlarda belirtilen mukavemet değerlerine uygun olmalıdır [35].

Şayet karışımda ince agregası olarak doğal kum kullanılacak ise kullanılma miktarı, üretilecek BSK dan istenen, akma, stabilite ve boşluk değerlerini sağlayacak şekilde belirlenecektir [35].

- Mineral Filler

Tarifi yukarıda yapılan ve BSK içerisinde dengeleyici bir rol oynayan. mineral filler malzeme, taş tozu, mermer tozu, sönmüş kireç veya benzeri maddelerden oluşabilir. İçerisinde herhangi bir zararlı madde olmasına ve topaklanmış olmasına müsaade edilmez, kuru olmalıdır ve akıcılığını muhafaza edebilmelidir [34].

Mineral fillerin elek analizi AASHTO T 37 [40]'ya göre yapılmalıdır.

3.3.1.3 Dane Dağılımı (Gradasyon) Sınıflandırması

BSK içerisindeki agreganın olduğu kaba, ince agregası ve mineral filler malzemenin toplam agregası içerisindeki % cinsinden dağılımına gradasyon denir. Agregası dane dağılımı karışımın stabilite, don duyarlılığı ve işlenebilirlik özelliğinin belirlenmesini sağlar. Temel tabakası için dane boyutu sınırları Tablo 3.1'de gösterilmektedir.

Tablo 3.1 Temel tabakası için dane boyutu sınırları [35]

Elek Boyutu mm (inç, No)	Agrega Gradasyon Tipi	
	Tip-A	Tip-B
	100	100
25 (1")	72 - 100	80 - 100
19 (3/4")	60 - 90	70 - 90
12,5 (1/2")	50 - 78	61 - 81
9,5 (3/8")	43 - 70	55 - 75
4,75 (No.4)	30 - 55	42 - 62
2,00 (No.10)	18 - 42	30 - 47
0,425 (No.40)	6 - 21	15 - 26
0,180 (No.80)	2 - 13	7 - 17
0,075 (No.200)	0 - 7	1 - 8

3.3.1.4 Yassılık ve şekil sınıflandırması

Agrega dane şeklinin belirlenmesi için yapılan deneyler; EN 933-3 standardına [41] göre uygulanan yassılık indeksi ve EN 933-4 standardına [42] göre yapılan şekil indeksi deneyleridir. Bu deneyler çoğunlukla kırılmış agregalar üzerinde uygulanmaktadır [34].

Agrega danelerinin şekilleri ve formları; BSK'nın; işlenebilirliği, sıkışma direnci, yoğunluğu, stabilitesi, içsel kilitleme ile sürtünme açısına, CBR özelliklerine ve kayma mukavemetine tesir etmektedir. Yuvarlak şekilde olan agregalar, köşeli agregalara nazaran işlenebilirliği daha fazla iken, stabilite bakımından köşeli agregalar daha üstündür [43].

3.3.1.5 Yüzey yapısı sınıflandırması

Agregaların yüzey yapısı BSK'nın işlenebilirliğine, sıkıştırılabilirliğine ve mukavemetine etki eder. Pürüzlü yüzey yapısı BSK'nın mukavemetini artırsa da işlenebilirlikteki zorluğun önüne geçilebilmesi için ilave bitüme ihtiyaç duyar [44]. Ayrıca, pürüzlü agregalarda daha iyi yapışma özelliği bulunmaktadır.

Genellikle, agrega yüzeyinin pürüzlülüğüne göre, yüzey alanı da büyümektedir. Bundan dolayı, pürüzlü agregaların kaplanması için daha fazla bitüm gerekmektedir [45].

Tekerlek izi ve deformasyona karşı dayanımı yüksek BSK'ların, kaba ve ince agregalar olarak pürüzlü yüzey yapısına sahip, köşeli agregalar ihtiva etmesi gerekmektedir [46].

3.3.1.6 Gözeneklilik sınıflandırması

Porozite (gözeneklilik), agregalar daneleri içerisindeki toplam boşluk hacmi olup, düşük porozite daha yüksek dayanıma neden olmaktadır [46].

Agrega danelerinin birli bir gözenekliliğe sahip olması gerekmektedir. Yeterli gözenekliliğe sahip agregalar daneleri bağlayıcının emilmesine imkân verdiğinden, agregalar ile bağlayıcı arasında kuvvetli bir yapışma meydana getirerek stabilitenin artmasını temin etmekte ve suyun etkisi ile soyulma oluşmasına engel olmaktadır [43].

3.3.1.7 Özgül ağırlık sınıflandırması

Agregalarda, zahiri, hacim ile kuru yüzey ve suya doymuş özgül ağırlıkları ölçülmektedir [47]. Bağlayıcı miktarının tespit edilmesinde, özgül ağırlık önemli bir girdi olarak kullanılmaktadır. Agregalar gözenekliliği fazla ise, başlangıç karıştırma işleminden sonra, karışım tamamen soğuyuncaya kadar geçen süreçte bağlayıcı emilimi devam etmekte ve bundan dolayı bağlayıcı kaybı oluşmakta ve yeterli bağlanmanın sağlanabilmesi için gereken bağlayıcı oranı azalmaktadır. Buna bağlı olarak gözenekli agregalar, az gözenekli olana göre daha fazla bitüme ihtiyaç duymaktadır [34].

3.3.2 Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agregaların fiziksel özelliklerine ilişkin ana başlıklar aşağıda sıralanmıştır.

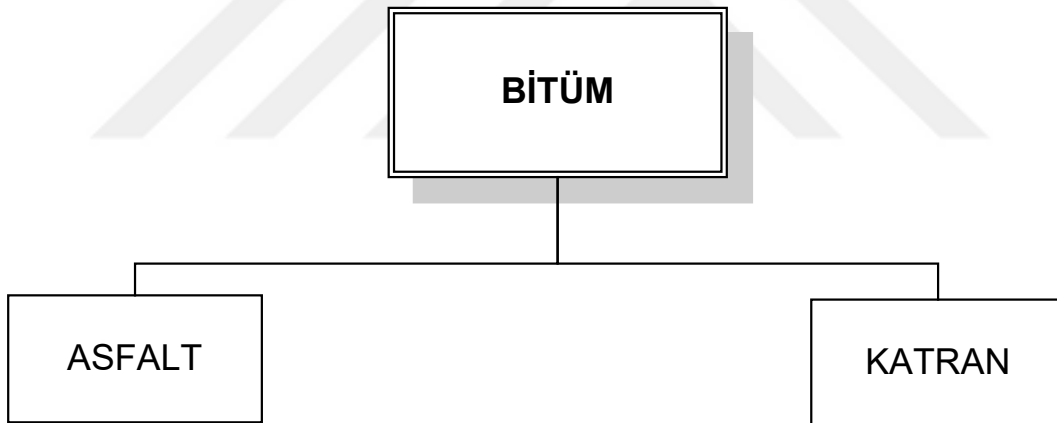
- Absorpsiyon (Su emme)
- Yüzey yapısı
- İnce ve kaba agregalar köşeliliği
- Düz ve ince-uzun parçacıklar
- Kil içeriği
- Agregalar gradasyonu
- Durabilite
- Sağlamlık
- Nem hassasiyeti

3.3.3 Agregalara Uygulanan Deneyler

BSK’da kullanılan agregaların yukarıda sıralanan fiziksel özellikleri, yol kaplamasının ömrü, mukavemeti ve işlevselliği üzerinde etkilidir. Bu nedenle yol üstyapısında kullanılacak agregaların fiziksel özelliklerinin bilinmesi çok önemlidir. Bu kapsamda agregalar üzerinde yapılan deneyler ve deneylerin yürütülmesinde kullanılan standartlar aşağıda, ilgili standart numarası ile Ek E’de verilmiştir.

3.4 Bitüm (Bağlayıcı Madde)

Doğal kökenli veya projenik kökenli hidrokarbonlardan meydana gelmiş sıvı, yarı katı veya katı halde bulunan, karbon disülfürde tamamen çözülen bağlayıcılara bitüm denir [36]. Bitümlü bağlayıcılar, asfaltlar ve katranlar olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Asfaltlar, doğal ve yapay olarak; katranlar ise, odun ve kömür kökenli olmak üzere, iki alt gruba ayrılır [48]. Bitümlü bağlayıcı tipleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Bitümlü bağlayıcı tipleri [36]

Bitüm; termoplastik bir malzemedir yani ısıtılınca kıvamı değişir. Ayrıca, geçirimsizliği yüksektir, yapışma özelliği güçlüdür ve dayanıklıdır. Bu özelliklerinin yanı sıra geri dönüştürülebilir bir malzemedir ve modifiye edilebilir. Tüm bu özelliklerinden ötürü karayolu esnek üstyapı uygulamalarında BSK bağlayıcı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Üretimden çıktığı hali katı veya yarı katı olmasına rağmen, çeşitli prosesler sonrasında sıvı hale gelmektedir [48]. BSK’larda kohezyon ve adezyon bağlayıcı tarafından sağlanmaktadır. Agregalar ise karışımın içsel sürtünme direnci ve stabilitesini sağlamaktadır [44], [38].

BSK'ların göstereceği performans; tasarımı, BSK içeriğinde bulunan agraga ve bağlayıcının kalitesi ve diğer faktörlere bağlıdır. Bağlayıcı hacimsel anlamda BSK'nın nispeten küçük bir bileşeni olup, ancak dayanıklılık ve viskoelastik özellikler üzerinde çok önemli bir role sahiptir. Bitümün; reoloji, yapışma (adezyon), bağlanma (kohezyon), ve dayanıklılık (durabilite) gibi dört özelliği sağlanabildiği takdirde istenilen performansı elde etmek mümkün olabilecektir [38], [34].

3.4.1 Bitümlerin Sınıflandırılması

BSK'da bitümler fiziksel özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Bunlar;

- Penetrasyon (TS EN 12591-EN 12591 [49], ASTM D946 [50]),
- Viskozite (ASTM D3381 [51]),
- Yaşlandırılmış bitüm viskozite (ASTM D3381 [51]),
- Superpave performans,

Sınıflandırmaları olarak sıralanabilir [52], [53].

Bitümlere penetrasyon deneyi, bitümlerin kıvam düzeyinin belirlenmesi için yapılmakta olup, penetrasyon derecesi yüksek olan bitüm daha yumuşak ve daha akışkan demektir [54].

Akışkanların akmaya karşı göstermiş olduğu direnç, viskozite olup, kesme gerilmesinin deformasyon hızına oranı olarak tanımlanır. Bitümün viskozitesi sıcaklık arttıkça ters orantılı olarak azalmakta ve sınıflandırmada 60°C'deki mutlak viskozitesi esas alınmaktadır [55], [53].

Dönel viskozimetre deneyi; 135°C sıcaklıktaki uygulama koşullarını temsil eden bağlayıcı viskozitesinin tayininde kullanılmaktadır. Aynı penetrasyona veya viskoziteye sahip bağlayıcılar farklı sıcaklıklarda farklı davranışlar gösterebilmektedir. Bağlayıcılar aynı penetrasyona sahip olsa dahi farklı bitümler olarak sınıflandırılması gerekirken aynı olarak sınıflandırılabilen ve bunların aynı performansı göstereceği hatasına düşülmektedir [56], [57]. AASHTO M 226 [58] ve ASTM D3381 [59]'e göre bitüm viskozite sınıflandırması Tablo 3.2'de gösterilmiştir [53], [34].

Tablo 3.2 AASHTO M 226 ve ASTM D3381’e göre bitüm viskozite sınıflandırması [53]

Standart	Bağlayıcı (AC) Sınıflandırması					
AASHTO M226 ASTM D3381	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Standart	Yaşlandırılmış Bitüm (AR) Sınıflandırması					
AASHTO M226	AR-10	AR-20	AR-40	AR-80	AR-160	
ASTM D3381	AR-1000	AR-2000	AR-4000	AR-8000	AR-16000	

Superpave performans sınıflandırma sistemi, bitüm sınıflandırmasında yaygın olarak kullanılan sistem olup, diğerlerine göre bazı avantajları bulunmaktadır. Deneyler, bağlayıcının kullanılacağı coğrafik konumu temsil eden sıcaklıklarda gerçekleştirildiğinden, bağlayıcılar bölgenin sıcaklık koşullarında gösterdikleri performansa dayalı olarak sınıflandırılmaktadır.

3.4.2 Bitümün Özellikleri ve Davranış Karakteristikleri

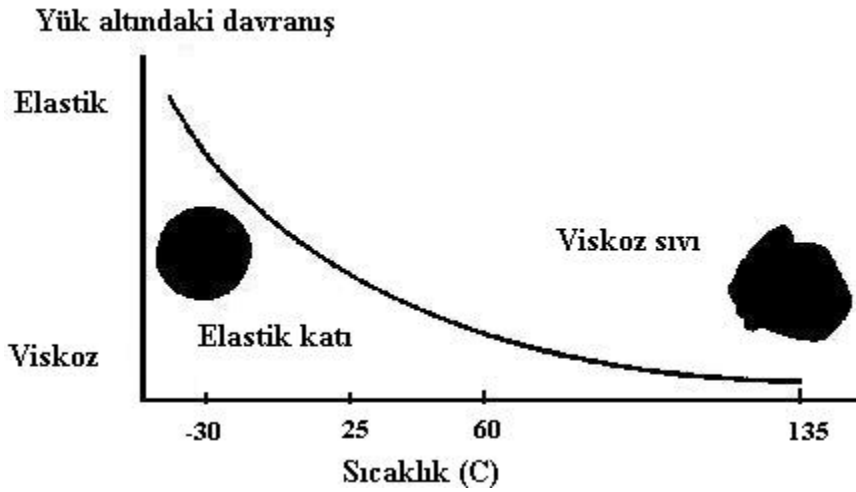
Bitümlü Sıcak Karışımların teşkilinde kullanılacak olan bitümün reolojik, viskoelastik davranışları ile düşük orta ve yüksek sıcaklık altında göstereceği davranışın bilinmesi çok önemlidir.

Bağlayıcıda oluşan deformasyonlar üç aşamadan oluşmaktadır:

- Başlangıç elastik,
- Gecikmiş elastik,
- Kalıcı

Şekil değiştirme veya viskoz akma [60].

Bitümün yük ve sıcaklık altındaki davranış biçimi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Asfaltın sıcaklığa göre yük altındaki davranışı [61]

Bağlayıcının özellikleri ve davranış karakteristikleri başlıklar halinde aşağıda sıralanmıştır.

- Bağlayıcının Reolojik Özellikleri
- Viskoelastik Davranış
- Bitümün yüksek, düşük ve orta sıcaklık davranışı

3.4.3 Bitüme Uygulanan Geleneksel Deneyler

BSK’larda kullanılan bağlayıcının özelliklerinin belirlenmesi için aşağıda, uygulanan geleneksel deneyler ve ilgili standart numaraları Ek F’de verilmiştir [48]

3.4.4 Superpave Deneyleri

1987 yılında Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) bünyesinde yüksek özellikli yapılarda kullanılan bağlayıcının davranışının ölçülmesi ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmış ve sonrasında yüksek performanslı asfalt kaplama bağlayıcı şartnamesi düzenlenmiştir [61].

Superpave deneylerinin asıl amacı asfalt kaplamalarının kullanım ömrü boyunca iyi bir performansa sahip olmalarının en ekonomik çözümle sağlanmasıdır [62].

Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (SUPERPAVE) deneyleri, malzemenin doğrudan arazi şartlarındaki performansı ile ilgili özelliklerini ölçmektedir. Bu deneyler asfaltın; yaşlanma, işlenebilirlik, oluklanma, yorulma ve termal etkilere karşı performanslarının belirlendiği bir seri deneyler grubudur [61]. Bu deneylerin adları ve ne amaçla yapıldıkları Tablo 3.3’te görülmektedir.

Tablo 3.3 Bitüme uygulanan superpave bağlayıcı deneyleri [63]

Superpave Test Adı	Amacı
Dinamik Kesme Reometresi (DSR)	Orta ve yüksek sıcaklıklardaki bağlayıcı özelliklerini ölçmek
Döner İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFO)	Bağlayıcının yaşlanma (sertleşme) karakteristiklerini belirlemek
Basınçlı Yaşlanma Deneyi(PAV)	
Dönel Viskometre (RV)	Yüksek sıcaklıklardaki bağlayıcı özelliklerini ölçmek
Kiriş Eğilme Reometresi (BBR)	Düşük sıcaklıklardaki bağlayıcı özelliklerini ölçmek
Doğrudan Çekme Aleti (DTT)	
Parlama Noktası Testi AASHTO T48	Güvenlik Amaçlı

Superpave deneylerinin amacı, asfaltın kullanım ömrü süresince maruz kalacağı 3 etkinin simüle edilmesidir. İlk safha orijinal asfaltların taşınma, depolanma ve işlenmesini simüle eder 2. safha karıştırma ve yapım ile serme aşamasını simüle eder ki bu safha deneyde, döner ince film etüvünde asfalt numunesi sıcaklık ve havaya maruz bırakılarak asfaltın serme sırasındaki sertliği tahmin edilir. Son safhada ise asfalt kaplama basınçlı oksidasyon kabı deneyi ile uzun süreli yaşlanmaya maruz bırakılır ki asfaltın hizmet ömründeki yaşlanmayı temsil edebilmesi için sıcaklık ve basınca maruz bırakılması gerekir [63], [62].

Superpave deneyleri şunlardır:

- Dinamik kesme reometresi deneyi (DSR)
- Dönel viskometre deneyi (RV)
- Kiriş eğilme reometresi (BBR)
- Doğrudan çekme deneyi (DTT)
- Döner ince film etüvü deneyi (RTFOT)
- Basınçlı oksidasyon kabı deneyi (PAV)

4

BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM (BSK) MODİFİKASYONU

Bitümlü bağlayıcı ve karışımların özelliklerinin daha iyi performans sağlamaları amacı ile günümüzde birçok farklı madde asfalt katkıları ve modifiyerleri olarak denenmekte ve kullanılmaktadır.

Dünyada modifiye bitüme olan ilginin artmasına paralel olarak, değişik iklim ve coğrafya koşullarının bulunduğu bölgelere sahip olan ülkemizde de bu konuda bazı çalışmalar yapılmakta olup, bu hususta Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan bir "Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi" mevcuttur [64]

4.1 BSK katkı malzemeleri ve aranan özellikler

Bitümlü Sıcak Karışımların modifiye edilme prosesi genel olarak iki türlü yapılabilmektedir. Bunlar:

1. Katkı maddesi bitüme katılarak, 'modifiye bitüm' elde edilir.
2. Katkı maddesi, asfalt plentinde doğrudan doğruya karışıma katılarak, 'modifiye karışım' elde edilir.

Bitümlü Sıcak Karışımların (BSK) arazi performansı ile ilgili olarak 3 sınıftan bahsedilebilir. Bunlar:

- 1) Kalıcı Deformasyonlar:
 - Tekerlek izi (oluklanma),
 - Çökmeler,
 - Kabarmalar,
 - BSK'nın yığılması,
 - Ondülasyonlar
- 2) Çatlamlar:
 - Tekrarlı yüklerden dolayı oluşan çatlaklar,
 - Yüksüz ve ısı çatlakları.
- 3) Ayrılmalar:
 - Sökülme,
 - Agrega ile bitümün ayrışması (soyulma).

Bitümlü sıcak karışımlarda görülebilen bu sorunları gidermek bakımından yapılabilecekler aşağıdaki gibi tasnif edilebilir:

- 1- Kaplama tasarımının malzeme ve drenaj vs. gibi hususlarda iyileştirilmesi,
- 2- Üstyapı Malzemelerinin yeniden değerlendirilerek gerekiyorsa değişiklikler yapılması
- 3- Üstyapıların mevcut şartnamelerinde yetersizlik varsa şartname özelliklerinin gözden geçirilerek iyileştirilmesi,
- 4- İnşa süresindeki kalite kontrolün gözden geçirilerek gerekiyorsa iyileştirilmesi,
- 5- Bağlayıcı sistemlerinin gerekiyorsa geliştirilmesi.

Bu hususların tümünün bir arada gerçekleşmesi doğal olarak performansı olumlu yönde etkileyecektir. İdeal bir bağlayıcının aşağıdaki hususları karşılaması beklenir:

- 1- Yüksek sıcaklıklarda tekerlek izlerinin minimize edilmesi için yeterli rijitliğe sahip olmalıdır. Bununla birlikte BSK'nın yorulma ömrünü uzatmalıdır,
- 2- Düşük sıcaklıklarda ise yeterli esnekliğe sahip olup, ısı çatlakların oluşmasını engellemelidir,
- 3- İnşa esnasında sıvı bağlayıcının pompalanmasının daha hızlı olmasını sağlamalı, BSK'nın karıştırılması ve sıkıştırılabilmesi için viskoziteyi düşürmelidir,
- 4- Rutubetli ortamlarda bitüm ve agrega arasındaki ilişkiyi doğru sağlayarak soyulmayı azaltmak için bitüm ile agrega arasındaki adezyonu arttırmalıdır.

Bitüm ve bitümlü karışımların modifiye edilmeleri ile, en genel anlamda yol üst yapılarının yüksek yol sıcaklıklarında yeterli rijitliğe sahip olarak oluklanma, ötelenme ve ondülasyon gibi deformasyonlara karşı dirençli olması düşük yol sıcaklıklarında da yeterli esnekliğe sahip olarak çatlamalara ve kırılmalara karşı dirençli olmaları amaçlanmaktadır. Ayrıca, trafik yükleri altında yorulma nedeniyle meydana gelen çatlamalar ile su etkisiyle meydana gelen soyulmalara karşı dirençli olması ve kaplama yüzeyinde istenilen seviyede kayma direncinin elde edilerek sürüş emniyetinin sağlanması amaçlanmaktadır.

Bitüme katkı maddesi ilave etme sebepleri aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- 1- Düşük sıcaklıklarda daha yumuşak karışımlar elde etmek ve bunun neticesinde çatlamaları engellemek,
- 2- Yüksek sıcaklıklarda daha sert karışımlar üretmek ve bunun neticesinde tekerlek izini azaltmak,

- 3- BSK yüzeylerinin kayma direncini artırmak,
- 4- Uygulama sıcaklıklarında düşük viskozite (sertlik) elde edilerek işlenebilirliği ve sıkıştırmayı geliştirmek,
- 5- Karışımların daha iyi mukavemet ve stabilite ortaya koymasını sağlamak,
- 6- Karışımların aşınma mukavemetini arttırmak ve kaplamanın çözülmesini azaltmak,
- 7- Yumuşak karışımların sertleşmesini hızlandırmak,
- 8- Karışımların yorulma mukavemetini arttırmak,
- 9- Asfalt çimentolarının verimini arttırmak,
- 10- Kullanılmış ve yaşlı olarak addedilen asfalt bağlayıcıları gençleştirmek,
- 11-Asfalt bağlayıcılarını ve karışımlarını daha güçlü hale getirmek,
- 12-Düşük kaliteli agregaların da kullanılabilir olmasını temin etmek,
- 13-Agregaların yüzeyinde daha kalın bağlayıcı filmleri oluşturmak ve bunun neticesinde, bağlayıcı ve agregaların birbirine yapışma (adezyon) özelliğini daha iyi hale getirmek, soyulmayı azaltmak,
- 14-Terlemeyi ya da akmayı minimize etmek,
- 15-Çatlakların dolmasını temin etmek,
- 16-Yaşlanma veya oksidasyona karşı mukavemeti arttırmak,
- 17-Aşınma ve binder tabaka kalınlıklarını azaltmak,
- 18-Yansıma (refleksiyon) çatlaklarını önlemek,
- 19-Yıl içinde inşa süresini daha uzun bir zamana yaymak,
- 20-Tatbikat sahalarını zenginleştirmek,
- 21-Su emme yüzdesini minimize etmek,
- 22-Yapıştırıcı katman olarak kullanabilmek,
- 23-Kaplamaların her türlü performansını maksimize etmek,
- 24-Kaplamaların uzun vadede ekonomik olmasını temin etmek.

Klasik bağlayıcılar ile sağlanamayan ancak sağlanması istenilen BSK'nın bu özelliklerinin, günümüzün teknolojik imkanları da kullanılarak, bağlayıcının yada karışımın katkı maddeleriyle modifiye edilmesi sonucunda sağlanması mümkün olabilmektedir [64],

4.2 BSK'lara doğrudan ilave edilen katkı maddeleri

Bitümlü sıcak karışımlara doğrudan ilave edilen katkı maddeleri filler olarak adlandırılan malzeme yerine ikame edilebilen atık maddelerdir.

Filler, toplam agreganın içindeki miktarı çok düşük olmasına karşın, karışımın özelliklerinin düzenlenmesinde önemli bir fonksiyonu vardır. Mineral filler malzemenin karışım boşluklarını uygun bir şekilde doldurması çok iyi bir geçirimsizlik sağlar. Bunun yanı sıra, bitüm ile ince agregaya karşı kayganlaştırma ve bağlayıcı fonksiyonu görür. Bahsedilen bu ikili fonksiyon, mineral fillere özgü bir hususiyettir ve onu diğer agregalardan ayırıştırır [65].

BSK'a doğrudan katılan atık maddelerinden bazıları aşağıda genel isimleri ile verilmiştir. Bunların dışında karışımın özelliklerinin iyileştirilmesi amacı ile katılan, fiber (cam lifi, tekstil elyafı gibi) malzemeler de mevcuttur.

- Kazınmış eski asfalt kaplamalar
- Kullanılmış otomobil lastikleri
- Çatı şingıl malzemesi
- Plastik atıklar
- Cüruflar
- Cam kırıkları
- Mermer atıklar

4.3 Bitüme Doğrudan ilave Edilen Katkı Maddeleri

Son zamanlarda kullanımı oldukça artan modifiye malzeme kullanımının öncelikli olarak aşağıdaki faktörlere olumlu yönde etkisi olması gerekir [66]

1. Son yıllarda trafik hacminin, trafik yüklerinin ve lastik basıncının önemli oranda artmış olması BSK'ların kullanım gereksinimini arttırmıştır. Bu nedenlerle BSK'ların tekerlek izine karşı önceki karışımlara göre daha mukavim olması gerekmektedir.
2. Superpave bağlayıcı şartnamesi, düşük ve yüksek üstyapı hizmet sıcaklıklarında asfalt bağlayıcının rijitliğini koruyabilmesini gerekli kılar. Modifiye edilmemiş asfalt bağlayıcıları aşırı iklim şartlarında bu standardı genellikle sağlayamaz
3. Çevresel ve ekonomik nedenler bazı atık maddelerin ve endüstriyel yan ürünlerin (lastik, çatı şingılları, cam, sülfür ve kül gibi) BSK da kullanılarak ortadan kaldırılmasını gerekli kılar

4. BSK yapımı için kamu tarafından çok yüksek miktarda yapılan ödemeler, ömründen önce oluşabilecek hata risklerini azaltmak ve hizmet ömrünün uzamasını ister.

Bitüme doğrudan ilave edilecek katkı maddelerinin şu koşulları sağlaması istenir [67]:

1. Kolay temin edilebilmelidir,
2. BSK sıcaklığında fonksiyonunu yerine getirebilmelidir,
3. Bitüm ile homojen olarak karışabilmelidir,
4. BSK'nın yüksek karıştırma ve serme sıcaklıklarında, BSK'yı çok fazla viskoz hale getirmeden, yüksek yol sıcaklıklarında akışkanlığa karşı direncini arttırmalıdır,
5. Düşük sıcaklıklarda ise BSK'nın çok kırılgan veya sert olmamasını sağlamalıdır,
6. Maliyeti uygun olmalıdır.

Bitümün modifiye edilmesinden sonra ise şu özelliklere sahip olması istenir [67], [66]:

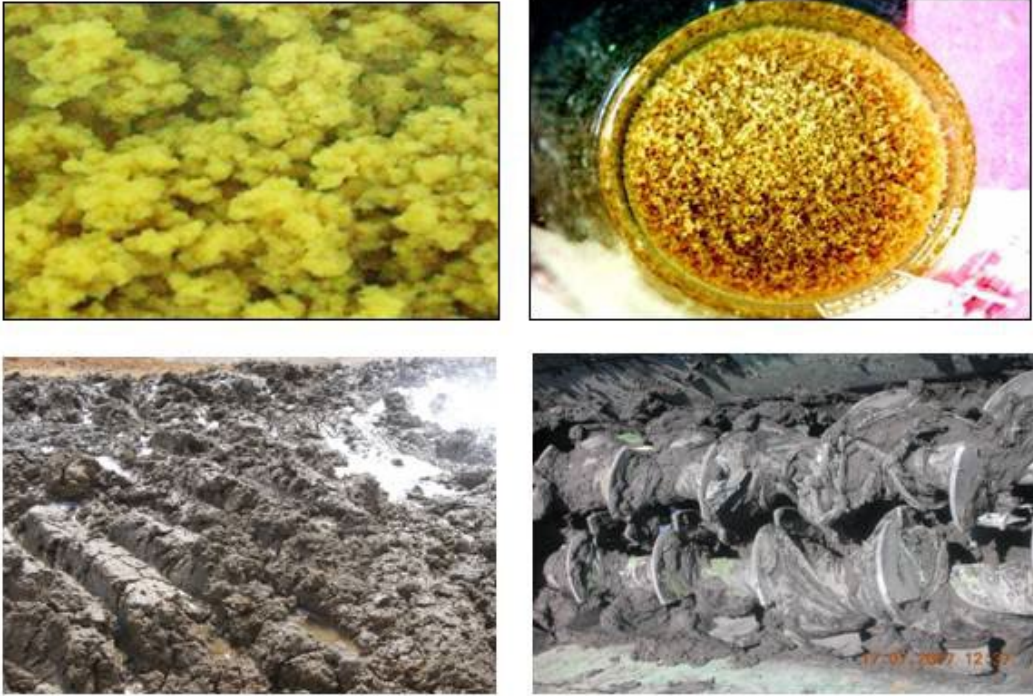
- 1- Depolama, tatbikat ve servis verme süresince sahip olduğu özelliklerini korumalıdır,
- 2- Uygun ekipman ile işlenebilir olmalıdır,
- 3- Depolama, tatbikat ve servis verme süresince fiziksel ve kimyasal olarak stabilitesini muhafaza etmelidir,
- 4- Tatbik etme sıcaklıklarında püskürtülebilme ve agregayı sarabilme akışkanlığını sağlayabilir olmalıdır.
- 5- Tekerlek izini minimize etmek için karışımın rijitliğini yeterli seviyeye çıkartabilmelidir,
- 6- Çatlakları en az seviyeye indirebilmek için karışımın elastikliğini uygun hale getirebilmelidir,
- 7- Karışımın yorgunluğa karşı mukavemetini arttırmalıdır,
- 8- Asfalt agrega yapışmasını arttırabilmeli, soyulma ve nem hassasiyetini azaltmak için karışımı iyileştirebilmelidir,
- 9- Aşınma mukavemetini sağlayabilmelidir,
- 10- Asfalt bağlayıcının yaşlanmasını geciktirebilir olmalıdır,
- 11- Absorpsiyonu (su emme) ve hava almayı minimize etmelidir,

- 12- Yaşlanmaya ya da oksidasyona karşı mukavim olmalıdır,
 - 13- Üstyapı tabakasının (binder, aşınma) kalınlığını azaltmalıdır,
 - 14- BSK üstyapının fayda-maliyet analizini iyileştirmelidir,
 - 15- Modifiye BSK'nın genel performansını geleneksel BSK'ya göre arttırmalıdır.
- Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırması Tablo D.1'de görülmektedir.



5.1 Arıtma Çamurları

Ham içme suyu ve atıksulara uygulanan biyolojik, fiziksel ve kimyasal arıtma sonucunda ortaya çıkan katı maddeler çamur olarak tanımlenebilir. Çamurlar içeriklerinden dolayı arıtılmaları gerekli olan yapısında yüksek miktarda su bulunan ve arıtılmadıkları takdirde çevreye zararlı olabilen maddelerdir. İçeriklerinde yüksek miktarlarda patojen mikroorganizmalar, organik madde ve besin maddeleri, bulunmaktadır. Şekil 5.1’de çeşitli arıtma çamuru örnekleri görülmektedir [68].



Şekil 5.1 Değişik özellikte arıtma çamurları [68]

İçme suyu arıtma çamuru ham içme suyundan içilebilir su elde edilmesi esnasında elde edilen bir yan üründür. Atıksu arıtma çamuru ise üretilen atıksudan daha sonra elde edilir. Çamur bertaraf etme işlemleri ilgili kurumlar için önemli bir yatırım ve işletme gideri oluşturan kalemler haline gelmiştir. Arıtılan içme suyunun ve atık suyun niteliğine ve uygulanan arıtma işlemlerine bağlı olarak arıtma çamurlarının özellikleri değişmektedir [69].

5.1.1 Arıtma Çamuru Kaynakları

Genel olarak çamur 3 ana kaynaktan elde edilir. Bunlar;

1. İçme suyu arıtma tesislerinden üretim esnasında elde edilen arıtma çamurları
2. Atıksu arıtma tesislerinde toplanan evsel atıksuların arıtımından elde edilen arıtma çamurları
3. Endüstriyel atıksu arıtma tesislerinde toplanan endüstriyel atıksuların arıtımından elde edilen arıtma çamurlarıdır.

Arıtma çamurları bünyelerinde yüksek miktarda su tuttuklarından dolayı hacimsel olarak oldukça büyük kütleler oluştururlar. Biyolojik arıtma işleminden elde edilen arıtma çamurlarında bozunabilir madde içeriği çok yüksektir ve bu nedenle bu tür çamurların bozunma dolayısı ile de kötü koku üretme özellikleri yüksektir. Bu özellikleri sebebi ile arıtma çamurlarının çevreye zarar vermeyecek şekilde bertaraf edilmesi günümüzün çözüm bekleyen önemli sorunlarından biridir.

Evsel nitelikli atıksuların arıtımından elde edilen arıtma çamurların özellikleri büyük oranda birbirine benzemektedir ancak, endüstriyel kaynaklı arıtma çamurlarında durum farklıdır ve üretildikleri endüstriyel sektörün türüne göre önemli farklılıklar gösterebilmektedirler. Her bir endüstriyel sektörden elde edilecek çamurun özellikleri ayrı ayrı belirlenmelidir.

Bunun yanında aynı tip atık çamurunun; fiziksel, kimyasal, biyolojik ya da ileri arıtma ile elde edilmiş olması da çamurun özelliklerini farklılaştırmaktadır.

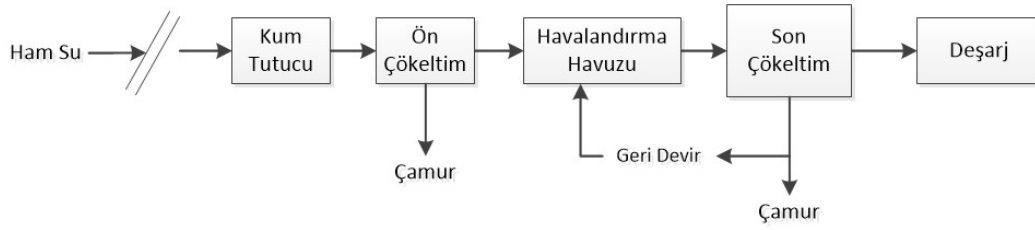
En yaygın kullanılan biyolojik arıtma işlemi aktif çamur havuzunda yapılan arıtmadır. Bir aktif çamur sistemi genelde havalandırma havuzu ve çökeltim havuzundan oluşmaktadır (Şekil 5.2). Bir aktif çamur havuzunun yer aldığı evsel atıksu arıtma tesisinin akım şeması ve çamur kaynakları ise Şekil 5.3'te verilmektedir. [69]



a. Havalandırma

b. Çökeltme

Şekil 5.2 Havalandırma havuzu [69]



Şekil 5.3 Klasik aktif çamur havuzunun yer aldığı arıtma tesisi akım şeması ve çamur kaynakları [69]

5.1.2 Arıtma Çamurlarının Karakterizasyonunda Önemli Parametreler

Çamur ile ilgili bilgiler ve parametreler, çamur işleme ve bertaraf etme tesislerinin dizaynı ve denetimi için kullanılmaktadır. Bu parametreler, ilgili mühendislere çamurun organik madde muhtevası, çökelebilme özelliği, su verme özelliği ve ısı değeri hakkında bilgi vermektedir. Aşağıda çamuru tarif eden ana parametreler kısaca özetlenmektedir [69].

5.1.2.1 Özgül Ağırlık

Birim hacimdeki çamur ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranı şeklinde tanımlanan özgül ağırlık, birçok çamur numunesi için yaklaşık olarak 1,0'dir. [69].

5.1.2.2 Çamur Katı Madde İçeriği

Çamurun katı madde içeriği “mg/L” veya “%Katı Madde (%KM)” olarak ifade edilmektedir. Çamurdaki toplam katı madde mg/L olarak, standart metotlarda verilen prosedüre göre belirlenir ve belli hacimdeki numunenin 103 °C’de etüvde buharlaştırılması neticesinde meydana gelen ağırlık kaybına göre hesaplanır. [69], [70]

Tablo 5.1 Çeşitli arıtma kademelerinde oluşan arıtma çamurlarının tipik katı madde yoğunlukları [69]

Çamur Türü	Katı Madde Yoğunluğu % KM	
	Aralık	Tipik
Ön Çökeltmede Oluşan Çamuru	4.0 - 10.0	5.0
Aktif Çamur	0.8 – 2.5	1.3

Tablo 5.1 Çeşitli arıtma kademelerinde oluşan arıtma çamurlarının tipik katı madde yoğunlukları [69] (devamı)

Damlatmalı Filtre Humusu	1.0 – 3.0	1.5
Ön Çökeltim Çamuru + Aktif Çamur	0.5 – 1.5	0.8
Anaerobik Çürütülmüş Çamur	5.0 – 10.0	8.0

Susuzlaştırma safhalarından sonra arıtma çamurlarına ait resimler Şekil 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.4 Atık Çamuru Kurutma Aşamaları [69]

5.1.2.3 Toplam Askıda Katı Madde

Çamurdaki toplam katı maddeleri askıda ve çözünmüş katı maddelerin toplamı olarak ifade edebiliriz [69]

5.1.2.4 Uçucu Askıda Katı Madde

Genel olarak organik maddelerden oluşan bu uçucu madde, normal kurutma işlemine tabi tutulan çamurun daha sonra 500 °C’de fırında yakılması ile kaybedilen kütle miktarı ile ölçülür [69].

5.1.2.5 Çamur Hacim İndeksi

Çamur hacim indeksi, çamurun çökebilme özelliğinin belirlenmesinde kullanılan ve belirlenmesi basit bir parametredir. Çamur hacim indeksi, bir gram katı maddenin 30 dakika çökelme sonucunda işgal ettiği hacimdir. Çamur hacim indeksini belirlemek amacıyla Şekil 5.5’de verilen düzenek kullanılmaktadır [69].



Şekil 5.5 Imhoff konisi düzeneği [69]

5.1.2.6 Çamurdaki Suyun Dağılımı

Çamurdaki suyun hangi yapıda olduğuna bağlı olarak su verme işlemlerinden hangisinin daha etkili olacağı değişkenlik göstermektedir. Çamurdaki suyu dört grup halinde incelemek mümkündür [69]:

- Serbest Su: Çamur partiküllerine bağlı olmayan ve yerçekimi etkisi ile kolaylıkla ayrılabilen sudur.
- Flok Suyu: Çamur yumakları içinde hapsedilmiş su olup, yumakla birlikte hareket eder. Mekanik su alma işlemleri ile giderilebilir.
- Kapiler Su: Çamur partiküllerinin üzerinde bağlı halde bulunur ve bu partiküllerin sıkıştırılması sonucu uzaklaştırılabilir.
- Kimyasal Bağlı Su: Partiküller içinde kimyasal formda bağlanmış sudur.

5.1.2.7 Çamurun Akışkanlık Özelliği

Çamurların akışkanlık özelliği “reoloji bilimi” ile tarif edilmektedir. Reoloji; sıvı, yarı sıvı ve katı formdaki materyallerin elastik ve viskoz özelliklerini ortaya koyan, materyal akışkanlığını ve deformasyonunu inceleyen bir bilimdir. Akışkanlık özelliğinin tespit edilmesinde en yaygın kriter viskozitedir. Viskozite, akışkanın kayma gerilmesine karşı gösterdiği mukavemettir [69].

Çamurun mekanik özelliklerinin tesbiti zor bir prosesdir ve bu tespit için geliştirilmiş çeşitli cihazlar mevcuttur. Şekil 5.6’da bu tip bir cihaza örnek görülmektedir [69].



Şekil 5.6 Çamurun akışkanlık özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan cihazlara bir örnek [69]

5.1.2.8 Çamur Partikül Boyut Dağılımı

Çamurların partikül boyut dağılımının belirlenmesi, çamurun koşullandırılması, çamurun filtre edilmesi, yumaklaşması ve çökmesi gibi birçok süreçte önemlidir. Şekil 5.7’de partikül boyut dağılımı analizinde kullanılan partikül boyut dağılım analiz cihazının resmi verilmektedir [69].

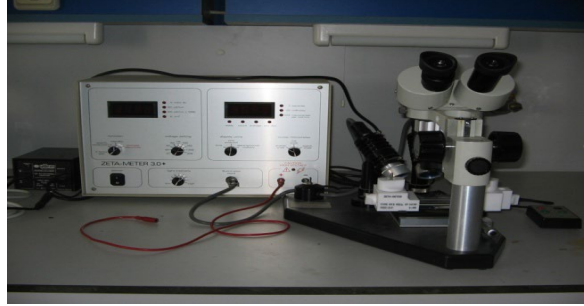


Şekil 5.7 Partikül boyut dağılımı analiz cihazı [69]

5.1.2.9 Çamur Partiküllerindeki Elektriksel Yüklerin Tespiti

Partiküller üzerindeki elektriksel yük “zeta potansiyeli” ile tespit edilir [69]

Şekil 5.8’de elektrik yükü olan ve elektrik yükü olmayan partiküllerin davranışı görülmektedir



Şekil 5.8 Zeta potansiyelini ölçen cihazlara bir örnek [69]

5.1.2.10 Çamurun Isıl Değeri

Çamurun ısı değeri, çamurun tipine ve içeriğindeki uçucu katı madde muhtevasına bağlıdır. Arıtılmamış ön çökeltim çamurunun ısı değeri, özellikle önemli miktarda yağ ve gres içeriyorsa, çok yüksektir. Çürümüş çamur ham çamurdan daha düşük ısı değere sahiptir [69]. Çamurun bertaraf edilmesi için termal işlemler uygulanacaksa mümkün olduğunca çamurun suyu alınarak ısı değeri artırılmalıdır.

5.1.2.11 Gübre Değeri

Sentetik gübrelerin yaygınlaştığı 20. yüzyılın ilk yarısından önce insan atıkları gübre olarak yaygın olarak kullanılmaktaydı [69].

5.1.2.12 Çamurun Biyolojik Özellikleri

Çamurların üretildiği kaynaklar oldukça fazla çeşitlilik gösterdiği için bünyesindeki organizmalar da çeşitlilik gösterir bu nedenle biyolojik özelliklerinin tespit edilip bilinmesi gerekir [69]

5.1.2.13 Çamurun Depolanabilirliği

Çamur arıtılması esnasında kullanılan kimyasalların ve içerisinde barındırdığı bozunabilir maddelerin varlığı nedeni ile çevreye zarar vermemesi için depolanmalıdır. Depolanma bazen nihai bir bertaraf yöntemi olabilir bu nedenle depolanma düzenli olmalıdır [69]

5.1.2.14 Çamur Su Verme Özellikleri

Çamur içerisinde oldukça yüksek miktarda su barındırır. Çamuru bertaraf etmeden önce gerek taşıma maliyetlerini azaltmak gerekse de ihtiyaç duyulabilecek

depolanma alanından tasarruf etmek için çamurun içerisindeki suyu azaltmak gerekecektir. Bu işlem doğal olarak ya da mekanik olarak yapılabilir [69]

5.1.2.15 Çamurun Pompalanabilir Olması

Viskoz olan bir çamurun pompalanabilmesi zordur. Çamurun viskozitesi, çamurdaki katı madde yoğunluğu, partikül boyutu ve içeriğindeki organik maddelerden dolayı oluşur. [69]

5.2 İçme suyu Atık Çamuru

İçme suyu arıtma tesislerinde ham su arıtımı esnasında oluşan katı kalıntılar içme suyu arıtma çamuru olarak adlandırılmaktadır. İçme suyu arıtma çamuru, içerisinde önemli miktarda su ihtiva ettiğinden hacimsel olarak oldukça büyük miktarda ortaya çıkmaktadır. İçme suyu arıtma çamuru diğer çamurlara göre nispeten daha az çevresel zararı olan ve bertarafı kolay malzemelerdir [12].

Her ne kadar içme suyu arıtma çamuru çevreye daha az zararlı ise de elde edilmeleri aşamasında kullanılan kimyasallar nedeni ile doğrudan bertarafı uygun değildir. Arıtma esnasında kullanılan kimyasallar su ve toprak için zararlı sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle gittikçe artan miktarda ortaya çıkan içme suyu atık çamurun ekonomik ve çevreye zarar vermeyecek bir şekilde bertarafı veya ekonomiye kazandırılması oldukça önemli bir meseledir. Elde edilen çamur bir şekilde bertaraf edilmediği takdirde belediyeler için yönetilmesi zor bir sorun haline gelmektedir. Özellikle içeriğinin önemli bir kısmı su olan bu malzemelerin depolanma sahalarına nakledilmesi ve bu depolarda sürekli çoğalan bir şekilde birikmeleri üstesinden gelinmesi zor bir kamusal yüküdür ve sürdürülebilir değildir. Giriş bölümünde de ifade edildiği gibi bu sorunun üstesinden gelinmesi için bugüne kadar birçok bilimsel çalışma yapılarak bu çamurların nasıl ekonomiye kazandırılarak bertaraf edilebileceği üzerinde çalışılmış ve güzel sonuçlar da elde edilmiştir. Dolayısıyla da içme suyu arıtma çamurlarının çeşitli alanlarda kullanılabilir olması sürdürülebilir atık yönetimi açısından uygun bir çözümdür [12].

5.2.1 İçme Suyu Arıtma Çamurlarının Genel Özellikleri

İçme kalitesinde bir su elde etmek için kullanılan ham su , içerisinde askıda katı maddeler, mikroorganizmalar, organik ve çeşitli yabancı maddeler de barındırır. Bu maddelerin içme suyundan uzaklaştırılması ve içilebilir bir su elde edilebilmesi için

ham suyun arıtılması zorunluluğu vardır. İçme suyu arıtma tesislerinde ham suya pıhtılaştırma (koagülasyon), topaklaştırma (flokülasyon), çökeltme, filtreleme ve dezenfekte etme süreçleri uygulanmaktadır. Genellikle alüminyum sülfat ve demir III klorür kullanılarak yapılan bu arıtma işlemi esnasında hacimsel olarak oldukça büyük miktarda çamur ortaya çıkmaktadır.

Nüfus arttıkça yaşam kalitesi yükseldikçe içme suyu miktarında oluşacak olan artıştan dolayı içme suyu arıtma çamurunun yıllar içerisinde daha da artacağı tahmininde bulunulabilir. Suyun arıtılması sonucunda ortaya çıkan çamurun miktarı ve muhtevası kullanılan ham suyun kaynağına ve arıtma teknolojisine göre değişiklikler gösterir yani tek bir çamur özelliğinden değil değişken özelliklerden bahsedebiliriz. İçme suyu arıtma çamurları, çoğunlukla jelatinimsi yapıda çamurlardır. Çamurun jelatinimsi yapıda olması içeriğindeki demir veya alümin hidratlardan kaynaklanmaktadır. Tablo 5.2’de içme suyu arıtma çamurlarının karakteristik özellikleri sunulmaktadır [12]

Tablo 5.2 İçme suyu arıtma çamurlarının tipik özellikleri [12]

Parametre	Alümin çamuru	Demir çamuru
Alüminyum (% kuru ağırlık)	29,7±13,3	10,0±4,8
Demir(% kuru ağırlık)	10,2±12	26,0±15,5
Kalsiyum (% kuru ağırlık)	2,9±1,7	8,32±9,5
Magnezyum (% kuru ağırlık)	0,89±0,8	1,6
SiO ₂ (% kuru ağırlık)	33,4±26,2	Veri mevcut değil
Çinko (mg/kg)	33,9±28	18,7±16
Kurşun (mg/kg)	44,1±38,2	19,3±25,3
Kadmiyum (mg/kg)	0,5	0,48±0,26
Nikel (mg/kg)	44,3±38,4	42,9±39,2
Bakır (mg/kg)	33,72±32,5	18,7±25,8
Krom (mg/kg)	25,0±20,1	25,7±21,6
Kobalt (mg/kg)	1,06	1,61±1,1
P (% kuru ağırlık)	0,35	0,36
Toplam katı madde (mg/L)	(2500–52345)	(2132–5074)
pH	7,0±1,4	8,0±1,6
BOI ₅ (mg/L)	45 (2–104)	Veri mevcut değil

Tabloda, “ortalama+standart sapma” değerleri verilmiştir.

Günümüzde içme suyu arıtma çamurlarının genel olarak bertaraf edilmesinde doğrudan akarsulara boşaltma, çamur göllerinde depolama, katı atık depolama tesislerinde depolama, yakma ve atık su arıtma tesislerine gönderme yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak gerek arıtma sürecinde kullanılan kimyasallar gerekse de çamurun bünyesinde ihtiva ettiği diğer maddeler bu tip bertaraf etme yöntemlerinin sakıncalı olduğunu göstermektedir. Bu bertaraf yöntemleri özellikle de akarsulara direkt deşarj insanlara, hayvanlara ve çevreye zarar verebilir. Bunun yanı sıra, çamurların doğrudan, hiçbir iyileştirme (kurutma, vb.) yapılmadan depolama sahalarında depolanması ise bünyesinde barındırdığı yüksek miktardaki suyun gerek buharlaşma ve gerekse de yeraltı suyuna sızma ihtimali atık kütlesinin stabilitesinde kayıplara yol açıp doğaya zarar verebilmekte ve büyük depolama hacimlerine ihtiyaç duyulmasına da sebep olabilmektedir [12].

Tablo 5.3'te Nguyen ve arkadaşları [71] tarafından yapılan çalışmaya göre döngüsel ekonomi açısından içme suyu arıtma çamurunun yeniden kullanımına yönelik fayda ve engeller ortaya konmaktadır.

Tablo 5.3 Döngüsel ekonomi açısından içme suyu arıtma çamurunun yeniden kullanımına yönelik fayda ve engeller [71]

Fayda Kategorisi	Örnek Fayda	Gelecek Uygulamalar
Çevresel	Çevreye deşarj edilen kirletici seviyesini azaltmak için atık su veya yağmur suyu akışını arıtmak için yeniden kullanım	Çevre sağlığını ve su ekosistemlerinin sağlığını iyileştirmek
Çevresel	Su kaynaklarına aşırı fosfor akışı riskini yönetmek için gübre veya biyosolidlerle birlikte toprağa uygulayın.	Çiftçilik faaliyetlerinin çevresel ayak izini azaltın
Çevresel	İnşaat malzemesi üretimi gibi çeşitli uygulamalarda işlenmemiş malzemelerin yerini alır	Endüstrilerin yeni malzemelere olan ihtiyacının azaltılması
Ekonomik	İnşaat için işlenmemiş malzemenin veya koagülasyon süreçleri için yeni kimyasalların yerine yeniden kullanım	Hammadde malzemelerin maliyetini azaltın
Ekonomik	Çöp sahasına atılmaktan kaçının	Çevre mevzuatı ve vergilerden kaynaklanan maliyetlerin azaltılması

Tablo 5.4 Döngüsel ekonomi açısından içme suyu arıtma çamurunun yeniden kullanımına yönelik fayda ve engeller [71] (devamı)

Sosyal	Sürdürülebilir iş imajının geliştirilmesine katkıda bulunmak	Paylaşım ekonomisi aracılığıyla bir topluluk, işbirliği ve özellikle katılım duygusu yansıtın
	Sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada su idarelerine yardımcı olmak	Yeni ticari fırsatları belirlemek ve keşfetmek için inovasyon kültürünü teşvik etmek yenilikçilik ve teknolojinin benimsenmesi
Engel Kategorisi	Örnek Engel	Gelecek Uygulamalar
Teknik	Farklı kaynaklardan elde edilen WTS (Water Treatment Sludge)'nin özelliklerinde önemli farklılıklar.	Teknolojinin benimsenmesini azaltır
Ön işlem gereksinimi	WTS'yi bir yeniden kullanım uygulaması için kullanıma hazır bir hammadde malzemesine dönüştürmek için işleme gerekebilir	Yeni malzemelere uyum sağlamak için sistemde değişikliklere yol açar. Operasyonel maliyetleri artırır
Mali	Büyük ölçekli bir WTS yeniden kullanım tesisi kurmak önemli miktarda Sermaye harcaması gerektirir	Yatırım ve Sermaye maliyetlerinde artış
Yasal Düzenleme	WTS'nin yönetimine ilişkin farklı düzenlemeler	WTS kullanımına olan güveni azaltın
	WTS'nin yeniden kullanımına ilişkin standart ve kılavuzların eksikliği	WTS'nin potansiyel kullanımını sınırlandırır ve yetkili makamların şüpheli yaklaşımlarına yol açar

Yıllık üretimleri çok büyük miktarlarda olan ve normal mevcut olan genel anlayış itibari ile bir atık olarak kurtulunması veya depolama tesislerinde depolanması gereken, bu nedenlerle de çevresel sorunlar oluşturan İSAÇ esasen uygun maliyetli, kolay ulaşılabilir malzemelerdir [12].

5.2.2 İçme Suyunun Arıtılma Süreci

5.2.2.1 İçme Sularının Özellikleri

İçme ve kullanma sularında istenilen ve istenmeyen özellikleri beş grupta toplamak mümkündür.

1. Su, kokusuz, renksiz, berrak ve içimi serinletici olmalıdır.
2. Su hastalık yapan patojenik mikroorganizma ihtiva etmemelidir.
3. Su sağlığa zararlı kimyasal maddeler ihtiva etmemelidir.

4. Su, kullanma amaçlarına uygun olmalıdır.

5. Sular sert, agresif olmamalıdır.

Son kullanıcıya ulaştırılan suyun bu özellikleri sağlayabilmesi için genelde kaynak suyunun bir arıtma işlemine tabi tutulmasına gerek vardır [72].

5.2.3 İçme suyu Arıtma Sürecine Bir Örnek: İstanbul İSKİ Cumhuriyet İçme suyu Arıtma Tesis

Cumhuriyet içme suyu arıtma tesisi 2012 yılında hizmete girmiştir ve ağırlıklı olarak Melen çayından ve bir kısım Ömerli tesisinden alınan ham suyun arıtılarak Avrupa yakasına iletilmesi fonksiyonunu icra etmektedir. Tesisin günlük içme suyu arıtma kapasitesi 720.000 m³ dür [73]

Tesiste yapılan incelemelerde ve İSKİ'nin yayınlamış olduğu Cumhuriyet İçme suyu Arıtma Tesis tanıtım kitapçığı [73]'ndan elde edilen bilgiler bu çalışmada derlenmiştir ki buna göre bir içme suyu arıtma işlemi aşağıdaki aşamalardan meydana gelmektedir:

1. Ham Su Girişi: Çelik isale hatları ile kaynağından gelen suyun tesise giriş yaptığı ilk ünite “ham su giriş yapısıdır”.

2. Havalandırma: Kaynağından temin edilen ham su, sekizgen şeklindeki dört basamaklı ve kaskat tipte olan havalandırma havuzlarında işleme tabi tutulur. Bu aşamada çözünmüş oksijen konsantrasyonu artar, tat ve koku veren uçucu parametreler atmosfere verilerek yok edilir.

Su havalandırma çıkışında ön klorlamaya tabi tutulmaktadır. Bu şekilde sudaki demir, mangan ve organik maddeler havalandırma ve ön klor sayesinde okside olarak arıtma tesisinde giderilebilecek forma dönüştürülmektedir. İSKİ Cumhuriyet içme suyu arıtma tesisinde bulunan havalandırma havuzlarının üstten görünümü Şekil 5.9'de, çalışma prensibi ise Şekil 5.10'de görülmektedir.



Şekil 5.9 Havalandırma havuzlarının üstten görünüşü [73]



Şekil 5.10 Havalandırma havuzunun çalışma prensibi [73]

3.Kimyasal Arıtma: Havalandırma havuzunda işleme tabi tutulan ham su hızlı karıştırma ünitesine pompalanır. Burada suya koagülant (pıhtılaştırıcı) olarak demir III klorür (FeCl_3) ilave edilir ve yaklaşık 50 sn bekleme süresi boyunca su ile homojen bir şekilde karışması sağlanır. Hızlı karıştırma ünitesi Şekil 5.11’de görülebilir.



Şekil 5.11 Hızlı karıştırma ünitesi [73]

Demir III klorür etkisiyle hızlı karıştırıcılarda yükleri nötrleştirilen kolloidal yapıdaki maddelerin yumak haline dönüşmesi için su, 1200 mm çapındaki çelik borularla yavaş karıştırma ünitesine alınır.

Bu üniteye polielektrolit ilavesiyle sular yavaş karıştırılarak çamuru meydana getiren kolloidal maddelerin birbiri ile buluşarak yumak haline gelmesi sağlanır.

Yavaş karıştırma ünitesi Şekil 5.12’de görülebilir.



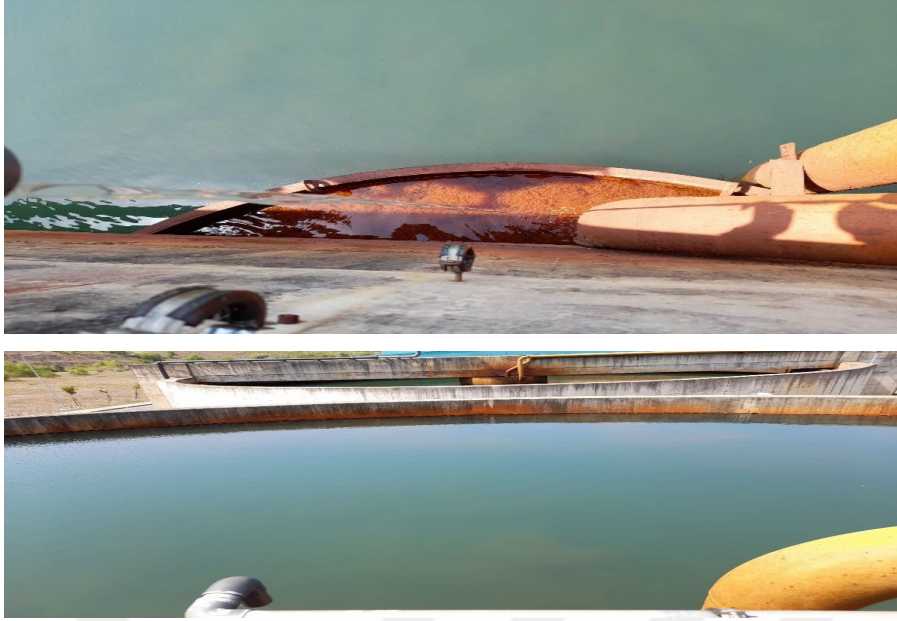
Şekil 5.12 Yavaş karıştırma ünitesi [73]

4.Çöktürme: Çöktürme ünitesi yavaş karıştırma işlemi neticesinde yumak (flok) haline gelmiş olan kolloidal maddelerin yerçekiminin etkisi ile sudan ayrıldığı yapıdır. Yüzey yükünü arttırarak daha iyi bir çöktürme işleminin gerçekleşebilmesi maksadı ile havuzun üst kısmına özel lamella paketleme sistemi monte edilmiştir. Kare çöktürme tankı olarak tasarlanan çöktürme havuzlarının tabanı dairesel ve 10 derecelik bir eğimden oluşmaktadır. Havuz tabanındaki çamur döner bir sıyrıcı ile orta kısımda toplanarak pompalar vasıtası ile çamur yoğunlaştırıcılara iletilir. Çöktürme ünitesi Şekil 5.13’da görülebilir



Şekil 5.13 Çöktürme ünitesi [73]

5.Çamur Susuzlaştırma: Çöktürme havuzlarının dibinden çekilen çamur, çamur yoğunlaştırma havuzuna gönderilir (Şekil 5.14). Yoğunlaştırma tankına giren çamurda katı madde miktarı %0,5-1,5 aralığında iken bu oran çökelmenin etkisi ile %2-4 oranına yükselir. Bu aşamada tanktaki çamur pompalar vasıtası ile kireç karıştırma tankına (Şekil 5.15) gönderilirken yüzeydeki duru su da dalgıç pompalar vasıtası ile tekrar arıtılmak üzere hızlı karıştırıcı havuzuna geri gönderilir. Hazırlama tankında kireç ile karıştırılan çamur, çamur besleme (Şekil 5.16) ve çamur basınçlandırma (Şekil 5.17) pompaları vasıtası ile yüksek basınçlarda mekanik olarak sıkıştırılmak üzere filtre preslere (Şekil 5.18) pompalanır. Sıkıştırma işlemi neticesinde filtre preslerde % 30-35 katı madde içeriğine sahip çamur keki oluşur ve bu çamur kamyonlarla (Şekil 5.19) katı atık depolama tesisine nakledilir.



Şekil 5.14 Çamur yoğunlaştırma havuzu [73]



Şekil 5.15 Çamur kireç karışım tankı [73]



Şekil 5.16 Çamur besleme pompaları [73]



Şekil 5.17 Çamur basınçlandırma pompaları [73]



Şekil 5.18 Çamur filtre pres makinası [73]



Şekil 5.19 Susuzlaştırılan çamurun depolara götürülmek üzere kamyonlara yüklenmesi [73]

5.3 Türkiye Cumhuriyeti'nde İçme Suyu Arıtma Çamuru Üretim Miktarı

Türkiye'nin yüzölçümü 779.500 km² ve yıllık ortalama yağış hacmi 450 milyar m³ olup, yıllık tüketilebilir yerüstü ve yeraltı su potansiyeli toplamı 112 milyar m³'tür. Ülkenin toprak ve su kaynaklarının geliştirilmesinden sorumlu olan kamu kurum ve kuruluşlarının geliştirdikleri projeler neticesinde çeşitli maksatlara yönelik yıllık su tüketimi 54 milyar m³'e (%48,2) ulaşmıştır [2]

2018 yılı itibari ile Türkiye'de bulunan İçme Suyu Arıtma Tesislerinin Tipleri ve Sayısı Tablo 5.4'te görülmektedir.

Tablo 5.5 İçme Suyu Arıtma Tesisleri [2]

İçme Suyu Arıtma Tesis Tipi	Tesis Sayısı
Ön Arıtma Tesisleri	28
Konvansiyonel Arıtma Tesisleri	119
İleri Arıtma Tesisleri	12
Paket Arıtma Tesisleri	295
Faal Tesis Sayısı	452
Faal Olmayan Tesis Sayısı	93
TOPLAM	545

TÜİK verilerinden görülebileceği gibi Türkiye Cumhuriyeti'nde toplam 1391 belediye tarafından içme ve kullanma suyu şebekesi için çekilen toplam su miktarı 6,7 milyar m³ dür. Bu suyun %43'ü barajlardan, %29,1'i kuyulardan, %16,5'i kaynaklardan, %7,7'si akarsulardan ve %3,7'si göl, gölet ve denizlerden sağlandı. Kullanılan bu suyun 4,1 milyar m³ ü içme ve kullanma suyu arıtma tesislerinde arıtıldı. Arıtılan su kullanılan içme suyu toplamının %60,8'ine karşılık gelmektedir [74].

İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından arıtılarak kullanıcılara ulaştırılan su miktarı 2018 yılında 1.040.965.331 m³ 2019 yılında 1.061.769.837 m³/yıl, 2020 yılında 1.074.133.977 m³/yıl, 2021 yılında 1.073.990.361 m³ ve 2022 yılında ise 1.103.672.069 m³'dür [75]. Bu su miktarının üretilen tesislerine göre dağılımı Tablo 5.5 ve Arıtılan içme suyu ve üretilen çamur miktarı ilişkisi Tablo 5.6'de ki

gibidir. Tablo 5.7’te ise üretilen içme suyundan elde edilen arıtma çamurundaki katı madde oranı gösterilmiştir

Tablo 5.6 İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından arıtılarak şehre verilen içme suyu miktarı [76], [77], [75]

Tesis Adı	Arıtılan Su miktarı 2020 (m ³ /yıl)	Arıtılan Su miktarı 2021 (m ³ /yıl)	Arıtılan Su miktarı 2022 (m ³ /yıl)
Büyükçekmece	54.490.249	53.953.601	96.665.955
Kağıthane	83.676.767	107.671.563	138.105.851
İkitelli	177.187.148	154.180.987	166.740.438
Taşoluk	17.999.014	17.662.548	15.786.797
Ömerli	449.321.272	462.535.244	446.706.301
Cumhuriyet	262.153.429	251.178.631	211.500.448
Diğer	29.306.098	26.807.787	28.166.279
Toplam	1.074.133.977	1.073.990.361	1.103.672.069

Tablo 5.7 İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından üretilen içme suyundan elde edilen toplam ve birim çamur miktarı [76], [77], [75]

Yıllar	2020	2021	2022
Arıtılan içme suyu m ³	1.074.133.977	1.073.990.361	1.103.672.069
Elde edilen çamur kg	132.538.070	128.507.880	121.588.820
1 kg çamur elde etmek için arıtılan içme suyu	8,10	8,36	9,08

Tablo 5.8 Bu çalışmada çamuru kullanılan içme suyu arıtma tesislerinin ürettiği çamur ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi yıllık üretilen çamur miktarı ile çamurdaki ortalama katı madde oranı [78], [79], [76], [77], [75]

Tesis Adı	Çamur Miktarı 2018 (kg/yıl)	Ort. Katı Madde Oranı (%)	Çamur Miktarı 2019 (kg/yıl)	Ort.Katı Madde Oranı%	Çamur 2020 (kg/yıl)	Ort. Katı Madde Oranı (%)
İkitelli	20.349.190	18,20	24.043.270	19,01	23.335.120	*
Cumhuriyet	38.378.620	35,13	37.478.600	36,01	64.645.100	*
Toplam	89.226.113	26,30*	102.507.300	27,06*	132.538.070	*

* 2019 yılından sonraki İSKİ faaliyet raporlarında çamurda bulunan katı madde miktarı belirtilmemiştir.

Tablo 5.8, 2022 yılı için Türkiye Cumhuriyeti'nin bütününde üretilebilecek yaklaşık sulu çamur ve katı çamur miktarı'daki verilerden de görülebileceği gibi 2020 yılında İstanbul Büyükşehir Belediyesi arıttığı 8.1 m³ sudan 1 kg sulu çamur elde etmiştir. Bu miktarlar 2021 yılı için 8.36 m³ ve 2022 yılı için 9.08 m³'tür. İstanbul Büyükşehir Belediyesi içme suyu arıtma tesis verilerini esas alarak Türkiye genelinde üretilen içme suyu arıtma çamurunu ve katı çamur miktarını Tablo 5.10'daki gibi yaklaşık olarak hesaplayabiliriz. Bu hesaplamada İSKİ 2022 yılı verilerine göre 1 kg sulu çamur üretmek için 9,08 m³ içme suyunun arıtılması gerektiği ve yine İSKİ tarafından 2019 yılında son kez açıklanan verilere göre 1 m³ sulu çamurda İstanbul genelinde ortalama %27,06 oranında katı madde olduğu dikkate alınmıştır.

Tablo 5.9 2022 yılı için Türkiye Cumhuriyeti'nin bütününde üretilebilecek tahmini yaklaşık sulu çamur ve katı çamur miktarı

	Arıtılan İçmesuyu miktarı 2022 (m³/yıl)	Üretilen Çamur Miktarı (kg/yıl)	Üretilen Katı Çamur Miktarı (kg/yıl)
İstanbul	1.103.672.069	121.588.820	32.901.934
Türkiye (tahmini)	4.100.000.000	451.541.850	122.187.225

KULLANILAN MALZEMELER VE UYGULANAN DENEYLER

6.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

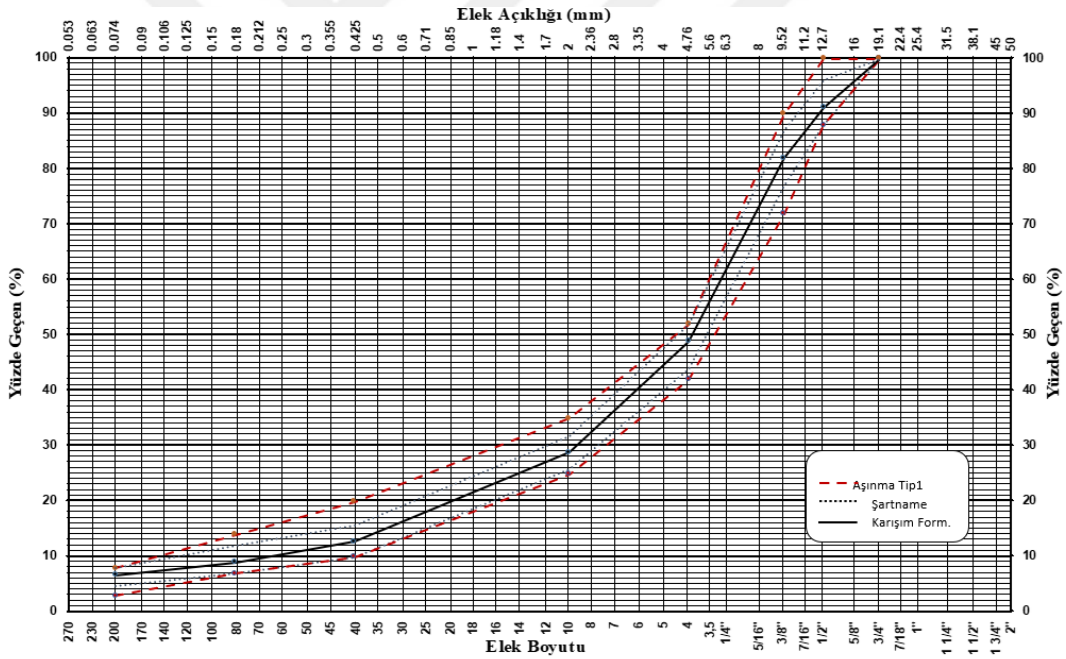
Bu çalışmada iki tip içme suyu arıtma çamuru kullanılmıştır. Bu çamurların biri İSKİ Cumhuriyet İçme suyu Arıtma Tesisinden temin edilmiş ve arıtma işlemi alüminyum sülfat (%50 lik) ile yapılmış diğeri ise İSKİ Kağıthane İçme suyu Arıtma Tesisinden temin edilmiş ve arıtma işlemi demir (III) klorür (%40'lık) ile yapılmıştır. Bu çamurlar, İSFALT A.Ş. Ümraniye Fabrika Aşınma Tip 1 dizaynında filler malzeme yerine %1, %3 ve %5 oranlarında kullanılmış ve oluşturulan dizaynlara marshall stabilite, tekerlek izi ve dolaylı çekme mukavemeti deneyleri uygulanarak en uygun sonucu veren dizayn belirlenmiştir. En uygun sonucu veren dizayna bu kez %2 ve %5 oranında SBS katkı maddesi ilave edilerek deneyler tekrarlanmış ve sonuçlar değerlendirilerek sıcak asfalt karışımında kullanılabilecek en uygun dizayn tespit edilmiştir.

6.1.1 Agregata

Agregata olarak İSFALT A.Ş. Ümraniye Fabrikasından alınan (Koç Taş Ocağı'na ait) 12-19 mm, 5-12 mm ve 0-5 mm elek aralığındaki kalker agregata kullanılmıştır. Bu kalker agregata ait tane boyutu dağılımı Tablo 6.1'deki, agregata gradasyonu ve limitleri ise Şekil 6.1'deki gibidir. Kullanılan agregata ait fiziksel özellikler de Tablo 6.2'de görülebilir.

Tablo 6.1 Tane Boyutu Dağılımı (Elek Analizi) Deney Metodu: TS EN 933-1 [80]

Elek No.	No 1 19-37,5 mm	No 2 12-19 mm	Taş Tozu 5-12 mm
1 1/2	100,0		
1"	100,0	100,0	
3/4 "	100,0	100,0	100,0
1/2 "	18,7	88,8	100,0
3/8 "	2,1	71,9	100,0
No 4	1	8,3	97,2
No 10	0,8	0,9	59,0
No 40	0,8	0,9	24,1
No 80	0,7	0,9	16,7
No 200	0,6	0,9	12,2
No 40	0,8	0,9	24,1
No 80	0,7	0,9	16,7
No 200	0,6	0,9	12,2



Şekil 6.1 Agregat gradasyonu ve limitleri [35]

Tablo 6.2 Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri [80], [35]

Deney Adı	Deney Metodu	Birim	Deney Sonucu	Şartname (KTŞ* 2013) Aşınma
Parçalanma Direnci (Los Angeles Aşınma Kaybı) 500 devir	TS EN 1097-2	%	16	Max 27
Yassılık İndeksi (5-12mm Agregası için)	TS EN 933-3	%	5	Max 20
Yassılık İndeksi (12-19 mm Agregası için)	TS EN 933-3	%	5	Max 20
Kaba Agregalarda Tane yoğunluğu (Hacim özgül Ağırlığı –kuru)	TS EN 1097-6	Mg/m ³	2,731	-----
Kaba Agregalarda Su emme (Absorpsiyon)	TS EN 1097-6	%	0,44	Max 2,0

*: Karayolları teknik şartnamesi

Karışımında kullanılan ince agregaya ait fiziksel özellikler Tablo 6.3’de görülebilir.

Tablo 6.3 İnce agregası özellikleri [80]

Deney				KTŞ Sınır Değerleri
Adı	Metodu	Birim	Sonucu	
İnce Agregası Dane yoğunluğu (Hacim özgül Ağırlığı –kuru-ortalama)	TS EN 1097-6	Mg/m ³	2,659	-----
İnce Agregalarda Su emme oranı (Absorpsiyon)	TS EN 1097-6	%	0,85	Max 2,0

6.1.2 Bağlayıcı

Bu çalışmada kullanılan 50/70 penetrasyon bitüm TÜPRAŞ İZMİT rafinerisinden temin edilmiştir. Kullanılan bitüme ait fiziksel özellikler Tablo 6.4’te verilmiştir.

Tablo 6.4 Karışımda kullanılan bitümün fiziksel özellikleri [80]

Deney Adı	Deney Metodu	Birim	Deney Sonucu	Şartname B50/70
Penetrasyon (Otomatik)	TS EN 1426	0,001 mm	53	50-70
Özgül Ağırlık d25/25	TS EN 15326 +A1 Hubbard Piknometre	Kg/m ³	1,028	
Yoğunluk @25°C	TS EN 15326 +A1 Hubbard Piknometre	Kg/m ³	1,024	
Yumuşama noktası, Bilye&Halka (Otomatik-Su banyosu)*	TS EN 1427	°C	48,6	46-54
Parlama Noktası (Cleveland Açık Kap-Otomatik)	TS EN ISO 2592	°C	292	≥ 230
Çözünürlük / Toluen ile	TS EN 12592	%	100	≥ 99,0

6.1.3 Katkı Malzemesi

Bu çalışmada katkı malzemesi olarak SBS kullanılmıştır. SBS (Styrene Butadiene Styrene) , bitümlü sıcak karışımın yüksek sıcaklıkta mukavemetini aynı zamanda düşük sıcaklıkta da esnekliğini arttıran bir 3 blok kopolimer ya da bir termoplastik kauçuktur. SBS in moleküler yapısı lineer veya radyal olabilir. SBS, geleneksel asfaltın mekanik özelliklerini ve yaşlanma davranışlarını iyileştirebilir [81].

6.1.4 İçme suyu Arıtma Çamuru (İSAÇ)

Bu çalışmada 2 farklı kimyasal ile arıtılan İSKİ Cumhuriyet ve İSKİ İkitelli içme suyu Arıtma Tesislerinden temin edilen çamurlar kullanılmıştır. Bu çamurlar Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi yol ve bitüm laboratuvarında etüvde 110 °C de

kurumaya tabi tutulmuştur (Şekil 6.2). Darası alınmış numune kaplarının ağırlıkları her iki tip çamur için de ayrı ayrı kurutma işlemi başlamadan önce tespit edilmiş ve kurutma esnasında belirli aralıklarla bu numune kapları tartılarak sıvı kaybının saate bağlı miktarı tespit edilmiş sıvı kaybının bittiğine kanaat getirildiğinde kurutma işlemi sona erdirilmiştir. Böylece her iki çamurun da katı atık miktarları ve kuruma süreleri tespit edilmiştir. Kurutma işlemi sona eren çamurlar daha sonra Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemeleri laboratuvarında ayrı ayrı Los Angeles deney küresinde bilyeler vasıtası ile küçük parçalara ayrıştırılmış, küçültülmüştür. (Şekil 6.3) Bu küçültülen parçalar da öğütücüden geçirilerek filler malzeme haline getirilmiştir. (Şekil 6.4)



Şekil 6.2 Çamurların Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi yol ve bitüm laboratuvarında kurutulduğu etüve yerleştirilme biçimi



Şekil 6.3 Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi yapı malzemeleri laboratuvarında bulunan ve kurutulan çamurların küçük parçalar haline getirildiği Los Angeles deney aleti



Şekil 6.4 Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi yapı malzemeleri laboratuvarında bulunan ve küçük parçalar halindeki çamuru filler malzemeye dönüştüren öğütme makinası

Öğütülerek filler malzeme haline getirilen malzeme içindeki organik maddelerin bertaraf edilmesi maksadı ile İSFALT A.Ş. tesislerinde yeni bir işleme tabi tutularak 500 °C de yakılmış ve deneylerde kullanılabilecek hale getirilmiştir. Böylece ham sulu çamurdan elde edilebilecek kullanılabılır çamur miktarı da tespit edilmiştir. Çamurun içindeki organik maddeleri bertaraf eden ve İSFALT A.Ş. laboratuvarında bulunan cihaz Şekil 6.5’da görülebilir.



Şekil 6.5 Kurutulan çamurun içinde bulunan organik maddeleri bertaraf etmek için kullanılan fırın

6.1.4.1 İSKİ Cumhuriyet İçme Suyu Arıtma Çamuru

Buradaki İSAÇ ham suyun demir (III) klorür (%40'lık) ve anyonik polielektrolit prosesinden elde edilmiştir. İstanbul İSKİ Arıtma Tesislerinde elde edilen çamurlar içerisinde katı madde miktarı en yüksek olan çamur tipidir. İSKİ Cumhuriyet arıtma tesisinden elde edilen çamurun kurutulmadan önceki görüntüsü Şekil 6.6'da, etüvde kurutulduktan sonraki görüntüsü Şekil 6.7'de, Los Angeles deney aletinde küçük parçacıklar haline gelmiş hali Şekil 6.8'de ve nihayet öğütülerek filler malzeme haline getirilmiş hali de Şekil 6.9'da görülebilir.



Şekil 6.6 İSKİ Cumhuriyet arıtma tesisinden elde edilen çamurun kurutulmadan önce numune kabındaki görüntüsü



Şekil 6.7 İSKİ Cumhuriyet arıtma tesisinden elde edilen çamurun kurutulduktan sonra numune kabındaki görüntüsü

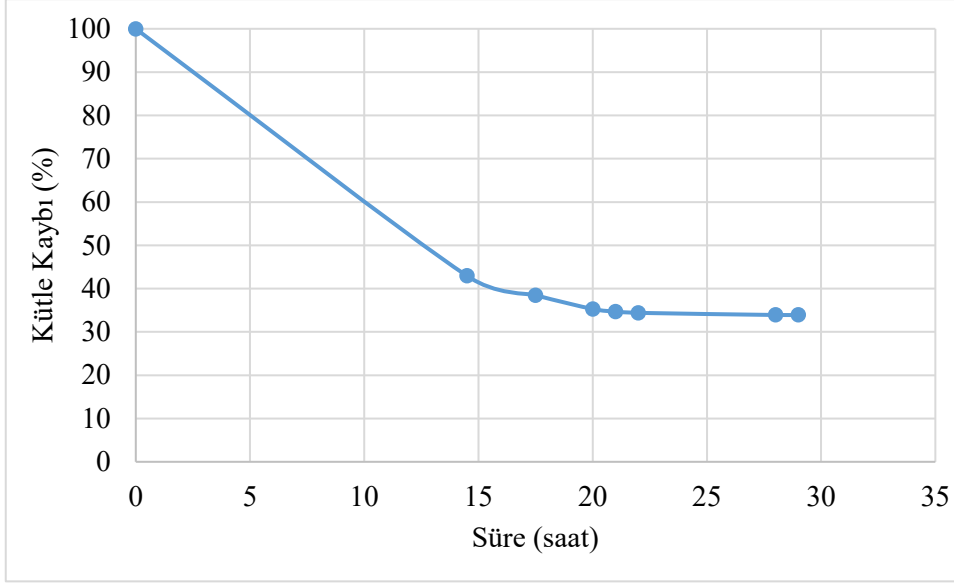


Şekil 6.8 Los Angeles deney aletinde küçük parçacıklar haline getirilmiş İSKİ Cumhuriyet arıtma tesisi çamuru



Şekil 6.9 Öğütülerek filler malzeme haline getirilmiş İSKİ Cumhuriyet arıtma tesisi çamuru

Cumhuriyet içme suyu arıtma çamurunun kuruma süresi kütle kaybı diyagramı Şekil 6.10'daki gibidir. Numune kabına konan çamurun darası alınmış ağırlığı: 3179 gr., kurutulduktan sonra elde edilen çamurun ağırlığı ise 1078 gr'dır. Çamurun organik içerik dahil katı madde oranı bu prosesin sonucunda 0,34 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.10 İSKİ Cumhuriyet içme suyu arıtma çamurunun etüvde 110 °C’de kurutulması ile elde edilen kütle kaybı-zaman diyagramı (gram-saat)

Etüvde kurutulan İSKİ Cumhuriyet içme suyu arıtma çamuru İSFALT A.Ş. tesislerinde organik maddelerden arındırılmak üzere 500 °C ta 1 saat yakma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem sonrasında Tablo 6.5’teki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 6.5 İSKİ Cumhuriyet içme suyu sulu ham çamurunun çalışmada kullanılabilir çamur haline getirilme süreç sonuçları

İSKİ Cumhuriyet İçme suyu Arıtma Çamuru	Miktar	Birim
Kurutulmadan önceki ağırlık	3179	g.
110 °C de kurutulduktan sonraki ağırlık	1078	g.
500 °C de yakıldıktan sonraki ağırlık	973,10	g.
Rutubet Oranı	66	%
Kuru malzeme organik madde oranı	9,73	%
Kullanılabilir çamur/ham çamur oranı	30,61	%

6.1.4.2 İSKİ İkitelli İçme Suyu Arıtma Çamuru

İkitelli içme suyu arıtma çamuru, ham suyun alüminyum sülfat (%50 lik) ve anyonik polielektrolit ile prosesinden elde edilmektedir. İSKİ İkitelli arıtma tesisinden elde edilen çamurun kurutulmadan önceki görüntüsü Şekil 6.11’de, etüvde kurutulduktan sonraki görüntüsü Şekil 6.12’de, Los Angeles deney aletinde

küçük parçacıklar haline gelmiş hali Şekil 6.13'te ve öğütülerek filler malzeme haline getirilmiş hali de Şekil 6.14'te görülebilir.



Şekil 6.11 İSKİ ikitelli içme suyu arıtma çamurunun kurutulmadan önce numune kabındaki görüntüsü



Şekil 6.12 İSKİ ikitelli içme suyu arıtma çamurunun kurutulduktan sonra numune kabındaki görüntüsü

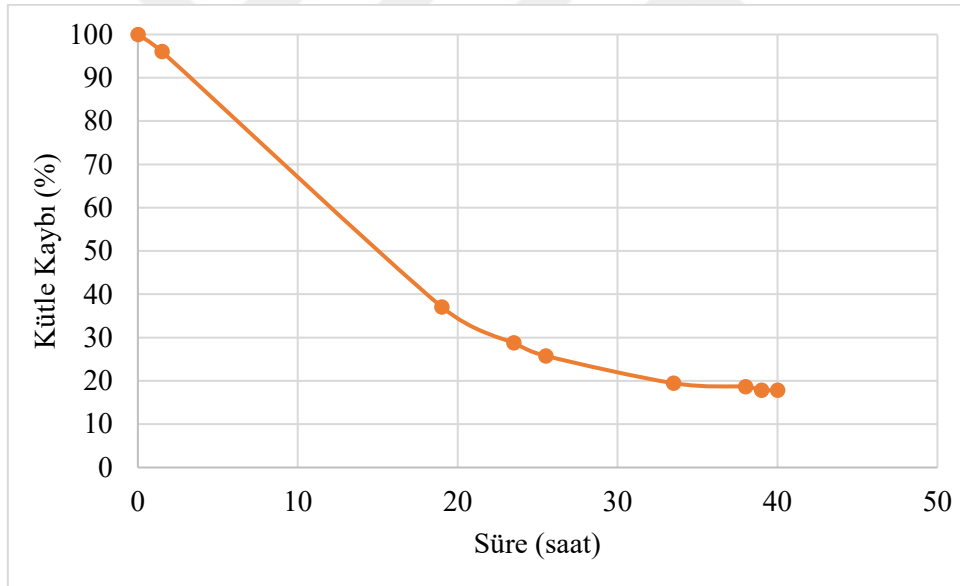


Şekil 6.13 İSKİ ikitelli içme suyu arıtma çamurunun Los Angeles aşınma kabında küçük parçalara bölünmüş görüntüsü



Şekil 6.14 Öğütücüden geçirilerek filler malzeme haline getirilen İSKİ İkitelli içme suyu arıtma çamuru

İSKİ İkitelli çamurunun kurutulmadan önceki numune kabındaki net ağırlığı 3421 gr. kurutulduktan sonraki ağırlığı ise 610,8 g. dır böylece çamurun katı madde oranı 0,179 olarak tespit edilmiştir. Bu çamurun 110 °C etüv sıcaklığında kurutulması sonucu elde edilen kütle kaybı-zaman grafiği Şekil 6.15'te gösterilmiştir.



Şekil 6.15 İSKİ İkitelli içme suyu arıtma çamurunun etüvde 110 °C'de kurutulması ile elde edilen kütle kaybı-zaman diyagramı (gram-saat)

Etüvde kurutulduktan sonra İSKİ İkitelli içme suyu arıtma çamuru İSFALT tesislerinde organik maddelerden arındırılmak üzere 500 °C da 1saat yakma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem sonrasında sonuçlar Tablo 6.6'da verilmiştir.

Tablo 6.6 İSKİ ikitelli içme suyu arıtma tesisi ham çamurunun çalışmada kullanılabilir malzeme haline getirilme süreç sonuçları

İSKİ İkitelli İçme suyu Arıtma Çamuru	Miktar	Birim
Kurutulmadan önceki ağırlık	3421	g.
110 °C de kurutulduktan sonraki ağırlık	610,8	g.
500 °C de yakıldıktan sonraki ağırlık	474,67	g.
Rutubet Oranı	82,15	%
Kuru malzeme organik madde oranı	22,29	%
Kullanılabilir çamur/ham çamur oranı	13,88	%

6.2 Çalışmada Uygulanan Deneyler

Bu çalışmada uygulanan deneyler, uygunluk testine tabi tutulacak içme suyu arıtma çamurlarının sıcak asfalt karışım içerisinde, yerine kullanılacak olduğu filler malzemenin özelliklerini karşılayıp karşılayamadığının tespiti ile ilgilidir.

Karışım tasarımına ilişkin amaçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Karayolları Teknik Şartnamesi' ne uygun bitüm miktarını belirlemek
- Trafik yükü altında tekerlek izi vb. bozulma göstermemesini sağlamak
- Trafik altında kuma, akma ve stabilite düşüklüğü oluşturmayacak, ancak tabakanın içinde rutubet ve fazla hava barındırmayacak ölçüdeki bir boşluk sağlamak.
- Segregasyon olmadan uygun serimi sağlayacak bir işlenebilirliğine sahip ekonomik bir karışım ve agrega gradasyonunun belirlenmesi [82], [35].

Bu çalışmada her iki çamur türü ayrı ayrı, önce Marshall dizayn metodu ile belirlenen bitüm oranı ile bitümlü sıcak karışıma dahil edilmiş daha sonra bu karışımlar dolaylı çekme mukavemeti deneyine ve tekerlek izi deneyine tabi tutulmuşlardır.

6.3 İçme suyu Arıtma Çamurlarına Uygulanan Deneyler ve Çıktıları

Bu çalışma kapsamındaki tüm deneysel çalışmalar İstanbul Büyükşehir Belediyesi iştiraki olan İSFALT A.Ş. laboratuvarında yapılmıştır. Yine bu çalışma kapsamında İstanbul Büyükşehir Belediyesi İSKİ içme suyu arıtma tesislerinde 2 farklı metot ile arıtılarak elde edilen çamurlar kullanılmıştır. Bu çamurlardan ilki İSKİ

Cumhuriyet içme suyu arıtma tesisi çamurudur ki Demir(III) klorür (%40'lık) ile proses edilmiştir. Diğer çamur ise İSKİ İkitelli içme suyu arıtma tesisi çamurudur ki Alüminyum sülfat (%50 lik) ile proses edilmiştir. Çalışmada yapılan deneylerde Cumhuriyet içme suyu çamuru kırmızı atık, İkitelli içme suyu çamuru da yeşil atık olarak ifade edilmiştir.

Çalışmanın 1. aşamasında prostenen geçirilerek kurutulan, öğütölüp filler malzeme haline getirilen ve sonrasında da yakılarak organik maddelerinden arındırılan İSKİ Cumhuriyet içme suyu arıtma çamuru, filler malzeme olarak %1, %3, %5 oranlarında sıcak asfalt karışıma katılarak karışım gradasyonları belirlenmiş ve Marshall yöntemi ile karışımın optimum bitüm oranı belirlenerek briketler oluşturulmuş ve bu numunelere dolaylı çekme mukavemeti deneyi uygulanmıştır. Bu 3 karışımdan standart değerlere en yakın sonuç veren %3 çamur katkılı karışım çalışmanın devamı için seçilmiştir.

Çalışmanın 2. aşamasında %3 çamur katkılı İSKİ Cumhuriyet ve İSKİ İkitelli içme suyu arıtma çamurları ayrı ayrı sıcak asfalt karışıma ilave edilerek gradasyonlar oluşturulmuş ve Marshall metodu ile bitüm oranları belirlenmiş elde edilen numune briketler dolaylı çekme mukavemeti ve tekerlek izi deneylerine tabi tutulmuştur. Bu deneyler sonucunda İkitelli içme suyu arıtma çamurunun şartname değerlerine göre daha iyi sonuçlar verdiği görölmüştür.

Çalışmanın 3. aşamasında ise iyi sonuç veren %3 İkitelli içme suyu arıtma çamuru ilave edilmiş sıcak asfalt karışım numunesine %2 ve %5 SBS modifikatör eklenerek dolaylı çekme mukavemeti ve tekerlek izi deneyleri tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirmeye alınmıştır.

6.3.1 İSKİ Cumhuriyet İçme suyu Arıtma Çamuruna Uygulanan Deneyler

İSFALT A.Ş. nin asfalt Tip 1 asfalt üretiminde referans aldığı gradasyon Tablo 6.7'daki gibidir.

Tablo 6.7 Referans gradasyon [80]

Agrega	Karışım % leri						
12-19mm	9						
5-12 mm	48						
0-5 mm	43						
			Toplam %100				
Elek No		12-19 mm	5-12 mm	0-5 mm	Karışım	Karışım Formülü	Şartname
1 1/2"							
1"							
3/4"		9	48	43	100	100-100	100-100
1/2"		1,6	47,4	43	92,1	88-97	88-100
3/8"		0,1	40,3	42	82,4	77-87	72-90
No 4		0,1	7,6	42	49,7	45-52	42-52
No 10		0,1	2,6	26,1	28,8	26-32	25-35
No 40		0,1	1,4	10,4	11,9	10-15	10-20
No 80		0,1	1,2	7,5	8,7	7-12	7-14
No 200		0,1	0,9	5,8	6,8	5-8	3-8

Sıcak karışım asfalta İSKİ Cumhuriyet çamurundan (kırmızı atık) %1 ilave edildiğinde oluşan gradasyon Tablo 6.8’de, %3 ilave edildiğinde oluşan gradasyon Tablo 6.9’da ve %5 ilave edildiğinde oluşan gradasyon ise Tablo 6.10’da görülebilir.

Tablo 6.8 %1 Demir çamuru (kırmızı atık) katkılı gradasyon [80]

Agrega	Karışım % leri						
Çamur	1						
12-19mm	9						
5-12 mm	48						
0-5 mm	42						
			Toplam %100				
Elek No	Çamur	12-19 mm	5-12 mm	0-5 mm	Karışım	Karışım Formülü	Şartname
1 1/2"							
1"							
3/4"	1,0	9	48	42	100	100-100	100-100
1/2"	1,0	16	47,4	42	92,1	88-97	88-100
3/8"	1,0	0,1	40,3	42	83,4	78-88	72-90
No 4	1,0	0,1	7,6	41	49,8	45-52	42-52
No 10	1,0	0,1	2,6	25,5	29,2	26-32	25-35
No 40	0,5	0,1	1,4	10,1	12,2	10-15	10-20
No 80	0,4	0,1	1,2	7,3	9,0	7-12	7-14
No 200	0,3	0,1	0,9	5,7	6,9	5-8	3-8

Tablo 6.9 %3 Demir çamuru (kırmızı atık) katkılı gradasyon [80]

Agrega	Karışım % leri						
Çamur	3						
12-19mm	9						
5-12 mm	48						
0-5 mm	40						
			Toplam %100				
Elek No	Çamur	12-19 mm	5-12 mm	0-5 mm	Karışım	Karışım Formülü	Şartname
1 1/2"							
1"							
3/4"	3,0	9	48	40	100	100-100	100-100
1/2"	3,0	16	47,4	40	92,1	88-97	88-100
3/8"	3,0	0,1	40,3	40	83,4	78-88	72-90
No 4	3,0	0,1	7,6	39	49,8	45-52	42-52
No 10	2,9	0,1	2,6	24,2	29,9	27-33	25-35
No 40	1,6	0,1	1,4	9,6	12,8	10-16	10-20
No 80	1,2	0,1	1,2	7,0	9,4	7-12	7-14
No 200	0,8	0,1	0,9	5,4	7,2	5-8	3-8

Tablo 6.10 %5 Demir çamuru (kırmızı atık) katkılı gradasyon [80]

Agrega	Karışım % leri						
Çamur	5						
12-19mm	9						
5-12 mm	48						
0-5 mm	38						
			Toplam %100				
Elek No	Çamur	12-19 mm	5-12 mm	0-5 mm	Karışım	Karışım Formülü	Şartname
1 1/2"							
1"							
3/4"	5,0	9	48	38	100	100-100	100-100
1/2"	5,0	16	47,4	38	92,1	88-97	88-100
3/8"	5,0	0,1	40,3	38	83,4	78-88	72-90
No 4	5,0	0,1	7,6	37,1	49,8	45-52	42-52
No 10	4,9	0,1	2,6	23,0	30,7	28-34	25-35
No 40	2,7	0,1	1,4	9,2	13,4	10-16	10-20
No 80	2,0	0,1	1,2	6,6	9,9	7-13	7-14
No 200	1,3	0,1	0,9	5,1	7,4	5-8	3-8

Kırmızı atık ilaveli sıcak karışım asfalta uygulanan Marshall ve dolaylı çekme mukavemeti deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.11’de görülebilir.

Tablo 6.11 Demir çamuru (kırmızı atık) katkılı numunelerin Marshall stabilite ve dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları

Özellik	Referans	Katkı Tip ve Miktarı			
		1%	3%	5%	%3*
Optimum AC	4,60	4,60	4,60	4,60	4,60
Dp, Pratik Yoğunluk (gr/cm3)	2,428	2,446	2,424	2,402	2,376
Vh, Boşluk %	4,0	3,60	4,46	5,47	6,33
VMA, Agregalararası boşluk %	14,0	13,37	14,15	15,08	15,83
VFA, Asfaltla dolu boşluk %	69,0	73,08	68,46	63,73	60,04
Akma, mm	3,10	3,91	3,28	2,84	2,66
Stabilite, kg	1300	1343	1443	1720	1487
Dolaylı Çekme Mukavemeti kN	56,7	50,4	47,0	43,7	34,6

*Organik maddelerden yakılarak arındırılmış demir çamuru (kırmızı atık)

Bu deneyler sonucunda %3 katkılı yakılmış kırmızı atık'ın referans değerlere en yakın sonucu verdiği görülmüş ve böylece İkitelli içme suyu arıtma çamurunun organik maddelerden arındırılmış %3 katkılı formunun Cumhuriyet içme suyu arıtma çamurunun organik maddelerden arındırılmış %3 katkılı formu ile karşılaştırılmasına karar verilmiştir.

Karşılaştırmanın yapılabilmesi açısından kırmızı atığın %3 formu ile tekrar Marshall dizaynı yapılmış, dolaylı çekme mukavemeti ve tekerlek izi deneyleri uygulanmıştır. Çalışmanın sonuçları rapordan doğrudan alınarak ekler kısmında paylaşılmıştır. Tablo A.1'de %3 Demir çamuru katkılı (kırmızı atıkla) yapılan Marshall dizaynı Tablo A.2' de ise dizayn raporu görülebilir. Tablo A.3' te ise bu çamura uygulanan dolaylı çekme mukavemeti (suya hassasiyet) deney sonuçları Şekil A.1'de de bu çamurun tekerlek izi deney sonuçları görülebilir.

6.3.2 İSKİ İkitelli İçme suyu Arıtma Çamuruna Uygulanan Deneyler

İkitelli içme suyu arıtma çamurunun (yeşil atık) organik maddelerden arındırılmış ve sıcak karışım asfalta %3 oranında katılmış karışıma da Marshall dizaynı yapılmış ve daha sonra dolaylı çekme mukavemeti ve tekerlek izi deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçları İSFALT A.Ş. deney raporundan doğrudan alınarak ekler kısmında paylaşılmıştır. Alum çamuru (yeşil atık) Marshall dizayn tablosu Tablo B.1'de, Marshall dizayn raporu Tablo B.2'de, dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları

Tablo B.3’de ve nihai olarak bu karışıma uygulanan tekerlek izi deneyi deney sonuçları Şekil B.1’de görülebilir.

Bu deneylerin ardından %3 katkılı sıcak karışım asfalta %2 ve %5 SBS ilave edilerek dolaylı çekme mukavemeti deneyi tekrar uygulanmış ve daha iyi sonuçlar veren %2 SBS katkılı yeşil atık nihai olarak tekerlek izi deneyine tabi tutulmuştur. Tablo C.1’de %2 SBS katkılı alum çamurlu karışımın dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları Tablo C.2’de ise %5 SBS katkılı alum çamurlu karışımın dolaylı çekme mukavemet deney sonuçları görülebilir.

Bu iki katkılı karışımdan bitüme %2 SBS katkılı karışım daha iyi sonuç verdiği için tekerlek izi deneyi bu karışıma uygulanmıştır. Bitüme %2 SBS katkılı ve %3 alum çamurlu karışıma uygulanan tekerlek izi deney sonuçları Şekil C.1’de görülebilir.

Bu çalışmada, İSAÇ, BSK agregasına filler malzeme olarak ilave edilmiş; sonuç olarak, agregaya karışımına eklenen İSAÇ'ın gradasyonu değiştirdiği görülmüştür. Eklenen atık miktarı, 5-12 mm agregaya miktarını azaltmıştır.

Buna dayanarak, %1, %3 ve %5 İSAÇ ile agregaya karışımındaki filler malzeme, 5-12 mm agregaya ikamesi olarak %6,9, %7,2 ve %7,4 olarak hesaplanmıştır. Agregalarda İSAÇ miktarının artması filler malzemede artışa neden olur ve filler malzeme, agregalarda %8 olan şartname sınırına yaklaşır. Marshall stabilitesi (ASTM 1559 [83]) ve dolaylı çekme mukavemeti (AASHTO T283 [84]) gibi ilk laboratuvar deneyleri, BSK için uygun İSAÇ miktarını bulmak için %4,6 bitüm içeriği için, çekme mukavemeti oranını hesaplamak için gerçekleştirildi. İlk öncül laboratuvar testleri, BSK'daki uygun atık miktarını belirlemek için yalnızca Demir III klorür ile proses edilmiş İSAÇ karışımı ile gerçekleştirildi. Deney sonuçları Tablo 7.1'de görülebilir.

Tablo 7.1 BSK içindeki İSAÇ miktarını belirlemek için yapılan ilk öncül laboratuvar deney sonuçları

İSAÇ Miktarı (Kırmızı Atık)	Karışım Yoğunluğu (g/cm ³)	Boşluk (%)	Asfaltla Dolu Boşluk (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Çekme Mukavemeti Oranı (%)	Karışımındaki Filler Miktarı (%)
Referans	2.428	4.00	69.00	3.10	1300	56.70	6.8
%1	2.400	5.11	64.09	3.17	1384	37.10	6.9
%3	2.380	6.33	60.04	2.66	1487	34.60	7.2
%5	2.350	7.11	55.89	2.30	1772	32.17	7.4

Bu çalışmada, uygun İSAÇ miktarı aşağıdaki nedenlerden dolayı %3 olarak seçilmiştir:

- Filler malzeme birim hacim başına daha fazla yüzey alanına sahiptir, bu nedenle karışımındaki filler miktarının artırılması karışımında daha fazla bitüm gerektirecek, böylece İSAÇ eklenmiş BSK' maliyetini artıracaktır.

- BSK, aşırı boşluk nedeniyle tekerlek izi üretme potansiyeline sahip olma eğilimindedir.
- Artmış İSAÇ, dolaylı çekme mukavemetinin azalmasına neden olur.
- %3'lük bir İSAÇ ilavesi için Marshall stabilitesi, diğer İSAÇ miktarlarından daha yüksektir.

İlk öncül deneyler, bitüm içeriğinin İSAÇ'lı BSK için önemli olduğunu gösterdi. Bu nedenle, İSAÇ ile BSK' optimum bitüm içeriğini belirlemek için hem Demir hem de Alum çamurları için Marshall karışım tasarım yöntemi uygulanmıştır. İSAÇ katılmış BSK için Marshall karışım tasarım yöntemi parametreleri Tablo 7.2'de sunulmaktadır.

Tablo 7.2 Demir ve alum çamur katkılı BSK için Marshall karışım dizayn sonuçları

Parametreler	Karışım Tipi		
	Referans	Demir Çamuru	Alum Çamuru
Optimum bitüm muhtevası (%)	4.6	5.7	6.3
Karışım yoğunluğu (g/cm ³)	2.418	2.401	2.381
Boşluk (%)	4.69	3.89	3.95
Mineral agregadaki boşluk (%)	14.35	15.82	17.02
Asfalt ile dolu boşluk (%)	67.32	75.39	76.76
Marshall Stabilitesi (kN)	12.82	15.73	14.71
Akma (mm)	3.54	3.64	3.46

Dolaylı çekme testi, sıkıştırılmış asfalt karışımları üzerinde soyulmaya neden olan nemin etkisini değerlendirmek için en popüler yöntemlerden biridir. Deney, kuru ve ıslak koşullarda sıkıştırılmış asfalt karışımlarının Dolaylı çekme mukavemeti (DÇM)'ni değerlendirmek için AASHTO T283 göre gerçekleştirildi. Aşağıdaki denklem, koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numunelerin DÇM'nin oranını, çekme mukavemeti oranı (ÇM) olarak tanımlar. Denklemde DÇM, BSK'nın (kN) cinsinden dolaylı çekme mukavemetidir.

$$DÇM = (DÇM \text{ şartlandırılmış} / DÇM \text{ şartlandırılmamış}) * 100 \quad (7.1)$$

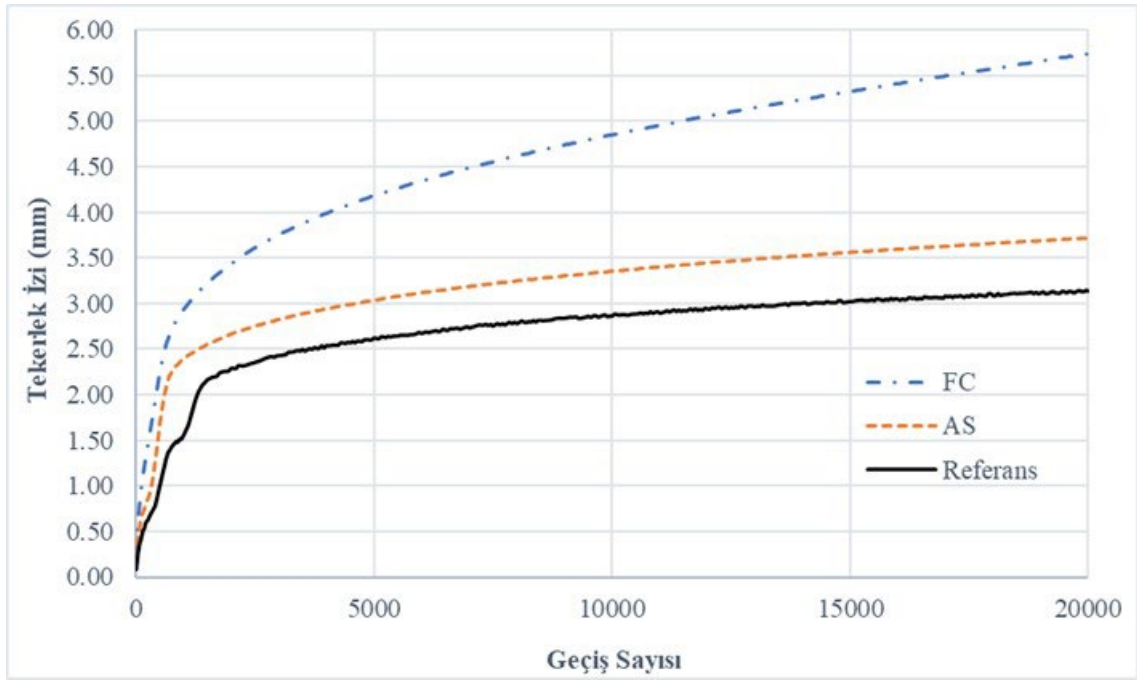
Tablo 7.3'de tüm karışımlar için DÇM sonuçları verilmiştir.

Tablo 7.3 AASHTO T283'e göre DÇM laboratuvar deney sonuçları

BSK Tipi	Özellikler	Koşullandırılmamış Numuneler			Koşullandırılmış Numuneler		
		1	2	3	1	2	3
Referans	Boşluk (%)	7.671	7.606	7.579	7.652	7.611	7.289
	Su emme (%)				70.225	70.017	70.181
	DÇM (kN)	166.09	162.74	147.64	98.59	80.76	90.97
	Ort. DÇM (kN)	158.82			90.11		
	ÇM (%)	56.73					
Alum Çamuru	Boşluk (%)	7.138	7.007	6.932	7.040	7.076	6.751
	Su emme (%)				70.218	70.142	70.464
	DÇM (kN)	174.47	173.50	172.77	120.67	119.97	121.83
	Ort. DÇM (kN)	173.58			120.83		
	ÇM (%)	69.91					
Demir Çamuru	Boşluk (%)	6.658	6.704	6.808	7.005	6.777	6.854
	Su emme (%)				71.138	71.454	71.009
	DÇM (kN)	169.23	164.97	178.11	113.62	109.09	106.65
	Ort. DÇM (kN)	170.77			109.79		
	ÇM (%)	64.29					

BSK numunesinin tekerlek izi direnci tekerlek izi deneyi kullanılarak değerlendirildi. Hamburg tekerlek izi deneyi, AASHTO T 324-11 [85] standardına uyularak gerçekleştirilmiştir [37]. Numune, 52 geçiş/dk hızında çelik tekerlek testine tabi tutulur. Her geçişin tamamlanmasından sonra numunelerin hem sol hem de sağ tarafları için bir Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatör (LVDT) ile bir kayıt elde edildi. Deney, numune 20.000 geçişe maruz kaldığında veya maksimum 20 mm'lik bir dikey deformasyona ulaştığında otomatik olarak sona erer. BSK numunelerinin hava boşlukları 7 ± 1 oranında kontrol edildi

Tekerlek izi deneyinden sonra, her test numunesi için Şekil 7.1'de gösterilen bir tekerlek izi veri eğrisi oluşturuldu. Tablo 7.4'de Hamburg tekerlek izi testinin sonuçlarını ve tekerlek izleme eğiminin hesaplanan değerlerini göstermektedir.



Şekil 7.1 BSK karışımları için tekerlek izi eğrisi

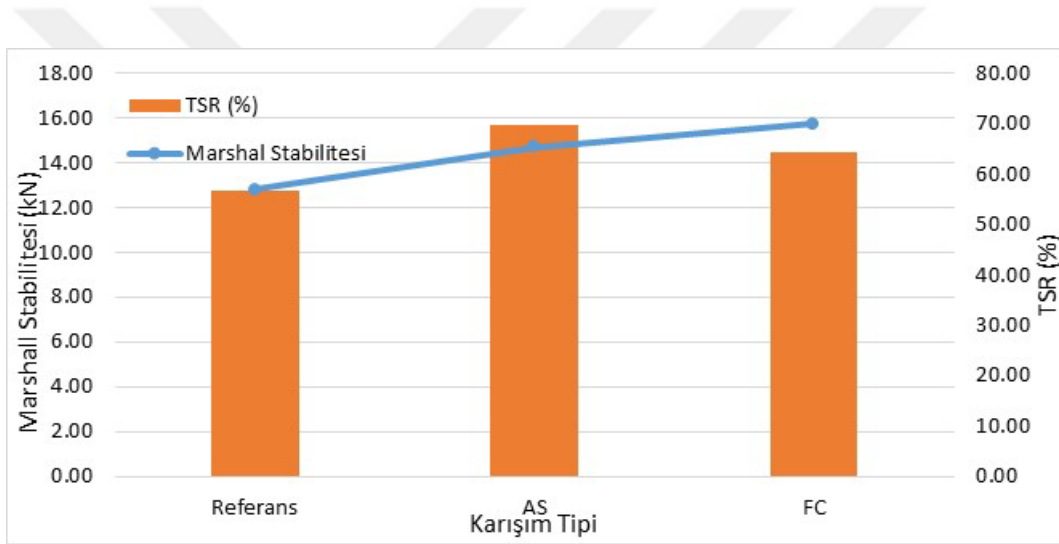
Tablo 7.4 BSK karışımları için tekerlek izi deneyi sonuçları

BSK TİPİ	Tekerlek İzleme Eğimi (mm/1000 devir)	İz Derinliği (mm)
Referans	0.06	3.1
Demir Çamuru (FC)	0.18	5.7
Alum Çamuru (AS)	0.07	3.7

Marshall ve DÇM deney sonuçları Tablo 7.5'te özetlenmiştir ve Şekil 7.2'de bir grafik olarak gösterilmiştir. Tablo 7.5'te gösterildiği gibi, demir çamuru karışımı, 15.73 kN'lık bir Marshall stabilitesi ile en sağlam Marshall stabilitesine sahipti, 14.71 kN'lık bir Marshall stabilitesine sahip olan alum çamurundan ve 12.82 kN'lık bir Marshall stabilitesine sahip referans karışımından belirgin bir şekilde daha iyi performans göstermiştir.

Tablo 7.5 Özetlenmiş Marshall ve DÇM deney sonuçları

Karışım Tipi	Marshall Stabilitesi (kN)	DÇM (kN)		
		Koşullandırılmamış	Koşullandırılmış	ÇM(%)
Reference	12.82 ± 0.39	158.82 ± 8.03	90.11 ± 7.31	56.73
Alum çamuru karışımı	14.71 ± 0.20	173.58 ± 0.69	120.82 ± 0.76	69.61
Demir çamuru karışımı	15.73 ± 0.73	170.77 ± 6.70	109.79 ± 3.54	64.29

**Şekil 7.2** Karışımların Marshall Stabilitesi (kN) ve DÇM (%)

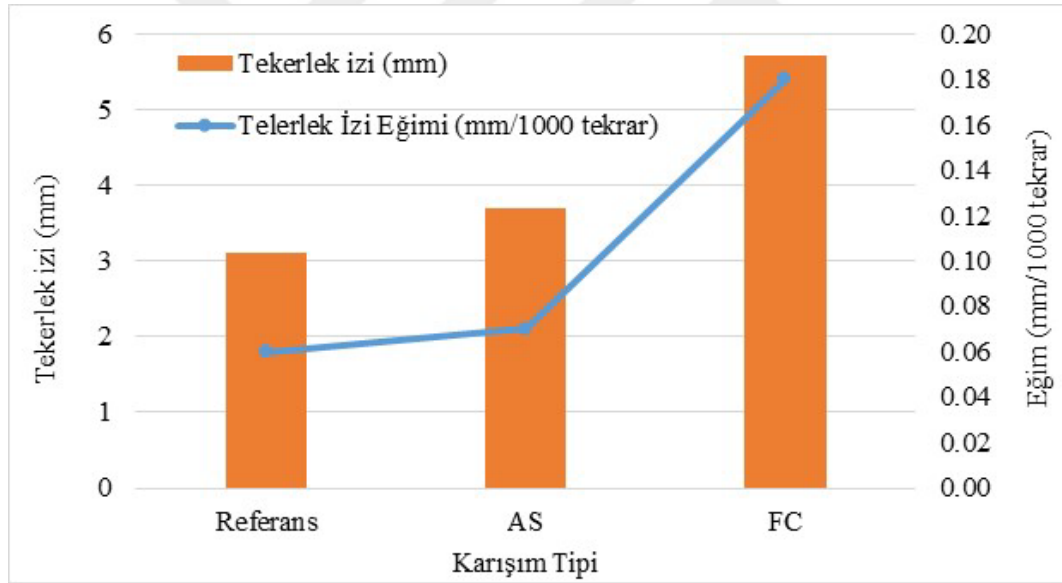
Şekil 7.2'nin incelenmesinden hem Alum çamurlu karışım hem de Demir çamurlu karışımın, referans karışıma kıyasla DÇM değerleri açısından üstün performans sergilediğini göstermektedir. Demir çamurlu karışım ve Alum çamurlu karışım karşılaştırıldığında, Alum çamurlu karışımın daha iyi DÇM değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

Tekerlek izi deneyinden, test edilen asfalt karışımlarının performansı, tipik olarak üç aşamaya bölünmüş bir deformasyon evrim eğrisi kullanılarak tanımlanır. Sıkıştırma sonrası aşama ilk aşamadır ve genellikle ilk 1000 tekerlek geçişi içindedir. Bu aşamayı, asfalt karışımının sürtünen bölgesini kapsayan ikincil aşama takip eder. Son olarak, üçüncü aşama, asfalt karışımının neme duyarlılık performansı ile ilgilidir. Asfalt karışımının nihai tekerlek izi derinliği, tipik olarak,

Tekerlek izi deneyi kullanılarak test edilen asfalt karışımının tekerlek izine karşı direnci ile ilişkilidir. Şekil 7.3'de gösterildiği gibi, tüm sıcak asfalt karışımları muhtemel sıkıştırma sonrası ve sürtünme aşamalarını test etti ve deney sırasında 20.000 geçişten önce iz oluşma aşaması gerçekleşmedi.

Demir çamuru karışımının tekerlek izi derinliği referans karışım ve Alum çamuru karışımından daha fazladır. Sıkıştırma sonrası aşama, tekerlek izi derinliği düşük olsa bile, Demir çamuru ve alum çamuru karışımları için referans karışımdan önce gerçekleşir.

Şekil 7.1, Tekerlek izi deneyinin 20.000 geçiş sonundaki tekerlek izi derinliğini ve karışımların sürtünme fazı eğimi olan tekerlek izleme eğimini göstermektedir. Şekil 7.3 de görüldüğü gibi, 20.000 geçişte referans karışımı ve Alum çamurlu karışımın tekerlek izi derinliği birbirine yakındır ve Demirli çamur karışımından daha azdır. Karışımların sürtünme fazı eğimleri, 20.000 geçişte tekerlek izi derinliği için benzer bir eğilim göstermektedir.



Şekil 7.3 Karışımlar için tekerlek izi derinliği ve sürtünme eğimi deney sonuçları

Bu çalışma konusu belirlenirken öncelikli olarak ülkemizde ortaya çıkan yaklaşık olarak yılda 410.000 m³ sulu 120.000 m³ kuru çamurun bertarafı için BSK'da kullanılabilirliğini araştırmanın faydalı olacağı düşüncesinden yola çıkıldı. İçme suyu arıtma çamuru, elde edildikten sonra gerek depolama sahalarına nakliye edilme maliyeti, ihtiyaç duyulan depo alanı, yıllar boyunca oluşan yığılma, arıtma esnasında genelde demir III klorür ve alüminyum sülfat kimyasallarının kullanılıyor olmasından kaynaklı çamur içindeki suyun buharlaşıp havaya karışma veya yeraltına sızarak yeraltı suyuna karışma ihtimalleri nedeni ile çevre ve sağlık sorunlarının oluşmaması için bertaraf edilmesi gereken bir atıktır.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi yıllık olarak tüm Türkiye'deki arıtılan toplam içme suyunun yaklaşık %25 ini arıtmaktadır. İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nde arıtma esnasında kullanılan prosesler Türkiye genelini temsil ettiğinden, yalnızca İstanbul'da üretilen çamurlar ile yapılacak çalışmalardan elde edilecek sonuçların tüm Türkiye'ye teşmil edilebileceği rahatlıkla söylenebilir.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi bünyesindeki çeşitli arıtma tesislerinden gerek üretim kapasiteleri gerekse de arıtma esnasında kullandıkları kimyasalların farklı olmasından ötürü Cumhuriyet ve İkitelli İçme suyu Arıtma Tesisleri seçilmiştir. Cumhuriyet içme suyu arıtma tesisinde arıtma prosedüründe demir III klorür (demir çamuru) kullanılmakta, İkitelli içme suyu arıtma tesisinde ise alüminyum sülfat (alum çamuru) kullanılmaktadır. Böylece Türkiye genelinde de kullanılan bu iki ayrı kimyasal ile elde edilen çamur üzerinde çalışılmasına karar verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında üzerinde çalışılacak çamurların belirlenmesinden sonra bu çamurların bitümlü sıcak karışımında kullanılıp kullanılamayacağının belirlenebilmesi için yapılması gerekli olan deneylere karar verilmiştir. Bu deneylerin amacı, çamur katkılı karışımının optimum bitüm içeriğinde kalıcı deformasyon, soyulma ve nem duyarlılığının araştırılmasıdır.

Bu amaç doğrultusunda her iki tip çamur katkılı bitümlü sıcak karışıma da ayrı ayrı, optimum bitüm oranını belirlemek için Marshall stabilitesi, nem duyarlılığını tespit etmek için dolaylı çekme mukavemeti ve oluşabilecek tekerlek izinin tespiti için de Hamburg tekerlek izi deneyi uygulanmıştır. Böylece optimum bitüm içeriğinde;

referans karışım, demir III klorürle elde edilen çamurlu karışım ve alüminyum sülfat ile elde edilen çamurlu karışımın kalıcı deformasyon, soyulma ve nem duyarlılığı incelenmiştir.

Deneyler sonucunda; demir çamurlu karışımın, en sağlam Marshall stabilitesine sahip olduğu sonucu elde edildi ve alum çamuru karışımından ve referans karışımından belirgin şekilde daha iyi performans gösterdi. Her iki çamur türü ile elde edilen sıcak asfalt karışımların Marshall stabilitesi, referans karışımın stabilitesinden daha fazlaydı. Hem alum çamurlu karışım hem de demir çamurlu karışım, referans karışımına kıyasla dolaylı çekme mukavemeti (DÇM) değerleri açısından üstün performans sergilemiştir. Demir çamurlu karışım ve alum çamurlu karışım karşılaştırıldığında, alum çamurlu karışımının demir çamurlu karışımından daha iyi dolaylı çekme mukavemeti değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

Tüm BSK karışımları sıkıştırma sonrası fazı ve sürünme fazı deneylerine tabi tutuldu ve deney sırasında 20.000 geçişten önce iz oluşması gerçekleşmedi. Demir çamurlu karışımının tekerlek izi derinliği referans karışım ve alum çamuru karışımınınkinden daha fazladır. Sürtünme aşamasının eğimi, karışım tekerlek izi direncine karşılık gelirken, soyulma aşamasının eğimi, soyulma direnci ile ilgilidir. Bundan dolayı alum çamurlu karışımının demir çamurlu karışıma göre daha fazla tekerlek izi direncine sahip olduğu söylenebilir.

Son olarak, deney sonuçları, referans karışımla mukayese edildiğinde hem demir çamurunun hem de alum çamurunun sıcak karışım asfaltta kullanılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, alum tipi çamur, demir tipi çamurunkinden daha üstün bir tekerlek izi direncine sahiptir. Sonuçlar BSK'da her iki çamurun kullanılabilirliği için olumlu olsa da yanma işlemi ve uygulama sırasında bitüm içeriğinin artması nedeniyle çamurlu karışımın maliyetindeki artışın dikkate alınması gerektiği unutulmamalıdır. Daha ileri bir çalışma olarak, çamurların doğrudan bitüm üzerine eklendiğinde etkilerin neler olacağını incelemek ilginç olacaktır.

- [1] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, «Türkiye Cumhuriyeti Devlet Su İşleri Ulusal Su Planı 2019-2023,» DSİ, Ankara, 2010.
- [2] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Ulusal Su planı (2019-2023), Ankara, 2018.
- [3] Türkiye İstatistik Kurumu, «Belediye Su Verileri, Su ve Atıksu İstatistikleri,» Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara, 2022.
- [4] Türkiye İstatistik Kurumu, «Adrese Dayalı Nüfus Verileri,» Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara, 2018.
- [5] Y. Anastasiya, A. Larisa ve O. Sergey, «Infrared Spectral Classification of Natural Bitumens for Their Rheological and Thermophysical Characterization,» *Molecules*, p. sayı 5, 22 Şubat 2023.
- [6] J. Kazım, E. Morteza, K. Mehdi ve K. Moses, «A Review of Different Aspects of Applying Asphalt Bituminous Mixes under a Railway Track.,» *Materials*, p. Sayı 14, 31 Aralık 2020.
- [7] S. Abbas, T. Piergiorgio, G. T. ve S. Cesare, «Waste Silt as Filler in Hot Mix Asphalt: A Laboratory Characterization,» *Applied Science*, 2023.
- [8] R. Tareq, M. Abbas ve G. Filippo, «Recycling of Waste Materials for Asphalt Concrete,» *Materials*, 25 Mart 2020.
- [9] F. Raffaella, M. Laura, F. Nicola ve D. Antonio, «Behavior Evalation of Bituminous Mixtures Reinforced with Nano-Sized Additivies:A Review,» *Sustainability*, 29 Eylül 2020.
- [10] Y. Anastasiya ve I. Sergey, «Bitumen Improvment with Bio-oil and Natural or Organomodified Montmorillonite: Structure, Rheology and Adhesion of Composite Asphalt Binders,» *Construction and Building Materials*, p. Sayı 364, 18 Ocak 2023.
- [11] X. Fengchi, Z. Yao ve L. Kangjian, «Using Waste Plastics as Asphalt Modifier:A Review,» *Materials*, p. Sayı 15, 24 Aralık 2021.
- [12] M. Balkaya, «The Beneficial Use of Water Treatment Sludges in Geotechnical Engineering,» *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, pp. 11-19, 2 Ocak 2019.
- [13] M. Boscov, J. Tsugawa ve E. Montalvan, «Beneficial Use of Water Treatment Sludge in Geotechnical Applications as a Sustainable Alternative to Preserve Natural Soils,» *Sustainability*, p. 13(17), 2 Eylül 2021.

- [14] A. Sabo, T. Garba, I. Bello ve G. Mohammed, «Potentials of Sludge from Drinking Water Treatment Plant for Use as Source of Soil Nutrients for Reclamation of Degraded Land,» Civil and Environmental Research, pp. 47-54, Ocak 2014.
- [15] P. Verlicci ve L. Masotti, «Reuse of Drinking Water Treatment Plant Sludge in Agriculture: Problems, Perspectives and Limitations,» Agriculture and Food Science, Environmental Science, 29 Ocak 2001.
- [16] M. Stojmenovic, J. Gulicovski, N. Nisic, R. Nenad, S. Liu, J. Loreda ve M. Kragovic, «Waste Sludge from the Wastewater treatment Plant Generated During the Production of Heating Devices in the Construction Industry,» Materials, p. 17(5), 27 Şubat 2024.
- [17] Y. Zhao, A. Nzihou, B. Ren, N. Lyczko, C. Shen, C. Kang ve B. Ji, «Waterworks Sludge: An Underrated Material for Beneficial Reuse in Water and Environmental Engineering,» Waste and Biomass Valorization, pp. Vol. 12, 4239-4251, 10 Eylül 2020.
- [18] B. Kevin, E. Pacheco, A. Guzman, Y. Pereira, H. Cuadros ve J. Vlençia, «Use of Sludge Ash from Drinking Water Treatment Plant in Hydraulic Mortars,» Materials Today Communications, p. Vol.23, Haziran 2020.
- [19] Y. Liu, Y. Zhuge, C. Chow, A. Keegan, D. Li, P. Pham, J. Huang ve R. Siddique, «Water Treatment Sludge in Concrete Paving Blocks: Microstructural Analyses, Durability and Leaching Properties,» Journal of Environmental Management, p. Vol.262, 15 Mayıs 2020.
- [20] American Society for Testing and Materials, «ASTM C618-17A-Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,» American Society for Testing and Materials, Washington, 2019.
- [21] A. Noruzman, N. Palil, R. Ahmad ve K. Baharudin, «Application of Waste Treatment Sludge from Water Treatment in Brick Production,» International Journal of Environmental Technologies, Innovation and Humanities, pp. 32-40, 26 Ağustos 2020.
- [22] D. Caniani, S. Masi ve I. Mancini, «Innovative Reuse of Drinking Water Sludge in Geo-environmental Applications,» Waste Management, pp. Vol.33 1461-1468, Haziran 2013.
- [23] Y. Liu ve Y. Zhuge, «Turning on Drinking Water Treatment Sludge into Eco-Friendly Concrete,» University of South Australia, Adelaide, 2019.
- [24] O. Kizinevic ve V. Kizinevic, «Utilization of Drinking Water Treatment Sludge for the Manufacturing of Ceramic Products,» IOP Conference Series: Material Science and Engineering, Londra, 2017.
- [25] A. Sarabia-Guarin, J. Sanchez-Molina ve J. Bermudez-Carrillo, «Effect of Use Residual Sludge from Water Treatment Plants as a Partial Substitute for Clay

for Refractory Bricks Production,» Universidad Industrial de Santander, Revista Uis Ingenierias, pp. 11-22, 10 Ekim 2020.

- [26] Y. Zandi, N. Ozturk, H. Ozturk ve A. Durmus, «A Study of Utilization in Cement of Activated Drinking Water Treatment Sludge at Various Temperature,» Advances in Environmental Biology, pp. 2958-2965, Ekim 2012.
- [27] A. Sofy, A. Faried, W. Sofi ve M. Abd-El-Aziz, «Influence of Reuse of Drinking Water Treatment Plants Sludge in Concrete,» International Journal of Engineering Research and Technology, pp. Vol.12, 367-377, Mart 2023.
- [28] C. Rodrigues ve A. Carneiro, «Influence of Calcination and Comminution of Drinking Water Treatment Sludge on the Properties,» Preprints, Mart 2023.
- [29] O. Nuria, H. Carmen, P. Maria, A. Miguel, M. Adrian ve M. Miguel, «Using Dewatered Sludge from a Drinking Water Treatment Plant for Phosphorus Removal in Constructed Wetlands,» WIT Transactions on Ecology and the Environment, pp. 111-119, 22 Aralık 2020.
- [30] A. El-Eneina, A. Shebla ve A. El-Dahab, «A. Drinking Water Treatment Sludge as an Efficient Adsorbent for Heavy Metals Removal,» Applied Clay Science, pp. Vol. 146, 343-349, Eylül 2017.
- [31] Y. Zhao, «Development of an Alum Sludge Based Constructed Wetland System for Improving Organic Matter and Nutrients Removal in High Strenght Wastewater,» Environmental Protection Agency, p. Vol.77, 2010.
- [32] S. Küçükçongar ve F. Alakay, Usage of Drinking Water Treatment Plant Sludge as a Coagulant in Wastewater Treatment, Konya: Konya Teknik Üniversitesi, 2022.
- [33] İ. Salta ve H. Özen, Bitümlü Karışımların Geri Dönüşüm Yöntemlerinin İncelenmesi, İstanbul: İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [34] A. Öcal, Investigation and Modelling of Nano Materials On the Marshall and Superpave Characteristics, Eskişehir: Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [35] Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolları Teknik Şartnamesi, Ankara, 2013.
- [36] H. Özen, Karayolu Üstyapıları Ders Notları, İstanbul, 2015.
- [37] Deutches Institut Für Normung, EN 13043- Aggregates for Bituminous Mixtures and Surface Treatments for Roads, Airfields and other Trafficked Areas, Berlin, 2022.
- [38] R. Hunter, A. Self ve J. Read, The Shell Bitumen Handbook, ICE Publishing, 2015.

- [39] British Standard Institute, BS 812, Testing Aggregates, Methods of Determination of Density, London, 1995.
- [40] American Association of State Highways and Transportation Officials, AASHTO T 37-Standard Method of Test for Sieve Analysis of Mineral Filler for Hot Mix Asphalt (HMA), Washington, 2007.
- [41] Deutsches Institut für Normung, En 933-3-Tests For Geometrical Properties Of Aggregates, Berlin, 2013.
- [42] Deutsches Institut für Normung, EN 933-4-Tests for geometrical properties of aggregates - Part 4: Determination of particle shape - Shape index, Berlin, 2008.
- [43] A. Tunç, Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, İstanbul: Nobel Yayın, 2007.
- [44] J. Speight, Handbook of Petroleum Product Analysis, Laramie, USA: John Wiley and Sons, 2015.
- [45] B. Chadbourn, E. Skok, B. Crow, S. Spindler ve D. Newcomb, «The Effect of Voids in Mineral Aggregate (VMA) on Hot Mix Asphalt Pavements,» Minnesota Department of Transportation Office of Research Services, Minnesota, USA, 2000.
- [46] A. Institute, The Asphalt Handbook Seveenth Edition, USA: Asphalt Institute, 2007.
- [47] N. Garber ve L. Hoel, Traffik and Highway Engineering, Fourth Edition, USA: Cengage Learning, 2009.
- [48] K. Yüknü, T. Öztürk ve M. Komut, Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvar El Kitabı, Ankara: T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 2021.
- [49] Deutsches Institut für Normung, EN 12591-Bitumen and bituminous binders. Specifications for paving grade bitumens, Berlin, 2009.
- [50] American Society for Testing and Materials, ASTM D946-Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction, Washington, 2010.
- [51] American Society for Testing and Materials, ASTM D3381-Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction, Washington, 2010.
- [52] P. Lavin, Asphalt Pavements, London: Spon Press, 2003.
- [53] A. Papagiannakis, Pavement Design and Materials, USA: John Wiley and Sons, 2008.

- [54] M. Karacasu, Yol Üstyapı Deneyleri Ders Notları, Eskişehir: Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 2016.
- [55] A. S. A. Güngör, F. Orhan ve E. Öztürk, Polimer Modifiye Bitümlerinin Superpave Performans Sınıflarının Belirlenmesi, Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü, 2009.
- [56] S. Loh ve J. Olek, «Contribution of PG Graded Asphalt to Low Temperature Cracking Resistance of Pavement,» Purdue University, 1999.
- [57] W. Tam, Highway Materials, The Handbook of Highway Engineering, USA: CRC Press Taylor and Francis Group, 2006.
- [58] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO M226-Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement, Washington, 1980.
- [59] American Society for Testing and Materials, ASTM D3381-Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction, Washington, 2010.
- [60] P. Green, Binders, Asphalt Surfacing, USA: JC Nicholls and FN Spon, 1998.
- [61] A. Öztürk ve M. Çubuk, «Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama,» *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fakültesi Dergisi*, pp. 175-184, 2004.
- [62] Y. Altaş, Bitümlü Malzemeler ve Karışım Şartnamelerinin Karşılaştırılması, İstanbul: İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
- [63] H. Özen, Asphalt and Pavement Laboratory Tests (Based on Superpave), İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, 2017.
- [64] R. Birliker, Bitümlü Karışımlara Eklenebilecek Katkılar ile Bu Tip Karışımların Davranışlarının Araştırılması ve Bir Yorulma Eğrisi Tahmin Modeli, İstanbul: Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 1998.
- [65] F. Üstümkol ve A. Turabi, Endüstriyel Atıkların Karayolu Üstyapısında Değerlendirilmesi, Balıkesir: Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2009.
- [66] Transportation Research Board, Relations Between Chemical Make up of Binders and Engineering Performance, Washington: The National Academic Press, 2017.
- [67] D. Whiteoak, The Shell Bitumen Handbook, London: Shell Company, 1991.

- [68] Ş. Yıldız, Y. E. ve E. Ölmez, «Evsel Nitelikli Arıtma Çamurlarının Stabilizasyonla Bertaraf Alternatifleri,» Türkiye'de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu, İstanbul, 2009.
- [69] A. Filibeli, Arıtma Çamurlarının İşlenmesi, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 2013.
- [70] M. a. Eddy., Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery Fifth Edition, USA: Mc Graw-Hill Education, 2018.
- [71] M. Nguyen, M. Thomas, A. Surapaneni, E. Moon ve N. Milne, «Beneficial Reuse of Water Treatment Sludge in the Context of Circular Economy,» Environmental Technology and Innovation, pp. 1-14, Kasım 2022.
- [72] V. Eroğlu, Su Tasfiyesi, İstanbul: İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, 2008.
- [73] İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi(İSKİ), Cumhuriyet İçme suyu Arıtma Tesisi, İstanbul, 2021.
- [74] Türkiye İstatistik Kurumu, «Belediye Su İndikatörleri, Su ve Atıksu İstatistikleri,» 2022. [Çevrimiçi]. Available: www.tuik.gov.tr. [Erişildi: Mayıs 2024].
- [75] İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi(İSKİ), «Faaliyet Raporu 2022,» İstanbul, 2023.
- [76] İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi(İSKİ), «Faaliyet Raporu 2020,» İstanbul, 2021.
- [77] İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi(İSKİ), «Faaliyet Raporu 2021,» İstanbul, 2022.
- [78] İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi(İSKİ), «Faaliyet Raporu 2018,» İstanbul, 2019.
- [79] İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi(İSKİ), «Faaliyet Raporu 2019,» İstanbul, 2020.
- [80] İstanbul Büyükşehir Belediyesi(İSFALT A.Ş.), «Deney Raporu,» İstanbul, 2022.
- [81] Y. Mehta, «Correlation Between Multiple Stress Crep Recovery Results and Polymer Modification of Binderent of Cncomplex Transportation Networks,» New Jersey Depatment of Transportation, University Transportation Research Center, New Jersey, 2013.
- [82] F. Orhan, Bitümlü Karışımlar Laboratuvar Çalışmaları, Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü, 2012.

- [83] American Society for Testing and Materials, ASTM D1559-Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus, Washington, 2021.
- [84] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T283-Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage, Washington, 2014.
- [85] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T324-11-Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA), Washington, 2019.
- [86] D. I. f. Normung, EN 933-1, Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method, Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2012.
- [87] Deutsches Institute Für Normung, EN 933-2-Tests For Geometrical Properties Of Aggregates Determination Of Particle Size Distribution. Test Sieves, Nominal Size Of Apertures, Berlin, 2020.
- [88] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T11-Standard Method of Test for Materials Finer Than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing, Washington, 2020.
- [89] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T27-Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate, Washington, 2014.
- [90] American Society for Testing and Materials, ASTM C136-Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, Washington, 2015.
- [91] Deutsches Institut für Normung, EN 1097-2-Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation, Berlin, 2020.
- [92] American Associations of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T96-Standard Method of Test for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, Washington, 2002.
- [93] American Society for Testing and Materials, ASTM C131-Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, Washington, 2010.
- [94] American Society for Testing and Materials, ASTM C535-Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, Washington, 2016.

- [95] Deutsches Institut für Normung, EN 1097-1-Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval), Berlin, 2011.
- [96] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T237-Standard Method of Test for Testing Epoxy Resin Adhesive, Washington, 2005.
- [97] American Society for Testing and Materials, ASTM D7428-Standard Test Method for Resistance of Fine Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus, Washington, 2023.
- [98] Deutsches Institut für Normung, EN 1097 6-Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption, Berlin, 2022.
- [99] American Association of State highway and Transportation Officials, AASHTO T85-Determination of specific gravity and absorption of coarse, Washington, 2023.
- [100] American Society for Testing and Materials, ASTM C127-Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, Washington, 2024.
- [101] Deutsches Institut für Normung, EN 1097-7-Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 7: Determination of the particle density of filler - Pyknometer method, Berlin, 2022.
- [102] American Associations of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T84-Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, Washington, 2022.
- [103] American Society for Testing and Materials, ASTM C128-Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, Washington, 2023.
- [104] Türk Standartları Enstitüsü, TS 3529(TS EN 1097-3)-Agreganın birim hacim ağırlığının bulunması, Ankara, 1999.
- [105] American Association of State Highway and Transportationand Officials, AASHTO T19-Standard Method of Test for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, Washington, 2014.
- [106] American Society for Testing and Materials, ASTM C29-Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, Washington, 2023.
- [107] American Society for Testing and Materials, ASTM 4791-Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate, Washington, 2023.

- [108] Deutsches Institut für Normung, EN 1367-1-Tests for thermal and weathering properties of aggregates Determination of resistance to freezing and thawing, Berlin, 2007.
- [109] Deutsches Institut für Normung, EN 1367-2-Tests for thermal and weathering properties of aggregates - Part 2: Magnesium sulfate test, Berlin, 2009.
- [110] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 104-Standard Method of Test for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, Washington, 2022.
- [111] American Society for Testing and Materials, ASTM C88-Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, Washington, 2018.
- [112] Deutsches Institut für Normung, EN 1744-1-Tests for chemical properties of aggregates Chemical analysis, Berlin, 2009.
- [113] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T112-Standard Method of Test for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregate, Washington, 2000.
- [114] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T113-Standard Method of Test for Lightweight Particles in Aggregate, Washington, 2018.
- [115] American Society for Testing and Materials, ASTM C123-Standard Test Method for Lightweight Particles in Aggregate, Washington, 2011.
- [116] American Society for Testing and Materials, ASTM C142-Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates, Washington, 2023.
- [117] Deutsches Institut für Normung, EN 1097-8-Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 8: Determination of the polished stone value, Washington, 2020.
- [118] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T278-Standard Method of Test for Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester, Washington, 1990.
- [119] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T279-Standard Method of Test for Accelerated Polishing of Aggregates Using the British Wheel, Washington, 2018.
- [120] American Society for Testing and Materials, ASTM E303-Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester, Washington, 2022.

- [121] Deutsches Institut für Normung, EN 12697-11-Bituminous mixtures. Test methods Determination of the affinity between aggregate and bitumen, Berlin, 2020.
- [122] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 182-Coating and Stripping of Bitumen-Aggregate Mixtures, Washington, 2002.
- [123] American Society for Testing and Materials, ASTM 1664-The Effect of Moisture on Laboratory-Prepared Asphalt Mixtures, Washington, 1993.
- [124] Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 58-Bitumen and bituminous binders - Sampling bituminous binders, Ankara, 2012.
- [125] Deutsches Institut für Normung, EN 1426-Bitumen and bituminous binders. Determination of needle penetration, Berlin, 2015.
- [126] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T49-Penetration Test of Bitumen, Washington, 2015.
- [127] American Society for Testing and Materials, ASTM D5-Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, Washington, 2017.
- [128] Deutsches Institut für Normung, EN 1427-Bitumen and bituminous binders. Determination of the softening point. Ring and Ball method, Berlin, 2015.
- [129] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T53-Standard Method of Test for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), Washington, 2022.
- [130] American Society for Testing and Materials, ASTM D36-Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), Washington, 2010.
- [131] Deutsches Institut für Normung, EN 12593-Bitumen and bituminous binders. Determination of the Fraass breaking point, Berlin, 2015.
- [132] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T315-Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), Washington, 2019.
- [133] American Society for Testing and Materials, ASTM 7175-Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, Washington, 2015.
- [134] Türk Standartları Enstitüsü, , TS EN ISO 6245-Petroleum products-Determination Of ash, Ankara, 2006.

- [135] American Society for Testing and Materials, ASTM 4402-Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer, Washington, 2012.
- [136] Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 13589-Bitumen and bituminous binders - Determination of the tensile properties of modified bitumen by the force ductility method, Ankara, 2018.
- [137] Türk Standartları Enstitüsü, , TS EN 13398-Bitumen and bituminous binders – Determination of the elastic recovery of modified bitumen, Ankara, 2010.
- [138] Deutsches Institut für Normung, EN 13589-Bitumen and bituminous binders. Determination of the tensile properties of modified bitumen by the force ductility method, Berlin, 2018.
- [139] American Association of State Highway and Transportation Officials, , AASHTO T51-To Determine The Ductility Value of The Given Bitumen Sample. Ductility, Washington, 2010.
- [140] American Society for Testing and Materials, ASTM D113-Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials, Washington, 2023.
- [141] Deutsches Institut für Normung, EN 12607-1-Bitumen and bituminous binders. Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air. RTFOT method, Berlin, 2014.
- [142] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T179-Effect of Heat and Air on Asphalt Materials (Thin-Film Oven Test), Washington, 2005.
- [143] American Society for Testing and Materials, ASTM D1754-Standard Test Method for Effect of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test), Washington, 2010.
- [144] American Association of State Highway and Transportation Officials, , AASHTO T44-Standard Method of Test for Solubility of Bituminous Materials, Washington, 2023.
- [145] American Society for Testing and Materials, , ASTM D2042-Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene or Toluene, Washington, 2022.
- [146] Deutsches Institut für Normung, EN 22592-Petroleum products - Determination of flash and fire points - Cleveland open cup method, Berlin, 1993.
- [147] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T48-Standard Method of Test for Flash Point of Asphalt Binder by Cleveland Open Cup, Washington, 2018.

- [148] American Society for Testing and Materials, ASTM D92-Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester, Washington, 2018.
- [149] Deutches Institut für Normung, EN 12595-Bitumen and bituminous binders - Determination of kinematic viscosity, Berlin, 2023.
- [150] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T72-Method of Test for Saybolt Viscosity, Washington, 2010.
- [151] American Society for Testing and Materials, ASTM D88-Standard Test Method for Saybolt Viscosity, Washington, 2013.
- [152] Deutches Institut für Normung, EN 13399-Bitumen and bituminous binders - Determination of storage stability of modified bitumen, Berlin, 2017.
- [153] American Society for Testing and Materials, ASTM D7173-Standard Practice for Determining the Separation Tendency of Polymer from Polymer-Modified Asphalt, Washington, 2020.
- [154] M. Gültekin, N. Nayır, U. Ziya, Çalışkan K.K., A. Öztürk, S. Tutan ve M. Komut, Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü, 2021.

A

Tablo A. 1 %3 Demir Çamuru (kırmızı atık) ile yapılan Marshall dizaynı [80]

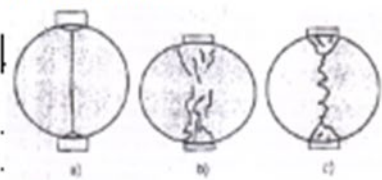
Br.	No	Btüm		Briket Yüceliği	Harasoski			Susuaki			Doğ. Yüz.	Hacim	Hac. Ölg.		Max. Teo.	Böyük	Ağr. Anası		Alma	Düzeltim	FORMÜLLER	
		Wb	Vb		%	1	2	3	Ort.	A			C	B			V	DP				Öz. Ağırk.
ORTALAMA																						
4	1	4,0	3,85	46,0	62,6	1187,8	685,6	1192,9	507,3	2,341								2,86	1519	$F = B - C$		
2	2	4,0	3,85	46,0	62,4	1188,5	684,2	1193,5	509,3	2,334				2,559	8,56	16,65	48,59	3,09	1606	$D_p = \frac{1}{p} \cdot \frac{(100 \cdot \frac{p}{100})}{G_p \cdot G_b}$		
3	3	4,0	3,85	46,0	62,1	1188,7	686,2	1193,2	507,0	2,345								2,78	1504			
ORTALAMA																						
4	4	4,5	4,31	51,8	65,0	1195,9	700,9	1208,7	507,8	2,355								2,91	1543	$D_p = \frac{1}{p} \cdot \frac{(100 \cdot \frac{p}{100})}{G_p \cdot G_b}$		
5	5	4,5	4,31	51,8	64,0	1195,4	699,7	1206,8	507,1	2,357				2,541	7,28	16,49	55,82	2,98	1378			
6	6	4,5	4,31	51,8	66,0	1198,8	702,6	1211,7	509,1	2,355								3,18	1371	$D_p = \frac{1}{p} \cdot \frac{(100 \cdot \frac{p}{100})}{G_p \cdot G_b}$		
ORTALAMA																						
7	7	5,0	4,76	57,5	64,5	1200,6	705,9	1209,3	503,4	2,385								3,05	1402	$D_p = \frac{1}{p} \cdot \frac{(100 \cdot \frac{p}{100})}{G_p \cdot G_b}$		
8	8	5,0	4,76	57,5	65,0	1200,7	706,3	1210,5	504,2	2,381				2,523	5,56	15,93	65,08	3,07	1383			
9	9	5,0	4,76	57,5	64,5	1202,8	705,8	1210,8	505,0	2,382								3,52	1351	$D_p = \frac{1}{p} \cdot \frac{(100 \cdot \frac{p}{100})}{G_p \cdot G_b}$		
ORTALAMA																						
10	10	5,5	5,21	63,3	65,2	1207,5	709,9	1212,8	504,9	2,401								3,31	1295	$D_p = \frac{1}{p} \cdot \frac{(100 \cdot \frac{p}{100})}{G_p \cdot G_b}$		
11	11	5,5	5,21	63,3	64,0	1204,0	707,7	1209,3	501,6	2,400				2,506	4,13	15,64	73,58	3,46	1384	$D_p = \frac{1}{p} \cdot \frac{(100 \cdot \frac{p}{100})}{G_p \cdot G_b}$		
12	12	5,5	5,21	63,3	64,5	1202,9	707,1	1207,2	500,1	2,405								3,51	1266			
ORTALAMA																						
13	13	6,0	5,66	69,0	62,3	1210,6	708,9	1211,0	502,1	2,411								3,63	1284	$D_p = \frac{1}{p} \cdot \frac{(100 \cdot \frac{p}{100})}{G_p \cdot G_b}$		
14	14	6,0	5,66	69,0	62,0	1205,0	708,2	1206,1	497,9	2,420				2,489	2,97	15,60	80,94	4,02	1226	$D_p = \frac{1}{p} \cdot \frac{(100 \cdot \frac{p}{100})}{G_p \cdot G_b}$		
15	15	6,0	5,66	69,0	62,2	1207,8	708,1	1208,5	500,4	2,414								4,21	1234	$D_p = \frac{1}{p} \cdot \frac{(100 \cdot \frac{p}{100})}{G_p \cdot G_b}$		
ORTALAMA																						
16	16	6,5	6,10	75	61,0	1211,7	712,9	1212,1	499,2	2,427								4,11	1202	$D_p = \frac{1}{p} \cdot \frac{(100 \cdot \frac{p}{100})}{G_p \cdot G_b}$		
17	17	6,5	6,10	75	61,1	1208,6	711,8	1209,3	497,5	2,429				2,472	1,90	15,53	87,85	4,82	1248	$D_p = \frac{1}{p} \cdot \frac{(100 \cdot \frac{p}{100})}{G_p \cdot G_b}$		
18	18	6,5	6,10	75	61,0	1209,0	710,9	1210,5	499,6	2,420								4,16	1119	$D_p = \frac{1}{p} \cdot \frac{(100 \cdot \frac{p}{100})}{G_p \cdot G_b}$		
ORTALAMA																						
19	19	7,00	6,54	81	61,5	1213,3	714	1214,3	500,3	2,425								4,64	1163	$D_p = \frac{1}{p} \cdot \frac{(100 \cdot \frac{p}{100})}{G_p \cdot G_b}$		
20	20	7,00	6,54	81	61,2	1211,8	710,6	1212,5	501,9	2,414				2,456	1,48	16,22	90,85	5,52	1137	$D_p = \frac{1}{p} \cdot \frac{(100 \cdot \frac{p}{100})}{G_p \cdot G_b}$		
21	21	7,00	6,54	81	61,5	1214,6	713,4	1215,3	501,9	2,420								5,06	1085	$D_p = \frac{1}{p} \cdot \frac{(100 \cdot \frac{p}{100})}{G_p \cdot G_b}$		
ORTALAMA																						
																4,96	1099	4,96	1099	DEVLET BÖNÜQLARI:		
																OPTIMUM BİTİM % 81					5,60	± 0,3
																PRATİK ÖZ. AĞ. (Opt.Bk.)					2,397	
																STABİLİTE (% **)					1360	
																AKMA (***)					3,70	
																ASFALTLA DOLU BOĞ. (***)					75,00	
																BOĞLUK % 81 (**)					4,00	
																AĞR. ARASI BOĞ. % 81 (VMA) (**)					15,60	
																MAX.TEORİK ÖZ.AĞ. (**)					2,502	

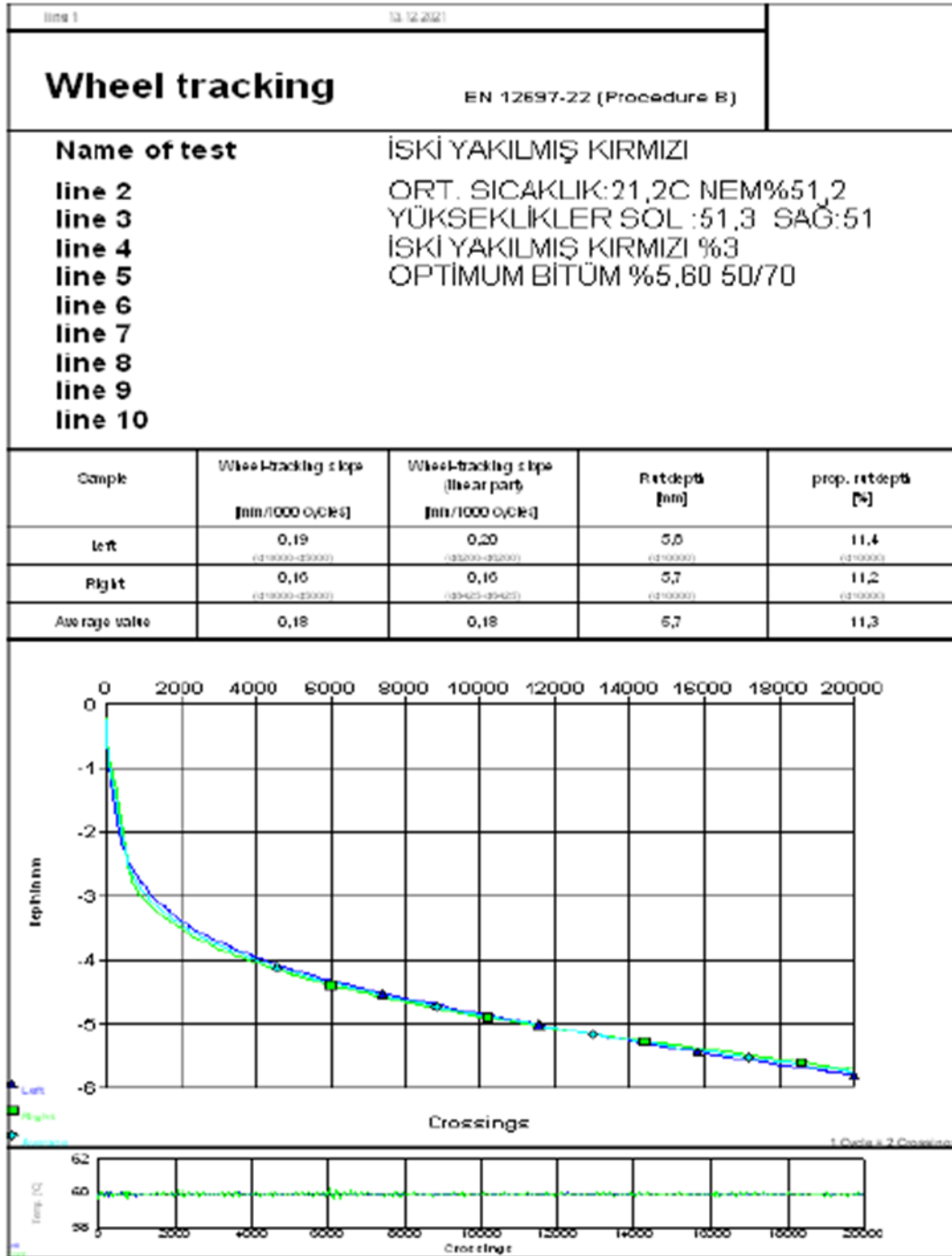
Tablo A.2 %3 Demir çamuru katkılı karışım Marshall Stabilite dizayn raporu

[170]

Karışım %'leri :							
19-37,5mm (1 1/2"- 3/4") : %	4						
12 - 19mm (3/4"-1/2") : %	50						
5 - 12mm (1/2"- No 4) : %	43						
Kırmızı Atk (No 4 - 0) : %	3						
Bitüm (50 / 70) : %	5,60						
Elek No.	19-37,5mm	12 - 19mm	5 - 12mm	0 - 5mm	Karışım	Karışım Formülü	Şartname
1 1/2 "	100,0				100,0	100	100
1 "	100,0	100,0			100,0	100 - 100	100 - 100
3/4 "	100,0	100,0	100,0		100,0	100 - 100	100 - 100
1/2 "	18,7	88,8	100,0		91,1	88 - 96	88 - 100
3/8 "	2,1	71,9	100,0	100,0	82,0	77 - 87	72 - 90
No 4	1,0	8,3	97,2	100,0	49,0	44 - 52	42 - 52
No 10	0,8	0,9	59,0	100,0	28,9	26 - 32	25 - 35
No 40	0,8	0,9	24,1	64,9	12,8	10 - 16	10 - 20
No 80	0,7	0,9	16,7	47,0	9,1	7 - 12	7 - 14
No 200	0,6	0,9	12,2	34,2	6,7	5 - 8	3 - 8
Optimum Bitüm %' si			5,60	± 0,3	Kaba Mıcırın Öz. Ağ. (gr/cm3)		2,731
Penetrasyon			53		İnce Mıcırın Öz. Ağ. (gr/cm3)		2,659
Birim Ağırlık (gr/cm3)			2,397		Fillerin Özgül Ağırlığı (gr/cm3)		2,718
Boşluk %' si			4,00		Agrega Efektif Öz. Ağ.(gr/cm3)		2,721
Asfaltla Dolu Boşluk %' si			75,0		Bitümün Özgül Ağırlığı (gr/cm3)		1,028
Stabilite (kg)			1260		Max.Teorik Özgül Ağırlık (gr/cm3)		2,502
Akma (mm)			3,70		Tokmak Sayısı		75
Agregalar Arası Boşluk %'si (VMA)			15,60		Tokmaktama Isısı (°C)		135

Tablo A.3 %3 Demir çamuru katkılı karışıma uygulanan dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları [80]

İLGİLİ STANDART:	AASHTO T 283					
Müşteri:	İski atık %3 Yakılmış atık kırmızı					
Numune Türü:	Ömraniye Aşınma Tip1 Optimum Bitüm %5,60					
	Normal			Koşullandırılmış Numuneler		
Numune No	1	2	3	4	5	6
Numune çapı (mm)	101,5	101,6	101,6	101,6	101,6	101,5
Numune yüksekliği (mm)	64,8	64,5	65,0	63,7	65,2	64,8
Havadaki ağırlık (gr)	1194	1195,7	1202,6	1193,3	1204,1	1193,4
Vakum Sonrası Hav. Ağır (Doygun yüzey)				1215,6	1227,9	1216,5
Havadaki Ağırlık (Doygun yüzey) gr	1198,5	1200	1206,4	1194,9	1208,3	1198,7
Sudaki ağırlık (gr)	690,7	690,6	691,8	686,3	693,2	688,9
Hacim (cm3)	507,8	509,4	514,6	508,6	515,1	509,8
Pratik özgül ağırlık (gr/cm3)	2,351	2,347	2,337	2,346	2,338	2,341
MaksimumTeorik özgül ağırlık (gr/cm3)	2,502	2,502	2,502	2,502	2,502	2,502
Boşluk %	6,0	6,2	6,6	6,2	6,6	6,4
Absorbe su hacmi %				70,4	70,3	70,4
Yük (Düzeltilmemiş) kN	12,61	12,44	12,59	8,32	7,71	7,13
Çekme Mukavemeti (psi)	171,27	170,98	169,42	118,17	102,90	96,84
Ortalama Çekme Mukavemeti (psi)	170,56			105,97		
Çekme Mukavemeti Oranı %	62,1					
Kırılma Türleri:						
			Gözlemler:			
☐ a) ☐ b) ☒ c)			* Kırılma türü: C Tipi			
			* Agregalarda kırılma yok.			



Şekil A.1 %3 Demir çamuru katkılı karışıma uygulanan tekerlek izi deney sonuçları [80]

B

ALUM ÇAMURUNA UYGULANAN DENEY SONUÇLARI

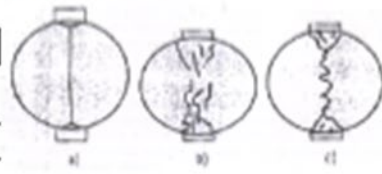
Tablo B.1 %3 Alum çamuru (yeşil atık) ile yapılan Marshall dizaynı [80]

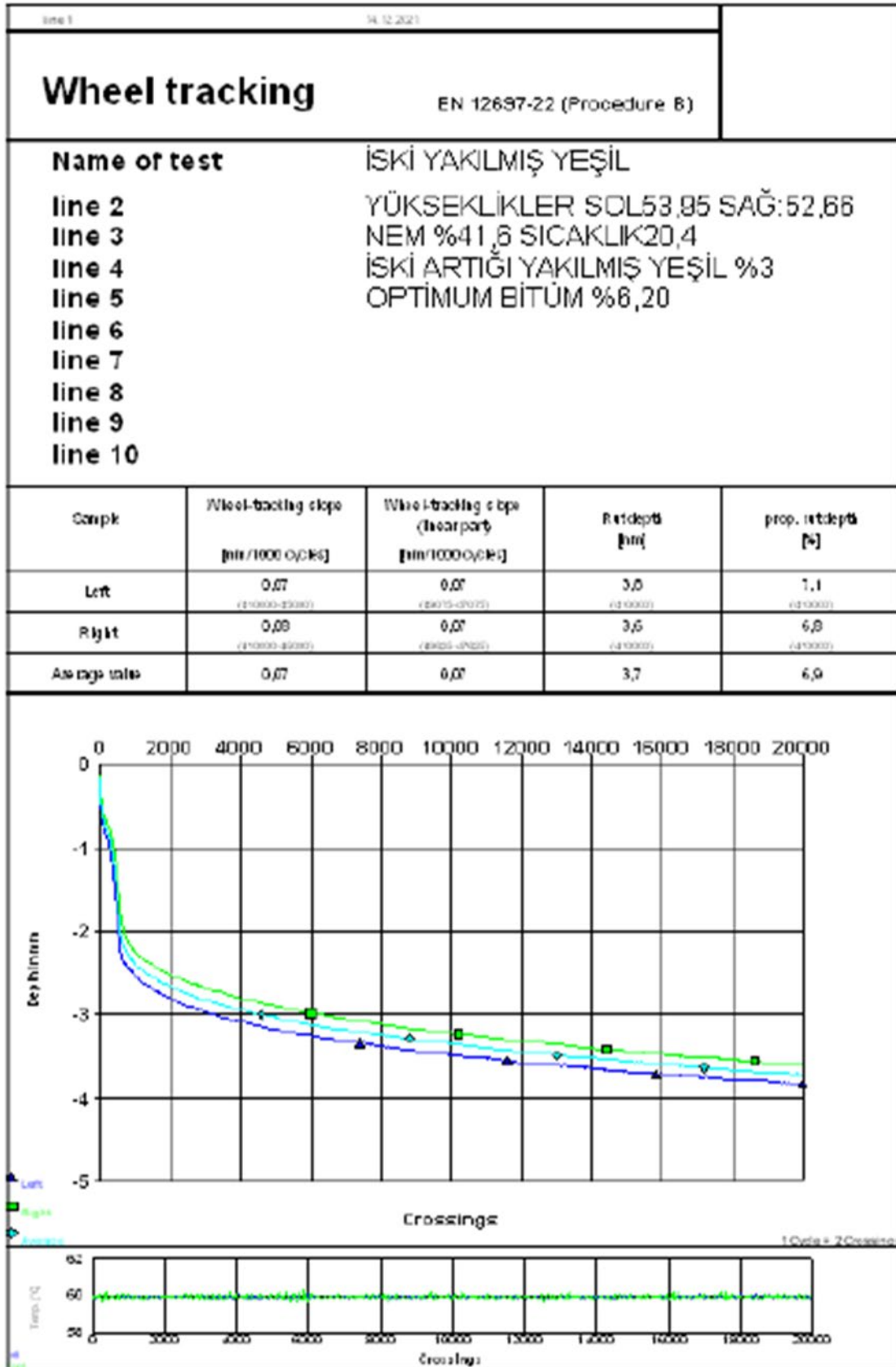
Bir. No	Bitüm %	Birliket Yüksekliği	Havadaki Ağırl. (gr)	Sudaki Ağırl. (gr)	Doy. Yüz. K.Ağırl. (gr)	Hacim (cm ³)	Hac. Örg. Ağırlık DP	Max. Öz. Ağırlık DT	Boşluk % V _h	Agr. Arası Boşluk % VMA	Asf. Dolu Boşluk % V _f	Alma (mm)	Düzeltilmiş Stabilite (kg)	FORMÜLLER
1	4,0	3,85	46,0	67,3	1187,8	676,1	1192,9	516,8	2,298	17,95	44,34	2,56	1396	$V \cdot B \cdot C$
2	4,0	3,85	46,0	68,1	1188,5	678,1	1193,5	515,4	2,306	17,95	44,34	2,32	1469	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
3	4,0	3,85	46,0	67,1	1188,7	677,5	1193,2	515,7	2,305	17,95	44,34	2,28	1364	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
ORTALAMA														
4	4,5	4,31	51,8	67,0	1188,1	686,5	1199,3	512,8	2,317	17,86	50,63	2,98	1442	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
5	4,5	4,31	51,8	66,9	1188,4	691,7	1209,2	517,5	2,316	17,86	50,63	2,78	1592	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
6	4,5	4,31	51,8	66,8	1184,9	691,6	1207,3	515,7	2,317	17,86	50,63	3,02	1498	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
ORTALAMA														
7	5,0	4,76	57,5	66,1	1196,0	700,0	1213,6	513,6	2,329	17,85	56,72	3,15	1636	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
8	5,0	4,76	57,5	66,2	1192,2	697,4	1211,0	513,6	2,321	17,85	56,72	3,08	1561	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
9	5,0	4,76	57,5	66,2	1192,8	698,3	1209,3	511,0	2,334	17,85	56,72	3,16	1573	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
ORTALAMA														
10	5,5	5,21	63,3	65,1	1201,5	705,9	1215,1	509,2	2,360	17,42	64,66	3,45	1684	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
11	5,5	5,21	63,3	65,0	1205,4	705,3	1218,3	513,0	2,350	17,42	64,66	3,20	1642	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
12	5,5	5,21	63,3	65,9	1199,3	701,4	1212,8	511,4	2,345	17,42	64,66	3,67	1805	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
ORTALAMA														
13	6,0	5,66	69,0	64,9	1206,8	703,4	1210,3	506,9	2,381	16,50	75,67	3,75	1864	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
14	6,0	5,66	69,0	64,2	1196,4	698,3	1199,9	501,6	2,385	16,50	75,67	3,64	1889	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
15	6,0	5,66	69,0	64,9	1205,0	706,1	1208,0	501,9	2,401	16,50	75,67	3,43	1993	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
ORTALAMA														
16	6,5	6,10	75	63,2	1211,7	710,9	1213,1	502,2	2,413	16,26	83,72	4,22	1888	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
17	6,5	6,10	75	63,8	1208,6	708,2	1211,3	503,1	2,402	16,26	83,72	4,12	1842	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
18	6,5	6,10	75	64,0	1209,0	709,9	1212,5	502,6	2,405	16,26	83,72	3,78	1744	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
ORTALAMA														
19	7,00	6,54	81	63	1212,6	712,3	1214,2	501,9	2,416	16,32	90,09	4,75	1750	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
20	7,00	6,54	81	63,1	1218,7	714,4	1220,1	505,7	2,410	16,32	90,09	3,64	1739	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
21	7,00	6,54	81	62,9	1217,3	716,9	1219,2	502,3	2,423	16,32	90,09	4,63	1891	$D \cdot \frac{A}{p \cdot V}$
ORTALAMA														
DENEY SONUÇLARI:														
Bütünün Öz. Ağ. (G _b)										6,00 ± 0,3				
Bütünün Pindirasyonu										2,384				
Agr. Bütün Abs. (F _{ba})										1850				
Agr. Kar. B. Öz. Ağ. (G _{st})										3,70				
Agr. Kar. B. Öz. Ağ. (G _{st})										75,00				
Agr. Kar. B. Öz. Ağ. (G _{st})										4,00				
Agr. Kar. B. Öz. Ağ. (G _{st})										16,70				
Agr. Kar. B. Öz. Ağ. (G _{st})										2,489				

Tablo B.2 %3 Alum çamuru katkılı karışım Marshall Stabilite dizayn raporu [80]

Karışım %'leri :							
19-37,5mm (1 1/2"- 3/4") : %	4						
12 - 19mm (3/4"-1/2") : %	50						
5 - 12mm (1/2"- No 4) : %	43						
Yeşil Atk (No 4 - 0) : %	3						
Bitüm (50 / 70) : %	6,00						
Elek No.	19-37,5mm	12 - 19mm	5 - 12mm	Yeşil Atk	Karışım	Karışım Formülü	Şartname
1 1/2	100,0				100,0	100	100
1 "	100,0	100,0			100,0	100 - 100	100 - 100
3/4 "	100,0	100,0	100,0		100,0	100 - 100	100 - 100
1/2 "	18,7	88,8	100,0		91,1	88 - 96	88 - 100
3/8 "	2,1	71,9	100,0	100,0	82,0	77 - 87	72 - 90
No 4	1,0	8,3	97,2	100,0	49,0	44 - 52	42 - 52
No 10	0,8	0,9	59,0	100,0	28,9	26 - 32	25 - 35
No 40	0,8	0,9	24,1	50,0	12,3	10 - 15	10 - 20
No 80	0,7	0,9	16,7	29,8	8,6	7 - 12	7 - 14
No 200	0,6	0,9	12,2	12,9	6,1	4 - 8	3 - 8
Optimum Bitüm %' si	6,00 ± 0,3				Kaba Micrın Öz. Ağ. (gr/cm3)		2,731
Penetrasyon	53				İnce Micrın Öz. Ağ. (gr/cm3)		2,659
Birim Ağırlık (gr/cm3)	2,384				Fillerin Özgül Ağırlığı (gr/cm3)		2,718
Boşluk %' si	4,00				Agrega Efektif Öz. Ağ.(gr/cm3)		2,721
Asfaltla Dolu Boşluk %' si	75,0				Bitümün Özgül Ağırlığı (gr/cm3)		1,028
Stabilite (kg)	1850				Max.Teorik Özgül Ağırlık (gr/cm3)		2,489
Akma (mm)	3,70				Tokmak Sayısı		75
Agregalar Arası Boşluk %'si (VMA)	16,70				Tokmaktama Isısı (°C)		135

Tablo B.3 %3 Alüm çamuru katkılı karışıma uygulanan dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları [80]

İLGİLİ STANDART:	AASHTO T 283					
Müşteri:	İski atık %3 Yakılmış atık <i>feçil</i>					
Numune Türü:	Ömraniye Aşınma Tip1 Optimum Bitüm %6,00					
	Normal			Koşullandırılmış Numuneler		
Numune No	1	2	3	7	5	6
Numune çapı (mm)	101,6	101,4	101,6	101,4	101,6	101,6
Numune yüksekliği (mm)	67,4	67,2	66,6	66,3	67,0	67,3
Havadaki ağırlık (gr)	1197,8	1205,6	1196,1	1194,1	1196,9	1198,6
Vakum Sonrası Hav. Ağır (Doğgun <i>füzef</i>)				1218,4	1224,6	1224
Havadaki Ağırlık (Doğgun <i>füzef</i>) gr	1211	1219,3	1209,2	1202,8	1210,9	1213,3
Sudaki ağırlık (gr)	691,6	694,3	690,1	687,2	689,4	694,1
Sudaki ağırlık (Parafin kaplı)				-	-	-
Hacim (cm3)	619,6	626	619,1	616,6	621,6	619,2
Pratik özgül ağırlık (gr/cm3)	2,306	2,296	2,304	2,316	2,296	2,308
MaksimumTeorik özgül ağırlık (gr/cm3)	2,482	2,482	2,482	2,482	2,482	2,482
Boşluk %	7,1	7,5	7,2	6,7	7,5	7,0
Absorbe su hacmi %				70,4	70,6	70,2
Yük (Düzeltilmemiş) kN	14,07	14,14	13,79	9,68	9,63	9,70
Çekme Mukavemeti (psi)	178,42	180,20	176,97	123,74	121,67	123,19
Ortalama Çekme Mukavemeti (psi)	178,63			122,83		
Çekme Mukavemeti Oranı %	68,8					
Kırılma Türleri:						
						
Gözlemler: Müşteri tarafından gönderilen sıcak karışıma Labaratuvarıda hazırlanan deney numuneleri						
☐ ☐ ☒						
* Kırılma türü: C Tipi						
* Agregalarda kırılma yok.						



Şekil B.1 %3 Alum çamuru katkılı karışıma uygulanan tekerlek izi deney sonuçları [80]

C

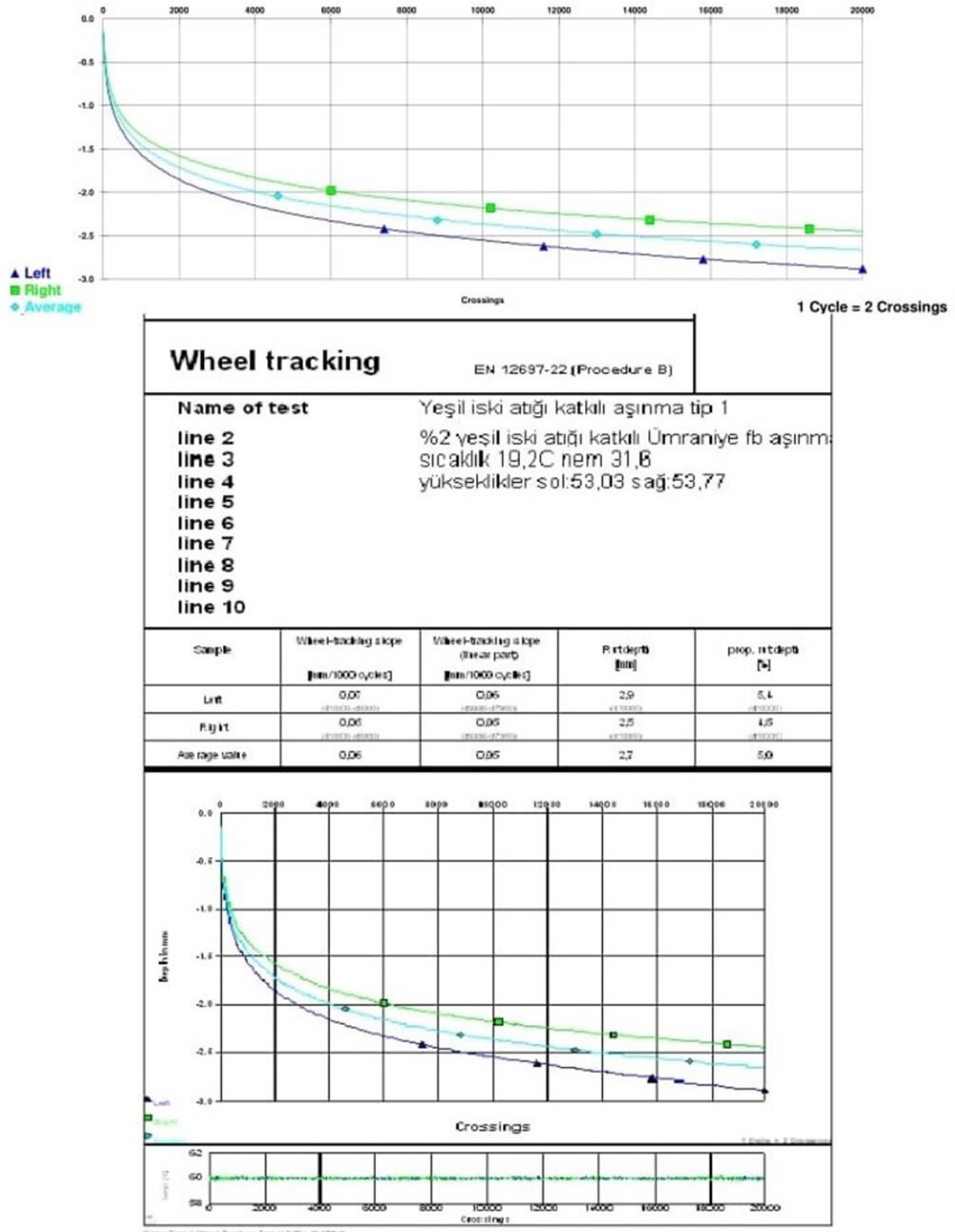
ALUM ÇAMURUNA UYGULANAN, SBS KATKILI DENEY SONUÇLARI

Tablo C.1 Bitüme %2 SBS katkısı ile alum çamurlu karışım dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları [80]

SUYA HASSASİYET DENEY RAPORU		Laboratuvar Kalite Yönetim Sistemi					
			Yayın Tarihi		12-03-2010		
			Revizyon Tarihi				
			Revizyon No		00		
				Doküman No		is-lab-f 85	
Düzenleme Tarihi	18.02.2022					Rapor No:	
Düzenleyen Birim	Kalite Yönetim ve Ar-Ge Müdürlüğü						
İLGİLİ STANDART:	AASHTO T 283						
Müşteri:	İSKİ YEŞİL ATIK (%2 SBS ile MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜM İLE)						
Numune Türü:							
	Normal			Koşullandırılmış Numuneler			
Numune No	1	2	3	4	5	6	
Numune çapı (mm)	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	
Numune yüksekliği (mm)	67,2	67,7	67,3	67,3	68,2	68,0	
Havadaki ağırlık (gr)	1197,2	1203,1	1194,1	1193,7	1205,9	1198	
Vakum Sonrası Hav. Ağır (Doygun yüzey)				1230,3	1244,9	1238	
Havadaki Ağırlık (Doygun yüzey) gr	1210,5	1217,5	1205,4	1208,1	1217,7	1213,1	
Sudaki ağırlık (gr)	689,0	693,0	678,4	685,7	687,2	684,3	
Sudaki ağırlık (Parafin kaplı)				-	-	-	
Hacim (cm3)	521,5	524,5	527	522,4	530,5	528,8	
Pratik özgül ağırlık (gr/cm3)	2,296	2,294	2,266	2,285	2,273	2,266	
MaksimumTeorik özgül ağırlık (gr/cm3)	2,538	2,538	2,538	2,538	2,538	2,538	
Boşluk %	9,5	9,6	10,7	10,0	10,4	10,7	
Absorbe su hacmi %				70,3	70,4	70,5	
Yük (Düzeltilmemiş) kN	12,04	13,31	14,32	7,88	8,45	7,95	
Çekme Mukavemeti (psi)	153,29	168,20	182,04	100,17	106,00	100,02	
Ortalama Çekme Mukavemeti (psi)	167,84			102,07			
Çekme Mukavemeti Oranı %	60,8						

Tablo C.2 Bitüme %5 SBS katkısı ile alum çamurlu karışım dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları [80]

SUYA HASSASİYET DENEY RAPORU		Laboratuvar Kalite Yönetim Sistemi						
			Yayın Tarihi		12-03-2010			
			Revizyon Tarihi					
			Revizyon No		00			
				Doküman No		is-lab-f 85		
Düzenleme Tarihi	18.02.2022				Rapor No:			
Düzenleyen Birim	Kalite Yönetim ve Ar-Ge Müdürlüğü							
İLGİLİ STANDART:	AASHTO T 283							
Müşteri:	İSKİ YEŞİL ATIK (%5 SBS ile MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜM İLE)							
Numune Türü:								
	Normal			Koşullandırılmış Numuneler				
Numune No	8	9	10	11	12	13		
Numune çapı (mm)	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5		
Numune yüksekliği (mm)	67,0	67,4	67,8	67,5	67,5	67,3		
Havadaki ağırlık (gr)	1191,2	1196,2	1199,9	1198	1200,6	1195,1		
Vakum Sonrası Hav. Ağır (Doygun yüzey)				1235	1239,3	1232,2		
Havadaki Ağırlık (Doygun yüzey) gr	1203,3	1208,2	1215	1211,6	1214,5	1209,4		
Sudaki ağırlık (gr)	680,2	685,0	689,0	686,8	686,3	685,7		
Sudaki ağırlık (Parafin kaplı)				-	-	-		
Hacim (cm3)	523,1	523,2	526	524,8	528,2	523,7		
Pratik özgül ağırlık (gr/cm3)	2,277	2,286	2,281	2,283	2,273	2,282		
MaksimumTeorik özgül ağırlık (gr/cm3)	2,538	2,538	2,538	2,538	2,538	2,538		
Boşluk %	10,3	9,9	10,1	10,1	10,4	10,1		
Absorbe su hacmi %				70,1	70,2	70,2		
Yük (Düzeltilmemiş) kN	14,43	15,79	15,18	7,02	9,66	7,93		
Çekme Mukavemeti (psi)	184,26	200,43	191,55	88,98	122,44	100,81		
Ortalama Çekme Mukavemeti (psi)	192,08			104,07				
Çekme Mukavemeti Oranı %	54,2							



Şekil C.1 Bitüme %2 katkı ilave edilmiş alum çamurlu karışıma uygulanan tekerlek izi deney sonuçları [80]

D

BİTÜM KATKI MADDELERİNİN GENEL SINIFLANDIRMASI

Tablo D.1 Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırması [64], [66]

TİP	ÖZELLİKLER	Modifikatörler in Asfalt Çimentosunun Kıvamına Genel Etkisi
1- Filler	- Mineral Filler: Taş tozu Kireç Portland çimentosu Uçucu kül - Karbon siyahı - Sülfür	Sertleştirme
2- Extender	- Sülfür - Lignin (Odun özü)	Sertleştirme
3- Kauçuk a) Doğal lateks (Kauçuk ağacı özsuu) b) Yapay lateks c) Blok copolymer d) İşlenmiş kauçuk	POLİMERLER	*
4-Plastik		Sertleştirme
5- Bileşim		*
6- Fiber	- Doğal: AsbestTaş yünü - Yapay: Polipropilen Polyester Fiberglas	Sertleştirme
7- Oksidan	Manganez tuzu	Sertleştirme
8- Antioksidan	- Kurşun karışımları - Karbon - Kalsiyum tuzu	Yumuşatma
9- Hidrokarbon	- Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları - Sertleştirme ve doğal asfaltlar	Yumuşama Veya Sertleştirme
10- Soyulma önleyici	- Aminler - Kireç	Yumuşatma
11-Bio modifiyerler	- Odun Atığı - Kullanılmış Yağ - Hayvan Gübresi	Değişik
12- Polifosforik Asit (PPA)		Yumuşama

E

AGREGALARA UYGULANAN DENEYLER

- Elek analizi deneyi (TS EN 933-1/2, EN 933-1/2 [86] [87], AASHTO T 11 [88], AASHTO T 27 [89], ASTM C136 [90])
- Aşınma (Los Angeles) deneyi (TS EN 1097-2, EN 1097-2 [91], AASHTO T 96 [92], ASTM C131 [93], ASTM C535 [94])
- Mikro-deval (Aşınma kaybı) deneyi (TS EN 1097, 1-EN 1097-1 [95], AASHTO T 237 [96], ASTM D7428 [97])
- Özgül ağırlık ve su emme deneyi (TS EN 1097-6, EN 1097-6 [98], AASHTO T 85 [99], ASTM C127 [100])
- Filler agrega özgül ağırlık deneyi (TS EN 1097-7, EN 1097-7 [101], AASHTO T 84 [102], ASTM C128 [103])
- Agregada birim hacim ağırlık deneyi (TS 3529 [104], AASHTO T 19 [105], ASTM C29 [106])
- Yassılık indeksi deneyi (TS EN 933-3, EN 933-3 [41], ASTM D4791 [107])
- Donma çözülme deneyi (TS EN 1367-1/2, EN 1367-1/2 [108] [109], AASHTO T 104 [110], ASTM C88 [111])
- Agregada organik madde tayini deneyi (TS EN 1744-1, EN 1744-1 [112], AASHTO T 112 [113] ve AASHTO T113 [114], ASTM C123 [115] ve ASTM C142 [116])
- Agregada cilalanma deneyi (TS EN 1097-8, EN 1097-8 [117], AASHTO T 278 [118] ve AASHTO T279 [119], ASTM E303 [120],
- Su etkilerine karşı dayanıklılık (Soyulma) deneyi (Nicholson yöntemi) (TS EN 12697-11, EN 12697-11 [121], AASHTO T 182 [122], ASTM D1664 [123])

F

BİTÜMLERE UYGULANAN GELENEKSEL DENEYLER

-
- Bitümlü bağlayıcılar numune alma (TS EN 58 [124])
 - Penetrasyon deneyi (TS EN 1426, EN 1426 [125], AASHTO T 49 [126], ASTM D5 [127])
 - Yumuşama noktası deneyi (TS EN 1427, EN 1427 [128], AASHTO T 53 [129], ASTM D36 [130])
 - Fraas kırılma noktası deneyi (TS EN 12593, EN 12593 [131], AASHTO T 315 [132], ASTM D7175 [133])
 - Kül Tayini Deneyi TS EN ISO 6245 [134]
 - Brookfield Viskozite Deneyi ASTM D4402 [135]
 - Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deneyi TS EN 13589 [136]
 - Elastik Geri Dönme Deneyi TS EN 13398 [137]
 - Düktilite deneyi (TS EN 13589, EN 13589 [138], AASHTO T 51 [139], ASTM D113 [140])
 - İnce film ısıtma kaybı (TFOT) deneyi (TS EN 12607-1, EN 12607-1 [141], AASHTO T 179 [142], ASTM D1754 [143])
 - Çözünürlük deneyi (AASHTO T44 [144], ASTM D2042 [145])
 - Parlama noktası deneyi (TS EN 22592, EN 22592 [146], AASHTO T 48 [147], ASTM D92 [148])
 - Viskozite deneyleri (TS EN 12595, EN 12595 [149], AASHTO T 72 [150], ASTM D88 [151])
 - Depolama stabilitesi deneyi (TS EN 13399, EN 13399 [152], ASTM D7173 [153])
 - Nicholson Soyulma Deneyi
 - Özgül Ağırlık Tayini Deneyleri

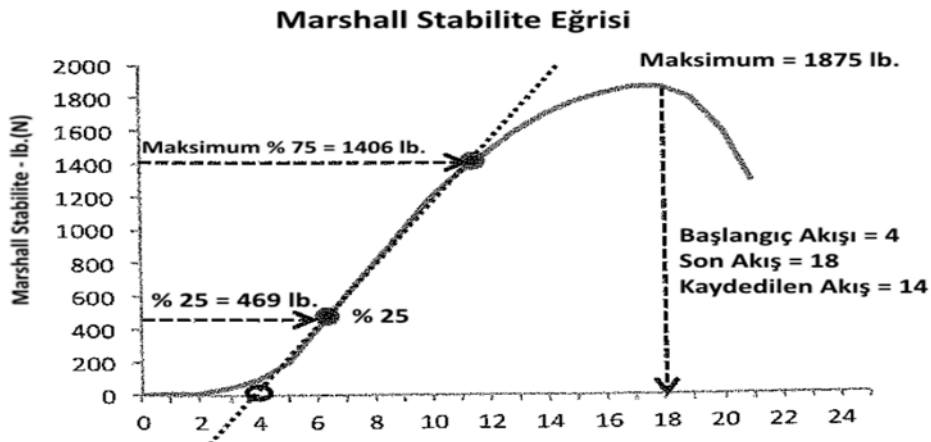
G

MARSHALL DİZAYN YÖNTEMİ

Marshall dizayn metodu, bitümlü karışımlar için basit bir yöntem olup; çevre ve iklim koşullarına dayanıklı (sağlam), trafik altında kalıcı deformasyon göstermeyecek yeterli dayanım ve esnekliğe sahip, tekerlek yükleri altında oluşabilecek çok az miktardaki sıkışmayı, bitüm kusması, akma ve stabilite problemi olmadan sağlayabilecek, bunun için de geçirimsizliğini düşürmeyecek veya rutubet oluşmasına izin vermeyecek oranda yeterli bir hava boşluğuna sahip ideal bir kaplama karışımı için gerekli olan optimum bitüm miktarını belirlemekte kullanılır. Ayrıca segregasyona uğramadan uygun serim ve sıkıştırma imkânı sağlayabilecek işlenebilirliğe sahip agrega gradasyonu ile ekonomik bir karışım elde etmek de tasarımın başka bir hedefidir. [154]

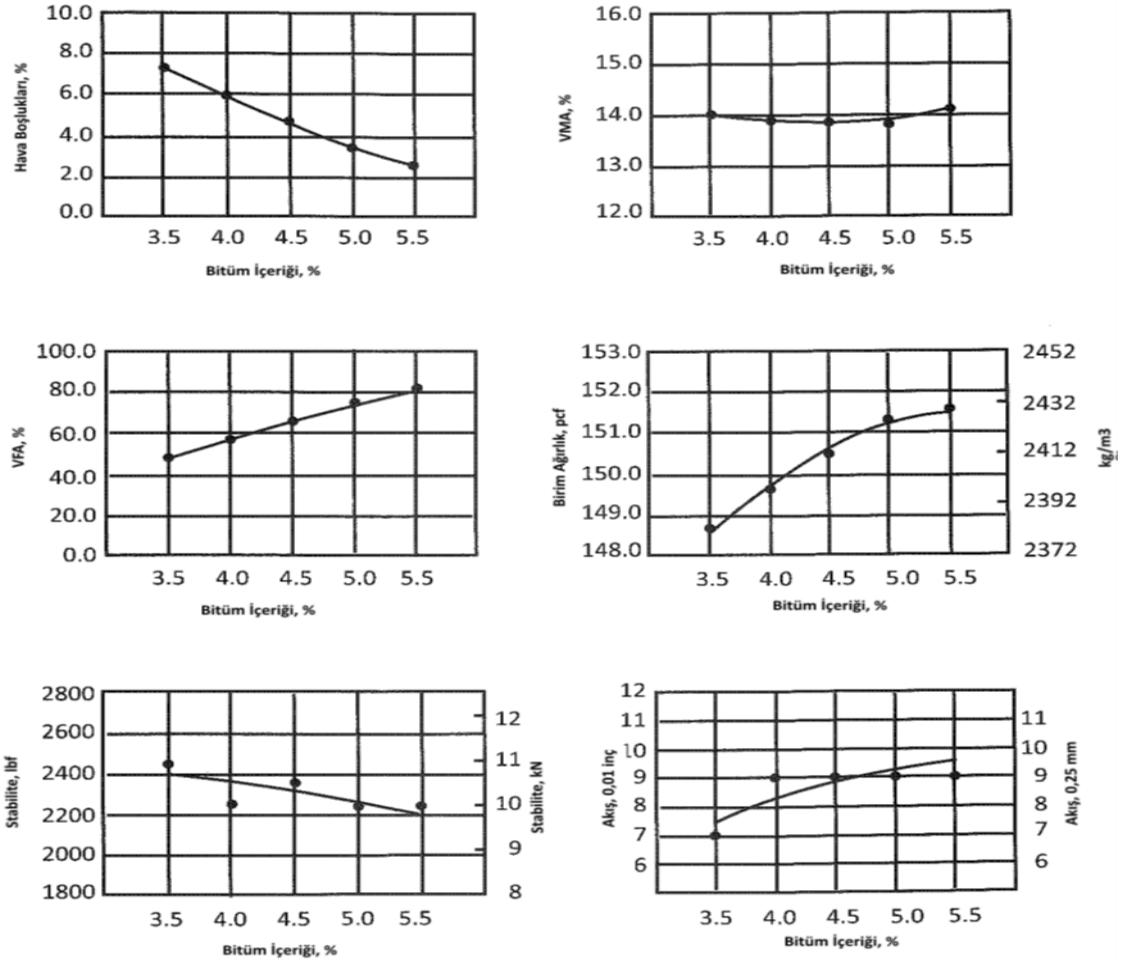
(Dp), maksimum teorik özgül ağırlık (Dt), hava boşluğu yüzdesi (Vh), agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA) ve asfaltla dolu boşluk yüzdesi (VFA) değerleri hesaplanır. Stabilitelerine bakılmışsa eğer, briketlerin yüksekliklerine göre düzeltmeleri yapılarak Marshall stabilitesi ve akma değerlerinin de ortalama değerleri bitüm yüzdesi gruplarına göre belirlenir. Bulunan sonuçlara göre yatay eksen bitüm yüzdesi değerlerini göstermek üzere her bir bitüm yüzdesine karşılık gelen ortalama Dp, VMA, Vh, VFA, Marshall Stabilite ve akma değerleri grafikleri ayrı ayrı çizilir. Grafikler yardımıyla optimum bitüm yüzdesi belirlenir.

Marshall stabilite deneyinde akma değerinin belirlenmesi Şekil G.1'de görülebilir [154]



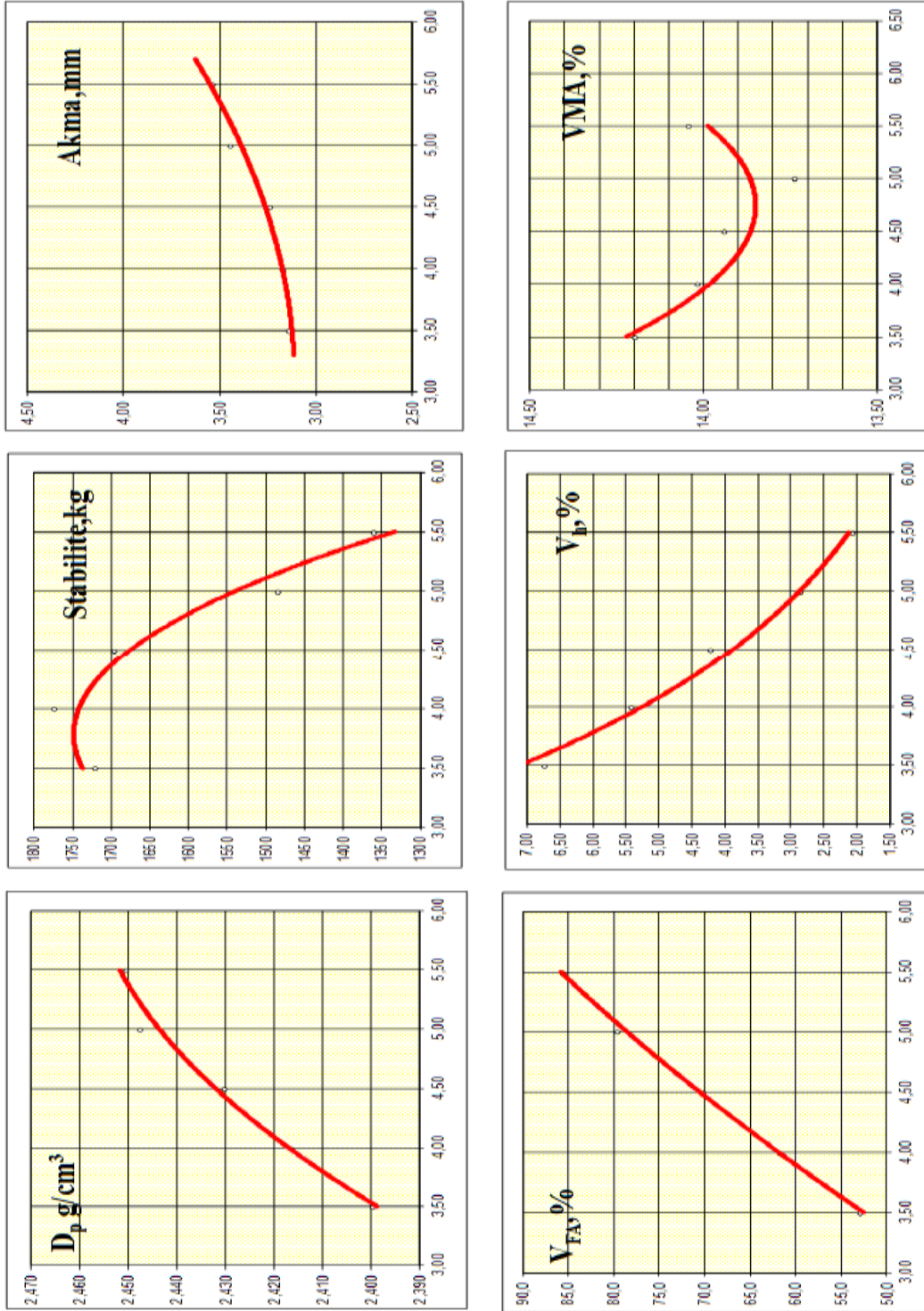
Şekil G.1 Marshall stabilite testinde akma değerinin belirlenmesi [154]

Marshall dizayn çalışmaları neticesinde elde edilen verilere göre bitüm yüzdeleri için D_p , stabilite, akma, V_h , VMA ve VFA grafikleri çizilerek seçilen agrega karışım gradasyonu için optimum bitüm içeriği belirlenir. Marshall stabilite deneyinde veriler arasında olması beklenen ilişki Şekil G.2'deki gibidir [154].



Şekil G.2 Marshall stabilite deneyinde veriler arasında olması beklenen ilişkiler [154]

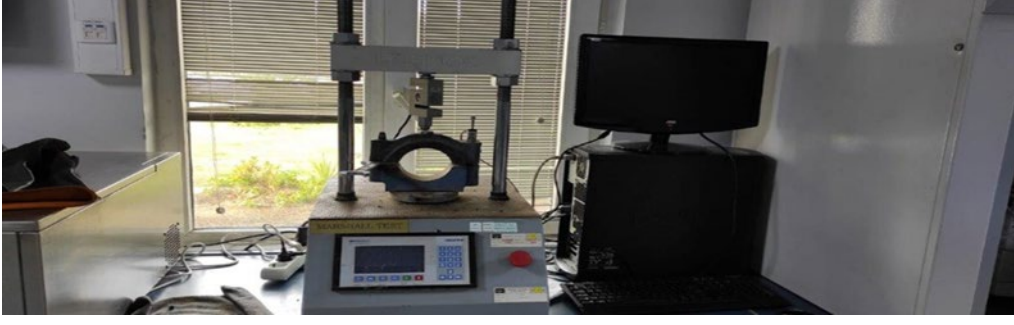
Şekil G.3'de Asfalt betonu binder tabakası için örnek tasarımda kullanılan bitüm yüzdelere karşılık gelen D_p , VMA, V_h , VFA, Marshall stabilitesi ve akma grafikleri verilmektedir [154].



Şekil G.3 Asfalt betonu binder tabakasına ait Marshall dizayn grafikleri örnekleri

[154]

Şekil G.4’de bu çalışmaya ait deneylerin yapıldığı Marshall deney cihazı görülmektedir.



Şekil G.4 Marshall test cihazı

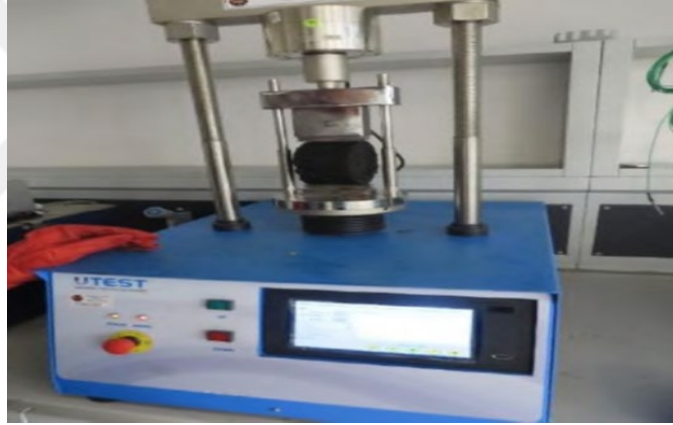


H

DOLAYLI ÇEKME MUKAVEMETİ DENEYİ

Bu deney metodu, sıkıştırılmış asfalt karışımların numunelerinin hazırlanması ve hızlandırılmış su etkilerinden kaynaklanan çapsal çekme dayanımlarının ölçülmesini kapsar. Sonuçlar, bitümlü karışımların uzun süreli soyulma hassasiyetini tahmin etmede ve mineral agregalara eklenen sönmüş kireç ya da Portland çimentosu veya asfalt çimentosuna eklenen soyulma direncini artırıcı katkı maddelerinin değerlendirilmesinde kullanılır.

Bu metot, sıkıştırılmış bitümlü karışımların hızlandırılmış su şartlanması ve doygunluk etkilerini donma-çözünme çevrimi ile değerlendirir [154]. Şekil H.1’de deneylerimizde kullanılan indirekt çekme mukavemeti tespit cihazı görülmektedir.



Şekil H.1 Dolaylı çekme mukavemeti tespit cihazı

Test makinesindeki maksimum basınç dayanımı kaydedilir ve dikey çatlak oluşana kadar yüklemeye devam edilir. Numune makineden kaldırılır. İç yüzey incelenir, yaklaşık nem hasarı derecesi 0-5 aralığında görsel olarak ölçeklendirilir [154]

Çekme dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanır:

SI birim sistemine göre;

$$St = 2000P/\pi tD \quad (6.6)$$

Burada;

St = Çekme dayanımı, kPa

P = Maksimum yük, N

t= Numune kalınlığı, mm

D = Numune apı, mm

Bitümlü karışımların suyun etkisine karşı sayısal indeksi nem ve donma-çözünme koşullandırmasından sonraki mukavemetin başlangıçtaki mukavemete oranı olarak ifade edilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\text{ekme Mukavemeti Oranı (TSR)} = S2/S1 \quad (6.7)$$

Burada;

S1 = Kuru numunenin ortalama çekme dayanımı, kPa

S2 = Koşullu numunenin ortalama çekme dayanımı, kPa



İ

TEKERLEK İZİ DENEYİ

Bu deney metodu sıkıştırılmış bitümlü karışımların yük altında deforme olmaya karşı hassasiyetlerinin sabit bir sıcaklıkta ve tekrarlı geçiş yapan sabit bir tekerlek yükü etkisinde oluşacak tekerlek izinde oturma derinliğinin test cihazı ile tayin edilerek belirlenmesini içerir.

Bitümlü malzemelerin deforme olmaya karşı hassasiyetleri sabit sıcaklıkta bir tekerleğin tekrarlı geçişleri altında oluşturduğu tekerlek izlerinden belirlenir. Tekerlek izi derinliği, bir deney numunesinin kalınlığında bir tekerleğin tekrarlı geçişlerinden kaynaklanan azalmanın milimetre cinsinden değeridir.

Üç tür cihaz alternatifi vardır: büyük ebatlı cihazlar, çok büyük ebatlı cihazlar ve küçük ebatlı cihazlar. Burada büyük ebatlı cihazlar ve küçük ebatlı cihazlar ile yapılan deneyler hakkında bilgi verilmiştir. Büyük ebatlı cihazlar ile deney sırasında numuneler havada uygun hale getirilirken küçük ebatlı cihazlarla yapılan deneyler sırasında numuneler hem havada hem de suda uygun hale getirilir.

Bu deneyler ile ilgili kullanılan terimler ve tarifleri şu şekildedir:

- Nominal Kalınlık: Laboratuvarda hazırlanmış numuneler için milimetre cinsinden hedef kalınlığıdır.
- Tekerlek İzi Derinliği: Bir deney numunesinin kalınlığında bir tekerleğin tekrarlı geçişlerinden kaynaklanan azalmanın milimetre cinsinden değeridir.
- Deney Yüzeyi: Tekerleğin deney numunesinin üzerinde döndüğü yüzeydir.
- Tek Deney Sonucu: Bu standardın tek bir deney miktarına uygulanarak elde edilen değerdir.
- Deney Miktarı: Tek bir deney sonucu için test edilmesi gereken numune miktarıdır.
- Tekerlek İzi: Düz bir yüzeye düşey bir kuvvet uygulandığında yüzeyde tekerleğin bıraktığı etkidir.
- Yük Periyodu: Tekerleğin iki geçişidir (gidiş ve dönüş).
- Ölçüm sayısı: n yük periyodunun tamamlanmasına dayalı olan test aşamasıdır.

Şekil I.1’de deneylerimizde kullanılan tekerlek izi cihazı Şekil I.2’de ise tekerlek izi mikser cihazı görülmektedir



Şekil I.1 Tekerlek izi cihazı



Şekil I.2 Tekerlek izi mikser cihazı

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

1. T.E. Kahveci, H. Özen, “Utilization of Waste Sludge from Drinking Water Treatment as a Filler Material in Hot Mix Asphalt,” *Materials*, Cilt 17, Sayı 7, Sayfalar 1528-1540, 2024. <https://doi.org/10.3390/ma17071528>

Konferans Bildirileri

1. T.E. Kahveci, H. Özen, “Su Arıtma Atığı Çamurunun Sıcak Asfalt Karışımında Kullanımı,” 17th International Istanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering, Architecture And Mathematical Sciences, İstanbul, Türkiye, 2024, sayfa 281-295

