



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FERROKROM CÜRUF AGREGASININ GEÇİRİMLİ BİTÜMLÜ
KARIŞIMLARIN PERFORMANSINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

HAZIRLAYAN
SEDAT TOPALOĞLU

DANIŞMAN
DOÇ. DR. ALTAN ÇETİN

BARTIN-2019



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FERROKROM CÜRUF AGREGASININ GEÇİRİMLİ BİTÜMLÜ
KARIŞIMLARIN PERFORMANSINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN

Sedat TOPALOĞLU

JÜRİ ÜYELERİ

- | | | |
|----------|---|------------------------|
| Danışman | : Doç. Dr. Altan ÇETİN | - Bartın Üniversitesi |
| Üye | : Prof. Dr. Osman GENÇEL | - Bartın Üniversitesi |
| Üye | : Dr. Öğr. Üyesi Halil İbrahim YUMRUTAŞ | - Karabük Üniversitesi |

BARTIN-2019

KABUL VE ONAY

Sedat TOPALOĞLU tarafından hazırlanan “FERROKROM CÜRUF AGREGASININ GEÇİRİMLİ BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN PERFORMANSINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu çalışma, 04.09.2019 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Altan ÇETİN (Danışman)

Üye : Prof. Dr. Osman GENÇEL

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Halil İbrahim YUMRUTAŞ

Bu tezin kabulü Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/..../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. H. Selma ÇELİKİYAY
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Altan ÇETİN danışmanlığında hazırlamış olduğum “FERROKROM CÜRUF AGREGASININ GEÇİRİMLİ BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN PERFORMANSINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

04.09.2019

Sedat TOPALOĞLU

ÖNSÖZ

Hazırladığım bu tez çalışmasıyla Ferrokrom cürufunun, ülkemiz için yeni bir kaplama tipi olan geçirimli asfalt kaplama karışımlarda agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çevresel ve ekonomik fayda gözetilerek planlanan tez çalışmasının geçirimli asfalt karışımlar ve atıkların geri kazanımı alanda ki literatüre katkı sunacağını temenni ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Altan ÇETİN'e katkı ve yardımlarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam süresince her zaman yanımda olan eşime, gösterdiği anlayıştan dolayı HIZARCIOĞLU İnşaat sahibi Gürkan HIZARCI'ya ve her zaman desteğini üzerimde hissettiğim aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Sedat TOPALOĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FERROKROM CÜRUF AGREGASININ GEÇİRİMLİ BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN PERFORMANSINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Sedat TOPALOĞLU

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Altan ÇETİN

Bartın-2019, sayfa: 126

Son zamanlarda, doğal kaynakların korunması ve çevresel kaygılar sebebiyle endüstriyel atıkların geri dönüşümü üzerindeki çalışmalar yoğunlaşmaktadır. İnşaat sektörü ve özellikle yol yapıları yüksek miktarlarda atık malzemelerin geri kazanımına imkân tanımaktadır. Geçirimli asfalt kaplamalar yağış oranı fazla olan bölgelerde yol kaplamasının işlevsel performansını ve sürüş güvenliğini arttırmak için uygulanmaktadır. Yüksek boşluk oranına sahip olan bu karışımlarda kullanılan kaba agreganın miktarı oldukça fazladır. Kaba agregalar arasındaki temas sebebiyle bu karışımlarda kullanılan agreganın dayanımının ve bitümlü bağlayıcı ile aderansının iyi düzeyde olması gerekmektedir.

Ferrokrom cürufunun geçirimli asfalt karışımlarda agreganın kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada, Karayolları Teknik Şartnamesinde geçirimli asfalt karışımları için belirtilen Tip-2, Tip-3, Tip-4 olmak üzere üç farklı gradasyon seçilmiş ve ferrokrom cürufu ile hazırlanan karışımların tasarım kriterleri incelenmiştir. Karışımlar tek tip polimer bitümlü bağlayıcı (PMB 76-16) kullanılarak hazırlanmıştır. Farklı bitüm yüzdesinde hazırlanan numuneler üzerinde boşluk analizi, permeabilite, Cantabro aşınma kaybı, dolaylı çekme mukavemeti ve nem hasarına karşı direnç gibi tasarım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlardan, Tip-2 karışımların boşluk ve permeabilite

değerleri minimum sınır değerlerin oldukça altında kalırken, en iyi hidrolik geçirgenlik düzeyi Tip-3 karışımlardan elde edilmiştir. Tasarım deney sonuçları birbirine yakın olan Tip-3 ve Tip-4 karışımların optimum bitüm oranları sırasıyla %6,50 ve %6,00 olarak belirlenmiştir. Ferrokrom cürufu ve kireçtaşı agrega tasarım sonuçları karşılaştırıldığında, ferrokrom cürufunun fiziksel özelliklerine bağlı olarak geçirimli asfalt karışımların tasarım kriterlerini iyileştirdiği ve geçirimli asfalt kaplamalarda agrega olarak kullanılabilceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cantabro aşınma kaybı; Endüstriyel atıklar; Ferrokrom cürufu; Geçirimli asfalt; Geri dönüşüm; Permeabilite.

Bilim Kodu: 624.04.01

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF FERROCHROM SLAG AGGREGATE ON PERFORMANCE OF PERMEABLE BITUMINOUS MIXTURES

Sedat TOPALOĞLU

**Bartın University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Thesis Advisor: Assoc. Prof Altan ÇETİN

Bartın-2019, pp: 126

Recently, researches on recycle of industrial wastes have increased due to the conservation of natural resources and environmental worries. The construction sector, especially the road structures enable the recycling of high amounts of waste materials. Porous asphalt pavements are applied to increase the functional performance of road pavement and driving safety in areas with high rainfall. Coarse aggregate is used in a large extent in porous asphalt mixtures to ensure the void ratio. Due to the contact between the coarse aggregates, the strength and the adherence of the bituminous binder of the aggregate used in these mixtures should have a good level.

In this study, which investigates for the usability of ferrochrome slag in the porous asphalt mixture, three different gradations of Type-2, Type-3, Type-4 that are specified for the permeable asphalt mixtures in the highways, technical specifications are selected and the design criteria of the mixture prepared with ferrochrome slag is examined. Mixtures are prepared to use a uniform polymer bituminous binder (PMB 76-16). Design experiments performed on specimens, are prepared in different bitumen percentage, such as volume analysis, permeability, Cantabro abrasion loss, indirect tensile strength and resistance to moisture damage. Experimental results, the void and permeability values of Type-2

mixtures were significantly below the minimum limit values, while the best hydraulic permeability level was obtained from Type-3 blends. The optimum bitumen ratios of Type-3 and Type-4 blends, which are close together in the design test results, Type-3 is determined to be %6,50 when Type-4 is 6,00. Compared to the design results with ferrochrome slag and limestone aggregate, it was determined that ferrochrome slag improves the design criteria of porous asphalt mixtures depending on its physical properties and it could be used as aggregate in permeable asphalt pavements.

Keywords: Cantabro loss; Industrial wastes; Ferrochrome slag; Porous asphalt; Recycling; Permeability.

Science Code: 624.04.01

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL VE ONAY	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xviii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 KARAYOLU ÜSTYAPI SİSTEMLERİ	4
2.1 Geçirimsiz (Geleneksel) Üstyapı	4
2.1.1 Esnek Üstyapı	4
2.1.2 Rijit Üstyapı	8
2.2 Geçirimli (Poroz) Üstyapı.....	11
BÖLÜM 3 GEÇİRİMLİ ASFALT KAPLAMALAR	15
3.1 Genel Bilgiler.....	15
3.2 Fonksiyonel (İşlevsel) ve Performans Özellikleri	16
3.2.1 Güvenlik Özellikleri.....	16
3.2.2 Konfor ve Çevre ile Uyum Özellikleri.....	18
3.2.3 Bakım-Onarım Özellikleri	19
3.2.4 Ekonomik Özellikleri	19
3.3 Yapısal Özellik ve Tasarım Kriterleri.....	20
3.3.1 Yapısal Özellikleri	20
3.3.2 Karışım Tasarımı.....	21
3.3.3 Yapım ve Bakım Aşamaları	26

BÖLÜM 4 YOL ÜSTYAPISINDA KULLANILAN ENDÜSTRİYEL ATIKLAR VE FERROKROM CÜRUFU	27
4.1 Atık Malzemelerin Yol İnşaatındaki Geri-Dönüşüm Uygulamaları.....	27
4.2 Yüksek Fırın Cüruflarının Geri-Dönüşüm Uygulamaları.....	34
4.2.1 Ferrokrom Cürufunun Özellikleri	36
4.2.2 Ferrokrom Cürufunun Geri-Dönüşüm Uygulamaları	43
BÖLÜM 5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	47
5.1 Deneysel Çalışma Kapsamı	47
5.2 Kullanılan Malzemeler	47
5.2.1 Agrega	48
5.2.2 Bitümlü Bağlayıcı	51
5.2.3 Selülozik Fiber	51
5.2.4 Uçucu Kül	52
5.3 Deney Yöntemleri.....	53
5.3.1 Karışım Numunelerinin Hazırlanması	53
5.3.2 Boşluk Analizi.....	54
5.3.3 Permeabilite Testi.....	56
5.3.4 Cantabro Aşınma Testi.....	59
5.3.5 Dolaylı Çekme Deneyi.....	60
5.3.6 Nem Hasarına Karşı Direnç	61
BÖLÜM 6 DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI	63
6.1 Boşluk Analizi Sonuçları	63
6.2 Permeabilite Deneyi Sonuçları	66
6.3 Cantabro Aşınma Deneyi Sonuçları	68
6.4 Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları	71
6.5 Nem Hasarı Deneyi Sonuçları	73
6.6 Karışım Tasarım Sonuçları	75

BÖLÜM 7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	76
KAYNAKLAR.....	80
EKLER	90
ÖZGEÇMİŞ.....	107

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
2.1: Esnek üstyapı tabakalarında yük dağılımı.	5
2.2: Esnek üstyapı için tipik enkesit.....	6
2.3: BSK kaplama üretim ve yapım aşamaları.....	7
2.4: Sathi kaplama yapım aşamaları.....	8
2.5: Sathi kaplama uygulama tipleri.....	9
2.6: Rijit üstyapı tabakalarında yük dağılımı	9
2.7: Beton yol kaplama yapım aşamaları(Kayar kalıp yöntemi).....	10
2.8: Rijit üstyapı(Beton Kaplama) tipleri oluşumu	11
2.9: Geçirimli esnek üstyapı enkesiti	12
2.10: Geçirimli ve geleneksel esnek üstyapı yüzey drenajı	13
2.11: Geçirimli rijit(beton) kaplama ve geleneksel beton kaplama yüzey görünümü	13
2.12: Geleneksel kilitli parke sistemine ait üstyapı kesiti	14
2.13: Geleneksel ve geçirimli parke kaplama uygulama örnekleri. a. Geleneksel tip beton parke uygulaması, b. Geçirimli tip beton parke uygulaması.....	14
2.14: Geçirimli kilitli beton parke kaplama yüzey suyu drenajı	14
3.1: Yağışlı havada geçirimli asfalt ile geleneksel asfalt kaplamalarda görüş mesafesi.....	17
3.2: Geleneksel kaplama yüzeyinde oluşan su birikintilerinden kaynaklanan olumsuzluk örnekleri.....	18
3.3: Geçirimli esnek üstyapı enkesiti	20
4.1: Karayolu yapımında kullanılacak endüstriyel atıkların uygunluğunun değerlendirilmesi.....	30
4.2: Cüruf oluşumlarında farklı soğutma yöntemleri	34
4.3: Elazığ Ferrokrom İşletmesi üretim akım şeması.....	38
4.4: Garipbaba Ark Fırını üretim şeması.....	39
4.5: Doğal kum ve Ferrokrom cürufunun SEM mikrografları ve 3D yüzey topografya görüntüleri.....	40
4.6: Doğal kum ve Ferrokrom cürufunun X-ışını kırınım analizi	40
5.1: Ferrokrom cürufunun yüzey şekli	48
5.2: Seçilen karışım tipleri için gradasyon eğrileri	49
5.3: Çalışmada kullanılan kireçtaşı kaba agrega	50

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Şekil No	Sayfa No
5.4: Selülozik fiber	52
5.5: İlave filler malzemesi olarak kullanılan uçucu kül	52
5.6: Kullanılan uçucu külün dane çapı dağılımı.....	53
5.7: Geçirimli asfalt karışımların hazırlanma aşamaları. a. mikser ile karıştırılması, b. Marshall tokmağı ile sıkıştırılması.....	54
5.8: Sıkıştırılmış numunelerin boşluk analizleri. a. numunelerin parafilmle kaplanması, b. tartımların yapıldığı özgül ağırlık sehpası	54
5.9: Bitümlü karışımın maksimum teorik özgül ağırlık deneyi. a. deney numunesinin hazırlanması, b. elle tanelenerek ayrılmış karışım	55
5.10: Permeabilite deney düzeneği. a. fotoğrafı, b. şematik şekli.....	58
5.11: Cantabro aşınma kaybı deney aleti	59
5.12: Cantabro aşınma deney öncesi ve sonrası numune örnekleri.....	59
5.13: Dolaylı çekme deney aleti. a. Marshall test cihazı, b. dolaylı çekme deneyi için modifiye edilen kırma çenesi	60
5.14: Dolaylı çekme deney aleti. a. Marshall test cihazı, b. eğrisel yükleme şeritleri arasına yerleştirilen silindirik numune	61
5.15: Numunelerin koşullandırma aşamaları. a. plastik bir film ile sarılarak plastik torbalara konulması, b. 60°C'lik su banyosunda bekletilmesi.....	62
6.1: Seçilen karışım gradasyonlarında ferrokrom cürufu ile hazırlanan numunelere ait boşluk oranlarının bitüm yüzdelere göre değişim grafiği	62
6.2: Tip-3 gradasyonunda ferrokrom cürufu ve kireçtaşı agrega ile farklı bitüm yüzdelere hazırlanan karışımların boşluk oranları	62
6.3: Seçilen karışım gradasyonlarında ferrokrom cürufu ile hazırlanan numunelere ait permeabilite değerlerinin bitüm yüzdelere göre değişim grafiği	67
6.4: Tip-3 gradasyonunda ferrokrom cürufu ve kireçtaşı agrega ile farklı bitüm yüzdelere hazırlanan karışımların permeabilite deney sonuçları.....	68
6.5: Seçilen karışım gradasyonlarında ferrokrom cürufu ile hazırlanan numunelere ait Cantabro aşınma kaybı değerlerinin bitüm yüzdelere göre değişim grafiği	70
6.6: Tip-3 gradasyonunda ferrokrom cürufu ve kireçtaşı agrega ile farklı bitüm yüzdelere hazırlanan karışımların Cantabro aşınma kaybı sonuçları.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Şekil No	Sayfa No
6.7: Seçilen karışım gradasyonlarında ferrokrom cürufu ile hazırlanan numunelere ait dolaylı çekme değerlerinin bitüm yüzdelere göre değişim grafiği	72
6.8: Tip-3 gradasyonunda ferrokrom cürufu ve kireçtaşı agrega ile farklı bitüm yüzdelere hazırlanan karışımların dolaylı çekme deneyi sonuçları	72
6.9: Seçilen karışım gradasyonlarında ferrokrom cürufu ile hazırlanan numunelere ait nem hasarı değerlerinin bitüm yüzdelere göre değişim grafiği.....	74
6.10: Tip-3 gradasyonunda ferrokrom cürufu ve kireçtaşı agrega ile farklı bitüm yüzdelere hazırlanan karışımların nem hasarı deneyi sonuçları	74

TABLolar DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
3.1: Avrupa ülkelerinin yıllara göre geçirimli asfalt kaplama uygulama miktarları.....	16
3.2: Amerika'nın Teksas eyaletinde bir deneme kesiminde geçirimli asfalt kaplama öncesinde ve sonrasında belirlenen kaza oranları	17
3.3: Türkiye ve bazı Avrupa ülkelerine ait geçirimli asfalt karışım gradasyon limitleri.....	22
3.4: Dünyadaki bazı ülkeler ve kuruluşların kullandığı agrega karışım gradasyon limitleri.....	23
3.5: Geçirimli asfalt karışımında kullanılacak agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri ve limit değerleri	23
3.6: Japonya, Çin, ABD ve Türkiye'de geçirimli asfalt karışımında kullanılan bitümlü bağlayıcı özellikleri ve limit değerleri	24
3.7: İngiltere, İspanya, Danimarka, İsviçre, Hollanda, Belçika ve İtalya'da geçirimli asfalt karışımlarda kullanılan bağlayıcı bitüm malzemesinin penetrasyon grupları ve optimum bitüm içeriği	24
3.8: Farklı ükle ve kuruşlara ait geçirimli asfalt karışım tasarım kriterleri.....	25
4.1: Karayolu yapımında kullanılacak endüstriyel atık malzemeler	28
4.2: Karayolu yapımında kullanılacak endüstriyel atık ürünlerin avantaj ve dezavantajları	29
4.3: Ferrokrom cürufu ile doğal agrega fiziksel özellikleri.....	41
4.4: Ferrokrom cürufunun (6.3 mm – 25 mm) kimyasal özellikleri	41
4.5: Ferrokrom cürufunun (6.3 mm – 25 mm) fiziksel özellikleri	41
4.6: Ferrokrom cürufunun (6.3 mm – 25 mm) mekanik özellikleri	42
4.7: Elazığ ferrokrom cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	42
5.1: Ferrokrom cürufuna ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler.....	49
5.2: Karışım tasarımı için seçilen gradasyon tipleri	50
5.3: Agrega (Ferrokrom cürufu) özgül ağırlık ve su emme yüzdeleri	50
5.4: Kireçtaşı agregaya ait fiziksel özellikler	51
5.5: Kullanılan polimer bitümlü bağlayıcının fiziksel özellikleri	51
5.6: Kullanılan selülozik fibere ait fiziksel özellikler	52

TABLOLAR DİZİNİ (devam ediyor)

Tablo	Sayfa
No	No
6.1: Seçilen karışım gradasyonlarına ait boşluk analiz sonuçları.....	64
6.2: Seçilen karışım gradasyonlarına ait permeabilite deney sonuçları	66
6.3: Agregat tipleri ve gradasyonlarına ait geçirimli asfalt karışımı tasarım değerleri.....	75

EKLER DİZİNİ

Ek	Sayfa
No	No
EK 1: Yol yapımında kullanılan kaplama sınıfı bitümlerin özellikleri (TS EN 12591).....	90
EK 2: Modifiye bitümün fiziksel özellikleri.....	91
EK 3: Boşluk analizi deneyine ait tüm veriler.....	92
EK 4: Permeabilite deneyine ait tüm veriler.....	94
EK 5: Cantabro aşınma deneyine ait tüm veriler.....	101
EK 6: Dolaylı Çekme deneyine ait tüm veriler.....	103
EK 7: Nem Hasarı deneyine ait tüm veriler.....	105

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

mm	: milimetre
kg	: kilogram
cm	: santimetre
m ²	: metrekare
MPa	: megapascal
g	: gram
N	: Newton, Yük
SG _T	: Teorik Özgül Ağırlık
SG	: Özgül Ağırlık
k	: Permeabilite katsayısı
Q	: Debi
i	: Hidrolik gradient
Q _T	: İndirek Çekme Mukavemeti
Π	: pi sayısı
IDT _{Koşullanmış}	: Koşullandırılmış İndirek Çekme
IDT _{Koşullanmamış}	: Koşullandırılmamış İndirek Çekme

KISALTMALAR

TS	: Türk Standartları
EN	: Avrupa Normu
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
ASTM	: American Society for Testing and Materials
ASSTHO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
PMB	: Polimer Modifiye Bitüm
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
TMA	: Taş Mastik Asfalt
GAK	: Geçirimli Asfalt Karışım
PA	: Poroz Asfalt, Geçirimli Asfalt
OGFC	: Open-graded Friction Course
SBS	: Stiren-Butadien-Stiren, Polimer Modifiye Bitüm Katkısı

İSFALT	: İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.
WAPA	: Wisconsin Asphalt Pavement Association
NAPA	: Ulusal Asfalt Kaplama Birliği
WSDOT	: Washington State Department of Transportation
NCAT	: National Center for Asphalt Technology
FDOT	: Florida Department of Transportation
TxDOT	: Texas Department of Transportation
EAPA	: European Asphalt Pavement Association
FHWA	: Federal Highway Administration
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
NMAS	: Nominal maksimum toplam boyut
3D	: Üç boyut gösterimi
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
XRD	: X-ışını Difraktometresi
XRF	: X-ışını Floresans Spektrometresi
TDS	: Total Dissolved Solids, Toplam çözünmüş katı madde miktarı
DSR	: Dinamik kesme Reometresi
Min.	: Minimum
Maks.	: Maksimum
vd.	: ve diğerleri
vb.	: ve benzeri

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Hammadde ve doğal kaynakların tükenmesi, atık malzemelerin depolanmasındaki güçlükler ve çevresel kirliliğinin boyutlarının giderek artması sebebiyle atıkların geri kazanımı gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Endüstriyel atıkların büyük miktarlarda değerlendirilebildiği alanların başında inşaat sektörü ve özellikle yol inşaatları gelmektedir. Belirtilen alanlar çoğu zaman fiziksel veya kimyasal işlemlere gerek duyulmadan atık malzemelerin daha ekonomik olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Termik santral atıkları ve yüksek fırın cürüfları inşaat sektöründe en yaygın olarak kullanılan endüstriyel atıklar arasında yer almaktadır. Doğada soğumuş yüksek fırın cürüflarının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin doğal agregayla benzer oldukları ve yol inşaatında farklı tabakalarda kullanılabilirliği belirtilmektedir (Yılmaz ve Kök, 2008; Yılmaz, 2017). Ferrokrom cürufu, ferrokrom üretimi gerçekleştiren tesislerin elektrik ark fırınlarındaki işlem sürecinde açığa çıkan atık malzemedir. Bu cürüflar açık alanlarda depolanmakta ve önemli çevresel zararlar oluşturmaktadır. Ülkemizde “Antalya Ferrokrom İşletmesi” ve “Elazığ ETİ Ferrokrom İşletmesi” tarafından ferrokrom cevherinin işlenmesi esnasında her 3 kg ferrokrom başına 1 kg cüruf atığı çıkmaktadır. Elazığ ETİ Ferrokrom Tesisi’nde yılda yaklaşık 225000 ton, Antalya’daki işletmede ise yılda 35000 ton Ferrokrom (FeCr) cüruf atığı ortaya çıkmaktadır (Yılmaz, 2002). Stok alanlarında depolanmakta olan ferrokrom cürüfların miktarları göz önüne alındığında farklı kullanım alanlarının araştırılmasının önemi ortaya çıkmaktadır.

Ulaşım hizmetlerinin hızlı, güvenli ve konforlu olarak sağlanabilmesi için yeni karışım tiplerinin geliştirilmesi ve uygulama alanlarının araştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Geleneksel kaplama tipleri yıllık yağış miktarı fazla olan bölgelerde yol yüzeyinden suyun drene edilmesinde yetersiz kalmaktadır. Sürüş güvenliği ve konforunda azalmaya, su sızdırılmaya ve görüş mesafesinde olumsuzluklara ve kazalara sebep olmaktadır. Geçirimli yol üstyapısı, yağmur suyu ve eriyen karların hızlı bir şekilde süzülmesini ve yer altı suyunun yol üst yapısına zarar vermeden tekrar zemin içerisine drenajına imkân sağlamaktadır (Claytor, 2000). Asfalt, beton veya kilitli beton parke sistemlerden oluşan

geçirimli yol üstyapı tabakaları çok daha az ince malzeme içerdiğinden sahip olduğu yüksek boşluk yüzdesi ile suyun hızlı bir şekilde drenajına olanak sağlamaktadır.

Geçirimli asfalt kaplamada yüksek miktarlarda kaba agregası kullanılması ile kaplamada %20 oranında boşluk sağlanmaktadır. Dolayısıyla, boşluklu yapısı sayesinde yağmur sularının karayolu yüzeyinden uzaklaştırılması ile araç tekerlekleri ile kaplama yüzeyi arasındaki kayma direncini iyileştirerek fren mesafesinde azalma sağlamaktadır (Emery, 1984). Kaplama yüzeyinde oluşan su birikintisinden dolayı gece sürüşlerinde meydana gelebilecek ışık parlamalarını azaltarak, taşıt geçişleri sırasında su birikintilerinden sıçrayan suyun çevreyi kirletmesini ve diğer taşıtların görüşünün kısıtlanmasını büyük oranda engellemektedir. Geçirimli asfalt kaplamalar, belirtildiği üzere yol yüzeyinden uzaklaştırılmayan suyun oluşturacağı kaza riskinin azalmasını sağlamaktadır. Yol yüzey pürüzlülüğünün artması her ne kadar yakıt tüketiminin artacağını düşündürse de yağışlı havalarda trafik hızı ve akımında sağlanacak süreklilik yakıt tüketimini olumlu etkileyecektir (Less, 1978). Aynı zamanda periyodik bakım gerektiren geçirimli kaplamalarda, yuvarlanma gürültüsünün absorbe edilerek taşıt içindeki konforun arttığı ve çevresel gürültü kirliliğinin azaldığı gözlemlenmiştir (Raaberg, 2001).

1950'li yıllarda Amerika Birleşik Devletleri'nde uygulanmaya başlayan geçirimli kaplama tipi, 1970'li yıllara doğru 30'a yakın eyalette uygulanmaya başlanmıştır. Kaba agregası yüzdesinin yüksek olması ve bitümlü bağlayıcının yetersiz kalması 1980'li yıllarda geçirimli asfalta olan talebi azaltmış olsa da, modifiye bitümlü bağlayıcılarda teknolojinin gelişmesiyle birlikte geçirimli asfalt kaplama kullanımı yaygınlaşmıştır (Kandhal ve Mallick, 1998). Avrupa'da aynı yıllarda geçirimli asfalt kaplama çalışmalarına başlanarak boşluk oranı daha yüksek olan "Avrupa Poroz Karışımı"(Porous European Mix-PEM)'ni geliştirmiştir (EAPA, 2019). Ülkemizde de geçirimli asfalt kaplamalara ait karışım ve yapım koşulları Karayolu Teknik Şartnamesi 417. Kısım'da yer almaktadır (KTŞ, 2013). Akdeniz ve Karadeniz bölgesi kıyıları gibi yoğun yağış alan yerlerde geçirimli asfalt kaplama uygulanabilirliği ve yüksek mevsimsel sıcaklıkların yaşandığı bölgelerde modifiye bağlayıcı kullanılmasının gerekliliği vurgulanmaktadır (Öztürk, 2008).

Elazığ ferrokrom işletmesi cürufalarının fiziksel ve kimyasal özellikleri incelendikten sonra yapılan performans deneyleri neticesinde Elazığ ferrokrom cürufalarının agregası olarak kullanılabilirliği belirlenmiştir (Vapur vd., 2013).

Ferrokrom metalinin üretim sürecinde atık olarak ortaya çıkan yüksek karbonlu ferrokrom (FeCr) cürufunun, inşaat sektöründe öğütülerek çimento klinkerine ilave edilmesi, yol alttemel malzemesi ve bitümlü sıcak karışım agregası olarak kullanılması gibi çeşitli alanlarda değerlendirilmesi yönünde araştırmalara rastlanmakla beraber, geçirimli asfalt kaplama karışımlarında kullanımını içeren çalışmaların sınırlı olduğu belirlenmiştir. Kullanım alanlarının yaygınlaştırılmasının yanında bu malzemelerin özelliklerine uygun alanlarda kullanılması ekonomik açıdan daha büyük faydalar sağlayacaktır. Özellikle çevresel koşullar ve trafiğin aşındırma etkisine maruz kalan geçirimli asfalt kaplamaların üretiminde, dayanımı yüksek kaliteli agrega kullanımı gerekliliği önem kazanmaktadır. %3-5 oranında Cr_2O_3 içeren metalürjik cüruflar sınıfında yer alan ferrokrom cürufunun fiziksel özellikleri bu gereksinimi karşılayacak niteliktedir.

Bu bağlamda çalışmada, önemli bir atık potansiyeline sahip olan ferrokrom cürufunun özelliklerine uygun bir alan olabileceği düşünülerek geçirimli asfalt üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, Karayolları Teknik Şartnamesi'nin (KTŞ, 2013) geçirimli asfalt ile ilgili bölümü (417. Kısım) göz önünde tutularak, ferrokrom cürufu ve doğal agrega kullanılarak hazırlanan geçirimli asfalt karışım tasarımı için bir laboratuvar çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, 3 tip agrega gradasyonu (KTŞ-Tip-2, Tip-3 ve Tip-4 gradasyonu) ve polimer bitümlü bağlayıcı (PMB 76-16) kullanılmıştır. Seçilen agrega gradasyonları için farklı bitüm yüzdelerinde numuneler hazırlanıp boşluk analizleri yapılarak, kaplama tasarımı için permeabilite, Cantabro aşınma kaybı, dolaylı çekme mukavemeti ve nem hasarı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları değerlendirilerek geçirimli asfalt karışıma ait tasarım değerleri ve ferrokrom cürufunun karışım performansına etkileri belirlenmiştir.

BÖLÜM 2

KARAYOLU ÜSTYAPI SİSTEMLERİ

Karayolu, taşıt ve yaya ulaşımının sağlanması için doğal zeminin geometrik ve yapısal olarak istenilen standartlara getirilerek inşa edilen yapılar bütünüdür. Karayolunun işlevsel performansının sağlanmasında yapısal olarak en önemli kısmı üstyapıdır. Üstyapı, trafik yüklerini taban zemininin taşıyabileceği değerlere indirmek, altyapıyı korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak amacı ile altyapı üzerine yerleştirilen, alttemel, temel ve kaplamadan oluşan tabakalı yol yapısıdır (Umar ve Ağar, 1985).

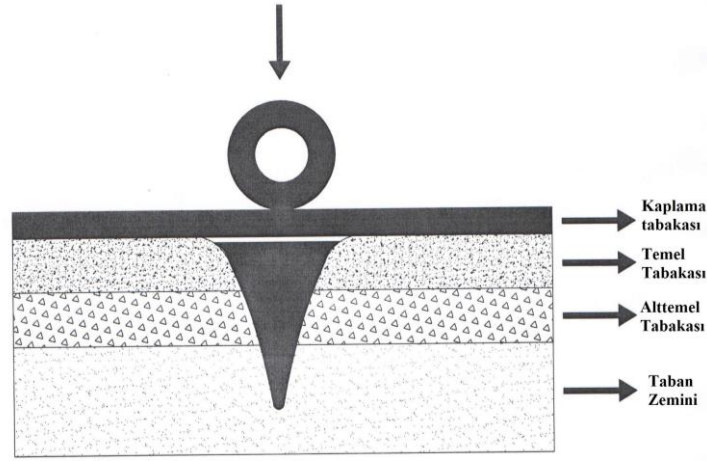
Karayolu üstyapısı yaygın olarak geçirimsiz yapıda inşa edilmektedir. Fakat, yoğun yağış sebebiyle karayolunda oluşacak kapasite ve güvenlik problemlerinin önüne geçilmesi açısından bazı kesimlerde geçirimli yol üstyapısı uygulanabilmektedir. Bu bölüm, geleneksel (geçirimsiz) ve geçirimli yapıdaki üstyapılar hakkında bilgiler içermektedir.

2.1 Geçirimsiz (Geleneksel) Üstyapı

Geçirimsiz üstyapı sistemlerinde, suyun üstyapı içerisine girişi engellenerek suyun vereceği zararların önüne geçildiğinden üstyapı dayanımı daha yüksektir. Bu üstyapı tipi kaplama tabakasında kullanılan malzeme türüne, özelliklerine ve yapım yöntemlerine göre esnek ve rijit üstyapı olarak iki gruba ayrılmaktadır.

2.1.1 Esnek Üstyapı

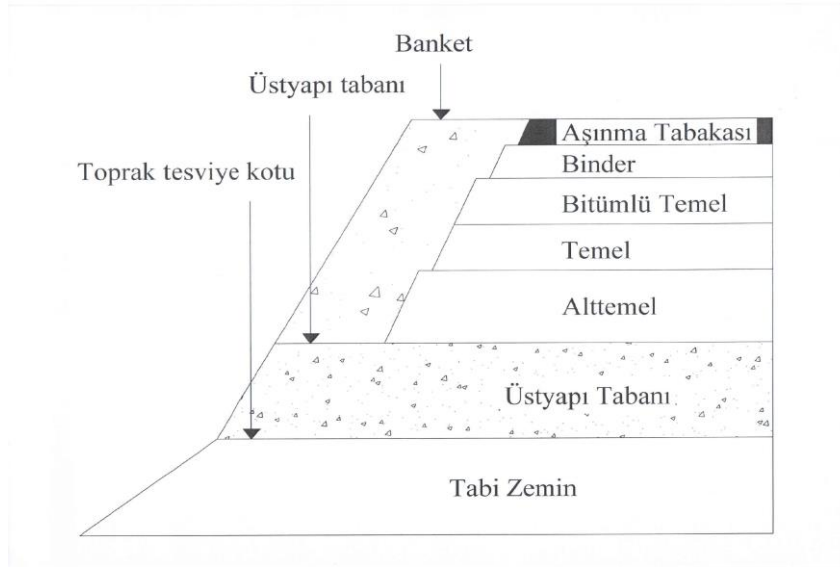
Bitümlü karışım kaplama tabakalarını içeren ve taşıt yüklerinin büyük bir kısmını kendi karşılarlarken, temel ve alttemel tabakaları yardımıyla taban zeminine azaltarak iletilen tabakalı sistemlerdir. Asfalt kaplamalar, taban zemini ve alt tabakalarda oluşacak belirli düzeydeki deformasyonlara kırılmadan uyum sağlayabilmesinden dolayı esnek kaplama olarak adlandırılırlar. Esnek üstyapı sistemlerinde etki eden yükün dağılımı Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Esnek üstyapı tabakalarında yük dağılımı.

Şekil 2.2’de verilen esnek üstyapı enkesitinde görüldüğü gibi en üstteki tabaka kaplama tabakasıdır. Bu tabaka aşınma ve binder olarak iki kısımdan oluşabilir. Bu tabakaların yeterli kayma direncini sağlarken aynı zamanda konforlu bir sürüş için yeterli yuvarlanma yüzeyine sahip olması gerekir. Kaplama tabakasının kalınlığı arttıkça trafik yüklerine karşı direnç artar. Kaplama tabakasının altında temel tabakası bulunur. Temel tabakasında kullanılan malzemelerin belirli fiziksel özelliklere sahip olması istenilir. Bu tabaka, kaplama tabakasından gelen yüklerin dağılımını sağlayarak, alttemel tabakası ve taban zeminine gelen yüklerin etkisini azaltır. Temel tabakası stabilize malzemedan oluşabileceği gibi bağlayıcı malzeme kullanılarak da yapılabilmektedir (Mutlugeldi, 2015). Temel tabakası altında bulunan alttemel tabakasının kullanım amacı, temel tabakası ile benzerlik göstermektedir. Alttemel ile temel tabakasının farkı olarak, kullanılan malzemenin elastisite modülü ve tabaka kalınlığı söylenebilir. Esnek üstyapının en alt tabakası olan taban zeminini sıkıştırılmış doğal zeminden oluşabileceği gibi dolgu malzemesinden de oluşturulabilir. Taban zeminini, karayolu üstyapısının temel görevini üstlendiğinden üstyapı tabakalarının en önemli tabakasıdır ve taşıma gücü üstyapının davranışını belirler (Kaya, 2014).

Esnek üstyapıların performansı ve hizmet ömrü, yapısal ve karışım tasarımlarının, üretim ve yapım aşamalarının standartlara uygun olmasına bağlıdır. Esnek üstyapı yapısal tasarımı, proje trafığına bağlı olarak tabaka tipleri ve kalınlıklarının belirlenmesini içermektedir. Tabakalarda kullanılacak malzeme kalitesi ve optimum karışım oranlarının doğru olarak belirlenmesi önemlidir. Esnek üstyapılarda, sathi ve yüzey düzeltme amaçlı ve bitümlü sıcak karışım kaplamalar kullanılmaktadır.



Şekil 2.2: Esnek üstyapı için tipik enkesit.

Esnek üstyapı denildiğinde akla gelen Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK)'dır. BSK kaplamaların yapımı bitümlü bağlayıcı ile agreganın asfalt tesislerinde ısıtılarak karışımı sağlandıktan sonra, karışımın sıcak halde taşınıp uygulanması aşamalarını kapsamaktadır. BSK kaplamalar, üzerindeki trafik için güvenli ve konforlu bir yuvarlanma yüzeyi sağlamakla beraber, orta ve ağır trafikli yollarda, trafik yüklerini taşımak ve üstyapıdaki diğer tabakaları olumsuz iklim koşullarından koruyarak, daha uzun bir servis ömrü temin etmektedirler. BSK kaplamaların sahip olması gereken stabilite, durabilite, geçirimsizlik, işlenebilirlik, esneklik, yorulmaya karşı direnç ve kaymaya karşı direnç gibi fizik ve mekanik özellikleri iyi bir karışım tasarımı ile mümkündür (Öztürk, 2008; Mutlugeldi, 2015).

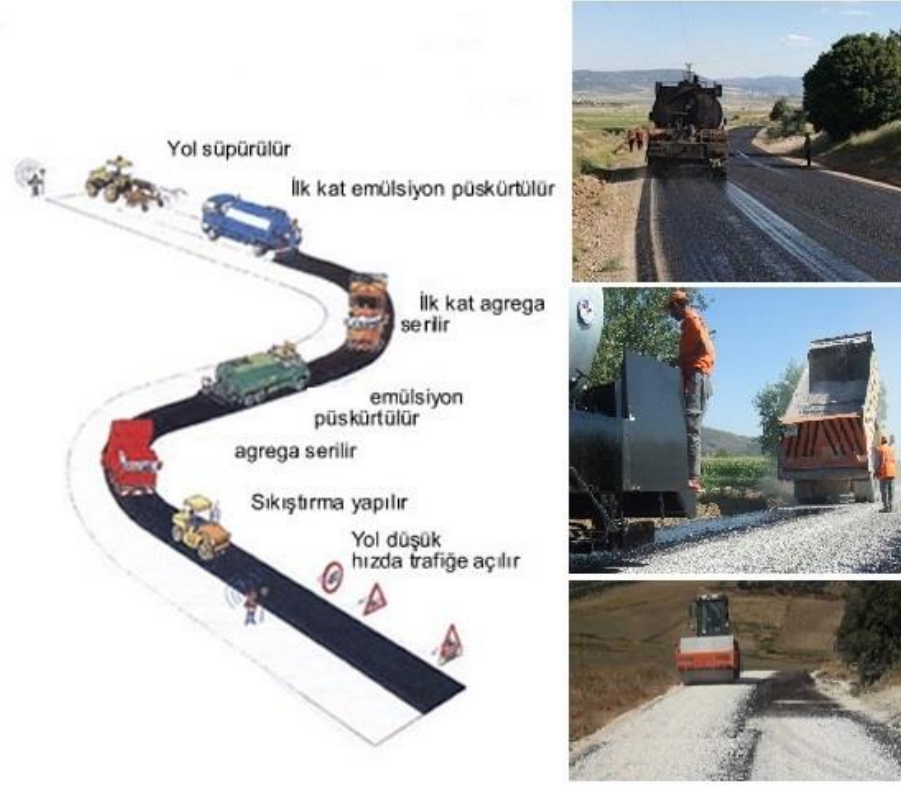
BSK kaplama üretiminde kullanılan agrega en az üç ayrı dane grubunun (kaba, ince ve orta) karışımından oluşmaktadır. Agrega gruplarının farklı oranları ile oluşturulan karışım gradasyonları ile farklı tipte BSK kaplamalar geliştirilmiştir. Bunlar arasında en yaygın olarak kullanılan, iri ve ince agrega miktarlarının birbirine yakın oranlarda karıştırıldığı sürekli ve yoğun gradasyonlu geleneksel karışımlardır. Ayrıca, farklı amaçlar çerçevesinde yüksek miktarda iri agrega içeren kesikli gradasyona sahip Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımlar, maksimum dane boyutu küçük olan ve çok az kaba agrega içeren harç tipi karışımlar ile üretilen ince, çok ince kaplamalar, çok az miktarda ince agrega içeren ve boşluk oranı yüksek geçirimli yapıya sahip bitümlü karışımlar da uygulanmaktadır (Öztürk, 2008).

Proje aşamasında belirtilen eğimler doğrultusunda oluşturulan taban zemini üzerine yapısal analiz sonucunda belirlenen kalınlıklarda alttemel ve temel tabakaları serilerek sıkıştırılır. Temel tabakası sıkıştırma işlemleri tamamlandıktan sonra Şekil 2.3'te görüldüğü üzere, özel prentlerde hazırlanan BSK Karışımlar uygulama alanına getirilerek finişer ile belirlenen kalınlıkta serimi gerçekleştirilir. Lastik tekerlekli ve çelik bandajlı silindirler ile sıkıştırma işlemi tamamlanan kaplamalar kısa süre içerisinde trafiğe açılabilir.



Şekil 2.3: BSK kaplama üretim ve yapım aşamaları (URL-1, 2017; URL-2, 2018; URL-3, 2019).

Sathi kaplama uygulamaları, temel tabakası tamamlandıktan sonra distribütör ile püskürtülen bitümlü yapıştırma tabakası üzerine serilen belli boyuttaki agrega malzemesinin sıkıştırılarak yapılmaktadır (Şekil 2.4). Hazırlanma ve uygulama maliyeti düşük olduğundan, trafik yoğunluğunun az olduğu yollarda uygulanması tercih edilmektedir. Bakım ve onarımı kısmen kolay ve ekonomik olmasına rağmen hizmet ömrü kısadır.



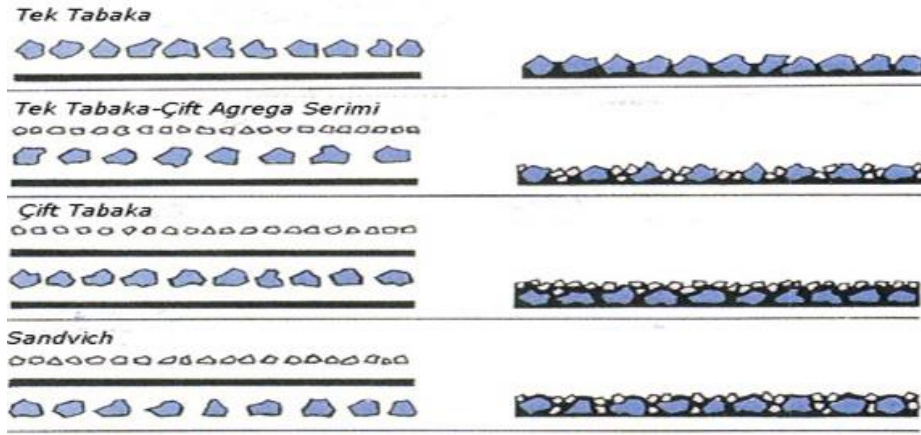
Şekil 2.4: Sathi kaplama yapım aşamaları (URL-4, 2007; URL-5, 2018; URL-6, 2018; URL-7, 2019).

Sathi kaplamalar, Şekil 2.5’de görüldüğü gibi tek tabakalı (tek ve çift agrega tabakası), çift tabakalı ve sandviç tipte olmak üzere farklı tiplerde uygulanabilmektedir. Tek kat bitüm püskürtülerek tek kat agrega serme işlemi uygulanan sathi kaplamalara tek tabakalı, ardarda iki defa bitüm-agrega serimi ve sıkıştırma işlemi uygulanan kaplamalar çift tabakalı sathi kaplama olarak adlandırılmaktadır. Tek kat agrega üzerine bitümlü bağlayıcı püskürtülerek üzerine farklı gradasyonda ikinci kat agrega serme işlemi uygulanarak hazırlanan sathi kaplama sistemler ise sandviç tipi sathi kaplama olarak adlandırılmaktadır. Yüksek trafik hacminin bulunduğu yol güzargahlarında çift tabakalı sathi kaplamalar uygulanmakta olup daha iyi bir dayanım ve geçirimsizlik ile daha az gürültü seviyesi sağlamaktadırlar.

2.1.2 Rijit Üstyapı

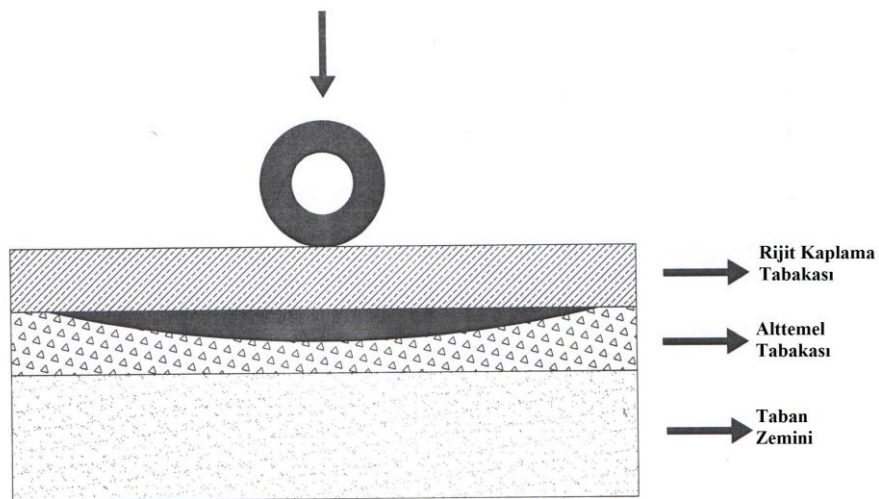
Portland çimento bağlayıcılı beton plak kaplamayı içeren üstyapı tipidir. Şekil 2.6’de görüldüğü gibi yüksek eğilme direncine sahip beton plak kaplama, trafik yüklerinden oluşan gerilmeleri büyük oranda azaltarak üniform bir şekilde taban zeminine iletmektedir.

Taban zemininin yeterli taşıma gücüne sahip olmadığı durumlarda temel ve alttemel tabakası da yapılmaktadır.



Şekil 2.5: Sathi kaplama uygulama tipleri (URL-4, 2007).

Beton plaklar, genelde alttemel tabakası üzerine yapılmakta olup, taban zemini pompajı, don kabarması, su içeriğinin artması, aşırı şişme ve büzülmenin görülmediği ve taşıma gücünün yeterli seviyede olduğu durumlarda, alttemel tabakası yapılmadan doğrudan taban zemini üzerine geçirimsiz malzeme (geomembran v.b.) uygulanarak da yapılabilmektedir. Alttemel tabakasına ihtiyaç duyulan durumda ise iyi drene olabilen stabilize malzemesi belirlenen kalınlıkta serilip sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir (Giriş, 2007).



Şekil 2.6: Rijit üstyapı tabakalarında yük dağılımı.

Plak tabakası sabit kalıp sistemi ile yapılabileceği gibi Şekil 2.7’de görüldüğü üzere kayar kalıp sistemiyle de yapılabilmektedir. Kayar kalıp kullanıldığı durumlarda çökme (slump) değeri düşük beton karışımları kullanılmaktadır. Kayar kayıp sistemlerinde, beton en geç bir buçuk saat içerisinde kalıba yerleştirilir ve iyi bir sıkışma sağlanması için vibratör uygulanır. Sonrasında, beton yüzeyi masterlanarak düzeltilmekte ve çatlak oluşumunun önlenmesi için uygun kimyasallar püskürtülmek suretiyle kür işlemi yapılmaktadır. Ayrıca yapım aşamaları, gerekli kayma-sürtünmenin sağlanması için pürüzlendirme ve belirlenen planlarda derz kesilme işlemlerini içermektedir (Giriş, 2007).

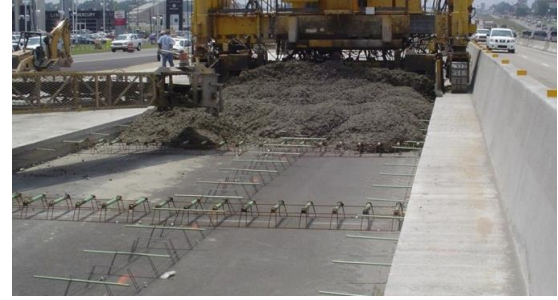
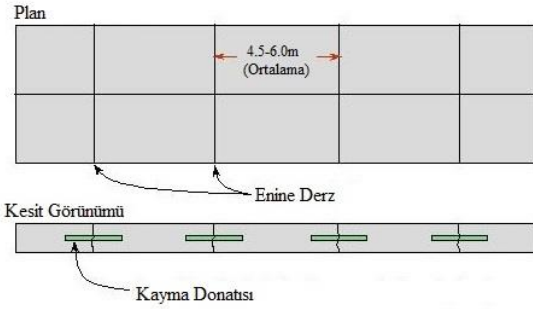


Şekil 2.7: Beton yol kaplama yapım aşamaları (Kayar kalıp yöntemi) (URL-8, 2019).

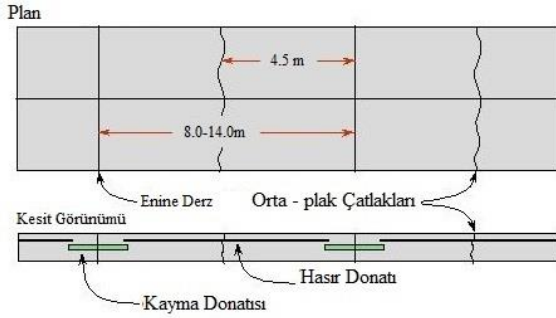
Şekil 2.8’de gösterildiği üzere rijit üstyapılar derzli donatısız, derzli donatılı ve sürekli donatılı plak olmak üzere üç farklı şekilde uygulanabilir. Derzli donatısız rijit üstyapı plaklarında 125-350 milimetre kalınlığında 3-6 metre boyunda donatı demiri içermeyen plaklardan oluşur. Bu plak kalınlığı 100-200 milimetre olan ve granüler malzeme, çimento veya bitümlü temel tabaka üzerine inşa edilir (Ecevit, 2007). Derzli donatısız rijit üstyapı plak tipinde derz aralıklarının birbirine yakın olması, çatlakları en aza indirmek ve derz açıklıklarını düşürmek için yapılır. Düşük trafikli yollarda kullanım alanı bulmaktadır (Britpave Association, 2002).

Derzli donatılı rijit üstyapı plaklarında hasır donatı kullanılır. Bu plaklarda donatı kullanımına bağlı olarak, derz mesafesi 8-30 metreye kadar arttırılabilirken, artan derzler arasında ki mesafe sebebiyle plaklarda oluşacak çatlak sıklığı da artmaktadır (Ecevit, 2007).

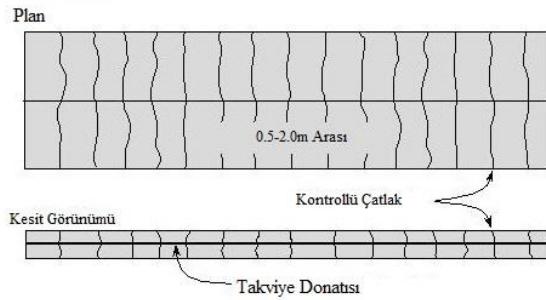
Sürekli donatılı rijit üstyapı plaklarında enine derzler bulunmamakla beraber derzli donatılı rijit üstyapı tipine göre kullanılan donatı miktarı daha yüksektir. Yüksek olan donatı oranına rağmen çatlak oluşumu engellenemekle birlikte kontrol altında tutulabilir. Bu tip plaklarda, plak kalınlığı 150-250 milimetre olup kullanılan donatı çeliği miktarı genellikle kesit oranının %5-7'si kadardır (Kozak, 2011).



(a) Derzli Donatısız Beton Kaplama



(b) Derzli Donatılı Beton Kaplama



(c) Sürekli (Derzsiz) Donatılı Beton Kaplama

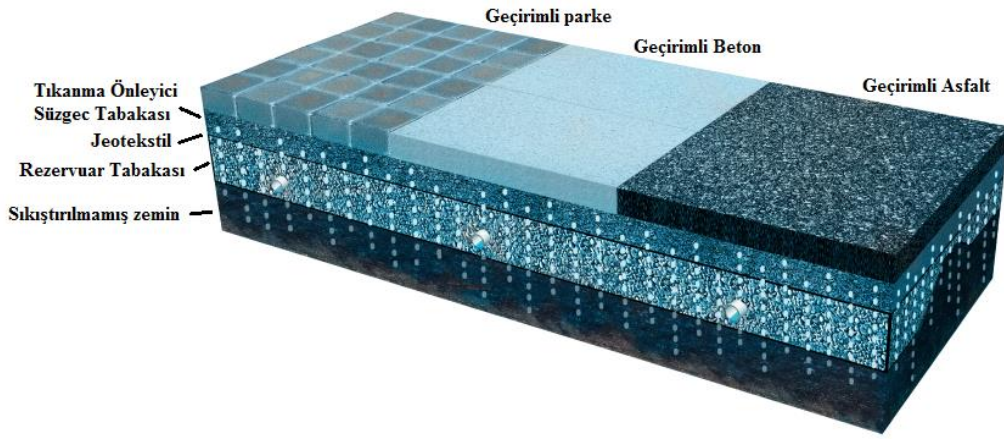
Şekil 2.8: Rijit üstyapı (Beton Kaplama) tipleri oluşumu (URL-9, 2013; Garber, 2014).

2.2 Geçirimli (Poroz) Üstyapı

Geleneksel kaplama tipleri yıllık yağış miktarı fazla olan bölgelerde yol yüzeyinden suyun drene edilmesinde yetersiz kalmaktadır. Sürüş güvenliği ve konforunda azalmaya, görüş

mesafesinde olumsuzluklara ve kazalara sebep olmaktadır (Claytor, 2000).

Geçirimli üstyapı sahip olduğu agrega gradasyonuna bağlı olarak geleneksel asfalt kaplamalara göre daha fazla boşluk oranı sunmaktadır. Sahip olduğu bu boşluklu yapısı sayesinde kaplama yüzeyinde biriken suyun hızlı bir şekilde en yakın drenaj tesisine iletilmesini sağlamaktadır. Drenajın yeterli düzeyde olabilmesi için kaplama eğiminin, alttemel ve temel tabakalarında kullanılacak stabilize malzemenin fiziksel özelliğinin iyi belirlenmesi gereklidir. Geçirimli üstyapı, esnek ve rijit kaplamadan imal edilebileceği gibi kilitli parke sistemlerden de yapılabilir. Bu üç sisteme ait üstyapı kesiti Şekil 2.9'de verilmiştir.

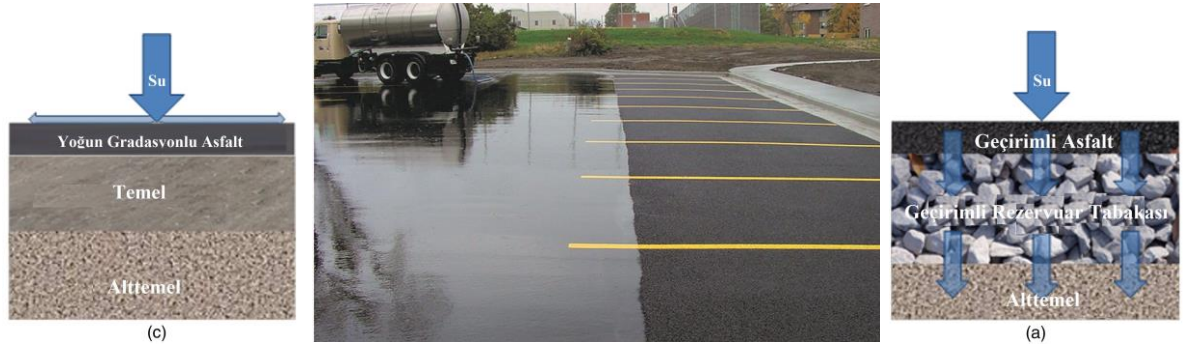


Şekil 2.9: Geçirimli esnek üstyapı enkesiti (URL-10, 2018).

Geçirimli esnek kaplama, bitüm bağlayıcı malzeme içeren bir BSK tipidir. Geçirimli esnek kaplamayı geleneksel esnek kaplamadan ayıran en önemli etken boşluk oranıdır. İçerdiği boşluklar sayesinde, kaplama yüzeyine gelen yağış sularının çok daha hızlı drene olmasını ve tekerlek ile yol yüzeyi arasındaki etkileşimden meydana gelen gürültünün büyük bir kısmının emilmesini sağlar. Şekil 2.10'deki fotoğrafta bir park alanında geçirimli esnek üstyapı olan kesimde yüzey suyunun hızlı bir şekilde drene edildiği görülmektedir.

Geçirimli beton kaplama, geçirimli asfalt kaplama gibi birbirine bağlı boşluklar içeren bir yapıya sahiptir. Bu yapıda bağlayıcı olarak bitümden farklı olarak portland çimentosu kullanılır. Betonda sadece iri agrega veya çok az miktarda ince agrega kullanılarak hazırlanmakta olup bu sayede geleneksel betona göre daha çok hava ve su geçirimsizliği sağlamaktadır (Özcan, 2017). Su geçirimsizlik özelliği ile kaplama üzerinde biriken suların

yer altına iletilmesini sağlar (Şekil 2.11). Kaldırımlar, otoparklar ve yollarda geniş kullanım alanına sahiptir.



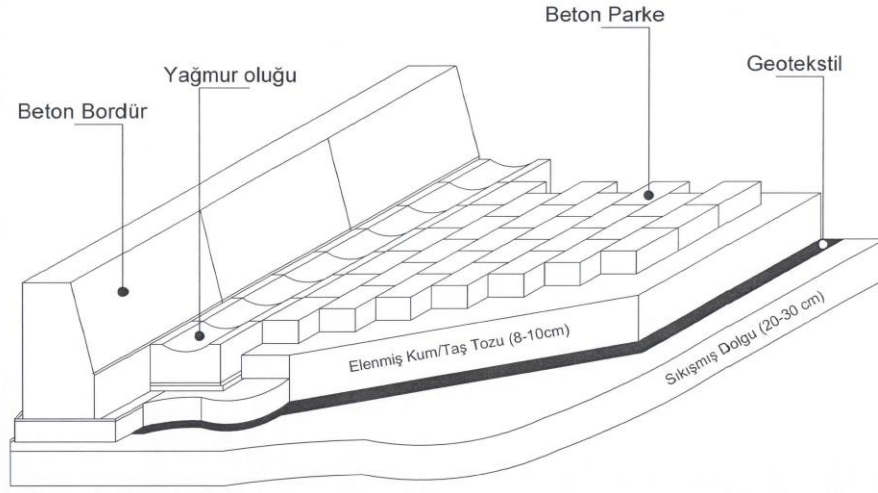
Şekil 2.10: Geçirimli ve geleneksel esnek üstyapı yüzey drenajı (URL-11, 2017).



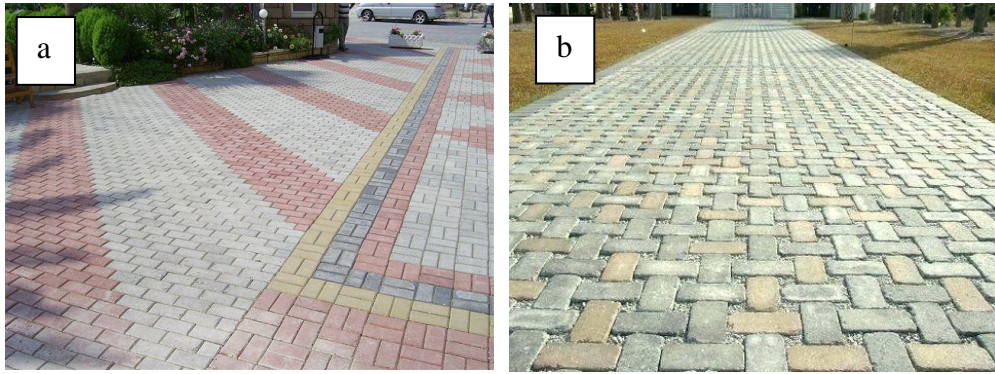
Şekil 2.11: Geçirimli rijit (beton) kaplama ve geleneksel beton kaplama yüzey görünümü (URL-12, 2018).

Parke ile yol yapımı Romalılardan günümüze kadar gelmiş bir üstyapı tipidir. Kilitli parke taşı uygulamasının, parçalar halinde bir bütün sağladığından geçirimsizlik, yüksek dayanım ve tekerlek yuvarlanmasına daha düzgün yüzey sağladığından, özellikle trafik hızının düşük olduğu şehir içi yollarda avantajlı olduğu görülmektedir (Tunç, 2007). Şekil 2.12’de kilitli parke üstyapı sistemine ait kesit verilmiştir.

Beton ile üretilen parke taşları dayanıklılığı, çeşitli biçim ve renklerde yapılabilmesi, hızlı üretimi, hızlı yerleştirilmesi ve geri dönüşümü sağlanabildiği için ön plandadır (Semiz, 2006). Parke sistemlerin geçirimsizliğinin artırılmasında, parkeler arasındaki kilit payları fazla olacak şekillerde tasarlanmaktadır (Şekil 2.13). Böylelikle geçirimsiz parke sistemlerde, Şekil 2.14’de görüldüğü gibi yağmur suyu yüzeyden hızlı bir şekilde drene edilebilmektedir.



Şekil 2.12: Geleneksel kilitli parke sistemine ait üstyapı kesiti.



Şekil 2.13: Geleneksel ve geçirimli parke kaplama uygulama örnekleri. a. geleneksel tip beton parke uygulaması, b. geçirimli tip beton parke uygulaması (URL-13, 2019).



Şekil 2.14: Geçirimli kilitli beton parke kaplama yüzey suyu drenajı (URL-14, 2013; URL-15, 2019).

BÖLÜM 3

GEÇİRİMLİ ASFALT KAPLAMALAR

Bu bölüm çerçevesinde, karayolu güvenliğinin esas tutulduğu geçirimli kaplamalar, konfor ve çevresel etkiler, bakım-onarım ve ekonomik özellikler açısından ele alınarak, tasarım kriterleri ve yapım aşamaları hakkında bilgiler verilmiştir.

Geçirimli asfalt kaplamalar, yol yüzeyinde biriken ve enine eğim ile uzaklaştırılmayan su filminin oluşturacağı kaza riskini azaltmak amacıyla geliştirilmiştir. Ayrıca, yağış sularının birikmesi sonucunda oluşacak olumsuzlukların önlenmesi amacıyla otopark alanlarında da uygulanmaktadır. Böylelikle yağış sularının yeraltı suyunu beslemesine de katkı sağlanmaktadır. Geçirimli asfalt kaplama, karışım içerisinde kullanılan iri agrega oranının, ince agrega ve filler malzemesi oranına göre oldukça yüksek olduğu, kesikli gradasyona sahip bitümlü sıcak karışım kaplama tipidir. Bu kaplama tipi için amacına uygun olarak %20 civarında boşluk oranı sağlanması hedeflenmektedir.

3.1 Genel Bilgiler

Geçirimli asfalt 1950’li yıllarda Amerika Birleşik Devletlerinde kızıklamayı önlemek amacıyla geliştirilmiştir. 1970’li yıllara doğru önem kazanarak 30 eyalette kullanımı amaçlanmıştır. Yapısından kaynaklı, kaplama performansında önemli olan bitümlü bağlayıcı karakteristiklerinin yetersiz kalması 1980’li yıllarda geçirimli asfalt uygulamalarında bir azalmaya sebep olsa da modifiye bitüm teknolojisindeki gelişmeler geçirimli asfalt kaplama uygulamalarının kullanımının yaygınlaşmasını sağlamıştır (Kandhal ve Mallick, 1998).

Avrupa ülkelerinde de geçirimli asfalt kaplama üzerinde çalışmalar yürütülerek, boşluk oranı yüksek olan “Avrupa Poroz Asfalt Karışımı”(Porous European Mix-PEM) geliştirmiştir (EAPA, 2019). Avrupa ülkelerinin yıllar bazında geçirimli asfalt kaplama uygulama miktarları yer aldığı Tablo 3.1 incelendiğinde, bu kaplama tipinin Belçika, Çek Cumhuriyeti ve Danimarka gibi ülkelerin uygulamaların yıllara göre süreklilik gösterdiği ve bir çok Avrupa ülkesinde uygulama alanına sahip olduğu görülmektedir.

Türkiye’de geçirimli asfalt kaplamaların yaygın bir kullanımı olmamakla birlikte, Şişli tercihli/İstanbul yolunda ve Fenerbahçe Parkı/İstanbul civarında deneme amaçlı uygulamaları gerçekleştirilmiştir (Öztürk, 2008).

Tablo 3.1: Avrupa ülkelerinin yıllara göre geçirimli asfalt kaplama uygulama miktarları (EAPA, 2019).

Ülke	İnşa Edilen Geçirimli Asfalt Alanı (milyon m ²)						
	2001 yılı	2003 yılı	2005 yılı	2009 yılı	2011 yılı	2015 yılı	2017 yılı
Avusturya	-	-	0,40	-	-	-	-
Belçika	1,00	-	0,50	0,26	0,21	0,40	0,60
Çek Cumhuriyeti	0,50	0,40	0,30	0,30	0,20	0,05	0,04
Danimarka	0,20	0,10	0,20	0,13	0,17	0,30	0,20
Lüksemburg	-	-	-	-	0,04	0,02	-
Hollanda	5,00	5,70	-	-	-	-	-
Slovenya	0,02	-	-	-	-	0,10	0,05
İspanya	-	-	13,00	8,90	-	-	-
İtalya	1,00	-	5,00	1,90	-	-	-
Slovakya	-	0,11	-	-	-	0,00	-
İsveç	-	0,20	0,40	0,20	0,20	-	-
İsviçre	11,00	2,20	1,20	-	1,75	-	-

3.2 Fonksiyonel (İşlevsel) ve Performans Özellikleri

Karayolu üstyapısının tasarımında, önceleri güvenlik ön planda iken günümüzde konfor, çevreye uygunluk ve ekonomiklik gibi işlevsel özellikler de önemli hale gelmiştir. Bu bölümde, geçirimli asfalt kaplamalar sağlamış olduğu güvenlik özellikleri yanında, konfor, çevre uyum ve ekonomik açıdan da ele alınmaktadır.

3.2.1 Güvenlik Özellikleri

Trafik kurallarına uyularak tüm hava koşullarındaki sürüş esnasında, yolu kullananların can ve mal güvenliğini sağlayan kaplamalara güvenli kaplama sistemleri denilebilir. Karayolu güvenliğinin artırılabilmesi tüm hava koşullarına uygun kaplamaların geliştirilmesine bağlıdır. Karayolu güvenliği açısından en önemli parametre, taşıtların hareketi sırasında taşıt tekerlekleri ile kaplama arasında temas halinde bulunan alanda

oluşan sürtünme kuvvetidir. Kaplama yüzeyinden drene edilemeyen su tabakası sürtünme kuvvetini azaltacak ve fren mesafelerinde önemli artışlara sebep olacaktır. Fren mesafelerinin artması ve sürüş hakimiyetinin azalmasıyla kaza oranları da artmaktadır. Amerika'nın Teksas eyaletinde bir deneme kesiminde geçirimli asfalt kaplama uygulaması öncesi ve sonrasında belirlenen kaza oranları karşılaştırıldığında, özellikle yağışlı havada kazaların %93 oranında azaldığı görülmektedir (Tablo 3.2).

Tablo 3.2: Amerika'nın Teksas eyaletinde bir deneme kesiminde geçirimli asfalt kaplama öncesinde ve sonrasında belirlenen kaza oranları (Rand, 2011).

Yıllar	2001	2002	2003	2004	2001-2003 Ortalaması	2004 Yılındaki % Değişim
Toplam Kaza Sayısı	25	48	36	17	36,30	-54,60
Yağsız Havadaki Kazalar	10	22	13	15	15,00	0,00
Yağmurlu Havadaki Kazalar	15	26	23	2	21,30	-93,00
Ölümler	0	1	5	0	2,00	-75,00
Yaralanmalar	25	16	21	6	20,70	-63,70
Yıllık Yağış (cm)	109	91	54	132	85,00	42,40

Yağmurlu havalarda taşıtların hareketi sonucu taşıt tekerleklerinden sıçrayan suların geriden gelen seyir halindeki araçlara sprej etkisi yatarak sis oluşumuna neden olmakta ve görüş mesafesini önemli ölçüde azaltmaktadır. Şekil 3.1'de yağışlı havalarda taşıtların sebep olduğu sprej etkisiyle, geçirimli ve geleneksel kaplamaların görüş mesafesindeki değişim görülmektedir. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi yol yüzeyinde biriken suların sıçratılması ile sürücü ve yayalar için oluşacak olumsuzlukları ortadan kaldırmaktadır.



Şekil 3.1: Yağışlı havada geçirimli asfalt ile geleneksel asfalt kaplamalarda görüş mesafesi (Rand, 2011).

Geçirimli asfalt kaplama, yüzeyine gelen suyun hızlı bir şekilde drenajını sağlayarak, karşı yönden gelen taşıt farlarının oluşturduğu ışık yansıması ve çevresel ışıklandırmalardan kaynaklanan yansımaları önleyerek görüş mesafesini iyileştirmektedir. Geçirimli asfalt kaplamalar, kaplama yüzeyinde su birikimini engelleyerek yol güzergahında izin verilen hız limitleri dahilinde güvenli bir trafik akışını sağlamaktadır.



Şekil 3.2: Geleneksel kaplama yüzeyinde oluşan su birikintilerinden kaynaklanan olumsuzluk örnekleri (URL-16, 2011; URL-17, 2018).

3.2.2 Konfor ve Çevre ile Uyum Özellikleri

Sürücü ve yolcuların seyahat sırasında rahatsız edici etkenlerin belirli bir düzeyin altında kalması istenir. Konforlu bir yolculukta en önemli etken kaplama yüzey özellikleridir. Kaplamadaki düzensizlikler, bozuk imalatlar ve yamalar; taşıt içine titreşim olarak yansdığından konfor üzerinde direkt etkilidirler.

Karayolu ulaşımının en önemli çevresel etkilerinden birisi de gürültü kirliliğidir. Geçirimli asfaltın boşluklu yapısı sayesinde taşıt tekerleği ve kaplama arasındaki sürtünmeden meydana gelen gürültünün bu boşluklar tarafından absorbe edilmesi ile geleneksel kaplamalara göre daha düşük gürültü seviyeleri oluşacağından, taşıt içerisinde ki konforu artırırken çevresel gürültü kirliliğini azaltacaktır (Raaberg, 2001).

Şehirleşmenin yoğun olduğu bölgelerde yağmur suyunun yeraltı suyuna sızması yok denecek kadar az olduğundan, yağış suyu büyük oranda geçirimsiz yüzeylerde toplanmaktadır. Geçirimli asfalt kaplamalar, otopark ve kaldırım uygulamaları ile yüzey akış oranını azaltarak, yağmur suyunun bir kısmının sızma yoluyla yeraltı suyunu beslemesine olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla yerleşim bölgelerinde ki kaplama uygulamalarında tercih edilmesi bu açıdan önemli katkı sağlayacaktır.

3.2.3 Bakım-Onarım Özellikleri

Yol üstyapısı periyodik bakım ve onarıma ihtiyaç duymaktadır. Bakım ve onarım maliyetlerinin az ve periyotlarının uzun olması, kaplama genel maliyetinin düşmesini sağlar. Bakım ve onarım maliyetlerinin artması durumunda kaplamanın servis ömrünü tamamladığı kabul edilebilir.

Geçirimli asfalt kaplamanın boşlukları zamanla kir, kum, karlı havalarda kullanılan tuzlar, soğuk havalarda suyun donarak boşlukların tıkanması, kaplamaya dökülen maddeler vb. sebeplerle zamanla kapanabilmektedir. Bu boşlukların kapanması ile permeabilite özelliği azalacağından kaplama işlevselliği azalacaktır. Dolayısıyla, geçirimli asfalt kaplamalar belirli aralıklarla basınçlı su ile yıkama, süpürme ve vakumlama gibi yöntemlerle bakım uygulanması gerektirmektedir (Hamzah, 2005).

Geçirimli asfalt kaplamalarda onarım yöntem ve uygulamaları benzerlik göstermektedir. Geleneksel asfalt kaplamalarda meydana gelen kaplama bozulmaları geçirimli asfalt kaplamalarda da görülmekle birlikte yüksek boşluk oranına bağlı olarak koparak parça kaybı yani sökülmeler daha sık görülmektedir. Bu durumda en etkili onarım yöntemi hasarlı bölgeyi kaldırmak ve yeniden uygulama yapmaktır.

3.2.4 Ekonomik Özellikleri

Geçirimli asfalt kaplama güvenli bir kaplama türü olması ve gösterdiği yüksek performanslara rağmen, fazla tercih edilen bir kaplama türü değildir. Bunun en büyük nedeni de geleneksel kaplamalara göre maliyetinin yüksek olmasıdır. Üretim ve imalat aşamaları geleneksel kaplamalar ile aynı olmasına rağmen, periyodik bakım aralığının kısa olması ve kaliteli malzeme gerekliliği genel maliyetleri arttırmaktadır. Karışımdaki yüksek bitüm oranı, kaliteli agrega, modifiye bitüm ve fiber katkı gibi malzeme gereklilikleri üretim maliyetinin artışında öne çıkan faktörlerdir. İri agrega miktarının fazla olması yük dağılımının bağlayıcı malzemeden ziyade agregalar arasında oluşması, kullanılacak agreganın bazalt, granit gibi sert ve dayanıklı malzeme olmasını gerektirmektedir.

Geçirimli asfalt kaplamada boşluk oranının yüksek olması bitüm muhtevasını arttırmakta ve modifiye bitüm kullanımına ihtiyaç duyulduğundan bağlayıcı maliyetlerini

yükseltmektedir. Kullanılan agrega ve bitümün performansları yüksek olsa da hava ile temas halindeki yüzey alanı fazla olduğundan suya daha fazla maruz kalarak servis ömrünü düşürür. Geçirimli üstyapı sisteminin tamamı düşündüğümüzde alt tabakalarda kullanılan ilave süzgeç tabakası, geotekstil ve drenaj boru sistemleri de maliyeti arttıran diğer bir unsurdur.

Yol yüzey pürüzlülüğün artması her ne kadar yakıt tüketiminin artacağını düşündürse de yağışlı havalarda trafik hızı ve akımında sağlanacak süreklilik yakıt tüketimini olumlu etkileyecektir (Less, 1978).

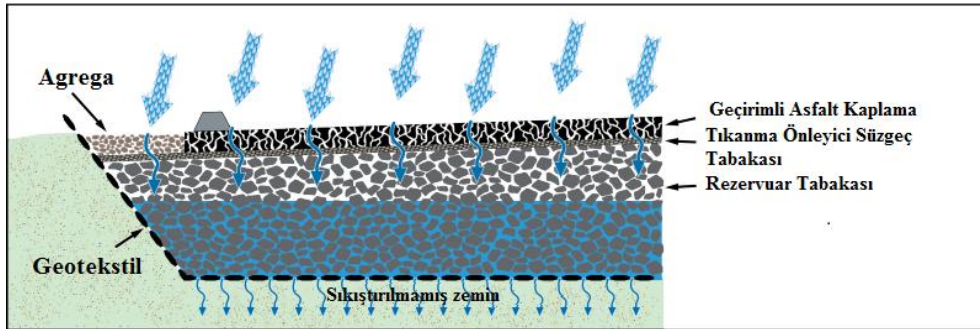
3.3 Yapısal Özellikler ve Tasarım Kriterleri

Geçirimli esnek üstyapının yapısal özellikleri, geçirimli asfalt kaplama karışım tasarım ve kriterleri geleneksel esnek üstyapı ve BSK'lerden farklılıklar göstermektedir.

3.3.1 Yapısal Özellikler

Şekil 3.3'de görüldüğü gibi geçirimli asfalt kaplama; tıkanma önleyici filtre, rezervuar ve geotekstil malzeme tabakalarını içeren geçirimli esnek üstyapı sistemi, geleneksel yol üstyapısından farklılık göstermektedir.

Geçirimli üstyapı sistemi yeraltı suyunun 2 ila 4 metre üstünde inşa edilmelidir. Bu mesafenin yetersiz kaldığı durumda, geçirimsizliği yüksek taş dolgu tabakası oluşturulmalıdır. Taban zemini üzerine geçirimsizliği azaltacak sıkıştırma işlemlerinden kaçınılmalıdır.



Şekil 3.3: Geçirimli esnek üstyapı enkesiti (URL-18, 2019).

En üst tabaka olan geçirimli esnek kaplama tabakası 10-15 cm kalınlığında ve yaklaşık %20 boşluk oranına sahip olmalıdır. Kaplama yatay eğimi %5 den az olmak koşuluyla kaplama karışımında %6 bitüm oranı kullanılarak %100 kırma taştan imal edilmelidir. (FHWA, 2015; WAPA Association, 2015; NAPA, 2019).

Uygulama sırasında hava sıcaklığı en az 10°C'nin üzerinde olması gerekmektedir. Sıkıştırma işlemi karışım sıcaklığı 115 - 125°C arasında uygulanmaktadır. Kaplamanın permeabilite değerinin 352 ila 6000 ft/gün değer aralığını sağlamalı ve permeabilite değerini azaltacak aşırı sıkıştırma işlemlerinden kaçınılmalıdır (WAPA Association, 2015; NAPA, 2019).

Kaplama tabakası altında bulunan tıkanma önleyici filtre tabakası, 2,5-5 cm kalınlığında, kırma taş agregadan imal edilmektedir. Kaplama tabakasından sızan suyu filtreleyerek suyun kirletici etkilerine ve tıkanmaya karşı bir alt tabaka olan rezervuar tabakası korunmaktadır (FHWA, 2015; NAPA, 2019).

30-90 cm kalınlığında kırmataş ile imal edilen rezervuar tabakasının %40 boşluklu yapıya sahip olması gerekmektedir. Rezervuar tabakası sızan suya geçici olarak depo görevi görürken aynı zamanda suyun iletilmesinde etkili bir tabakadır. Boşluklu yapısının uzun süreli geçirgenlik sağlayıp sağlamadığının kontrolü yapılmalıdır (FHWA, 2015; WAPA Association, 2015; NAPA, 2019).

Üstyapının en altında yer alan geotekstil tabakası, taban zemininden rezervuar tabakasına ince malzeme geçişini önleyerek rezervuar tabakasının boşluk oranının azalmasını önlemek amacıyla uygulanmaktadır (NAPA, 2019).

3.3.2 Karışım Tasarımı

Geçirimli esnek üstyapı sisteminin en önemli tabakası olan geçirimli asfalt kaplama karışım tasarımında ilgili gerekliliklerin sağlanması için kullanılan agrega, bitüm ve katkı malzemelerinin özelliklerinin belirtilen standartlar çerçevesinde sağlanması gerekmektedir. Bu bölümde, Avrupa ve dünyadaki uygulamalar araştırılarak, geçirimli asfalt kaplama karışım tasarımı ile ilgili parametreler ve malzeme özellikleri belirtilmiştir.

Geçirimli asfalt kaplama, karışım amacına uygun olarak tasarımında yeterli boşluk oranını sağlayabilecek agrega gradasyonunun seçilmesi önemlidir. Dünyada farklı hidrolik geçirgenlik düzeylerinin elde edilmesi amacıyla farklı agrega karışım gradasyonları uygulandığı görülmektedir. Bazı Avrupa ülkelerine ait geçirimli asfalt gradasyon limitleri ve dünyadaki bazı ülkeler ve kuruluşlar tarafından uygulanan agrega karışım gradasyonları sırasıyla Tablo 3.3 ve Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.3: Türkiye ve bazı Avrupa ülkelerine ait geçirimli asfalt karışım gradasyon limitleri (Alvarez vd., 2006; KTŞ, 2013).

Elek Boyutu	Gradasyon Tipleri								
		İngiltere	İspanya	Danimarka			Türkiye		
No (inç)	mm	PA 6/20	PA 2/10	PA 12	PA 0/5	PA 0/8	PA 0/16	Tip-3	Tip-4
1,24	31,5	100	-	-	-	-	-	-	-
0,79	20	95-100	-	100	-	-	100	-	-
¾	19,00	-	-	-	-	-	-	100	-
5/8	16	-	-	-	-	-	97	-	-
0,55	14	55-75	100	-	-	-	-	-	-
½	12,5	-	-	70-100	-	-	55	85-95	100
7/16	11,2	-	-	-	-	100	30	-	-
0,39	10	-	90-100	-	-	-	-	-	-
3/8	9,5	-	-	-	-	-	-	5-15	85-95
5/16	8	-	-	38-62	100	94	12	-	-
¼	6,3	20-30	40-55	-	-	-	-	-	-
0,22	5,6	-	-	-	99	35	9	-	-
No:4	4,75	-	-	-	-	-	-	5-15	5-12
No:5	4	-	-	13-27	65	11	9	-	-
No:10	2	5-12	19-25	9-20	10	9	8	5-10	5-10
No:18	1	-	-	-	9	8	8	-	-
No:35	0,5	-	-	5-12	8	7	7	-	-
No:60	0,25	-	-	-	7	6	7	-	-
No:80	0,180	-	-	-	-	-	-	-	-
No:200	0,075	-	-	--	6	5,5	5	3-5	3-5
No:230	0,063	3,5-5,5	3-6	3-6	-	-	-	-	-

Geçirimli ve geleneksel asfalt karışımlar kullanılan agrega cinsine göre karşılaştırıldığında, geçirimli asfalt karışımlarda daha yüksek boşluk oranı istenildiğinden kullanılacak agreganın daha sert ve yüksek dayanıma sahip olması gerekmektedir. Kullanılacak agregaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi karışım tasarımı açısından önemlidir. Bu özellikler ve kabul edilen limit değerler ülkelere göre genel itibarıyla benzerlik göstermektedir. Türkiye ve bazı ülkelerde geçirimli asfalt karışım agregalarından istenilen fiziksel ve mekanik özellikler ve limit değerler Tablo 3.5’de verilmiştir.

Geçirimli asfalt karışımında ince agrega miktarının düşük olması, kaba agregaların

arasındaki boşluk oranlarını arttırmakta ve daha stabil bir karışım için geleneksel asfalt karışımlara göre daha yüksek optimum bitüm miktarlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca bu durum karışımlarda modifiye bitüm kullanma gerekliliğini de beraberinde getirmektedir.

Tablo 3.4: Dünyadaki bazı ülkeler ve kuruluşların kullandığı agrega karışım gradasyon limitleri (Özay ve ÖZTÜRK, 2013; Palmer ve Leed, 2013; WAPA Association, 2015).

Elek Boyutu		Japonya	Çin	NAPA	WSDOT 2000	WAPA		
		Gradasyon Tipleri						
No (inch)	mm		OGFC 13	IS 115	CLASS D-1	CLASS D-2	12,5 mm NMAS	9,5 mm NMAS
¾	19,1	100	100	100	100	-	100	-
0.530	13,2	-	95	-	-	-	-	-
½	12,7	95		85-100	98-75	100	85-100	100
3/8	9,5	70	70	55-75	50-60	95-100	55-75	90-100
No.4	4,75	23	21	10-25	17-30	30-50	10-25	15-40
No.8	2,36	-	16	5-10	9-17	5-15	3-15	5-20
No.10	2,0	15	-	-	-	-	-	-
No.16	1,18	-	12	-	-	-	-	-
No.30	0,6	-	9,5	-	5-10	-	-	-
No.50	0,3	-	7,5	-	-	-	-	-
No.80	0,177	7	-	-	-	-	-	-
No.100	0,15	-	5,5	-	-	-	-	-
No.200	0,075	5	1,2	2-4	0-3	2-5	1-4	2-6

Tablo 3.6’de bazı ülkelere ait geçirimli asfalt karışımında kullanılan bitümlerin özellikleri gösterilmiştir. Türkiye’de yol yapımında kullanılan kaplama sınıfı bitümlerin özellikleri (TS EN 12591) Ek-1’de, modifiye bitümün fiziksel özellikleri (TS EN 14023) Ek-2’de verilmiştir (KTŞ, 2013).

Tablo 3.5: Geçirimli asfalt karışımında kullanılacak agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri ve limit değerleri (Alvarez vd., 2006; KTŞ, 2013; Moriyoshi vd., 2014).

Deney	ABD	Japonya	Çin	Türkiye	Güney Afrika
	Şartname Limitleri				
Parçalanma Direnci Kaybı (Los Angeles), %	< 12	-	-	≤ 25	< 21
Aşınma Direnci	≤ 25	< 30	< 30	≤ 20	< 25
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, %	-	< 12	< 12	≤ 10	-
Kırılmışlık, Ağırlıkça %	-	< 5,0	< 5,0	100	-
Yassılık İndeksi	≤ 15	< 10	< 20	< 20	-
Cilalanma Değeri, %	> 38	-	-	≥ 50	> 45
Soyulma Mukavemeti	-	-	-	≥ 80	-
Su Emme, %	≤ 2,0	< 3,0	< 3,0	≤ 2,0	-
Kaba agrega Özgül Ağırlık	-	> 2,45	> 2,50	> 2,674	-
Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler, %	-	< 0,25	-	0	-

İngiltere, İspanya, Danimarka, İsviçre, Hollanda, Belçika ve İtalya'da geçirimli asfalt karışımlarında kullanılan bağlayıcı bitüm malzemesinin penetrasyon grupları ve optimum bitüm içeriği Tablo 3.7'de gösterilmiştir.

Tablo 3.6: Japonya, Çin, ABD ve Türkiye'de geçirimli asfalt karışımında kullanılan bitümlü bağlayıcı özellikleri ve limit değerleri (Moriyoshi vd., 2014; Tanzadeh ve Shahrezagamasaei, 2017; Zhang vd., 2018).

Deney	Japonya	Çin	ABD	Türkiye	
				PMB 70-16	PMB 76-16
Penetrasyon, 25°C, 100 g.	> 41	20-40	60-70	45-80	25-55
Yumuşama Noktası, °C	> 80,00	>82	49-56	≥ 60	≥ 65
Parlama Noktası, °C	> 260	> 230	> 232	≥ 220	≥ 220
Yumuşama Noktası Farkı	> 50	> 20		≤ 5	≤ 5
Elastik Geri Dönme, 25°C	-	> 95	-	≥ 60	≥ 60
Kuvvet Ölçümlü Düktilite	-	-	-	≥ 0,5	≥ 0,5
Dinamik Kesme Reometresi (DSR)	-	-	-	≥ 70	≥ 76
Özgül Ağırlık	-	-	-	1-1,10	1-1,10

Tablo 3.7: İngiltere, İspanya, Danimarka, İsviçre, Hollanda, Belçika ve İtalya'da geçirimli asfalt karışımlarında kullanılan bağlayıcı bitüm malzemesinin penetrasyon grupları ve optimum bitüm içeriği (Alvarez vd., 2006).

Ülke	Penetrasyon Grubu	Optimum Bitüm İçeriği
İngiltere	PA 6/20	PA 6/20
	100/150, 160/220	3,7-4,5
	PA 2/10	PA 2/10
	100/150, 160/220	5,2
İspanya	PA 12	PA 12
	60/70 + SBS	4,5-5,5
	60/70 + EVA	4,5-5,5
	80/100 + SBS	4,5-5,5
	80/100 + EVA	4,5-5,5
Danimarka	PA 0/5	PA 0/5
	50/100- 75 + SBS	6,3
	PA 0/8	PA 0/8
	50/100-75 + SBS	5,4
İsviçre	PA 0/16	PA 0/16
	50/100-75 + SBS	3,9
	PA S 16	PA S 16
	50/70	>3,6
	70/100	>3,6
	PA S 22	PA S 22
PmB 50/70-65 E	>3	
Hollanda	PA S 32	PA S 32
	PmB 70/100-60 E	>3
Hollanda	-	4,5
Belçika	PmB 50/70	4,3-5,3
İtalya	80/100 + SBS	4,0-6,0

Marshall, ASSTHO, TxDOT ve PradoWin dünya genelinde asfalt karışım metodu olarak kabul görmüş ve Türkiye dahil olmak üzere birçok ülkede kullanılan karışım metotlarından bazılarıdır (Alvarez vd., 2006).

Geçirimli Asfalt Kaplama (GAK) karışımlarının tasarım değerlerini ve karışımın performansının belirlenmesi için Permeabilite, Cantabro aşınma kaybı, dolaylı çekme, nem hasarına karşı direnç ve boşluk oranı tayini deneyleri uygulanmaktadır. Tablo 3.8’de farklı ülke ve kuruluşların belirlediği GAK tasarım kriterleri ve limitleri verilmiştir. Farklı ülkelerin uygulamaları, en önemli tasarım kriterinin boşluk oranı ve permeabilite olduğu ve boşluk oranı değerinin %18-22 arasında değiştiği görülürken, permeabilite değerinin 0,1 cm/s değerinden büyük olması gerektiği belirtilmektedir.

Tablo 3.8: Farklı ülke ve kuruluşlara ait geçirimli asfalt karışım tasarım kriterleri (Alvarez vd., 2006; Moriyoshi vd., 2014).

Ülke ve Kuruluş	Boşluk Oranı %	Permeabilite	Cantabro %	İndirek Çekme	Nem Hasarı %	Tekerlek İzinde Oturma
NCAT (ABD)	> 18	> 100 m/gün	Yaşlı < 30 Genç < 20	> 0	> 80	-
TxDOT (ABD)	-	-	< 20	> 0	-	-
Türkiye	> 20	-	-	> 0	> 80	30.000 d. %6
Danimarka	Şart yok	0,15-0,50 cm/s	-	> 0	-	-
Hollanda	> 20	-	-	> 0	-	-
Avustralya	> 20	-	Yaşlı < 30 Genç < 20	> 0	-	-
Belçika	> 21	-	< 20	> 0	-	-
Japonya	> 20	> 0,1cm/s	< 20	> 0	-	-
İsviçre	18-22	-	-	> 0	70-80	-
İngiltere	-	0,12-0,40 cm/s	-	> 0	-	-
İspanya	> 20	-	< 20	> 0	-	-

GAK karışımlar yapısı itibariyle en yaygın bozulma tipi olarak, sökülmelere maruz kalmaktadır. Sökülme direncinin belirlenmesinde genel olarak uygulanan Cantabro aşınma kaybı değerinin %20’den küçük olması beklenirken, yaşlanmış karışımlar için bu sınır %30’dan küçük olması istenilmektedir. Karışım dayanımının belirlenmesinde, sökülme direncinin de bir ölçüsü niteliğinde olan dolaylı çekme değeri için bir sınır değeri belirtilmemekle birlikte, karışımların karşılaştırılmasında uygulanan ve bitüm filminin çekme direnci ve dolayısıyla optimum bitüm değerinin belirlenmesinde önemli bir göstergedir. GAK karışımlar, geçirimsiz asfalt karışımlara göre daha büyük yüzey

alanlarında suya maruz kalmaktadır. Dolayısıyla suyun vereceği hasarı belirlemek için uygulanan nem hasarı deneyi ile belirlenen koşullu/koşulsuz numunelere ait nem hasarı oranının 0,80'den yüksek olması istenilmektedir.

3.3.3 Yapım ve Bakım Aşamaları

Karışım, uygulama alanına getirilme sürecinde sıcaklığının korunmasına dikkat edilir ve finişer aracılığı ile serilir. Serim işleminin tamamlanmasından hemen sonra statik ağırlığı 10 ton olan en az iki adet çelik bandajlı silindir kullanılarak sıkıştırılır. Silindirleme işlemi karışım sıcaklığı 155 °C'nin altına düşmeden önce başlanacak ve karışım sıcaklığı 120 °C'ye düşmeden tamamlanacaktır. Silindirlerin, finişerin arkasında en fazla 100 m mesafe içerisinde çalışacak olup lastik tekerlekli silindirler kullanılmayacak, vibrasyon uygulanmayacak ve aynı zamanda silindirlerin yapışmayı önlemek için sulama sistemi bulunacaktır. Agreganın kırılmasını önlemek için gerektiğinden fazla sıkıştırma işlemi yapılmayacaktır. Karışımın serilmesi ve sıkıştırılması süresince ve ilk 24 saat süresince yol trafiğe kapalı tutulacaktır. Uygulama yapılan bölge çok sıcak ise kapalı tutulacağı süre daha da arttırılabilir (KTSŞ, 2013).

Kaplama yüzeyinde buzlanma etkisini engellemek için tuz veya diğer buz çözücülerin kullanımı ve yanlış kar temizleme işlemlerinden kaçınılmalıdır. Vakumlama ve süpürme işlemi uygulanarak bakım yapılmalı ve %10'dan fazla onarım gerektirmedikçe hasarlı bölgeye yama uygulaması yapılmalıdır (FHWA, 2015).

BÖLÜM 4

YOL ÜST YAPISINDA KULLANILAN ENDÜSTRİYEL ATIKLAR VE FERROKROM CÜRUFU

Doğal kaynakların gün geçtikçe azalması ve çevresel kaygılar sebebiyle atıkların geri dönüşümü günümüzde oldukça önem kazanmıştır. Özellikle, büyük boyutlara ulaşan endüstriyel atıkların faydalı bir şekilde geri kazanılabileceği alanların araştırılması ihtiyaç duyulmaktadır. Termik santral atıkları ve yüksek fırın cürufları inşaat sektöründe en yaygın olarak kullanılan endüstriyel atıklar arasında yer almaktadır. Literatürde, doğada soğumuş yüksek fırın cüruflarının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin doğal agregaya benzemekte olduğu ve yol üstyapısı inşaatında farklı tabakalarda kullanılabilirliğinin belirtildiği çalışmalar yer almaktadır. Bu bölümde, genel olarak yol üstyapısında kullanılabilirliği araştırılan endüstriyel atıklardan bahsedilmekte, ferrokrom cürufunun özellikleri ve kullanılabilirliği açısından yapılan önceki çalışmalara yer verilmektedir.

4.1 Atık Malzemelerin Yol İnşaatındaki Geri-Dönüşüm Uygulamaları

Artan şehirleşme ve modernleşme nedeniyle ulaşımın sağlanması büyük önem arz etmektedir. Yol yapımı için kullanılan dolgu malzemesi, agrega ve bağlayıcılar gibi doğal kaynakların yüksek miktarlarda kullanılması, doğal kaynak rezervlerini azaltmaktadır. Bununla beraber, günümüzdeki nüfus artışı, hızlı sanayileşme ve çeşitli faaliyetler nedeniyle kentsel katı atık miktarının önemli ölçüde artmıştır. İnsan nüfusu ile birlikte artan atık ürünlerin yok edilmesi önemli bir sorun haline gelmektedir. Biyolojik olarak parçalanamayan atıkların imha edilmesi zorlaşmakta ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımı için atık malzeme kullanımı teşvik edilmelidir. Gelecek nesiller için doğal kaynakları korumak ve çevre kirliliğinin önlenmesi amacıyla inşaat atıkları, tarım atıkları, endüstriyel atıkların ve evsel katı atıkların yol yapımı ve çeşitli inşaat işlerinde geri dönüşüm malzemesi olarak kullanılması büyük önem kazanmıştır (B. Mishra, 2015; R. S. Mishra, 2015; M. Mishra, 2016).

Yeni yapılacak yolların veya ömrünü tamamlamış ve yeniden inşası gereken yollarda yüksek miktarda doğal malzeme kullanımı gerektirmektedir. Doğal kaynakların kısmen

korunmasında, çevresel kirlilik oluşturan yüksek hacimlerdeki endüstriyel atıkların inşaat sektöründe, özellikle yol inşaatlarında faydalı bir şekilde geri dönüşüm ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Yol yapımında kullanılan atık malzemelerini, yeniden kullanılabilir inşaat atıkları, sanayi yan ürünleri ve düşük kullanılabilirlik değerine sahip doğal inşaat malzemeleri olarak üç grupta toplamak mümkündür. Endüstriyel atıklar başta olmak üzere karayolu yapımında kullanılacak atık malzemeler Tablo 4.1’de sunulmuştur (Aravind ve Das, 2007).

Tablo 4.1: Karayolu yapımında kullanılacak endüstriyel atık malzemeler (Aravind ve Das, 2007).

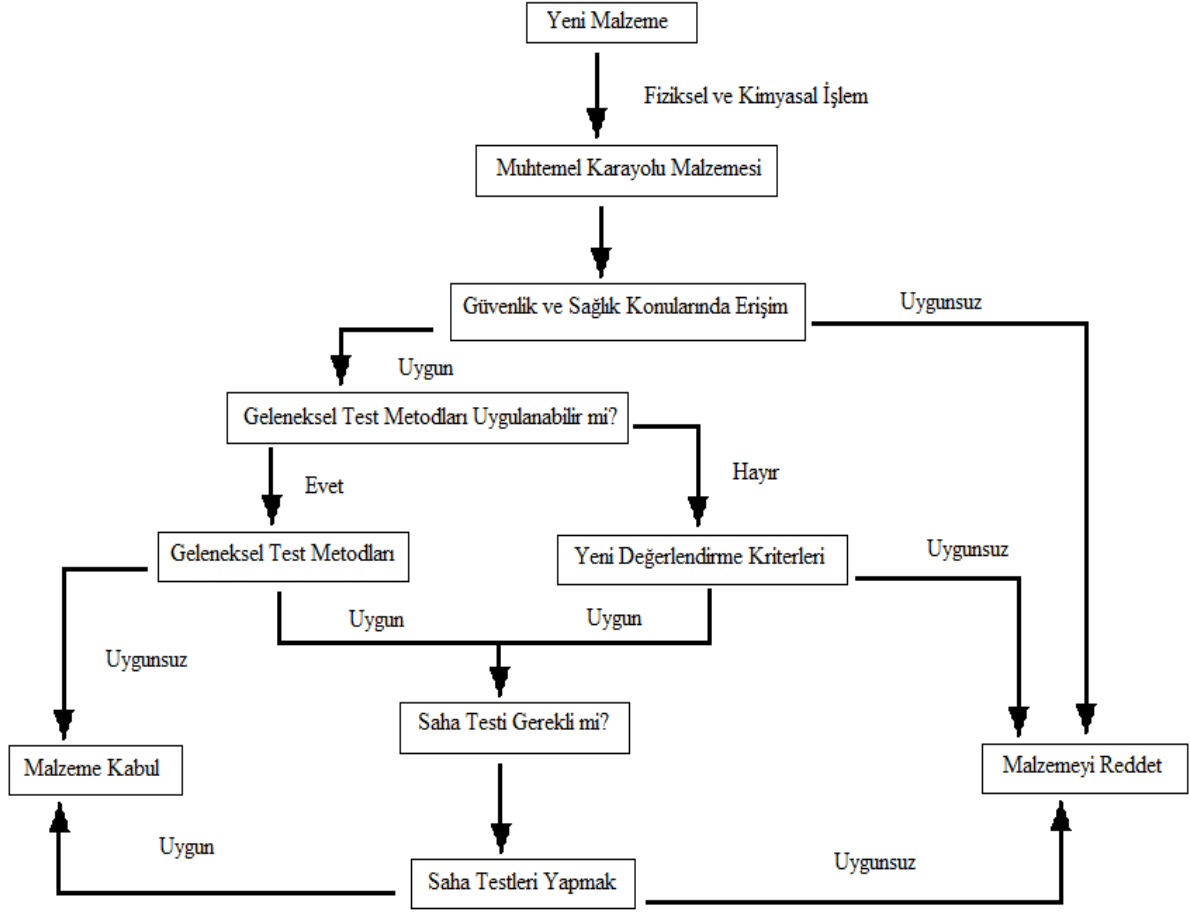
Atık Ürünü	Atık Kaynağı	Kullanım Yeri
Uçucu Kül	Termik Santraller	Bitümlü karışımlarda filler malzemesi, Betonda bağlayıcı malzeme, Temel zemini stabilizasyonu (Mroueh ve Wahlström, 2002).
Yüksek Fırın Cürufu	Çelik Endüstrisi	Temel ve Alttemel Tabakası, Taban zemini iyileştirme (Mroueh ve Wahlström, 2002).
İnşaat Atıkları	İnşaat Sektörü	Temel ve Alttemel Tabakası dolgu malzemesi (Sherwood, 1995).
Kömür Külü	Kömür Madenciliği	Filler malzemesi (Sherwood, 1995).
Atık Yağ	Petrokimya Endüstrisi	Bitüm katkısı (Sherwood, 1995).
Demir Cürufu	Demir Döküm Endüstrisi	Dolgu malzemesi, Betonda agrega olarak (Javed vd., 1994).
Fabrika Atığı	Maden İşleme sanayi	Dolgu malzemesi, Granüler temel ve alttemel malzemesi, bitümlü karışımlarda agrega (Aravind ve Das, 2007).
Çimento Fırın Tozu (Klinker)	Çimento Endüstrisi	Taban zemini iyileştirme, bitümlü karışımda filler (Hawkins vd., 2003).
Kullanılmış Motor Yağı	Otomobil Endüstrisi	Beton imalatında kalıp yağlama (Hamad vd., 2003).
Mermer Tozu	Mermer Endüstrisi	Bitümlü karışımlarda filler malzemesi (Okagbue ve Onyeobi, 1999).
Lastik Atığı	Otomobil Endüstrisi	Bitüm modifikasyonu, agrega (Aravind ve Das, 2007).
Cam Atığı	Cam Endüstrisi	Cam elyaf takviyesi, filler malzemesi (Aravind ve Das, 2007).
Demir Olmayan Cüruf	Maden İşleme sanayi	Dolgu malzemesi, bitümlü karışımlarda agrega (Aravind ve Das, 2007).
Kaolin	Tuğla ve Kiremit Endüstrisi	Filler malzemesi, bitümlü karışımlarda agrega (Aravind ve Das, 2007).

Endüstriyel atıkların karayolu yapımında kullanımı ile ilgili olarak Tablo 4.2’de bazı endüstriyel atıkların kullanımının avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir (Aravind ve Das, 2007).

Tablo 4.2: Karayolu yapımında kullanılacak endüstriyel atık ürünlerin avantaj ve dezavantajları (Aravind ve Das, 2007).

Malzeme	Avantajları	Dezavantajları
Uçucu kül	Düşük pozolanik özelliklerinden dolayı temel ve alttemel tabakasında bağlayıcı olarak kullanılabilir.	Homojenlik eksikliği, sülfatların varlığı, yavaş mukavemet gelişimi (Sherwood, 1995).
Metal Cürufu (a) Demir Cürufu (b) Demir Olmayan Cüruf	Yüksek Kayma Direnci, Hafiflik,	Beton işleri ve dolgu için uygun değildir. Tutarsız özellikler gösterebilir.
İnşaat ve Yıkım Atıkları	Garanüler temel agregası olarak kullanılabilir dayanıma sahiptir.	Tutarsız özellikler gösterebilir.
Yüksek Fırın Cürufu	Filler malzemesi olarak kullanılabilir.	Yeraltı suyunu kirletebilir (Nunes vd., 1996).
Kömür Atığı	-	Yanmamış kömürün yanması, beton yollarda sülfat etkisi (Sherwood, 1995).
Atık Yağ	-	Alevlenebilir.
Döküm Kumu	Asfalt karışımlarında ince agrega olarak kullanılabilir.	Düşük aderans sağlaması ve ağır metal içerir (Javed vd., 1994).
Fabrika Atığı	Bazıları doğal puzolaniktir.	Zehirli maddeleri bulundurabilir.
Çimento Fırın Tozu (Kilinker)	Neme maruz kaldığında sertleşme özelliği nedeniyle toprak iyileştirmesinde kullanılabilir (Hawkins vd., 2003).	Alkali yüzdesi nedeniyle korozyona neden olur.
Kullanılmış Motor Yağı	Beton içerisinde akışkanlaştırıcı olarak kullanılabilir (Hamad vd., 2003).	İyi organize edilmiş yağ toplama sistemi gerektirir (Hamad vd., 2003).
Lastik Atığı	Yaşlanmayı geciktirir.	İnce öğütme ve bitüm ile karıştırma için özel teknikler gerektirir, bazen ayrışma meydana gelir.

Karayolu sıkıştırılmış tabakalardan oluşur ve genellikle kullanılan malzemenin dayanımı alt tabakalara inildikçe azalır. Kullanılacak malzemelerin geçirgenliği, stabilitesi, dayanıklılığı, sertliği, tokluğu, yorulma dayanımı, şekli, viskozitesi, özgül ağırlığı, saflığı ve sıcaklığa karşı duyarlılığı gibi şartnamede belirtilen fiziksel ve performans özelliklerini sağlaması gerekir. Geleneksel malzemelerin performans özelliklerini belirlemek için uygulanan testler, partikül boyut dağılımı ve kimyasal yapısı gibi malzeme özelliklerinin büyük ölçüde farklılık gösterebileceği geri-dönüşüm malzemelerinin (endüstriyel atık vb.) özelliklerinin belirlenmesinde uygun olmayabilir. Bu sebeple, atık malzemelerin uygun bir biçimde değerlendirilmesi için yeni testler geliştirilmiş ve yeni kabul edilebilirlik kriterleri oluşturulmuştur. Şekil 4.1’de karayolu yapımında kullanılacak endüstriyel atıkların uygunluğunu değerlendiren akış şeması verilmiştir (Nunes vd., 1996; Mroueh ve Wahlström, 2002).



Şekil 4.1: Karayolu yapımında kullanılacak endüstriyel atıkların uygunluğunun değerlendirilmesi (Aravind ve Das, 2007).

Doğada, endüstriyel, inşaat, tarım vb. gibi birçok atık malzeme türü bulunmakta olup uçucu kül, kömür külü, taş ocağı külü, çimento fırın tozu, plastik atıklar, cam atıklar, geri kazanılmış agrega, elyaf ve polietilen torbalar gibi atık malzemeler yol yapımında değerlendirilebilmektedir. Termik santrallerden açığa çıkan uçucu kül, dip külü ve havuz külü ile demir-çelik endüstrisinin atık ürünleri olan yüksek fırın cürufu, granül yüksek fırın cürufu ve çelik cürufu miktarları büyük hacimlere ulaşmaktadır.

Yapılan önceki çalışmalardan, farklı tipteki atıkların, yol üstyapısının temel, alttemel ve kaplama tabakalarında agrega, filler ve katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı görülmektedir. Çok farklı tipte ve potansiyele sahip atık malzemeler olmakla birlikte, demir-çelik ve maden sektörü atık ürünü olan cüruflar, termik santral ürünleri olan baca küllerinin yaygın araştırma ve kullanım alanlarına sahip olduğu görülmektedir.

Uçucu kül, kömür yakıtlı elektrik ve buhar tesislerinde toz haline getirilmiş kömürün yanmasından kaynaklanan ve yanma odasından egzoz gazları ile taşınan ince bir atıktır. Toz halinde ki kömür kazanının yanma odasına hava ile doğrudan üflenerek burada ısı üretilir. Baca yardımıyla kazandaki ısının uzaklaştırılması erimiş mineral kalıntısının sertleşmesine ve kül oluşumuna neden olur. Taban külü veya cüruf olarak adlandırılan iri kül parçacıkları yanma odasının altına düşerken, uçucu kül olarak adlandırılan hafif ince kül parçacıkları bacada asılı kalır. Uçucu kül elektrostatik çökelticiler veya filtre kumaş gibi partikül emisyon kontrol cihazları tarafından uzaklaştırılır. Kazanın altında biriken cürufa ise genelde taban külü denir. Uçucu küller, yüksek kesme mukavemeti, yüksek geçirgenlik, yüksek CBR değeri, hafif olması, daha hızlı konsolidasyon oranına ve düşük sıkıştırılabilir özelliği sayesinde filler malzemesi, taban zemini iyileştirmesinde, rijit ve yarı rijit beton uygulamalarında ve bitümlü karışımlarda filler malzemesi olarak kullanılabilir. Bitümlü karışımlarda kullanıldığı durumlarda optimum bağlayıcı miktarını arttırabilir. Yakılan kömür kaynağının yapısına bağlı olarak bileşenleri değişiklik göstermektedir. Uçucu kül yüksek miktarlarda Silisyum dioksit (SiO_2) ve Kalsiyum oksit (CaO) olmak üzere Demir Oksit (FeO_2) ve Alüminyum Oksit (Al_2O_3) ile beraber kömürün kaynağına bağlı olarak Arsenik, Berilyum, Bor, Kadmiyum, Krom, Kobalt, Kurşun, Magnezyum, Civa, Molibden, Selenyum, Stronsiyum, Talyum ve Vanadyum gibi toksit kimyasal maddede içerirler (Ahmed, 1991; Ahmed ve Lovell, 1992; Han, 1993; Aravind ve Das, 2007; Çağlar, 2007; Üstümkol ve Turabi, 2009; Prasad vd., 2009; Sen ve Mishra, 2010; Aravind ve Das, 2012; B. Mishra ve R. S. Mishra, 2015; M. Mishra, 2016; Bhanuprasad ve Ganesh, 2017).

Çimento fırın tozu (klinker), çimento üretimi yapan tesislerin fırınından egzoz gazıyla taşınan ve fırının hava kirliliği kontrol sistemi tarafından yakalanan ince alkali parçacıklardır. Bileşimi çimentoya benzerlik gösterir ve kalsiyum karbonat, kalsit, silikat, potasyum sülfat, kalsiyum sülfat, alüminyum oksit, demir oksit, potasyum klorür, magnezyum oksit, sodyum sülfat ve potasyum florürden oluşur. Çimento fırın tozu, taban zemininin iyileştirilmesinde kullanılarak, taban zemininin taşıma kapasitesinin arttırılması, taban zemini üzerine yapılacak yapının maliyeti ve süresinin azaltılmasında katkı sağlamaktadır (Hawkins vd., 2003; Sen ve Mishra, 2010; B.Mishra ve R. S. Mishra, 2015; M. Mishra, 2016).

Demir-çelik endüstrisinin bir yan ürünü olan çelik cürufu, içerdiği önemli miktarda demirin yanında kalsiyum, sönmemiş kireç ve magnezyum gibi oksit ve silikat karışımları içerir. Parça boyutları 80 mm ile 300 mikron arasında değişen, boşluklu ve sert bir yapıya sahiptir. Granüler alt tabakalarda agrega ve filler malzemesi olarak kullanılabilen bu malzemenin, sızdırılabilir kirletici madde içerip içermediği kontrol edilmelidir. Yüksek fırın cürufu ile karşılaştırıldığında düşük miktarda silika ve kireç varlığından dolayı yüksek miktarda demir oksit ve kalsiyum oksit içermektedir (B. Mishra ve R. S. Mishra, 2015; M. Mishra, 2016; URL-19, 2016).

Cam atıkları BSK'da bitümlü tabakaların altındaki katmanlarda dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Cam atıkları bitümlü karışımlarda kullanılan geleneksel agregalarla karşılaştırıldığında, boşluklu yapıları sebebiyle bitümlü bağlayıcı ile güçlü bir aderans sağlamakla birlikte, bitümlü karışımlarda cam atığının agrega olarak kullanılması durumunda düşük agrega dayanımına bağlı karışımların mekanik dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Ayrıca cam atıkları trafik altında parçalanıp kırıldığı için yol yüzey dokusunu değiştirdiği gözlemlenmiştir (Larsen, 1989; Ahmed, 1991; Su ve Chen, 2002; Aravind ve Das, 2007; Çağlar, 2007; Çelik vd., 2007; Üstümkol ve Turabi, 2009; Öksüz, 2011).

Beton teknolojisinde meydana gelen gelişmeler ve her geçen gün artan barınma ihtiyacının karşılanması için düşük katlı eski binaların yıkılarak, yerlerine yüksek katlı binalar yapılmaktadır. Kentsel dönüşüm çerçevesinde, yıkılan inşaatlardan elde edilen kırılmış beton ve duvar molozları depolama alanlarına bırakılmakta ve çevre kirliliği oluşturmaktadır. Kırılmış beton ve duvar molozları ile kaldırım ve taşıt yollarından sökülen parke taşlarının kırma tesislerinde istenilen boyutlara indirgenerek, düşük dayanım beklenen beton uygulamaları, temel ve alttemel tabakalarında geri-dönüşüm agregası olarak kullanılabilmesi belirtilmektedir (Ahmed, 1991; Ahmed ve Lovell, 1992; Han, 1993; Sherwood, 1995; Roa, 2005; Roa vd., 2006; Demir, 2010; Chen vd., 2011; Karle vd., 2016; Sree, 2017).

Kömür tozu, kömür ocaklarından kömürün çıkarılması ve işleme aşamaları sırasında açığa çıkan atık malzemedir. Yanmamış kömür tozuna oranla daha yüksek dayanıma sahip olan yanmış kömür külü altyapı uygulamalarında, çöp depolama alanlarında, taşkın koruma alanlarında ve yol yapım işlerinde geniş kullanım alanını bulmaktadır.

Plastik atık ve poşetler doğada kolayca kaybolmayıp uzun yıllar boyunca doğayı kirletmektedir. Literatürde, plastik atıkların 2-8 mm boyutlarına getirerek BSK'da kullanımı araştırılmış ve geleneksel karışım özellikleri ile karşılaştırması yapılmıştır. Yapılan çalışma sonuçları, asfalt karışımları içerisinde bitüm ağırlığının %6-8 oranında kullanılan plastik atıklarının karışım performansını iyileştirdiği belirtilmektedir. Plastik karışım içerisinde kullanılabilmesi gibi bitümün modifikasyonunda da kullanılabilir (Han, 1993; B. Mishra ve R. S. Mishra, 2015).

Mermer atıklarının bitümlü sıcak karışımlarda agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmalarda, gerçekleştirilen malzeme ve karışım test sonuçlarının KTŞ'de belirtilen limit değerleri sağladığı, dolayısıyla mermer atıklarının aşınma değerlerine (sertlik derecesine) göre aşınma ve binder tabakalarında kullanılabilir olduğu belirtilmektedir (Okagbue ve Onyeobi, 1999; Akbulut vd., 2003; Terzi ve Kardeş, 2003; Çağlar, 2007; Üstümkol ve Turabi, 2009; Yıldız vd., 2011; Okubay ve Yardım, 2016).

Yapı ömrünü tamamlamış asfalt kaplamaların kazıtılarak bitümlü sıcak karışımların bitümlü karışım olan kaplama tabakası hariç diğer tabakalarında belirli oranlarda tekrar agrega olarak kullanılabilir (Ahmed, 1991; KTŞ, 2013).

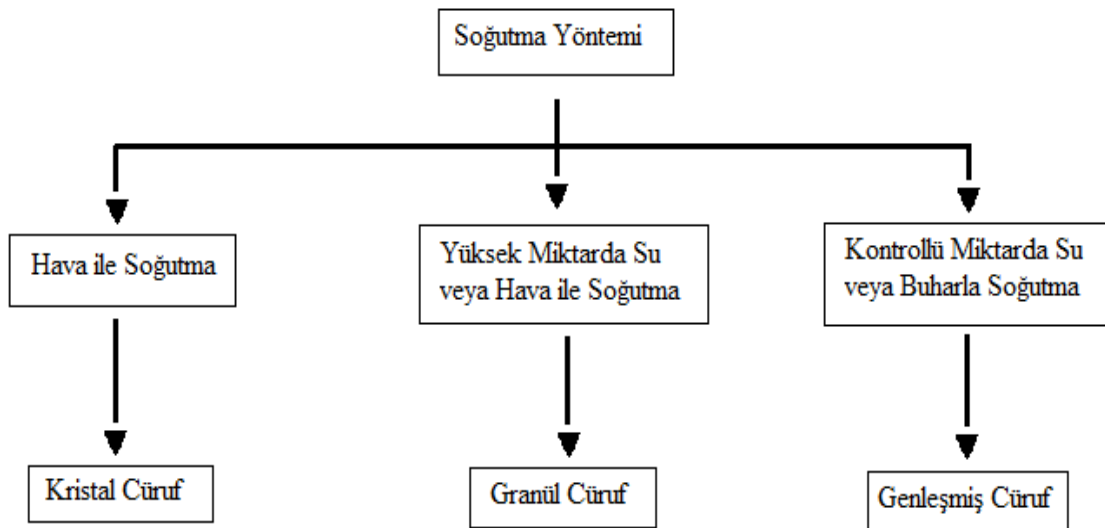
Her geçen gün artmakta olan taşıt sayısı ile beraber kullanılarak ömrünü tamamlayan hurda lastik sayıları da artmakta olup kimyasal bileşenlerden oluşan lastiklerin doğaya bırakılması veya yakılması doğaya büyük zararlar verebilmektedir. Hurda lastikler öğütülerek karayolu üstyapı tabakalarından bitümlü kaplama tabakasında karışım veya bitümün modifikasyonunda kullanılmaktadır (Ahmed, 1991; Yüceer ve Çelik, 1991; Ahmed ve Lovell, 1992; Aravind ve Das, 2007; Çağlar, 2007; Prasad vd., 2009; Koçak ve Alpaslan, 2011).

Ülkemizde endüstriyel boyutlarda çıkan bor madeni işleme sırasında açığa çıkan bor atığı ve zeolit kaynaklarının beton içerisinde kullanımının uygun olduğu ve betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerine büyük ölçüde fayda sağladığı yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir (Akyıldız, 2012).

4.2 Yüksek Fırın Cüruflarının Geri-Dönüşüm Uygulamaları

Yüksek fırın cürufu, metal üretimi yapan tesislerin elektrik ark fırınından eritme işlemi sırasında yan ürün olarak açığa çıkan kireç, silikat ve alüminosilikatlardan oluşurken yapısında metal oksit ve döküm külü de bulundurabilen endüstriyel atıktır. Özellikler bakımından çimentoya benzerlik göstermekle beraber fiziksel şekli büyük ölçüde toplama yöntemine bağlı olup hava da soğutma veya ıslatılarak soğutulması sağlanır. Islama yöntemi ile soğutulması sağlanan cürufların boyutları genellikle çakıl boyutlarındadır. Çimentoya benzerlik göstermesi, daha düşük sermaye gereksinimi, neme maruz kaldığında sertleşmesinden dolayı karayolu yapılarında taban zeminini stabilize etmek için çimento yerine bağlayıcı olarak kullanılabilirler (Ahmed ve Lovell, 1992; Chumhua Han, 1993; Beeghly, 2003; Aravind ve Das, 2007; Asi, 2007; Çağlar, 2007; Sen ve Mishra, 2010; Aravind ve Das, 2012; Anupam vd., 2013; Azanov, 2014; B. Mishra ve R. S. Mishra, 2015; Karle vd., 2016; M. Mishra, 2016; Bhanuprasad ve Ganesh, 2017).

Üretilen cürufun türü, erimiş kütlenin soğutma yöntemine ve işlenmiş metalin tipine bağlı olarak Şekil 4.2’de gösterildiği gibi değişmektedir.



Şekil 4.2: Cüruf oluşumlarında farklı soğutma yöntemleri (Barišić vd., 2010).

Kristal cüruf, eriyen metalde meydana gelen gaz kabarcıklarından dolayı boşluklu bir yapıya sahip olurken, ağırlık olarak normal ağırlığa sahip agrega grubunda yer alır. Granül

cüruf, küçük boyutlu tanelerden oluşmakta olup kompozisyonundan dolayı yüksek hidrolik bağlayıcı özellikler taşımakta ve uygun bir aktivatör aracılığıyla Portland çimentosuna benzer davranışlar göstermektedir. Genleşmiş cüruf, düşük hacimli olmasına rağmen kristal cürufa kıyasla daha yüksek boşluk oranına sahiptir. İşlenen metalin türüne bağlı cüruf, demir dışı (alüminyum, ferrokrom ve ferromagnezyum) ve demir cürufu (demir ve çelik) olmak üzere iki gruba ayrılır (Barišić vd., 2010).

Cürufların ilk kullanımı Roma dönemine kadar dayanmakta olup cüruf kullanılan ilk modern yollar 1813 yılında İngiltere’de inşa edilmiştir. Cüruf kullanımı İngiltere’den sonra Amerika kıtasına da hızlı bir şekilde yayılmıştır (URL-20, 2013). Yol yapımında kullanılan cüruflar 15 yıllık deneme aşamasından sonra 1830’lu yıllarda kayıt altına alınmış ve bu süre içerisinde olumlu sonuçlar verdiği görüldükten sonra demiryolu inşaatlarında da cüruf kullanılmaya başlanmıştır (Lewis, 1982). I. Dünya savaşı sırasında çelik üretiminde meydana gelen artış nedeniyle önemsenmeyecek miktarlarda açığa çıkan cüruf miktarı, atık malzemelerin yönetimine olan ihtiyacı da gün yüzüne çıkarmıştır. Askeri yol yapımlarında kullanılarak atık malzemelerin yeniden kullanılması üzerine ilk adımlarında atılması sağlanmıştır (URL-20, 2013). Granül yüksek fırın cürufunun hidrolik bağlayıcı özelliklerinin keşfi ile cüruflar Avrupa ve Amerika’da geniş kullanım alanları bulmuştur (Barišić vd., 2010).

BSK’ların içerisinde cürufların ilk olarak 1969 yılında Toronto’da bir deneme kesiminin aşınma ve temel tabakasında kullanılmış ve 1974 yılında ise Ontario’da asfalt kaplamanın sürtünme kuvvetini arttırmak amacıyla 17 farklı deneme kesiminde, BSK’da atık cüruflar kullanılmıştır. Deneme kesimlerinde kullanılan cürufun, geleneksel agregalara oranla daha yüksek özgül ağırlık ve yoğunluğa sahip olduğundan kaplamanın; taşıma kapasitesinin, dış etkilere karşı direncinin, kaplama dayanıklılığının, yol yüzeylerinin sürtünmeye karşı direncinin ve bakım-onarım periyodlarının arttığı görülmüştür (Emery, 1982; 1984a; Ali vd., 1992; URL-21, 2016).

Cüruflar, keskin kenarlı yapısı, kübik tane şekli ve pürüzlü yüzey dokusu sayesinde bitümlü bağlayıcı ile arasındaki aderansın yüksek olmasını sağlarken, aynı zamanda seçilecek uygun karışım gradasyonu ile bitümlü kaplamaların içsel sürtünme direncini geleneksel agregalara göre önemli oranla arttırmaktadır. Bu özelliği sayesinde endüstriyel tesis yollarında, ağır taşıtların bulunduğu park alanlarında, yüksek aşınma dayanımı

gereken kavşaklarda ve kaldırımlarda geniş kullanım alanı bulmaktadır (URL-22, 1997; Mäkikyrö, 2004; Wu vd., 2007).

Çelik cürufunun bir depo inşaatında kullanılmasının ardından 7 gün sonra %2,30'lük hacim değişimi ve 7 MPa'lık basınç artışı gözlenmiştir. Çelik cürufunun, rijit yol kaplamasında kullanılması ile önce %250 CBR değeri ardından hızlı bir şekilde %80 seviyelerine düştüğü gözlenmiştir. Bunun nedeni serbest kalsiyum oksitlerin su ile reaksiyona girmesi sonucu kaplamada kabarma ve çatlakların meydana gelmesidir (De Bock ve Van den Bergh, 2004). Küçük taneli cürufların büyük taneli cüruflardan daha fazla genişleme göstermesi, uygun bir maksimum dane boyutu seçimi ile serbest haldeki oksitlerin su ile reaksiyonu minimuma indirilerek bu problemin önüne geçilmesi mümkündür (Mäkikyrö, 2004).

Çelik cürufunun bağlayıcı olarak kullanılabilmesi için yapılan çalışmalar, düşük çimentolu ve pozolanik etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Fakat, çelik cürufunun eritilerek su jeti ile soğutulmasıyla elde edilen malzemeye uygulanan laboratuvar testleri sonucunda cüruf sertliğinin 4 kat arttığı görülmüştür (Mahieux vd., 2009; Muhmood vd., 2009; Shen vd., 2009).

4.2.1 Ferrokrom Cürufunun Özellikleri

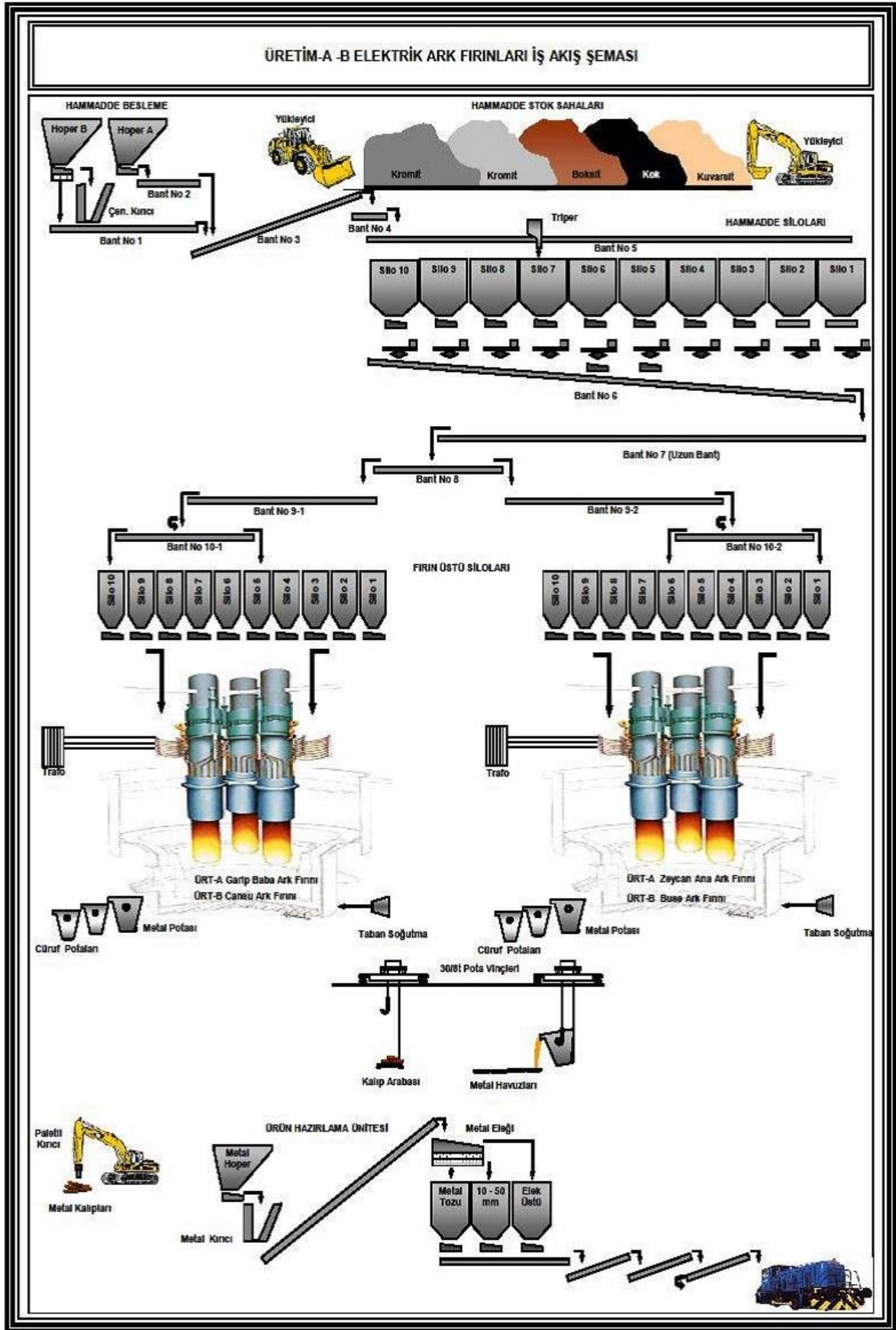
Ferrokrom cürufu, krom üretiminde açığa çıkan atık yan üründür. Şekil 4.3'te verilen üretim akım şemasından da izlenebileceği üzere, bir ferrokrom işletmesinde maden ocağı sahalarına kamyonlar aracılığı ile getirilen kromit cevherleri açık ve kapalı ortamlarda stoklanmaktadır. Krom cevheri konsantre ve parça halinde uygulanan işlemler sonrasında ferrokroma dönüşmektedir. Krom cevheri ile beraber kok kömürü, kuvarsit, boksit ve soderberg üretim aşamasında kullanılan yardımcı hammaddelerdir. Bütün hammaddeler istenilen boyutlara getirilerek hammadde silolarında stoklanır. Bu silolardan kantarlar yardımı ile belirli oranlarda otomatik olarak karıştırılarak, ferrokrom fırınlarına iletilir ve ark fırınlarında fiziko-kimyasal proseslere tabi tutulmaktadır. Taban ve duvarları rekraktör ile kaplı ark fırınının tabanları hava ile soğutulmaktadır. Fırına soderberg tip elektrotlarla enerji verilmektedir. Bu elektrotlar 1,50-2 m gömülü olup, elektrot uçlarında oluşan arklar ısı enerjisine çevrilerek, yeterli (1700-1800°C) sıcaklık temin edilir. Yeterli sıcaklıkta Cr ve Fe reaksiyona girerek ferrokromu oluşturur ve sıvı halde fırın tabanında birikir.

Ferrokrom şarj içerisindeki şartlara göre bir miktar Si ve C içerebilir. Reaksiyon sonucu meydana gelen CO gazı şarj içerisinde geçip fırın yüzeyine çıkarak tam yanma gerçekleştirir. Erimiş cüruf havada yavaşça soğuyarak bazalta benzer mükemmel mekanik özelliklere sahip stabil ve yoğun bir kristalli yapıdaki yan ürün oluşturmaktadır. Cürufun su ile soğutulmasıyla granüle ferrokrom cürufu ortaya çıkmaktadır (Yılmaz ve Karaşahin, 2010; Erkan, 2012; Yılmaz ve Yıldız, 2015; P. H. Kumar vd., 2018).

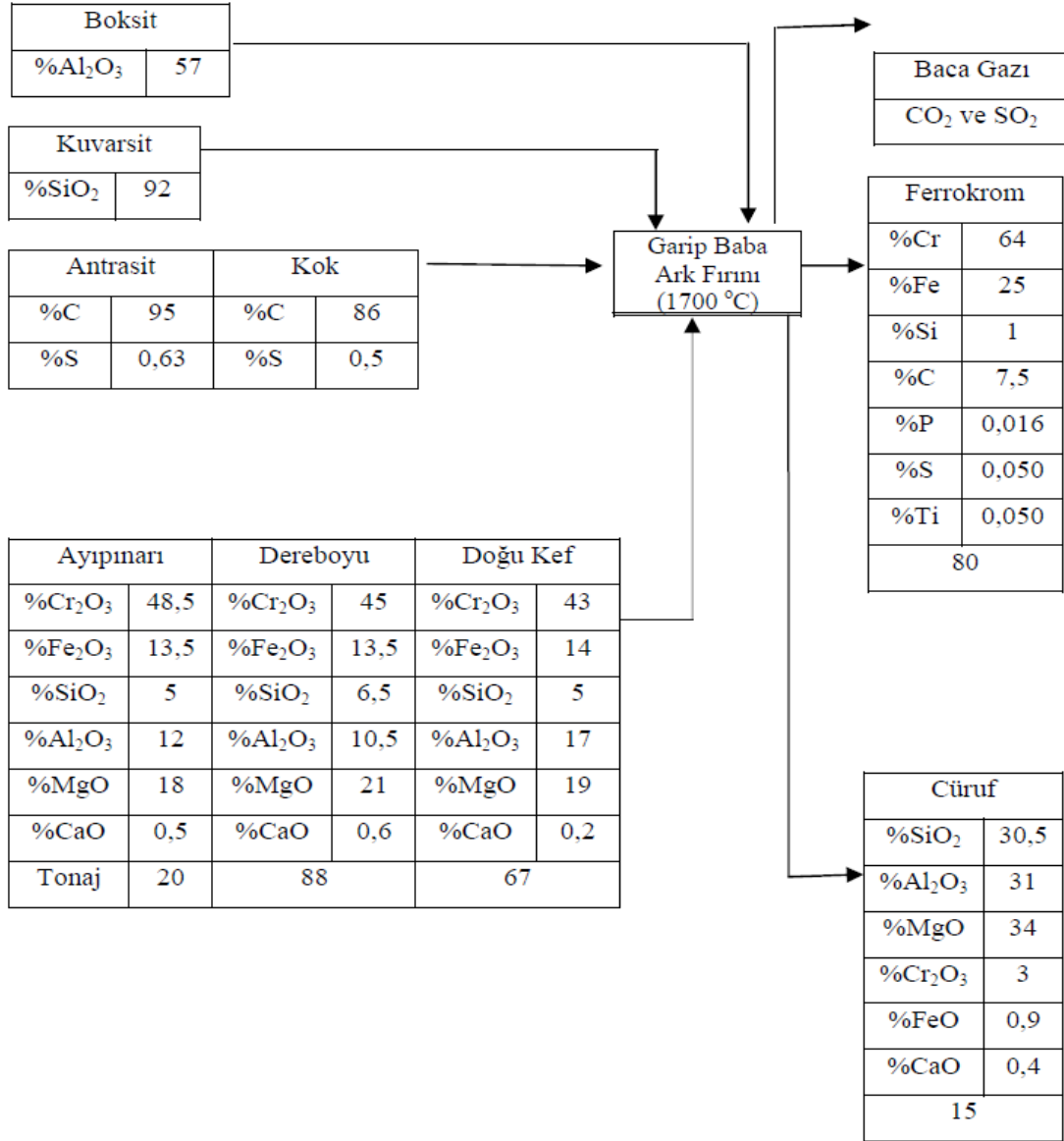
Ülkemizde, Antalya ve Elazığ'daki Ferrokrom işletmeleri bu sahadaki faaliyetlerini sürdürmektedir (Yılmaz ve Yıldız, 2015). Elazığ Ferrokrom İşletmesinde mevcut olan elektrik ark fırınları (Zeycanana ve Garipbaba) yıllık toplam 50 000 ton üretim kapasitesine sahipken, sonrasında kurulan ilave ark fırınları (Cansu ve Buse) ile yıllık toplam 120 000 ton üretim kapasitesi hedeflenmiştir. Ferrokrom üretim aşamalarına örnek olarak, Şekil 4.4'de Garipbaba ark fırını için hazırlanmış üretim şeması verilmiştir (Erkan, 2012).

Bir ton krom üretimi için ton başına 1,10-1,60 ton ferrokrom cürufu açığa çıkmaktadır (Niemelä ve Kauppi, 2007). Ferrokrom cürufunun %83'ünü Silikon(Si), Alüminyum(Al), Magnezyum(Mg) ve oksitleri oluştururken Cr, Ni, Fe ve Ca gibi oksitlerde içermektedir. Umman'da üretilen ferrokrom cürufuna yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, %5-6 Cr₂O₃, %23-24 Al₂O₃, %22-23 MgO, %34-35 SiO₂, %1-4 CaO ve %4-5 NiO içerdiği görülmüştür. Ferrokrom cürufu %60 oranında silikon, alüminyum ve demir oksit içerirken aynı zamanda %3 gibi düşük miktarda kireç içerdiğinden gerekli hızda hidrasyon ve erken yaş mukavemetini sağlayamadığı için çimento yerine kullanımı uygun olmadığı belirtilmiştir (Al-Jabri vd., 2018). Ferrokrom cürufu, betonda olumsuz etkilere sahip olabilen %34-35 oranda Magnezyum oksit içererek betonun priz alma süresini uzatabilir ve %10'luk büyük hacim değişikliklerine neden olabilir (Zheng vd., 1991; Barišić vd., 2010; Zhang vd., 2015).

Ferrokrom cürufu diğer agregalar ile karşılaştırıldığında; daha iyi aderans sağlaması, daha sert olması, Şekil 4.5'de görüldüğü gibi pürüzlü ve gözenekli yüzeye sahip olması, kil ve organik bileşenler içermemesi gibi fiziksel özelliklere sahiptir. Gözenekli yapısından dolayı geçirgenlik katsayısı da yüksektir (Zelic, 2005; Yılmaz ve Karaşahin, 2010; Acharya ve Patro, 2016; Al-Jabri vd., 2018; P. H. Kumar vd., 2018).

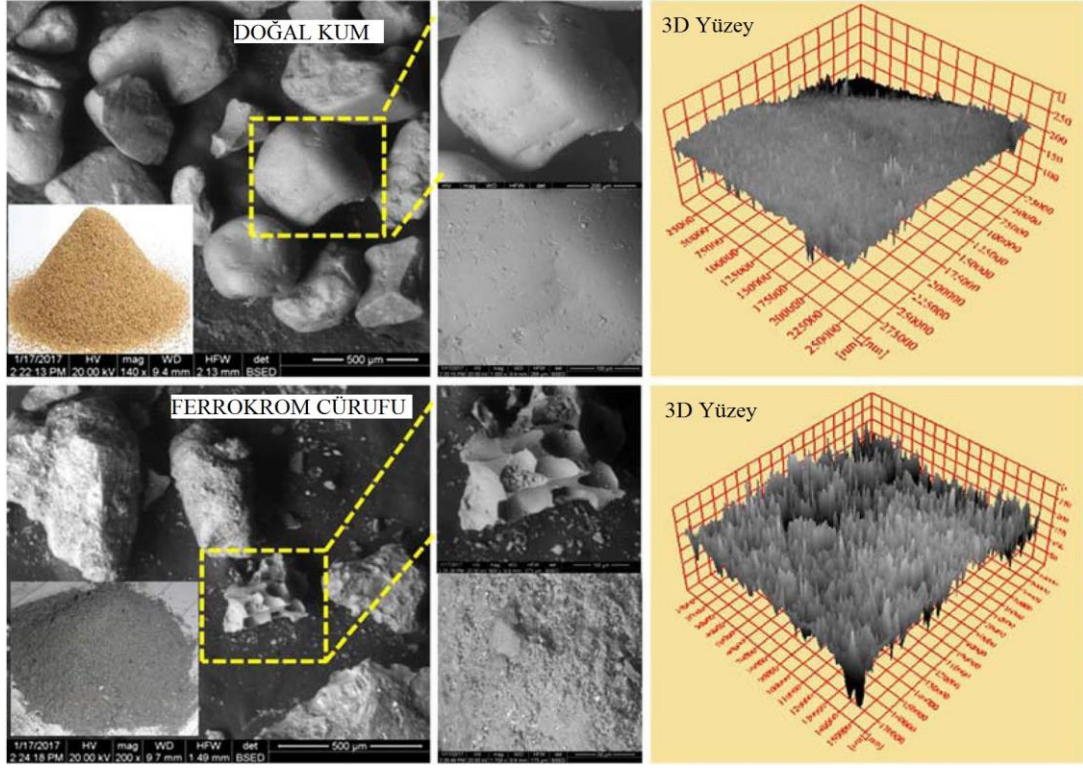


Şekil 4.3: Elazığ Ferrokrom İşletmesi üretim akım şeması (Erkan, 2012).



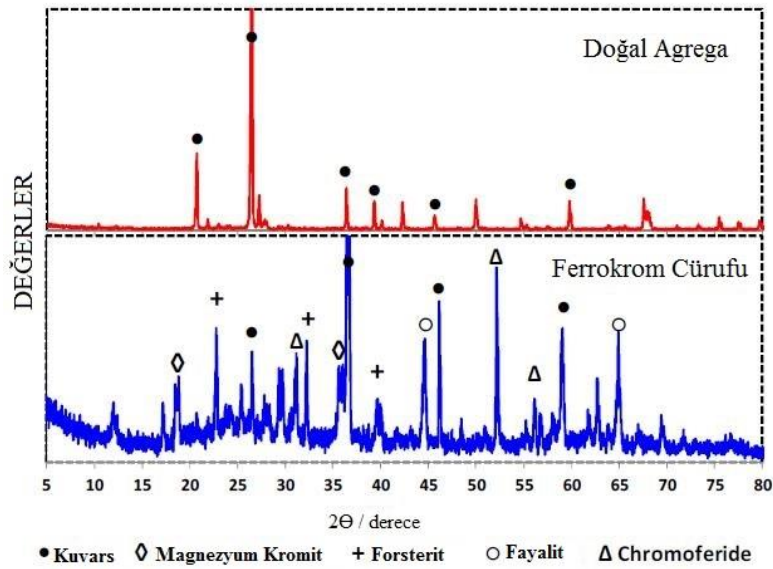
Şekil 4.4: Garipbaba Ark Fırını üretim şeması (Erkan, 2012).

Al-Jabri (2018)'nin ferrokrom cürufunun fiziksel özelliklerini belirlemek için yaptığı deneysel çalışmada, kireç taşı özgül ağırlığı 2,65 g/m³ değeri elde edilirken ferrokrom cürufu özgül ağırlığı 2,84 ile 3,15 g/m³ arasında değiştiği görülmüştür. Su emme oranı kireç taşında %0,38 çıkarken ferrokrom cürufunun su emme oranının %0,25 ile %2,30 değerleri arasında olduğu sonucuna varılmıştır. Ferrokrom cürufunun Los Angeles aşınma ve CBR değerleri sırasıyla %14-18 ve %107-140 arasında değişirken, kireç taşı için bu değerler sırasıyla %21 ve %103 olarak belirlenmiştir. Tablo 4.3'de belirtilen çalışmada fiziksel özellikleri bakımından karşılaştırma yapılan doğal agrega ile ferrokrom cürufunun değerleri verilmiştir.



Şekil 4.5: Doğal kum ve Ferrokrom cürufunun SEM mikrografları ve 3D yüzey topografya görüntüleri (Al-Jabri, 2018).

Şekil 4.6’de verilen ferrokrom cürufu X-ışını kırınım analiz modellemesinde görüldüğü gibi magnesiokromitin metalik fazı ($MgCr_2O_4$), kromofrid, forsterit (Mg_2SiO_4) gibi silikat fazları ve fayalit (Fe_2SiO_4) gibi baskın mineral fazlarının varlığını gösterdiği ve 2θ : 15-35 noktalarında amorf aktif silisin varlığına işaret ettiği görülmektedir (Al-Jabri vd., 2018).



Şekil 4.6: Doğal kum ve Ferrokrom cürufunun X-ışını kırınım analizi (Al-Jabri vd., 2018).

Tablo 4.3: Ferrokrom cürufu ile doğal agrega fiziksel özellikleri (Al-Jabri, 2018).

Özellik	Ferrokrom Cürufu	Agrega	
		Kaba	İnce
Özgül Ağırlık, g/cm ³	2,84	2,83	2,70
Su Emme, %	0,63	0,20	0,73
Yassılık İndeksi, %	9,83	18,50	-
Elastiklik İndeksi, %	10,50	13,50	-
Cilalanma Değeri, %	11,00	15,30	-
Soyulma Mukavemeti, %	17,89	20,10	-
Aşınma Direnci, %	18,19	18,60	-

Sanghamitra ve Satyanarayana Reddy (2012) tarafından yapılan çalışmada, kimyasal özellikleri Tablo 4.4'te verilen, 6,3 mm – 25 mm tane boyutlarındaki ferrokrom cürufunun fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesinde özgül ağırlık, elek analizi, ince-uzun malzeme ve yassılık indeksleri, su emme oranı gibi fiziksel özellikler belirlenmiştir. Belirlenen özelliklere ait sonuçlar Tablo 4.5'de verilmiştir. Ayrıca, aynı gradasyona sahip ferrokrom cürufu kullanılarak hazırlanan 100×100×100 mm buyutlarında beton numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ıslak ve kuru koşullarda kırma, darbe, aşınma, basınç ve kayma testleri uygulanmış ve sonuçları Tablo 4.6'de belirtilmiştir.

Tablo 4.4: : Ferrokrom cürufunun (6,3 mm – 25 mm) kimyasal özellikleri.

Bileşenler	Yüzde (%)	Bileşenler	Yüzde (%)
Al ₂ O ₃	16,30	CaO	3,20
SiO ₂	22,20	TiO ₂	0,70
FeO	10,40	SO ₄	0,40
Cr ₂ O ₃	9,80	P ₂ O ₅	0,02
MgO	26,80	MnO	0,70

Tablo 4.5: Ferrokrom cürufunun (6,3 mm – 25 mm) fiziksel özellikleri.

Özellik	Değer
Özgül Ağırlık	3,15
Su Emme, %	0,30
Yassılık İndeksi, %	14,30
İnce-uzun malzeme yüzdesi, %	14,50
Köşelilik Sayısı	6,00
İncelik modülü	6,97

Tablo 4.6: Ferrokrom cürufunun (6,3 mm – 25 mm) mekanik özellikleri.

Özellik	Islak	Kuru
Darde değeri, %	17,50	16,50
Kırılma değeri, %	16,60	12,40
Aşınma yüzdesi, %	13,00	11,60
Basınç dayanımı, N/mm ²	124	132
Kayma Parametreleri		
i) Kohezyon, c	0	-
ii) İçsel sürtünme açısı, ϕ	52°	-

Tablo 4.4 ve Tablo 4.5 incelendiğinde ferrokrom cürufu özgül ağırlığının 3,15 olduğu görülmekte ve bu değer doğal agrega özgül ağırlığından daha yüksektir. Ferrokrom cürufu özgül ağırlığının, doğal agrega özgül ağırlığından yüksek olması aynı zamanda mukavemetin de yüksek olacağını göstermektedir. İncelik modülü 6,97, yassılık indeksi %14,30, ince-uzun malzeme oranı %14,50, ıslak numune ve kuru numune darbe değerleri sırasıyla %17,50 ve %16,50 iken, aşınma değerlerinin sırasıyla %13,00 ve %11,60 olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, ferrokrom cürufunun doğal agregaya oranla daha yüksek dayanıma ve daha iyi aşınma direncine sahip olduğu ve karayolu yapımında kullanılabilir olduğu göstermektedir (Sanghamitra ve Satyanarayana Reddy, 2012).

Ülkemizde Elazığ Ferrokrom İşletmesi'nden temin edilen ferrokrom cürufuna ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 4.7'de belirtilmiştir (Yılmaz ve Kök, 2008).

Tablo 4.7: Elazığ Ferrokrom cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellik	Standart	Değerler				
		Kaba	İnce	Filler		
Aşınma Kaybı, % (Los Angeles)	ASTM DC 131	16,40	-	-		
Donma Kaybı, % (Na ₂ SO ₄)	ASTM C 88	4,13	-	-		
Özgül Ağırlık, g/cm ³	ASTM C127	2,77	-	-		
Su Emme, %	ASTM C127	1,68	-	-		
Özgül Ağırlık, g/cm ³	ASTM C128	-	3,02	-		
Su Emme, %	ASTM C128	-	1,97	-		
Özgül Ağırlık, g/cm ³	ASTM D854	-	-	3,13		
Kimyasal Kompozisyonu						
Bileşenler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃	FeO	CaO
Miktar (%)	30,47	31,09	33,66	3,40	0,69	0,49

4.2.2 Ferrokrom Cürufunun Geri-Dönüşüm Uygulamaları

Ferrokrom üretimi yapan tesisler, cüruf depolama maliyetinin artması ve depolama alanlarının azalmasından etkilenmişlerdir. Cürufu potansiyel bir kaynak olarak görmenin çevresel ve ekonomik avantajları vardır. Güney Afrika, Hindistan, Norveç, Türkiye, Doğu Avrupa, Çin, İsveç ve ABD gibi ülkeler ferrokrom cürufunu yol ve inşaat uygulamalarında kullanılmaktadır. Yol yapımında, beton endüstrisinde, tuğla imalatında ve asfalt karışımlarında ve son yıllarda çimento içerisinde kullanımları araştırılmaktadır (Lind vd., 2001; Zelic, 2005; Niemelä ve Kauppi, 2007; Yılmaz ve Karaşahin, 2010; Das, 2014; Al-Jabri, 2018).

Yol inşaatının farklı tabakalarında atık cürufların kullanımı üzerine birçok araştırma yapılmış olup havada soğutulmuş kristal yapıdaki yüksek fırın cüruflarının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin doğal agregaya benzer olduğu tespit edilmiştir. Kristal yapılu ferrokrom cürufunun bitümlü sıcak karışımlar, sathi kaplamalar, beton yollar, granüler temel ve alttemel tabakalarında agrega olarak, mekanik zemin stabilizasyon, demiryolu balast malzemesi, yapısal dolgularda dolgu malzemesi olarak geniş kullanım alanına sahiptir. Kullanıldığı yapılarda sert ve köşeli ve pürüzlü yapısıyla kayma direnci yüksek bir agrega iskeleti oluşturmaktadır (Lind vd., 2001; Zelic, 2005; Das, 2014; Yılmaz ve Yıldız, 2015; Al-Jabri, 2018).

Güney Afrika'da ferrokrom cürufunun kullanımını teşvik etmek için yapılan bir çalışmada, ferrokrom cürufunun fiziksel ve mekanik özelliklerinin doğal agregaya benzer olduğundan yol ve altyapı uygulamalarında doğal agregaya alternatif olabileceği belirtilmiştir. Güney Afrika çevre mevzuatında ferrokrom cürufu tehlikeli atık olarak sınıflandırmasına rağmen, insan sağlığı ve su ekosistemi tehlike kategorilerine göre değerlendirildiğinde tehlikeli olarak sınıflandırılmadığını ve normal şartlarda ferrokrom cürufunu kullanımının hiçbir çevresel tehlikesi bulunmadığını doğrulamaktadır. Ferrokrom cürufu gibi atıl durumdaki malzemelerin depolanmasının olumsuz çevresel etkilere neden olmaması için inşaat sektörü tarafından değerlendirilmesi gerektiği ve böylelikle atıl durumdaki cüruf malzemelerin doğal kaynakların korunmasına katkı sağlayacağı vurgulanmaktadır (Moodie, 2016).

Batı İsveç'teki Vargön Alaşım İşletmesi'nden elde edilen ferrokrom cürufunun fiziksel

özellikleri üzerinde yapılan kapsamlı testler sonucunda, ferrokrom cürufunun bileşimi ve süzülme testleri, normal koşullar altında süzülme değerinin düşük olmasına rağmen, krom içeriğinin %1-3 oranında olduğunu göstermektedir. Potansiyel süzülme kapasitesi %16 civarında olan potasyum (K) haricinde, krom, nikel, çinko ve diğer elementlerin süzülme değerleri çok düşük seviyelerde kalmıştır. Yapılan araştırma sonucunda, yol yapım malzemesi olarak ferrokrom cürufunun oldukça uygun olduğu belirtilmiştir (Lind vd., 2001).

Ferrokrom cürufu beton karışımı içerisinde kısmen veya tamamen agrega olarak kullanıldığında, ferrokrom cürufunun özgül ağırlığı, darbe dayanımı ve ezilme mukavemetinin geleneksel agregalara göre daha yüksek olduğu ve karışım içerisinde ferrokrom cüruf oranının artması ile işlenebilirlik azalsa da betonun mukavemetinde artış olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen standart süzülme deneyleri ile beton içerisinde çok düşük miktarda krom sızıntısının olduğu fakat bu sızıntının kabul edilebilir değerler içerisinde kaldığı görülmüştür. Bu bilgilerin ışığında doğal agrega yerine ferrokrom cürufunun kullanılabilirliği ve kullanımı ile beraber çevre kirliliğinin de azalacağı vurgulanmıştır (Panda vd., 2013; Elibol ve Şengül, 2016; Bhavani vd., 2018; Urs ve Anwer, 2018).

Taban zeminini iyileştirmek için uygulanan kendi kendine yerleşen beton içerisinde çimento ve uçucu kül yerine ferrokrom cürufu kullanımının uygunluğu araştırılmıştır. Ferrokrom cürufu üzerinde taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizi, X-ışını kırınım (XRD) analizi, X-ışını floresan (XRF) etkisi, optik mikroskop görüntüsü, basınç, elektriksel iletkenlik, toplam çözünmüş katı miktarı (TDS) ve termal iletkenlik gibi testleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan kendi kendine yerleşen beton karışımı ve stabilize zemin numuneleri üzerinde yapılan deney sonuçları, ferrokrom cürufunun çimento ve uçucu kül yerine beton içerisinde kullanılabilirliği sonucunu ortaya çıkarmıştır (Mahamaya ve Das, 2018).

Suda soğutulan ferrokrom cürufunun beton içerisinde %50 oranında geleneksel agrega yerine kullanılarak uygulanan performans testleri sonuçları, %30 oranına kadar doğal agrega yerine ikamesiyle betonunun dayanımında olumsuz etki gözükmezken, %30'dan yüksek oranlarda betonun mukavemetinde azalma olduğu belirlenmiştir (Dash ve Patro, 2018).

Asfalt karışımlar arasında yaygın olarak kullanılan bitümlü sıcak karışımlarda, bağlayıcı malzeme, kullanılan agrega ve bağlayıcı malzeme ile agrega arasındaki aderansın iyi olması gerekmektedir. Ferrokrom cürufuları kristal yapıda olduğundan köşeli ve keskin kenarlara sahipken aynı zamanda yüzeyi pürüzlüdür. Bu özelliğinden dolayı iç sürtünmesi yüksektir. İç sürtünmenin bir ölçüsü olan akma değerinin ferrokrom kullanılan bitümlü karışımlarda düşük çıktığı görülmüştür. Akma değerinin düşük olması bitümün agregaya daha iyi bağlanması ve nihai süreçte asfalt karışımının dayanımını arttırmaktadır (Yılmaz ve Süttaş, 2015).

Yılmaz ve Kardeş (2010), esnek kaplamaların granül tabakalarında agrega olarak kullanılan ferrokrom cürufunun etkilerini araştırdıkları deneysel çalışmada, ferrokrom cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri ve ferrokrom cürufu ve kireçtaşı agrega ile hazırlanan karışım numunelerinin mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Aşınma, donma direnci, basınç, CBR ve tekrarlı yükler altında üç eksenli yorulma testlerinin uygulandığı çalışmada, ferrokrom cürufunun kullanılabilir ve fiziksel ve mekanik özelliklerinin kireçtaşı agregasından daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Antalya ferrokrom işletmesinden temin edilen ferrokrom cürufunun bitümlü sıcak karışımlarda, filler malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı bir çalışmada, öncelikle uygun gradasyonun elde edilmesi için No.200 elekten elenmiş ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. BSK'da kullanılan ferrokrom cürufu optimum bitüm oranı belirlendikten sonra, filler olarak kullanılan ferrokrom cürufu oranları artırılarak hazırlanan numunelere stabilite ve akma deneyleri uygulanarak doğal taş tozu ile hazırlanan numunelerle karşılaştırılmıştır. Numunelerin birim hacim ağırlık, bağlayıcı ile dolu boşluk ve boşluk oranları benzerlik gösterirken, stabilite değerleri taş tozuna oranla daha yüksek elde edilmiştir. Yılmaz ve Süttaş (2015) tarafından yapılan çalışmada ferrokrom cürufunun BSK içerisinde %5-10 arasında filler malzemesi olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir.

Al-Jabri (2018) ferrokrom cürufunun fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleyerek rijit ve esnek üstyapılarda, temel ve alt temellerde doğal agrega yerine kullanılabilirliğini araştırmıştır. Ferrokrom cürufunun doğal agregaya oranla daha iyi sonuçlar verdiği ve atık durumda olan ferrokrom cürufunun doğal agrega yerine üstyapı çeşitlerinde, temel ve alt temellerde kullanımının mümkün olabileceği belirtilmiştir. Aynı zamanda atık durumda

olan ferrokrom cürufunun kullanımının çevre kirliliğinin de önüne geçeceğini savunmaktadır.

Endüstriyel atık potansiyeline sahip olan ferrokrom cürufunun özellikleri, geçirimli asfalt karışım agregası olarak kullanılmasının uygun bir alan olabileceği düşündürmüştür. Ferrokrom cürufunun fiziksel ve mekanik özellikleri, yapılan önceki çalışmalar, çevresel koşullar ve trafiğin aşındırma etkisine maruz kalan, yüksek kaliteli agrega kullanımı gerektiren geçirimli asfalt kaplama karışımların performansı ve tasarım parametrelerine etkilerinin araştırılması planlanmıştır.

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, deneysel çalışma kapsamı, kullanılan malzemeler, numunelerinin hazırlanması, deney yöntemleri hakkında bilgilere yer verilmiştir.

5.1 Deneysel Çalışma Kapsamı

Ferrokrom cürufunun geçirimli asfalt karışımlarda agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışma kapsamında, Karayolları Teknik Şartnamesi'nin (KTŞ, 2013) 417. Kısımında verilen geçirimli asfalt karışım gradasyonları arasından üç farklı karışım gradasyonu (Tip-2, Tip-3 ve Tip-4) seçilmiştir. Böylelikle, ferrokrom cürufu agreganın farklı agrega boyutları için tasarım kriterleri üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca, tasarım sonuçlarının karşılaştırılması için ferrokrom agregadan en iyi sonuçların elde edildiği karışım gradasyonunda (Tip-3), doğal (kalker) agrega kullanılarak geçirimli asfalt karışım tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, tek tip polimer bitümlü bağlayıcı (PMB 76-16) ile bitüm stabilizasyonu için mineral fiber katkı kullanılmıştır. Karışım numunelerinin hazırlanmasında darbeli sıkıştırma yöntemi (Marshall Tokmağı) kullanılmıştır. Seçilen agrega gradasyonları için farklı bitüm yüzdelerinde hazırlanan numuneler üzerinde boşluk analizleri yapılmıştır. Ferrokrom cürufunun geçirimli asfalt karışım performansına etkileri belirlenmesi için permeabilite, Cantabro aşınma kaybı, dolaylı çekme mukavemeti ve nem hasarı gibi tasarım deneyleri gerçekleştirilmiştir.

5.2 Kullanılan Malzemeler

Çalışmada, farklı karışım gradasyonlarının oluşturulmasında tek tip ince agrega (ferrokrom), performansın karşılaştırılması için iki farklı tipte kaba agrega (ferrokrom ve kireçtaşı) kullanılmıştır. Agreganın performansa etkileri incelendiğinden karışımlar tek tip polimer bitümlü bağlayıcı kullanılarak hazırlanmıştır. Karışımlar içerisinde ince malzeme miktarı az olduğundan, gereksinim duyulan filler oranının sağlanmasında F tipi uçucu kül ve bitüm stabilizasyonu için selülozik fiber kullanılmıştır.

5.2.1 Agregada

Geçirimli asfalt karışımlarda, istenilen boşluk oranının elde edilmesinde karışım agregada gradasyonunun çok az miktarda ince agregada içermesi önemli rol oynamaktadır. Karışımlardaki yüksek kaba agregada oranı dikkate alındığında, agregalar arasındaki temas sebebiyle bu karışımlarda kullanılan agreganın dayanımının ve bitümlü bağlayıcı ile aderansının iyi düzeyde olması gerekmektedir. Bu çerçevede, aşınma direnci oldukça yüksek olan ferrokrom cüruf agregası Şekil 5.1’de görüldüğü gibi pürüzlü bir yapıya sahiptir. Karışımların hazırlanmasında, Elazığ Ferrokrom Tesisinden temin edilen farklı dane boyutundaki iki tip kaba ve tek tip ince cüruf malzemesi agregada olarak kullanılmıştır. Ferrokrom cürufuna ait olan bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerin yer aldığı Tablo 5.1 incelendiğinde yüksek oranlarda MgO, SiO₂, Al₂O₃ ve Cr₂O₃ içeren ferrokrom cüruf agregasının geçirimli asfalt kaplamalar için belirlenen kriterlerine uygun olduğu görülmektedir.



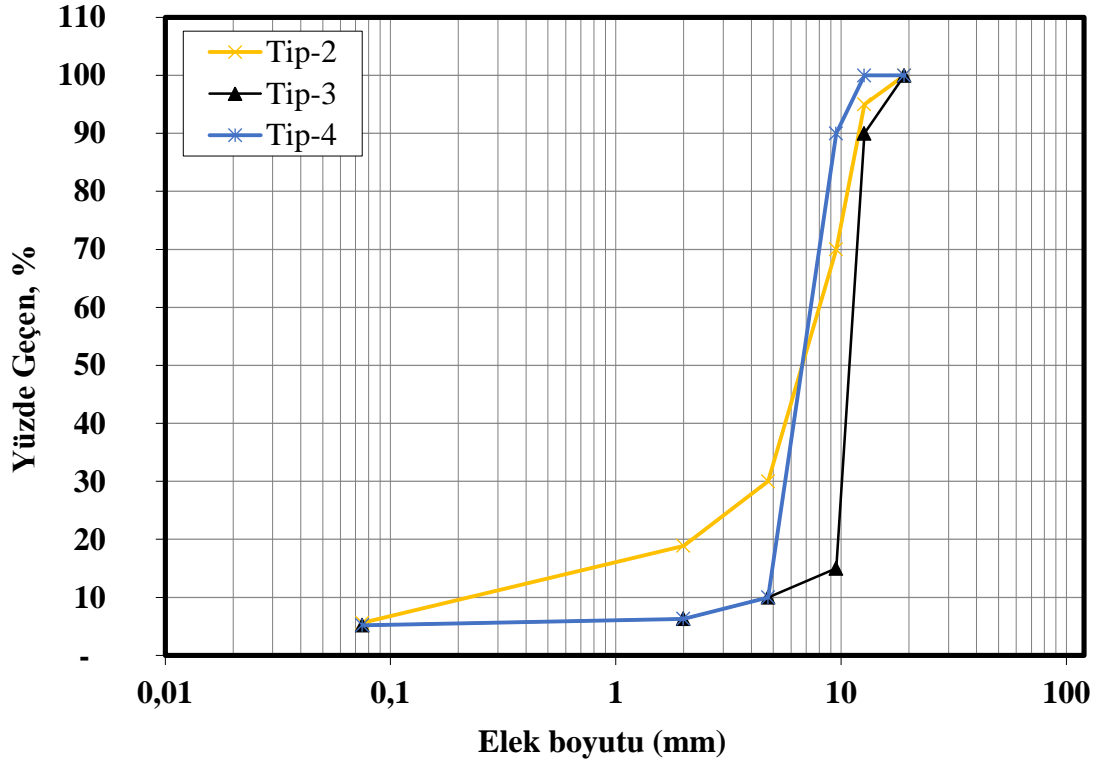
Şekil 5.1: Ferrokrom cürufunun yüzey şekli.

Çalışmada, KTS’de belirtilen geçirimli asfalt karışım gradasyonları dikkate alınarak, ferrokrom cürufunun farklı gradasyonlardaki performansının belirlenmesi amacıyla, limit

değerleri ve tolerans aralıkları Tablo 5.2’de, gradasyon eğrileri Şekil 5.2 verilen TİP-2, TİP-3 ve TİP-4 eğrileri verilen gradasyonlar seçilmiştir. Karışım tasarımı ve boşluk analizleri için TS EN 1097-6’ya göre gerçekleştirilen deneyler ile belirlenen ferrokrom cürufuna ait özgül ağırlık ve su emme değerleri Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.1: Ferrokrom cürufuna ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler.

Özellikler	Fiziksel Özellikler						
	Deney Standardı			Değerler			
Los Angeles Aşınma Kaybı, (%)	TS EN 1097-1			18			
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (%)	TS EN 1367-1			0,85			
Kırılmışlık Oranı, (%)	ASTM D 5821			100			
Yassılık İndeksi, (%)	TS 9582 EN 933-3			7,8			
Kimyasal Kompozisyonu							
Bileşim	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO
Ağırlıkça Yüzde, %	3,04	1,21	30,12	24,17	0,15	0,5	40,5



Şekil 5.2: Seçilen karışım tipleri için gradasyon eğrileri.

Tablo 5.2: Karışım tasarımı için seçilen gradasyon tipleri (KTŞ, 2013).

Elek Boyutu		Yüzde Geçen, %			Tolerans aralıkları
No	mm	Tip-2	Tip-3	Tip-4	%
3/4''	19,00	100	100		
1/2''	12,50	90-100	85-95	100	± 4
3/8''	9,50	63-77	5-15	85-95	± 4
No.4	4,75	11-35	5-15	5-12	± 3
No.10	2,00	10-20	5-10	5-10	± 3
No.80	0,180	5-10	-	-	± 3
No.200	0,075	3-7	3-5	3-5	± 2

Tablo 5.3: Agregası (Ferrokrom cürufu) özgül ağırlık ve su emme yüzdeleri.

Özellikler	Kaba Agregası			İnce Agregası	Mineral Filler
	Tip-2	Tip-3	Tip-4		
Zahiri Özgül Ağırlık	2,984	2,998	2,996	2,781	3,209
Hacim Özgül Ağırlık	2,883	2,903	2,987	2,616	-
Su emme yüzdesi, %	1,18	1,09	1,02	2,27	-

Ferrokrom cüruf agregasının geçirimli asfalt karışım performansının karşılaştırılması açısından Tip-3 gradasyonunda kaba agregası olarak Şekil 5.3'te görülen kireçtaşı agregası kullanılarak numuneler üretilmiştir. Kireçtaşı agregasının fiziksel özellikleri Tablo 5.4'de verilmiştir.



Şekil 5.3: Çalışmada kullanılan kireçtaşı kaba agregası.

Tablo 5.4: Kireçtaşı agregaya ait fiziksel özellikler.

Özellikler	Fiziksel Özellikler	
	Deney Standardı	Değerler
Los Angeles Aşınma Kaybı, (%)	TS EN 1097-1	22
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (%)	TS EN 1367-1	1,39
Kırılmışlık Oranı, (%)	ASTM D 5821	100
Yassılık İndeksi, (%)	TS 9582 EN 933-3	6,8
Zahiri Özgül Ağırlık		2,72
Hacim Özgül Ağırlık	TS EN 1097-6	2,65
Su emme yüzdesi, %		1,0

5.2.2 Bitümlü Bağlayıcı

Çalışmada, cüruf agregasının karışım tasarımına etkileri araştırıldığından, karışımların hazırlanmasında İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilen tek tip polimer bitümlü bağlayıcı (PMB 76-16) kullanılmıştır. Polimer bitümlü bağlayıcıya ait bazı fiziksel ve performans karakteristikleri Tablo 5.5’de verilmiştir (İSFALT, 2018).

Tablo 5.5: Kullanılan polimer bitümlü bağlayıcının fiziksel özellikleri (İSFALT, 2018).

Özellikler	Standartlar	Sonuçlar
Penetrasyon, 25°C, 100 g, 5 s (0,1mm)	TS EN 1426	44
Yumuşama Noktası (°C)	TS EN 1427	62,4
Brookfield viskozite 135°C, 20rpm	ASTM D 4402	1500 cP
BBR kiriş eğme reometresi, (S≤300MPa, m≥0,300)	TS EN 14771	-6°C
DSR dinamik kesme reometresi, (G*/sinδ>1kPa)	TS EN 14770	76°C
Özgül ağırlık	TS 1087	1,026

5.2.3 Selülozik Fiber

Karışımında bitüm stabilizasyonu için Şekil 5.4’de görülen bitüm emdirilmiş selülozik fiber kullanılmıştır. “İstanbul Teknik” firmasından temin edilen selülozik fibere (HiperCell®) ait bazı özellikler Tablo 5.6’de verilmiştir. Selülozik fiber, üretici firma tarafından önerilen %0,03 (karışım ağırlığının) oranında karışımlara ilave edilmiştir (İstanbul Teknik, 2017).



Şekil 5.4: Selülozik fiber (İstanbul Teknik, 2017).

Tablo 5.6: Kullanılan selülozik fibere ait fiziksel özellikler (İstanbul Teknik, 2017).

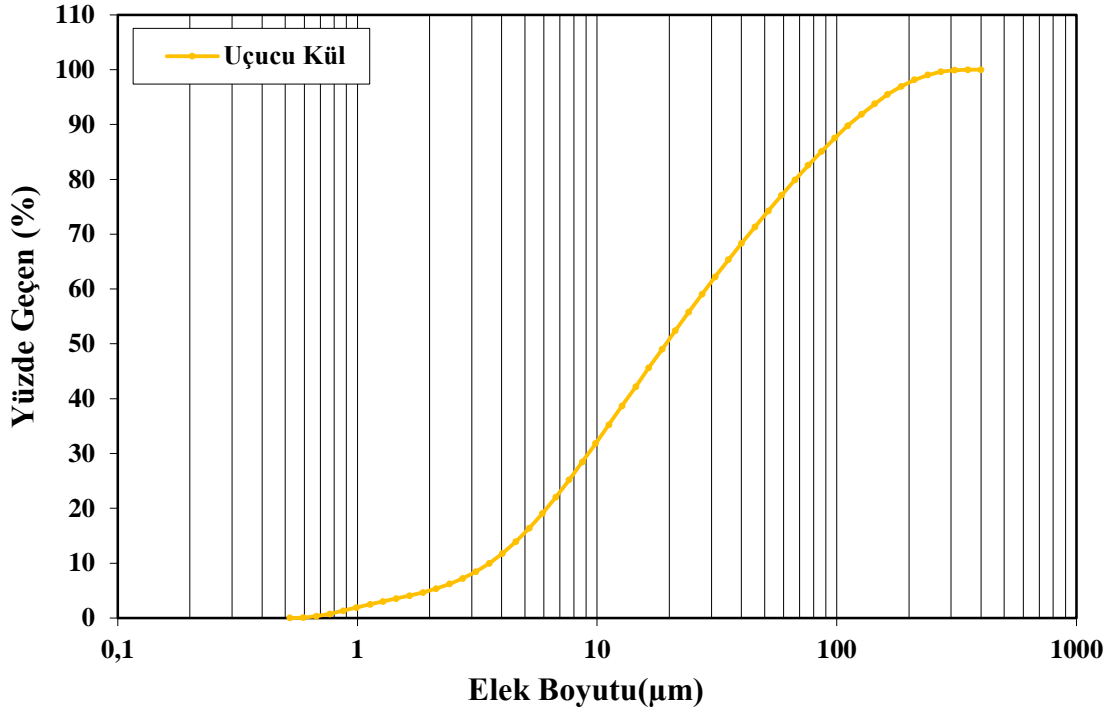
Bileşimi	Granül Olarak Sıkıştırılmış Selülozik Fiber
Görünümü	Granül elyaf
Renk	Gri
Pelet Çapı	7 mm
Yoğunluk	450 g/l
Ortalama lif uzunluğu	2 mm
Isıl dayanımı	>250 °C

5.2.4 Uçucu Kül

Geçirimli asfalt karışımlarda, düşük ince agrega içeriği sebebiyle filler ilavesine ihtiyaç duyulmaktadır. Karışımlarda filler ilavesi olarak Şekil 5.5'te görülen F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Karışımdaki agrega miktarının % 4,45'i oranında ilave edilen uçucu kül Çatalağzı Termik Santralinden temin edilmiştir. KTŞ'de verilen ilave mineral filler boyutuna uygun olan uçucu kül Şekil 5.6'te verilen dane boyutu dağılımı bağlı olarak karışımların yüzey alanının artırılması amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 5.5: İlave filler malzemesi olarak kullanılan uçucu kül.



Şekil 5.6: Kullanılan uçucu külün dane çapı dağılımı.

5.3 Deney Yöntemleri

Bu bölümde karışım numunelerinin hazırlanması ve tasarım değerlerinin belirlenmesi için numunelere uygulanan boşluk analizi, permeabilite, Cantabro aşınma, dolaylı çekme mukavemeti ve nem hasarına dayanım deneylerinin yöntemleri açıklanmaktadır.

5.3.1 Karışım Numunelerinin Hazırlanması

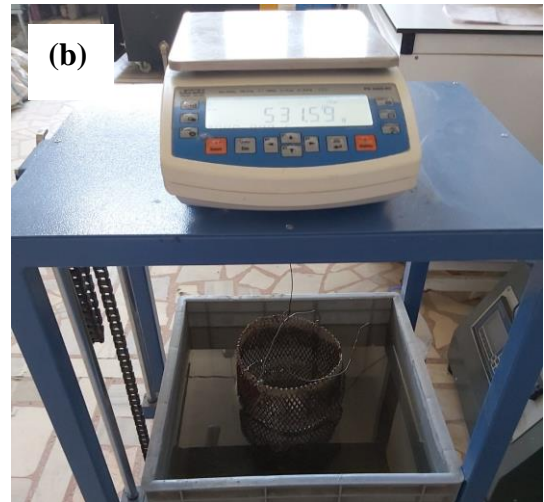
Seçilen her bir agrega gradasyonu (KTŞ Tip-2, Tip-3 Tip-4) için tasarım aşamasında 3 ve 4 farklı bitüm oranında (%5,5, %6,0, %6,5 ve %7,0) karışım numuneleri hazırlanmıştır. Karışımlar Şekil 5.7a'da ki mikser yardımıyla öncelikle selülozik fiberin karışım içerisinde homojen olarak dağılabilmesi için agrega ile kuru olarak 2 dk. karıştırılmış, sonrasında belirtilen yüzdelerde bitümlü bağlayıcı ile 175 °C'de 3 dk. karıştırılmıştır. Sıkıştırma sıcaklığına (130-140 °C) ulaşması beklenen bitümlü karışımlar, Şekil 5.7b'de ki Marshall kompaktörü ile her iki yüzüne fazla sıkıştırmadan dolayı boşluk oranında azalma olmaması için 50 darbe uygulanarak sıkıştırılmıştır. Oda sıcaklığına kadar soğuması beklenen sıkıştırılmış numuneler hidrolik kriko ile kalıplardan çıkarılmıştır.



Şekil 5.7: Geçirimli asfalt karışımların hazırlanma aşamaları. a. mikser ile karıştırılması, b. Marshall tokmağı ile sıkıştırılması.

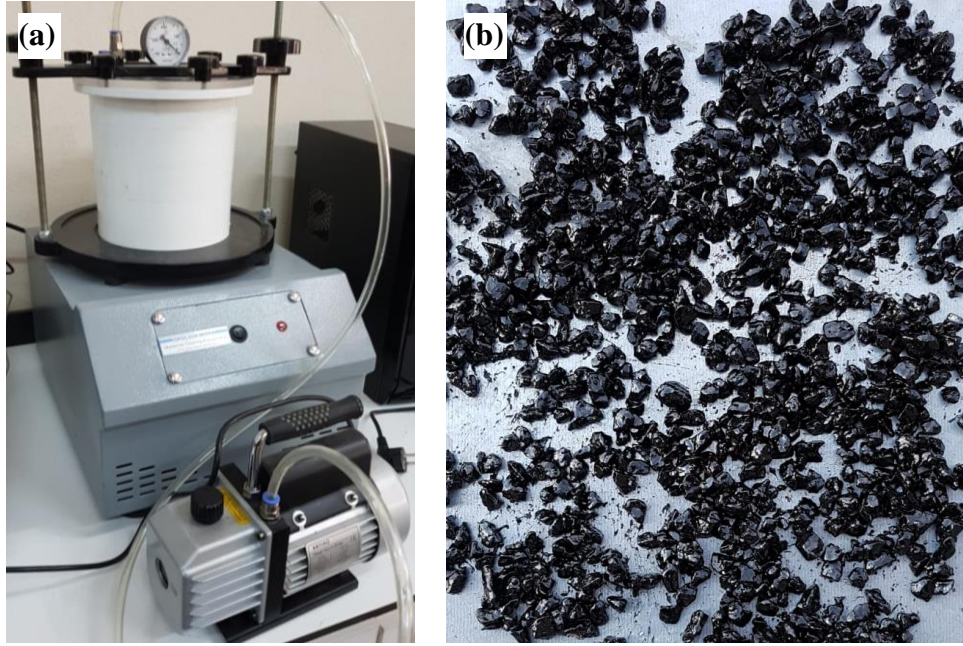
5.3.2 Boşluk Analizleri

Geçirimli asfalt karışımların yüksek boşluk oranı ve çıkıntılı yüzey yapısından dolayı, sıkıştırılmış numunelerin özgül ağırlık ve boşluk oranları AASHTO T275 standardına uygun olarak parafilm kaplama yöntemi ile belirlenmiştir. Bu yöntemde, sıkışmış karışım numuneleri parafilm ile su geçirmeyecek şekilde kaplanarak (Şekil 5.8a) özgül ağırlık sehpasında tartımları yapılarak (Şekil 5.8b) boşluk analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.8: Sıkıştırılmış numunelerin boşluk analizleri. a. numunelerin parafilmle kaplanması, b. tartımların yapıldığı özgül ağırlık sehpası.

Boşluk analizlerinde önemli parametrelerden birisi de bitümlü karışım teorik özgül ağırlığı (SG_T)'dir. Bu değer, 25°C'deki bitümle kaplanmış gevşek malzemenin kütesinin, malzemeyle eşit hacimdeki ve aynı sıcaklıktaki suyun kütesine oranıdır. ASTM D2041 standardına göre uygulanan deney düzeneği, 4000 ml vakuma dayanıklı kalın cidarlı manometreli piknometre, 30 mm Hg (4,0 kPa) güce sahip vakum pompası, hava kabarcıklarının daha hızlı çıkması için çalkalama cihazından oluşmaktadır (Şekil 5.9a). standartta belirtildiği gibi seçilen karışım gradasyonlarının maksimum dane boyutu esas alınarak deney için en az 2000 g ağırlığında numune hazırlanmıştır. Belirtilen miktarda hazırlanan karışım numunesi, taneleri kırmamaya özen göstererek ve ince agregadan oluşmuş topakların boyutu 6,4 mm'den küçük olacak şekilde elle tanelenerek ayrılmıştır (Şekil 5.9b) (ASTM D2041, 2019).



Şekil 5.9: Bitümlü karışımın maksimum teorik özgül ağırlık deneyi. a. deney numunesinin hazırlanması, b. elle tanelenerek ayrılmış karışım.

Denyde, tanelenerek ve karıştırılarak soğutulmuş karışım, piknometreye konarak tartılır ve tartım kaydedilir (K). Malzemenin üzerini örtecek kadar saf su ilave edilir. Daha sonra piknometre vakum uygulamak üzere cihaza bağlanır. Karışım içerisindeki hava kabarcıklarının tamamen alınana kadar mekanik cihazlarla çalkalama işlemi uygulanır. Piknometrenin tamamı su doldurularak $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 'ye ayarlı su banyosunda bekletilir. Piknometre içindeki malzeme ve suyun sıcaklığı 25°C 'ye geldiğinde, piknometre hemen kurularak tartılır. Tartım kayıt edilir (L). Tüm tartım işlemleri tamamlandıktan sonra

Eşitlik 1’de yerine yazılarak karışım maksimum teorik özgül ağırlığı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\text{Karışım teorik özgül ağırlığı (SG}_T\text{)} = \frac{K-M}{(K-M)-(L-N)} \quad (1)$$

M: Piknometrenin boş ağırlığı, g.

N: Piknometrenin 25°C’de saf su dolu ağırlığı, g.

K: Piknometre + numune ağırlığı, g.

L: 25°C’deki numune ve su dolu piknometre ağırlığı, g.

Sıkıştırılmış numunelerin özgül ağırlıkları ve boşluk oranları sırasıyla Eşitlik 2 ve Eşitlik 3’te verilen formüller kullanılarak belirlenmektedir:

$$\text{Karışım Özgül Ağırlığı} = \frac{A}{D-E-\frac{D-A}{F}} \quad (2)$$

$$\text{Karışım Boşluk Oranı} = \left(1 - \frac{SG}{SG_T}\right) \times 100 \quad (3)$$

A: Numunenin havadaki ağırlığı, g.

D: Parafilm kaplanmış numunenin havada ağırlığı, g.

E: Parafilm kaplanmış numunenin suda ağırlığı, g.

F: Parafilmin özgül ağırlığı, g.

SG: Karışım özgül ağırlık,

SG_T: Karışım teorik özgül ağırlık.

5.3.3 Permeabilite Testi

Geçirimli asfalt kaplamalarda en önemli parametre olan boşluk oranı ile beraber boşlukların birbiri ile bağlantılı olması da bir o kadar önemlidir. Kaplama yüzeyine gelen yağış suyunu, sahip olduğu boşluklu yapısı sayesinde kaplama içerisine alarak verilen boyuna ve enine eğimlerle hızlı bir şekilde en yakın drenaj tesisine ulaşmasını sağlar. Kaplama içerisinden geçen suyun miktarını ve hızını belirlemek için uygulanabilecek deneylerden biri permeabilite deneyidir. Permeabilite deneyi düşey ve yatay olarak iki

şekilde uygulanabilir. Permeabilite deneyleri sonucunda k geçirimsizlik katsayısı belirlenir. Boşluk yapısının artması geçirimsizlik katsayısını arttıracığından haliyle permeabilite artış gösterecektir. Uygulanacak geçirimsiz asfalt kaplamasının permeabilite düzeyi karışım tasarımı esnasında belirlenmektedir.

Geçirgenliği belirlemek için kullanılan sistemlerden biri de sabit seviyeli permeabilite deneyidir. Bu sistem, 101,6 mm çaplı silindirik numunelerin permeabilite katsayılarını ölçmek için özel olarak geliştirilmiş bir "rijit duvar permeametri" kullanılarak belirlenir. Şekil 5.10'de görülen sistem, "kabarcık tüplü sabit seviyeli permeametre" olarak adlandırılmaktadır. Yan duvar sızıntısını önemli ölçüde azaltan bu sistem, çok düşük hidrolik gradyanların uygulanmasına izin vermekle birlikte yüksek akış oranlarına sahip olan malzemelerinin test edilmesine olanak tanımaktadır. Numunenin kalıptan çıkarılmadan yerleştirildiği permeametre, sabit su seviyesini korumak için su ile dolu bir hazne içerisine yerleştirilmektedir (Şekil 5.10). Test başlamadan önce kabarcık tüpünün ucu kapatılarak, sistemin rezervuarı belirli bir seviyeye kadar vakum pompası yardımıyla su ile doldurulur. Bu seviye stabil duruma geldiğinde seviye kaydedilir, kabarcık tüpünün ucu açılarak deney başlatılır. Su, permeametrenin silindirik haznesinden numune boyunca aktığından, kabarcık tüpünün tabanından hava kabarcıkları ortaya çıkmaktadır. Deney sonunda rezervuardaki su seviyesi ve akış süresi kaydedilir. Numune yüksekliği (L) ve toplam seviye kaybını veren kabarcık tüpünün tabanı ile sistemin içine yerleştirildiği su haznesinin üst kısmı arasındaki yükseklik farkı (H) belirlenir. Numuneden geçen toplam su debisi (Q), rezervuar tüpünün iç alanı ile deneyin başlangıç ve bitişi arasındaki seviye farkı çarpılarak belirlenir. Şekil 5.10a'da kullanılan düşey permeabilite deney düzeneği ve Şekil 5.10b'de şematik şekli gösterilmiştir. Permeabilite katsayısı, Darcy yasası kullanılarak hesaplanır (Cetin vd., 2014). Geçirimsiz kaplama yapılarında minimum permeabilite katsayısı değerinin yaygın olarak 102 cm/s (~100 m/gün) olması önerilmektedir (Mallick vd., 2000; FDOT, 2012). Eşitlik 4'de permeabilite katsayısının hesap yöntemi verilmiştir.

$$\text{Permeabilite katsayısı}(k) = \frac{Q}{i \times A \times t} \quad (4)$$

$$Q = (F_{\text{start}} - H_{\text{finish}}) \times A \quad (4a)$$

$$i = (H_2 - H_1) / L \quad (4b)$$

Eşitlik 4a ve Eşitlik 4b, Eşitlik 4'de yerine yazılması ile elde edilen Eşitlik 4c denklemiyle permeabilite katsayısı "k" hesaplanmaktadır.

$$\text{Permeabilite katsayısı}(k) = \frac{(H_{\text{start}} - H_{\text{finish}}) \times L}{(H_2 - H_1) \times t} \quad (4c)$$

Q : Debi (Su akış hızı)

ı : Hidrolik gradient

H₂ : Su haznesinde ki su yüksekliği, cm

H₁ : Kabarcık tüpü alt ucu yüksekliği, cm

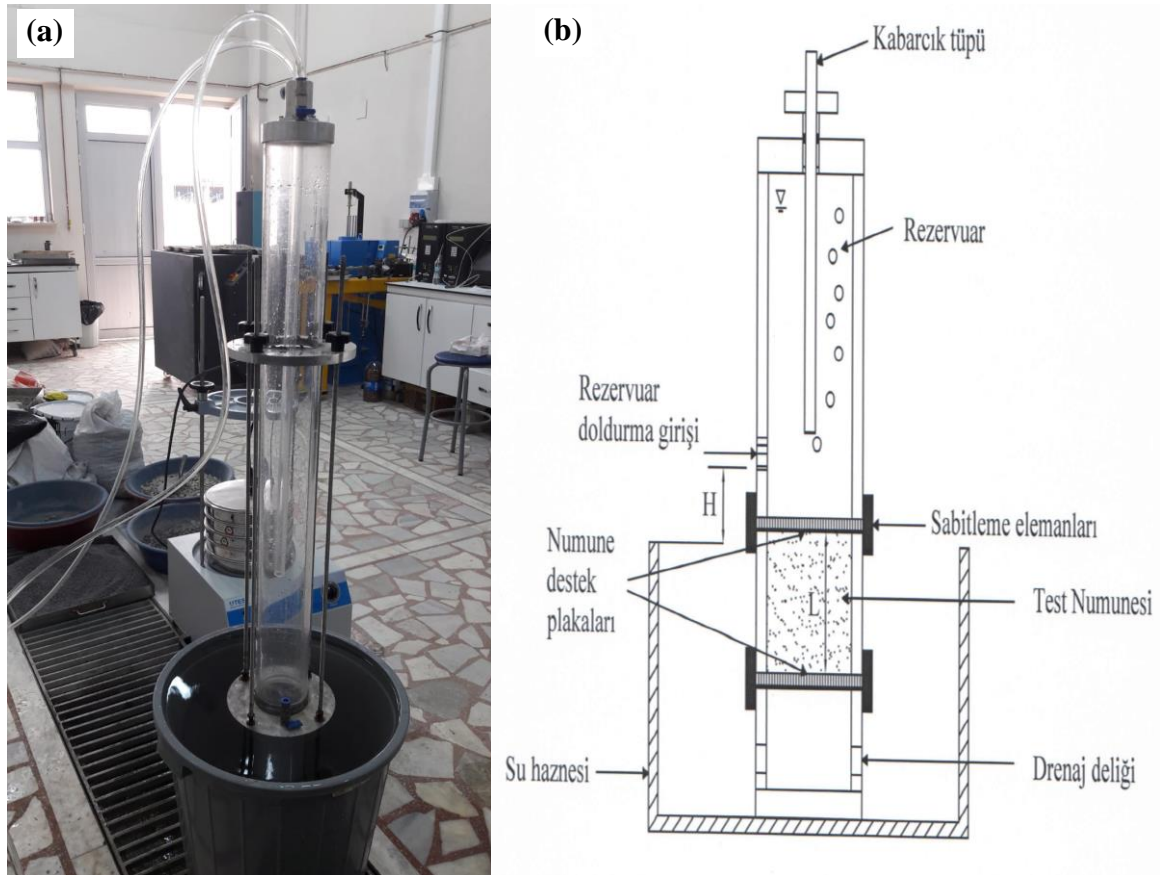
H_{start}: Başlangıç su yüksekliği, cm

H_{finish}: Bitiş su yüksekliği, cm

L : Numune yüksekliği, cm

A : Numune Alanı

t : Başlangıç ile bitiş arasında geçen zaman



Şekil 5.10: Permeabilite deney düzeneği. a. fotoğrafı, b. şematik şekli.

5.3.4 Cantabro Aşınma Deneyi

Geçirimli asfalt kaplama boşluk oranının fazla olması sebebiyle kaplama yüzeyinden koparak parça kaybetme olayı (sökülme) daha fazla görülmektedir. Geçirimli asfalt kaplamalarda sökülme direncinin belirlenmesinde Cantabro aşınma deneyi uygulanmaktadır. TS EN 12697-17 standardına uygun olarak gerçekleştirilen deneyde, Şekil 5.11’de gösterilen ve dakikada 30-33 tur hızda dönen Los Angeles aşındırma tamburuna yerleştirilen tek sıkıştırılmış numunenin 300 tur sonundaki aşınma kaybı belirlenmektedir. Aşınma kaybı, Şekil 5.12’de görüldüğü gibi deney öncesi ve sonrasında numunelerin belirlenen ağırlıkları oranlanarak yüzde olarak hesaplanır. Belirtilen şartnamede Cantabro aşınma kaybının %25’den fazla olması istenmemektedir (TS EN 12697-17, 2004).



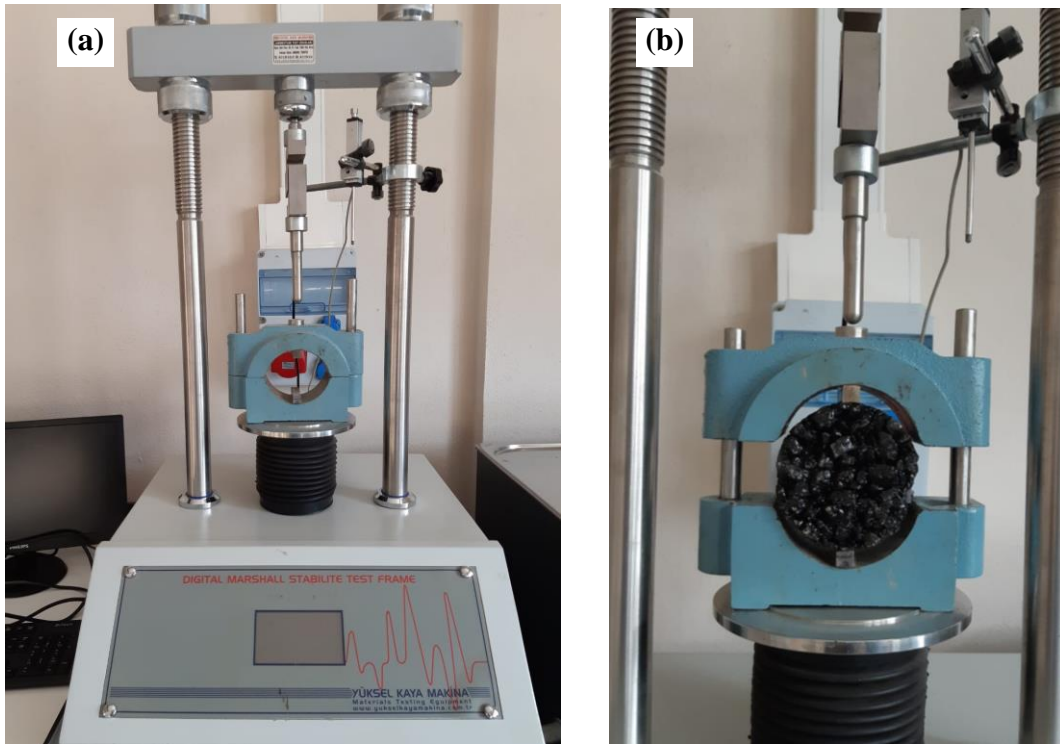
Şekil 5.11: Cantabro aşınma kaybı deney aleti.



Şekil 5.12: Cantabro aşınma deney öncesi ve sonrası numune örnekleri.

5.3.5 Dolaylı Çekme Deneyi

Asfalt kaplamaların maruz kaldığı gerilme durumunu kısmen yansıtan bu deney, asfalt karışımların dayanımının karakterizasyonunda yaygın bir şekilde kullanılan temel deneylerden biridir. Deney sonuçları asfalt karışımların yaklaşık mukavemeti ve kaplama bozulma potansiyeli hakkında bilgi vermektedir. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi, özellikle performansı bitüm filminin çekme dayanımına bağlı olan geçirimli asfalt kaplama karışımların tasarımında, bitümün bağlayıcılığının ve yüke maruz kalması durumunda asfalt matriksinin sergileyeceği davranışın belirlenmesinde önemli bir deneydir. Bu test, 50 mm/dakika deformasyon hızı ve 25 °C sıcaklıkta Şekil 5.13a'da gösterilen Marshall stabilite test cihazında çelik şeritlerin adapte edildiği modifiye kırma çenesi (Şekil 5.13b) kullanılarak ASTM D6931 prosedürüne uygun olarak gerçekleştirilir (ASTM D6931-07, 2007).



Şekil 5.13: Dolaylı çekme deney aleti. a. Marshall test cihazı, b. dolaylı çekme deneyi için modifiye edilen kırma çenesi.

Şekil 5.14'de gösterilen biçimde eğrisel yükleme şeritleri arasına yerleştirilen silindirik numune, düşey çap düzlemine paralel olarak uygulanan basınç yüküne maruz bırakılmaktadır. Uygulanan yükün yönüne dik olarak oluşan çekme gerilmesi, numunenin

kırılmasına sebep olan nihai yük ve yüke maruz kalan numune alanı dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Dolaylı çekme mukavemeti Eşitlik 5’de gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\sigma_T = \frac{2.F}{\pi.h.d} \times 1000 \quad (5)$$

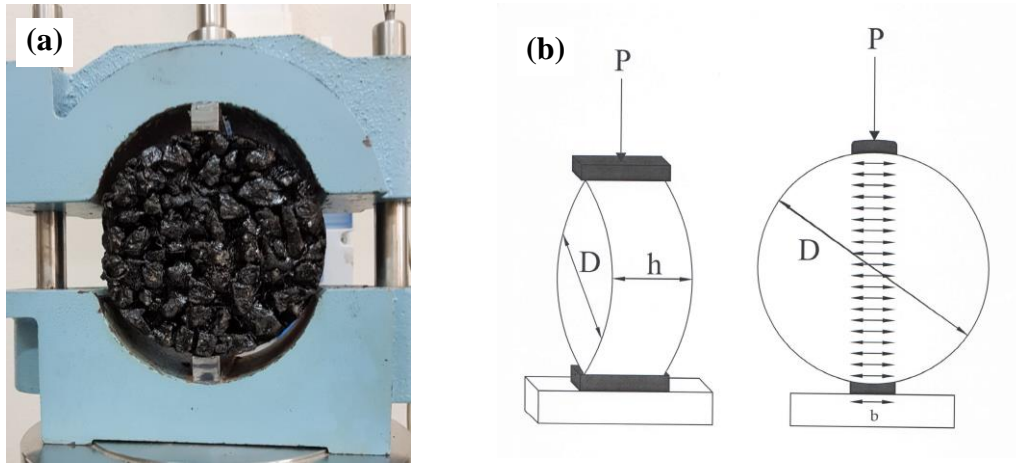
σ_T : İndirek Çekme Mukavemeti,

F : Kırılma yükü,

π : Pi katsayısı

h : Numune kalınlığı

d : Numune çapı



Şekil 5.14: Dolaylı çekme deney aleti. a. Marshall test cihazı, b. eğrisel yükleme şeritleri arasına yerleştirilen silindirik numune.

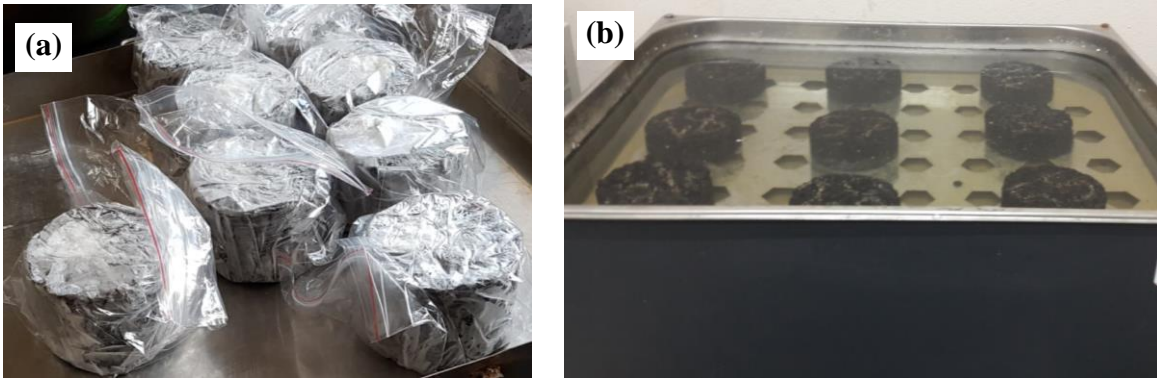
5.3.6 Nem Hasarına Karşı Direnç

Geçirimli asfaltın boşluk oranının fazla olması gerektiğinden suya daha fazla maruz kalırlar. Asfalt karışımı içerisine nüfuz eden su, bitümlü bağlayıcı ve agrega arasındaki bağlara zarar vererek kaplamada oluşan bozulmaları hızlandırmaktadır (Shen vd., 2008). Meydana gelebilecek hasarın boyutunu saptayabilmek için kullanılan yöntemlerden biri de AASHTO T-283 standardıdır.

AASHTO T-283 standardında, özgül ağırlıkları birbirine yakın en az 3 adet numune üzerine koşullandırılmış ve koşullandırılmamış olarak 2 grup hazırlanarak yapılır. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış gruplardaki sıkıştırılmış numunelerin dolaylı

çekme dayanımları Şekil 5.13'deki Marshall testi yükleme çerçevesi ile belirlenir. Koşullandırma işleminde, numuneler vakum tatbik edilemediği için ıslatılarak plastik bir film tabakası ile iyice sarılır ve her biri içerisinde 10 ml su bulunduran plastik torbalara konulur (Şekil 5.15a). Sonrasında, numuneler 16 saat -18 °C'de derin dondurucuda ve 24 saat 60 °C'deki su banyosunda bekletilir (Şekil 5.15b). Son olarak, 2 saat 25°C'deki su banyosunda bekletilen numuneler dolaylı çekme deneyine tabi tutulur. Asfalt karışımların suyun etkisine karşı direncinin sayısal indeksi, donma/çözülme koşullandırmasından sonraki dayanımının orijinal dayanıma oranı olarak ifade edilmektedir. Nem hasarı direnci oranı Eşitlik 6 kullanılarak hesaplanır.

$$\text{Nem hasarı direnci oranı} = \frac{IDT_{\text{Koşullanmış}}}{IDT_{\text{Koşullanmamış}}} \quad (6)$$



Şekil 5.15: Numunelerin koşullandırma aşamaları. a. plastik bir film ile sarılarak plastik torbalara konulması, b. 60 °C'lik su banyosunda bekletilmesi.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Bu bölümde, ferrokrom cürufu ile üç farklı geçirimli asfalt agrega karışım gradasyonu için hazırlanan karışımlar üzerinde gerçekleştirilen tasarım analizlerinin sonuçları yer almaktadır. Geçirimli asfalt karışım tasarımlarında uygulanan boşluk analizleri, permeabilite, Cantabro (parça kopma oranı), dolaylı çekme, su hasarı deneylerinde karışım gradasyonlarının sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, Tip-3 gradasyonu için doğal agrega ile hazırlanan karışımlardan elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak ve ferrokrom cürufunun geçirimli asfalt kaplama karışımlarında kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

6.1 Boşluk Analizi Sonuçları

Geçirimli asfalt kaplamaların tasarımında esas alınan parametrelerden en önemlisi boşluk oranıdır. Kaplamanın geçirimsizlik düzeyinde önemli olan yapısındaki birbiri ile bağlantılı olan boşluklar, agrega dane boyutu dağılımı ve kullanılan bitümlü bağlayıcı miktarı etkilenmektedir.

Sıkıştırılmış geçirimli asfalt karışımların boşluk analizlerinin gerçekleştirilmesinde, öncelikle parafilmle kaplanan numunelerin özgül ağırlıkları (AASHTO T275'e göre) ve bitümlü karışım teorik özgül ağırlıkları (ASTM D2041'e göre) belirlenmiştir. Bu değerler Eşitlik 3 kullanılarak sıkışmış numunelerin boşluk oranları hesaplanmıştır. Analizler her bir karışım tipi ve bitüm oranında en az üç numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Boşluk analizlerinin sonuçları Tablo 6.1'de verilmiştir. Ayrıca, deneylerle ilgili tüm veriler EK-3'de verilmiştir.

Tablo 3.8'de bazı ülkelere ait geçirimli asfalt karışım tasarım kriterleri incelendiğinde minimum boşluk değerinin %18-22 arasında kabul edildiği görülmektedir (Alvarez vd., 2006; Moriyoshi vd., 2014). Ülkemizde geçirimli asfalt karışım tasarımında esas alınan KTŞ'de ise minimum boşluk değeri %20 olarak kabul edilmektedir (KTŞ, 2013). Çalışma sonuçlarının değerlendirilmesinde, dünya ülkeleri arasında kabul edilen kriterlerden en düşük değer olan %18 esas alınmıştır. Üç farklı karışım gradasyon tipi arasında en yüksek

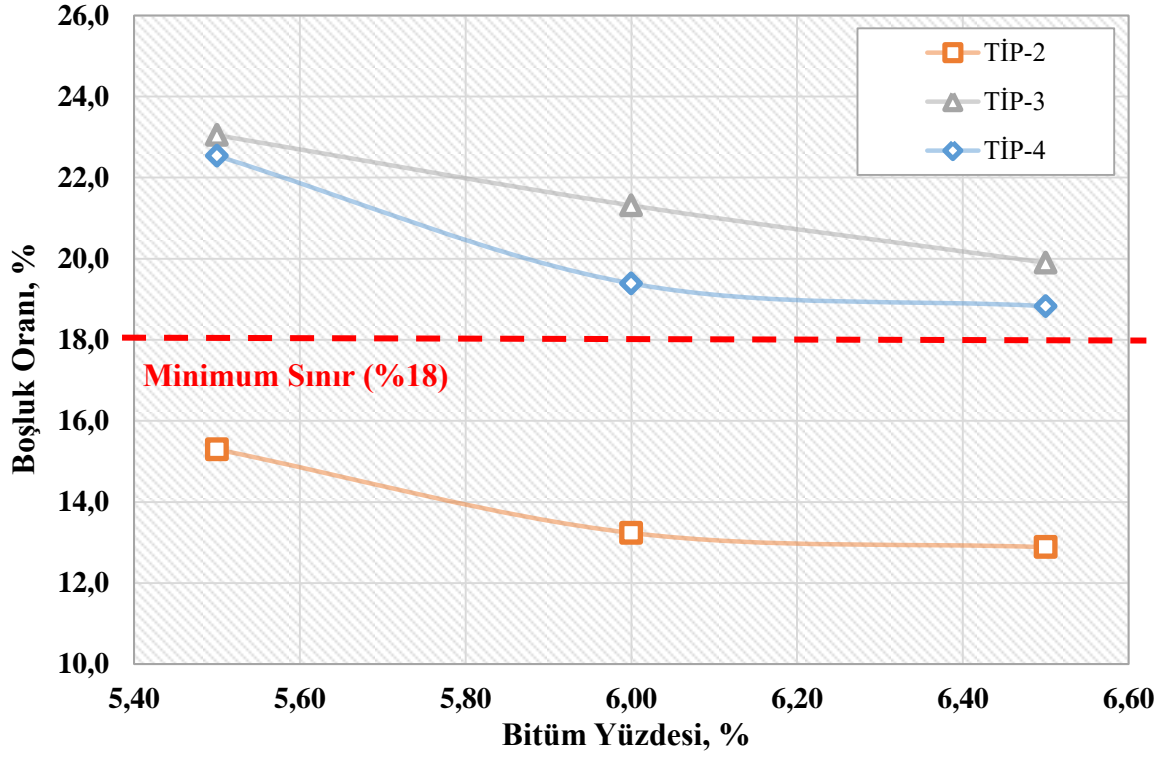
kaba agrega yüzdesine sahip olan Tip-3 karışımların diğer iki gradasyon tiplerine oranla tüm bitüm yüzdelerinde daha yüksek boşluk değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 6.1: Seçilen karışım gradasyonlarına ait boşluk analiz sonuçları.

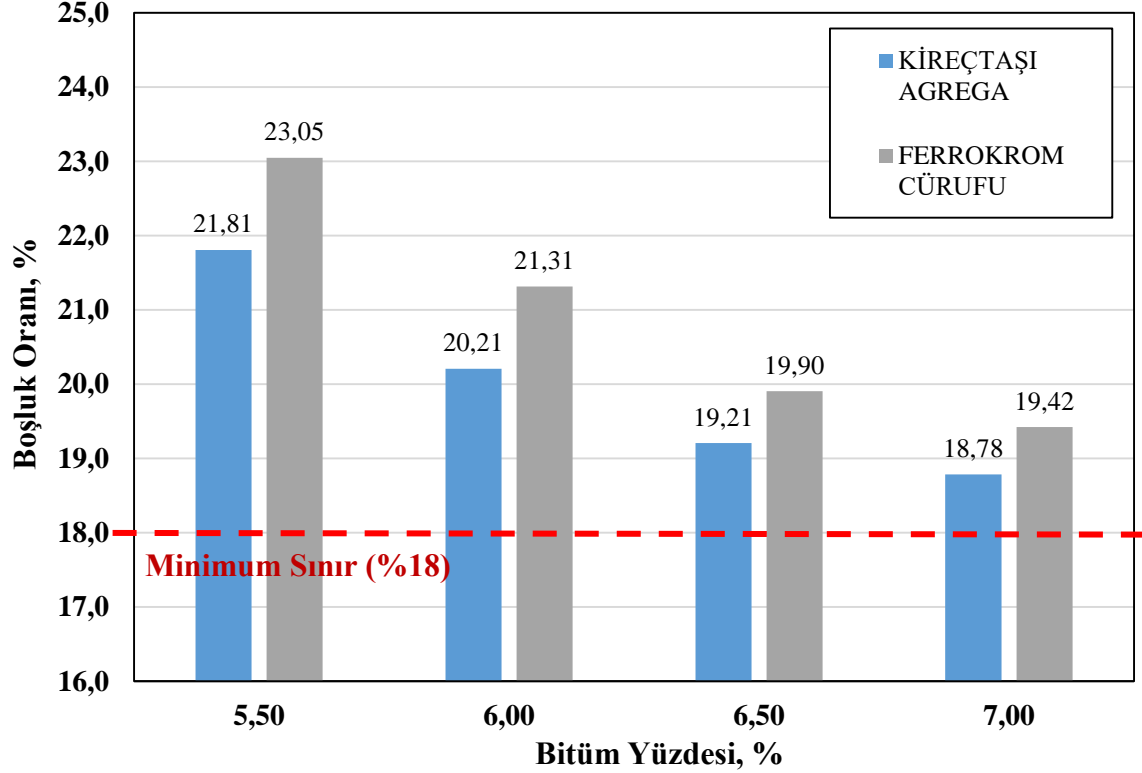
Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi (%)	Özgül Ağırlık, g.	Teorik Özgül Ağırlık, g.	Boşluk Oranı (%)
Tip-2	%5,50	2,246	2,652	15,296
Tip-2	%6,00	2,300	2,652	13,235
Tip-2	%6,50	2,310	2,652	12,886
Tip-3	%5,50	1,996	2,594	23,047
Tip-3	%6,00	2,041	2,594	21,313
Tip-3	%6,50	2,078	2,594	19,902
Tip-4	%5,50	1,972	2,545	22,534
Tip-4	%6,00	2,052	2,545	19,389
Tip-4	%6,50	2,066	2,545	18,829

Seçilen gradasyon tiplerine ait karışımlardaki boşluk oranlarının bitüm yüzdelerine göre değişiminin verildiği Şekil 6.1'deki grafik incelendiğinde, doğal olarak tüm gradasyon tiplerinde bitüm oranı arttıkça, bitümlü dolu boşluk miktarı arttığından dolayı boşluk oranlarının azaldığı görülmektedir. Tip-2 gradasyonu haricindeki diğer gradasyonların tüm bitüm oranlarındaki boşluk değerleri, minimum boşluk oranını (%18) sağlamaktadır. Maksimum dane çapı ve kaba agrega oranının büyük olduğu karışımlar (Tip-3) en yüksek boşluk oranına sahiptirler. Tip-3'ün boşluk oranları, benzer gradasyon tipine sahip olan Tip-4 karışımlardan yaklaşık olarak % 4,50 oranında daha fazla olduğu görülmektedir. 9,50 mm nominal dane boyutuna sahip ve daha ince kaba agrega içeren Tip-2 karışımların boşluk değerleri minimum değerin altında kalmıştır.

Ayrıca, ferrokrom cürufu için farklı gradasyonların tasarım deney sonuçlarından elde edilen en iyi karışım gradasyonunda (Tip-3) kireçtaşı agrega ile geçirimli asfalt karışım tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.2'de Tip-3 gradasyonu için ferrokrom cürufu ve kireçtaşı agrega ile dört farklı bitüm yüzdesinde hazırlanan numunelere ait boşluk oranları karşılaştırılmıştır. Grafik incelendiğinde, ferrokrom cürufu ile hazırlanan geçirimli asfalt karışımların boşluk oranlarının yaklaşık %1 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu sonucun belirtildiği üzere ferrokrom cürufunun boşluklu yüzey yapısı dolayısıyla bitümlü bağlayıcının bir miktar boşluklar tarafından absorbe edilmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.1: Seçilen karışım gradasyonlarında ferrokrom cürufu ile hazırlanan numunelere ait boşluk oranlarının bitüm yüzdelere göre değişim grafiği.



Şekil 6.2: Tip-3 gradasyonunda ferrokrom cürufu ve kireçtaşı agrega ile farklı bitüm yüzdelere hazırlanan karışımların boşluk oranları.

6.2 Permeabilite Deneyi Sonuçları

Geçirimli asfalt kaplamaların geliştirilme amacına yönelik olan en önemli tasarım parametresi permeabilite özelliğidir. Karışımların boşluk oranları ile paralellik gösteren geçirgenlik düzeyleri, kaplama içerisinde geçen suyun miktarını ve hızını belirlemek için düşey ve yatay olarak uygulanabilen permeabilite deneyleri ile belirlenmektedir. Boşluk yapısının artması geçirimsizlik katsayısını arttıracığından haliyle permeabilite değeri de artış gösterecektir.

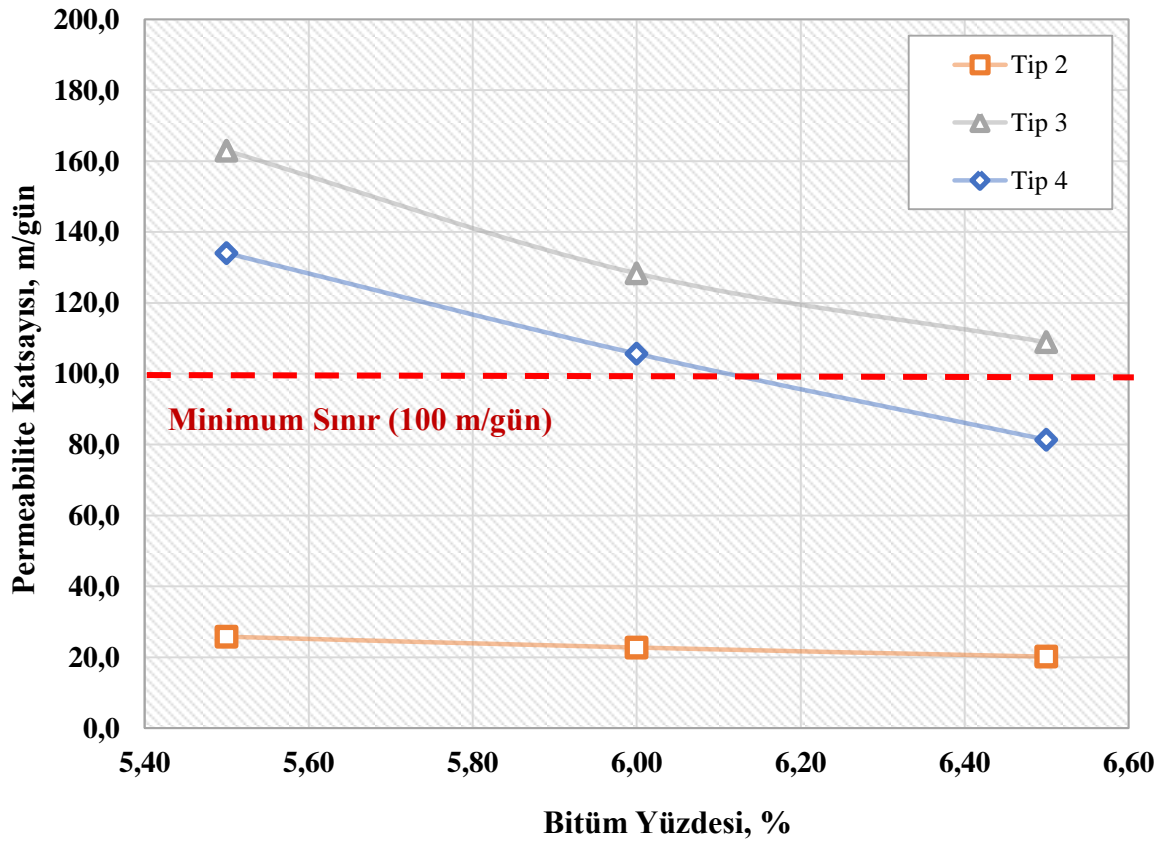
Geçirimli asfalt kaplama karışımların hidrolik geçirgenlik katsayıları, özel olarak geliştirilmiş "rijit duvar permeabilite" ile belirlenmiştir. Bölüm 4'te deney yönteminin anlatıldığı deney sistemi "kabarcık tüplü sabit seviyeli permeabilite" olarak da adlandırılmaktadır. Permeabilite katsayıları, Eşitlik 4 kullanılarak hesaplanmıştır. Deney, her bir karışım tipi ve bitüm oranında en az üç numune üzerinde beşer kez gerçekleştirilmiştir. Deneyden elde edilen ortalama değerler Tablo 6.2'de, her numune için gerçekleştirilen deney verileri EK-4'de kapsamlı olarak verilmiştir.

Tablo 6.2: Seçilen karışım gradasyonlarına ait permeabilite deney sonuçları.

Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi (%)	Boşluk Oranı (%)	Permeabilite Katsayısı, k (m/gün)
Tip-2	%5,50	15,296	25,792
Tip-2	%6,00	13,235	22,737
Tip-2	%6,50	12,886	20,166
Tip-3	%5,50	23,047	162,912
Tip-3	%6,00	21,313	128,310
Tip-3	%6,50	19,902	108,876
Tip-4	%5,50	22,534	134,020
Tip-4	%6,00	19,389	105,635
Tip-4	%6,50	18,829	81,349

Yapılan önceki çalışmalar ve dünyada kabul gören bazı standartlarda, geçirimsiz kaplama sistemleri için permeabilite katsayısı değerinin yaygın olarak 0,12-0,50 cm/s aralığında olduğu görülmektedir (Mallick vd., 2000; FDOT, 2012). Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde, öngörülen kriterler arasındaki minimum değer olan 0,12 cm/s (≈ 100 m/gün) dikkate alınmıştır.

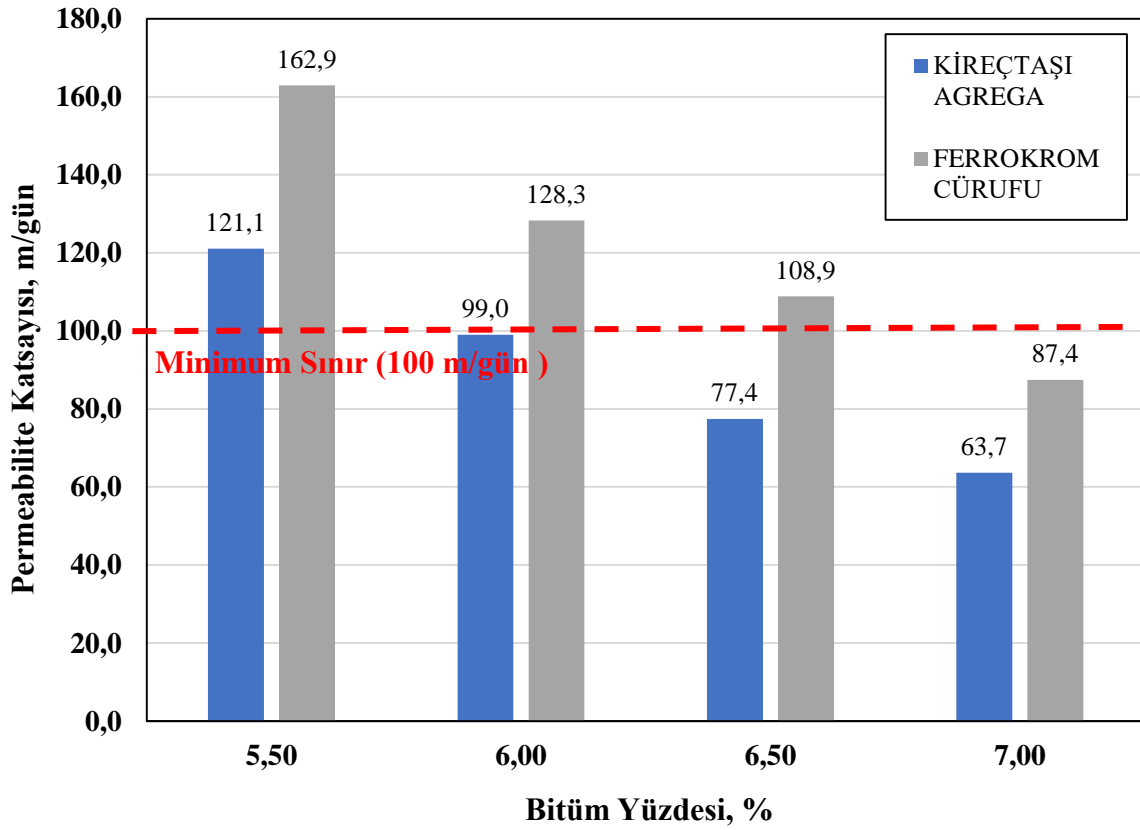
Şekil 6.3’de geçirimli asfalt karışımlarına ait farklı bitüm yüzdelerindeki permeabilite katsayıları verilmiştir. Grafik incelendiğinde, en iyi hidrolik geçirgenlik değerleri Tip-3 gradasyonuna sahip numunelerden elde edilmiştir. Tip-3 numunelerin deney sonuçları, tüm bitüm yüzdelerinde 100 m/gün olan minimum sınır değerinin üzerinde elde edilirken, Tip-4 gradasyon tipinde ise sadece %6.50 bitüm yüzdesinde sınır değerinin altında kalmıştır. Tip-2 karışımların permeabilite değeri (≈ 25 m/gün) diğer karışımlardan ve sınır değerinin oldukça altında kalmıştır. Tüm gradasyon tiplerinde bitüm oranındaki artışla, karışımların permeabilitesi azalmaktadır. Gradasyon tipi açısından diğer karışım tiplerine göre düşük boşluk oranına sahip olan Tip-2’de azalma oranı oldukça düşüktür. Bu durum, Tip-2 karışımının yüzey alanının daha fazla olmasından kaynaklı olarak asfaltla dolu boşluk oranının fazla etkilenmemesine bağlanabilir. Permeabilite deney sonuçları, beklenildiği üzere karışımların boşluk değerlerini teyit eder niteliktedir.



Şekil 6.3: Seçilen karışım gradasyonlarında ferrokrom cürufu ile hazırlanan numunelere ait permeabilite değerlerinin bitüm yüzdelerine göre değişim grafiği.

Tip-3 gradasyonunda kireçtaşı agrega ile dört farklı bitüm yüzdesinde (%5,50, %6,00, %6,50, %7,00) hazırlanan numunelerin permeabilite katsayılarının ferrokrom cürufu

karışım değerleriyle karşılaştırıldığı Şekil 6.4'te verilen grafik incelendiğinde, ferrokrom cürüflü numunelerin geçirgenlik değerlerinin kireçtaşı agregası ile hazırlanan numunelerden artan bitüm yüzdelere göre sırasıyla 41,80, 29,30, 31,50 ve 23,70 m/gün daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun boşluk analizinde belirtildiği gibi bitümlü bağlayıcının ferrokrom cürufunun pürüzlü ve boşluklu yüzey yapısına bağlı olarak absorbe edilmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Kireçtaşı agregası kullanılan karışımlar %5,50 ve %6,00 bitüm oranlarında minimum sınır değeri sağlarken ferrokrom cürufunun sadece %7,00 bitüm oranında sınır değerinin altında kaldığı belirlenmiştir. Boşluk analizleri ve permeabilite deney sonuçları, ferrokrom cürufunun geçirimli asfalt kaplama karışımlarının geçirgenlik kapasitesini önemli düzeyde artırdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 6.4: Tip-3 gradasyonunda ferrokrom cürufu ve kireçtaşı agregası ile farklı bitüm yüzdelerinde hazırlanan karışımların permeabilite deney sonuçları.

6.3 Cantabro Aşınma Deneyi Sonuçları

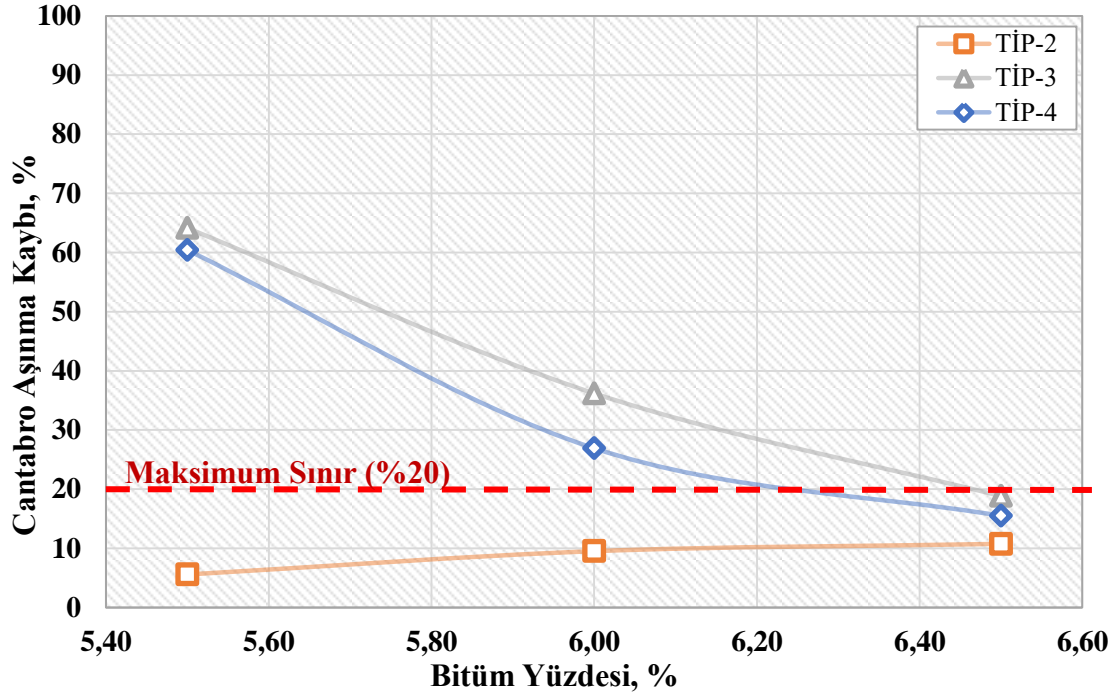
Geçirimli asfalt kaplamalarda, çevresel koşulların ve trafiğin etkisiyle boşluklu yapısından kaynaklanan sökümler daha yaygın olarak görülmektedir. Dolayısıyla, geçirimli asfalt kaplama tasarımında esas alınan performans özelliklerinden biriside sökülme direncidir.

Bu deney, ferrokrom cürufunun beklenen olumlu etkisinin belirlenmesi açısından da önemlidir. Bu çalışmada, sökülme direncinin belirlenmesinde, yaygın olarak kullanılan Cantabro aşınma deneyi TS EN 12697-17 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Karışım tipi ve bitüm oranları için en az üç numune üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen tüm değerler EK-4'de verilmiştir. Çalışma sonuçlarının değerlendirilmesinde, bazı ülkelerin ait tasarım kriterleri ve sınır değerlerin verildiği Tablo 3.8'de, yaygın olarak Cantabro aşınma kaybının maksimum %20 olarak kabul edildiği görülmektedir.

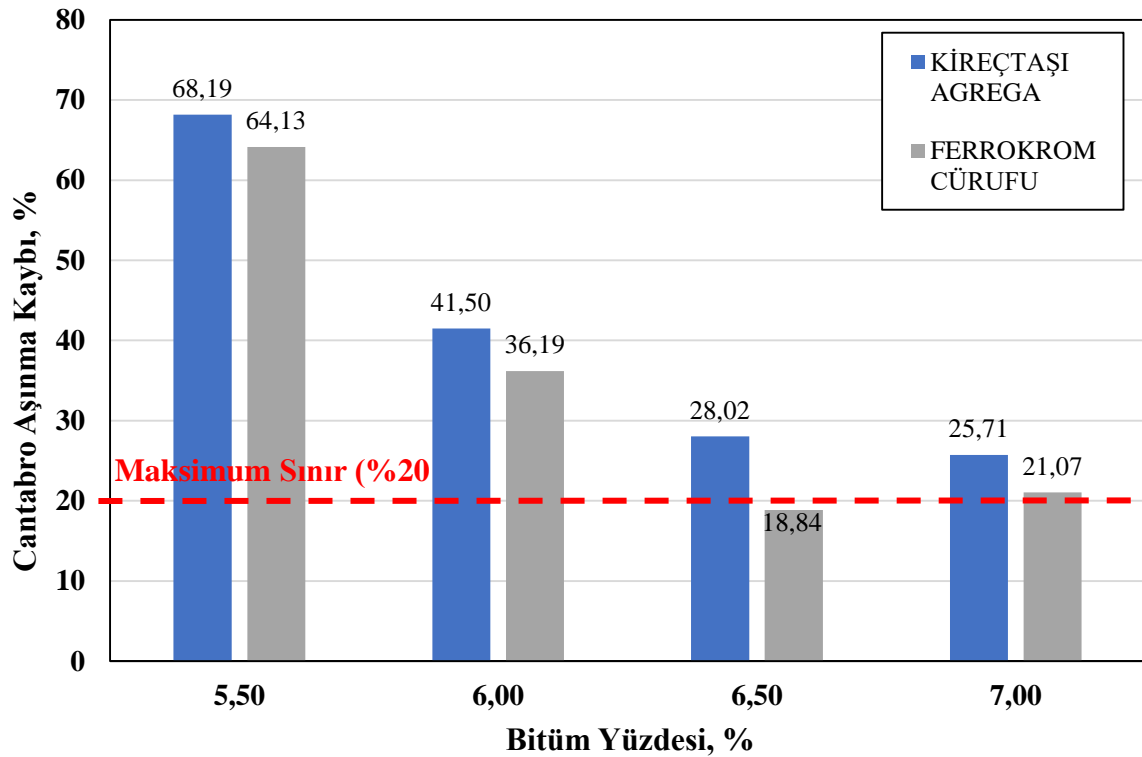
Seçilen geçirimli asfalt karışım gradasyonları için farklı bitüm yüzdelerinde üretilen numunelerin Cantabro aşınma kaybı değerlerinin verildiği Şekil 6.5 incelendiğinde, diğer karışım tiplerine nazaran düşük boşluk oranına sahip olan Tip-2 karışımların aşınma değerleri, agrega temas yüzeylerinin artışına bağlı olarak tüm bitüm yüzdelerinde maksimum sınır değer olan %20'nin altında kalmıştır. Tip-3 ve Tip-4 gradasyon tiplerinde parçalanma ve sökülme kaybının sadece % 6,50 bitüm yüzdesinde maksimum sınır değeri sağlandığı görülmüştür. Bu karışımların (Tip-3 ile Tip-4) %6,50 bitüm yüzdesindeki Cantabro aşınma kayıpları birbirine oldukça yakındır. Tip-3 ve Tip-4 karışım tiplerinin Cantabro aşınma kaybı değerleri, bitümlü bağlayıcı oranının artışı ile büyük oranda bir iyileşme sağlarken, Tip-2 gradasyonunda etkilenmediği belirlenmiştir. Geçirimli asfalt kaplamaların sökülme direnci, bitümlü bağlayıcı özelliklerine bağlı olmakla birlikte, bitüm-agrega aderansı ve bitüm film kalınlığından da etkilenmektedir. Ferrokrom cüruf agregasının pürüzlü yüzey yapısı ile bitüm aderansını aynı zamanda sökülme direncini kısmen iyileştireceği beklenilmiştir. Dolayısıyla, Tip-2 karışımının agrega yüzey alanı fazla olduğundan bitüm artışı ile film kalınlığının diğer karışım tipleri kadar etkilenmediği söylenebilir. Tip-3 ve Tip-4'de ise agrega temas yüzeyleri küçük olduğundan bitüm oranında ki artışı karışımı elastikleştirmesi ve gevrek davranışa bağlı kopmaların büyük oranda azalmasına sebep olmuştur.

Şekil 6.6'da verilen Tip-3 gradasyonu için ferrokrom cürufu ve kireçtaşı agrega ile dört farklı bitüm yüzdesinde (%5,50, %6,00, %6,50, %7,00) hazırlanan numunelerin Cantabro aşınma sonuçları karşılaştırıldığında, ferrokrom cürufu ile hazırlanan geçirimli asfalt karışımların aşınma kaybı değerlerinin yaklaşık %4-5 oranında daha az olduğu belirlenmiştir. İki karışımdan sadece ferrokrom cürufunun %6,50 ve %7,00 bitüm yüzdesindeki aşınma kayıpları maksimum sınır değeri (%20) sağlamıştır. Bu sonucun pürüzlü ve boşluklu bir yüzey yapısına sahip olan ferrokrom cürufunun bitümlü bağlayıcı

ile daha iyi bir aderans sağlamasına bağlanabilir.



Şekil 6.5: Seçilen karışım gradasyonlarında ferrokrom cürufu ile hazırlanan numunelere ait Cantabro aşınma kaybı değerlerinin bitüm yüzdelere göre değişim grafiği.



Şekil 6.6: Tip-3 gradasyonunda ferrokrom cürufu ve kireçtaşı agrega ile farklı bitüm yüzdelere hazırlanan karışımların Cantabro aşınma kaybı sonuçları.

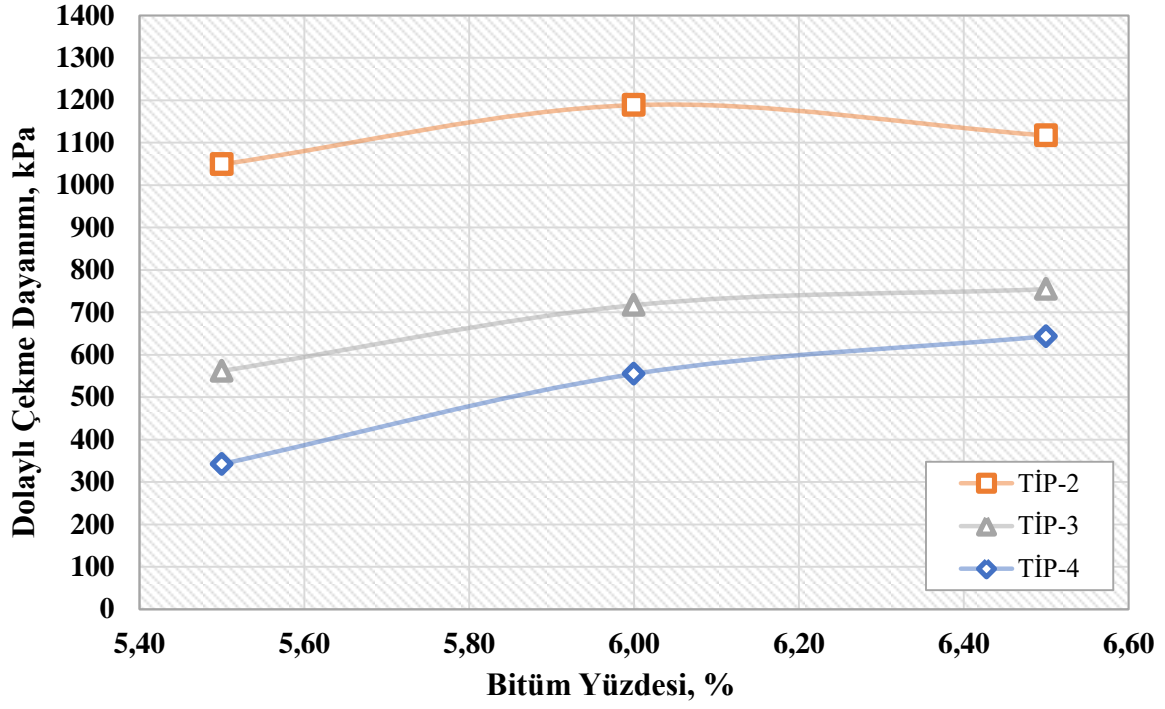
6.4 Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları

Asfalt kaplamaların maruz kaldığı gerilme durumunu ve çekme gerilmelerine karşı dayanımının belirlenmesinde uygulanan temel deneylerden birisidir. Dolaylı çekme dayanımı için literatürde tasarım için bir limit değer belirtilmemekle birlikte, karışım gradasyonundan kaynaklanan iç yapısı itibarıyla performansının belirlenmesinde, bitüm filminin çekme dayanımının ön plana çıktığı geçirimli asfalt kaplama karışımların tasarımı açısından önemlidir. Dolayısıyla, bu deney sonuçları bitümlü bağlayıcı ve agrega arasındaki aderans hakkında bilgi vereceğinden araştırma konusu açısından ayrıca önem taşımaktadır.

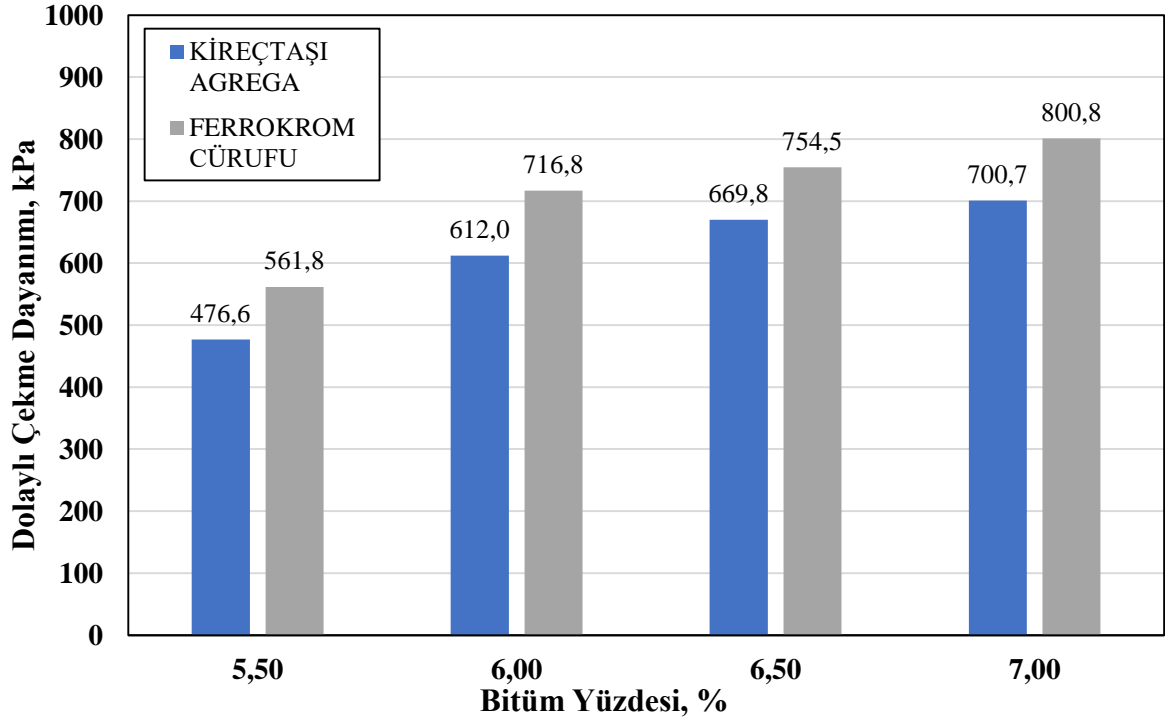
ASTM D6931 prosedürüne uygun olarak gerçekleştirilen deneyde dolaylı çekme dayanım değerleri Eşitlik 5 kullanılarak hesaplanmıştır. Karışım tipleri için farklı bitüm oranlarında en az üç numune üzerinde yapılan deney sonuçları EK-5’de sunulmuştur.

Dolaylı çekme dayanım değerlerinin verildiği Şekil 6.7 incelendiğinde, en iyi sonuçların beklenildiği gibi boşluk oranı diğer karışımlara oranla çok daha düşük olan Tip-2 karışımlardan elde edildiği görülmektedir. Tip-2 için maksimum çekme dayanımı (1188,5 kPa) %6,00 bitüm oranında elde edilmiştir. Tip-3 ve Tip-4 gradasyon tipleri için hazırlanan karışımların boşluk oranlarına bağlı olarak dolaylı çekme dayanımları Tip-2’ye göre oldukça düşüktür. Tip-3’ün çekme dayanımlarının Tip-4’e göre yaklaşık %23 oranında yüksek olduğu belirlenmiştir. Her iki karışım tipi içinde bitüm oranı arttıkça çekme dayanımının azda olsa arttığı belirlenmiştir.

Şekil 6.8’de verilen ferrokrom cürufu ve kireçtaşı agrega için karşılaştırma grafiğinde, ferrokrom cürufu ile hazırlanan geçirimli asfalt karışımların dolaylı çekme dayanım değerlerinin farklı bitüm muhtevalarında yaklaşık %11-15 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu aynı gradasyondaki iki agrega tipi için durum, pürüzlü ve boşluklu bir yüzey yapısına sahip olan ferrokrom cürufunun bitümlü bağlayıcı ile daha iyi bir aderans sağlaması ve absorbe edilen bitüm miktarı ile daha ince film kalınlıklarının elde edilmesine bağlanabilir. Dolaylı çekme ve Cantabro deneylerinin sonuçlarından belirlenen optimum bitüm değerleri birbirlerini desteklemektedir.



Şekil 6.7: Seçilen karışım gradasyonlarında ferrokrom cürufu ile hazırlanan numunelere ait dolaylı çekme değerlerinin bitüm yüzdelere göre değişim grafiği.



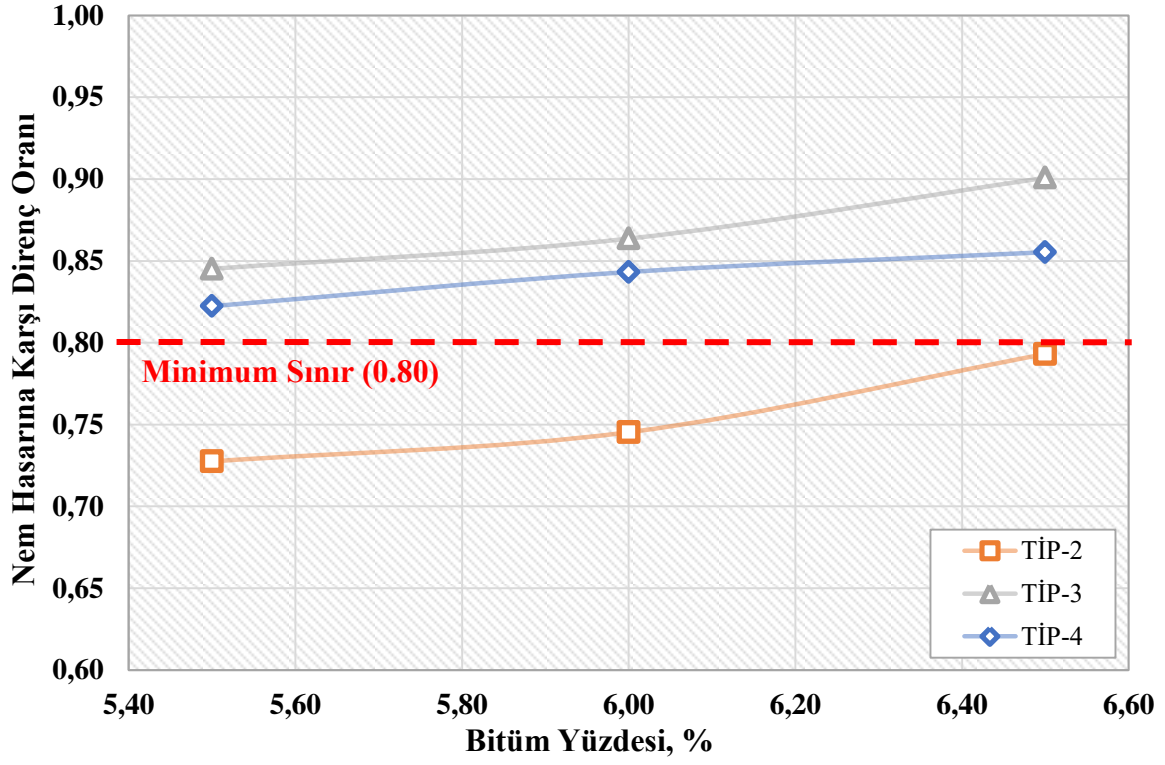
Şekil 6.8: Tip-3 gradasyonunda ferrokrom cürufu ve kireçtaşı agrega ile farklı bitüm yüzdelerinde hazırlanan karışımların dolaylı çekme deneyi sonuçları.

6.5 Nem Hasarı Deney Sonuçları

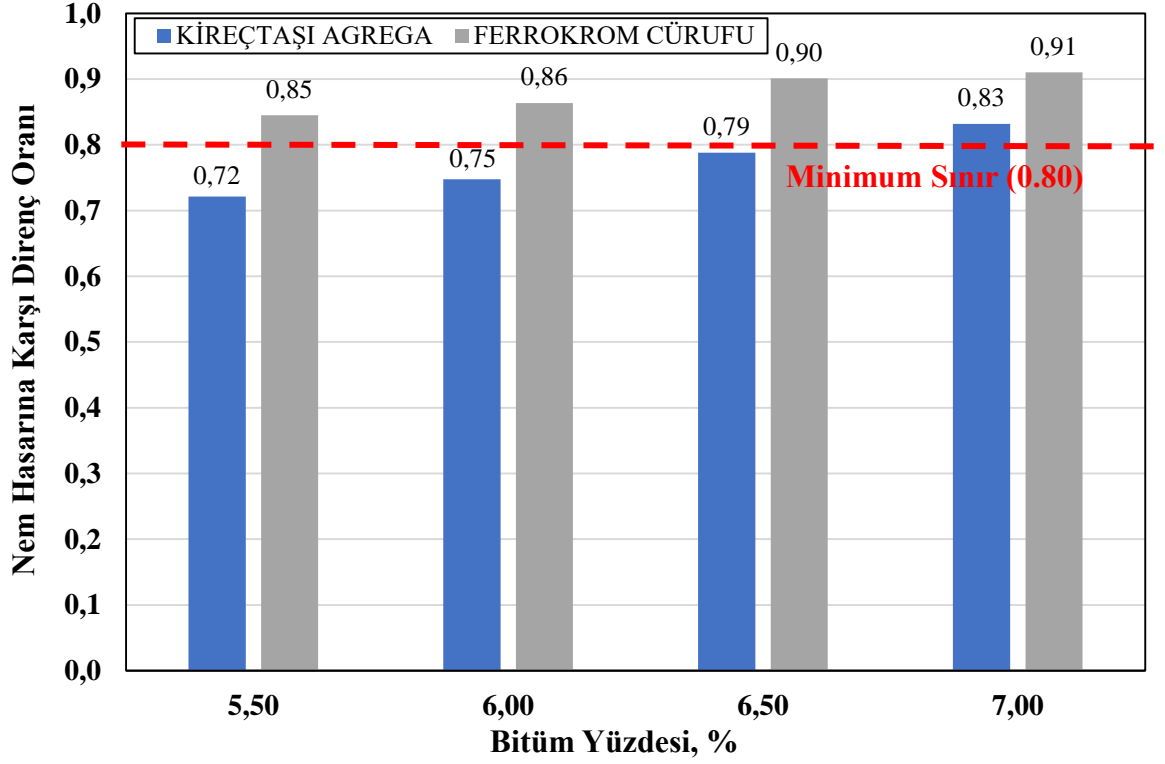
Suyun yol yüzeyinden hızlı bir şekilde uzaklaştırılması için boşluklu yapıda tasarlanan geçirimli asfalt kaplamalar servis ömrü boyunca geçirimsiz asfalt kaplamalara nazaran daha büyük temas yüzeyinde suya maruz kalırlar. Dolayısıyla, agrega ve bitümlü bağlayıcı arasındaki aderansı zayıflatarak soyulmaya sebep teşkil eden su, geçirimli kaplamada oluşan bozulmaları hızlandırmaktadır. Suyun zararını minimumda tutmak için agregayı saran film kalınlığının yüksek olması gerekmektedir. Çalışmamızda, karışımların nem hasarından etkilenme düzeyi AASHTO T-283 standardı ile saptanmıştır. Deneyler, karışım tipleri için farklı bitüm oranlarında iki grupta (koşullandırılmış/koşullandırılmamış) en az üçer numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Koşullandırılmış/koşullandırılmamış grup numunelerden elde edilen çekme dayanım oranı olarak hesaplanan nem hasarı sayısal indeks değerleri EK-7’de verilmiştir.

Şekil 6.9’de geçirimli asfalt karışım tiplerine ait farklı bitüm yüzdelerindeki nem hasarına karşı direnç değerleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde, seçilen tüm gradasyonlar için nem hasarına karşı direncinin bitüm oranının artışıyla iyileştiği görülmektedir. Tip-3 ve Tip-4 karışımların sonuçları tüm bitüm yüzdelerinde minimum sınır değer üzerinde iken, Tip-2 karışımların nem hasarına karşı direnç sınır değerinin altında kalmıştır. Tip-2 gradasyonunda agrega yüzey alanı diğer karışımlara nazaran daha fazla olduğundan aynı bitüm yüzdelerindeki bitüm film kalınlığının ince olmasından kaynaklı olarak agrega ile bitüm arasındaki aderansı zayıflatarak suya karşı direnci azaltmaktadır. Tip-3 ile Tip-4 karışımların sonuçları birbirine yakın olmakla birlikte, maksimum dane boyutunun küçük olduğu Tip-4 gradasyonunda bitüm ile sarılacak agrega yüzey alanına bağlı olarak dayanım oranı ortalama %5 civarında daha düşük elde edilmiştir.

Şekil 6.10’da verilen agrega tipinin karşılaştırma grafiğinde kireçtaşı agrega ile hazırlanan numunelerin nem hasarına karşı direncin %7,00 bitüm yüzdesi hariç minimum sınır değer olan 0,80’in altında kalmıştır. Ferrokrom cürufu ile hazırlanan geçirimli asfalt karışımların dayanım oranları ortalama %12 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ferrokrom cürufunun boşluklu ve pürüzlü yüzey yapısından dolayı bir miktar azalacak film kalınlığından dolayı nem hasarına karşı direncin kireçtaşı agregaya nazaran azalması beklenirken, yine aynı yüzey yapısının bitümlü bağlayıcı ile sağladığı aderans ile açıklanabilir. Dolayısıyla, ferrokrom cürufunun nem hasarına karşı direnci olumlu yönde etkilediği belirtilebilir.



Şekil 6.9: Seçilen karışım gradasyonlarında ferrokrom cürufu ile hazırlanan numunelere ait nem hasarı değerlerinin bitüm yüzdelere göre değişim grafiği.



Şekil 6.10: Tip-3 gradasyonunda ferrokrom cürufu ve kireçtaşı agrega ile farklı bitüm yüzdelere hazırlanan karışımların nem hasarı deney sonuçları.

6.6 Karışım Tasarım Sonuçları

Performans deneylerinin sonuçları değerlendirildiğinde, tüm gradasyon tiplerinde permeabilite ve boşluk oranı için doğal olarak en düşük bitüm yüzdesi olan %5,50'de en yüksek boşluk ve permeabilite katsayısı değerleri elde edilmiştir. Bitüm yüzdesinin artması ile azalan boşluk oranından dolayı Tip-4 gradasyon tipi %6,50 bitüm yüzdesinde %18 olan minimum boşluk oranını sağlamasına rağmen 100 m/gün olan permeabilite sınır değerini sağlayamamıştır. Tip-3 ve Tip-4 gradasyon tiplerine oranla daha ince malzemeden oluşan Tip-2 gradasyon tipinin hiçbir bitüm yüzdesinde boşluk oranı ve permeabilite sınır değerlerini sağlamadığı görülmüştür. Tip-2 karışımlar, Cantabro aşınma kaybı maksimum sınır değerini (%20) tüm bitüm yüzdelerinde sağlarken, boşluk oranı Tip-2 gradasyon tipine oranla daha yüksek olan Tip-3 ve Tip-4 gradasyon tiplerinde ise sadece %6,50 bitüm yüzdesinde sağlanmaktadır. En yüksek dolaylı çekme dayanım değerleri Tip-2 karışımlardan elde edilirken, Tip-3 ve Tip-4 gradasyon tiplerinde sonuçlar birbirine oldukça yakındır. Nem hasarı deneyinde bitüm yüzdesinin artması ile dayanımın arttığı görülmekle beraber yüzey alanı fazla olan Tip-2 gradasyon tipinde agreganın etrafını saracak bitüm film kalınlığının ince olması agrega-bitüm arasındaki aderansın zayıf kalmasına neden olmaktadır. Bu nedenden dolayı Tip-2 gradasyon tipinin Nem Hasarı minimum sınır değeri olan %80 değerini sadece %6,50 bitüm yüzdesinde sağladığı görülmüştür. Bu değerlendirmeler ışığında belirlenen, karışım tiplerine ait tasarım değerleri Tablo 6.3'de verilmiştir.

Tablo 6.3: Agrega tipleri ve gradasyonlarına ait geçirimli asfalt karışımı tasarım değerleri.

Tasarım Parametreleri	Ferrokrom Cürufu			Kireç Taşı	Limit Değerler
	TİP-2	TİP-3	TİP-4		
Optimum bitüm, %	6,50	6,50	6,00	6,50	-
Boşluk oranı, %	15,30	23,05	22,53	19,21	Min. 18
Cantabro aşınma kaybı, %	5,58	18,84	15,50	18,84	Maks. 20
Permeabilite katsayısı, m/gün	25,79	162,91	134,02	77,40	Min. 100 m/gün
Dolaylı çekme mukavemeti, kPa	1188,51	754,50	643,44	669,80	-
Su hasarı oranı, %	0,79	0,90	0,85	0,79	Min. 80

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ferrokrom cürufunun üstün fiziksel özelliklerinin geçirimli asfalt kaplama karışımların performansını iyileştirme fikriyle ortaya çıkan bu tez çalışması kapsamında, gerçekleştirilen boşluk analizleri, permeabilite, Cantabro aşınma kaybı, dolaylı çekme dayanımı ve su hasarına karşı direnç gibi tasarım deney sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Geçirimli asfalt kaplamaların tasarım amacı açısından önemli olan boşluk analizleri ve permeabilite deney sonuçları, ferrokrom cürufunun geçirimli asfalt kaplama karışımların geçirgenlik kapasitesini iyileştirdiğini göstermiştir.
- Boşluk analizlerinin sonuçları, beklenildiği gibi bitüm yüzdesi ve gradasyon tiplerinin etkilerini açık olarak yansıtmaktadır. Dolayısıyla, karışımların bitüm yüzdeleri arttıkça, boşluk oranlarının azaldığı görülmektedir. En büyük dane çapı ve kaba agrega miktarını içeren Tip-3 karışımların en yüksek boşluk oranına ve Tip-2 gradasyonu haricindeki karışımların (Tip-3 ve Tip-4) tüm bitüm yüzdelerinde %18 sınır boşluk değerinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. Boşluklu ve pürüzlü yüzey yapısına sahip olan ferrokrom cürufu ile hazırlanan karışımlarda, bitümlü bağlayıcının kısmen bu boşluklar tarafından absorbe edilmesinden kaynaklı olarak, kireçtaşı agregaya nazaran aynı bitüm yüzdelerinde daha yüksek boşluk oranları elde edilmiştir.
- Karışımların boşluk değerleri ile orantılı olduğu belirlenen permeabilite deney sonuçları, en iyi hidrolik geçirgenlik değerlerinin elde edildiği Tip-3 karışımların, tüm bitüm yüzdelerinde kabul gören minimum sınır değer (100 m/gün) üzerinde olduğunu göstermiştir. Tip-4 gradasyon tipinde %6,50 bitüm yüzdesi haricinde sınır değer sağlanırken, Tip-2 karışımların permeabilite değerleri (≈ 25 m/gün) sınır değer oldukça altında kalmıştır. Ferrokrom cürufu karışımların hidrolik geçirgenlik değerlerinin, boşluk analizinde belirtildiği gibi bitümlü bağlayıcının, ferrokrom cürufunun pürüzlü ve boşluklu yüzey yapısı sayesinde absorbe edilmesine bağlı olarak kireçtaşı agrega ile hazırlanan karışımlardan yüksek olduğu (≈ 32 m/gün) belirlenmiştir.

- Geçirimli asfalt kaplamaların boşluklu yapısına bağlı olarak oluşan sökülme direncinin belirlenmesi için gerçekleştirilen Cantabro deneyinin sonuçları, przly ve boşluklu bir yüzey yapısına sahip olan ferrokrom cürufunun bitümlü baēlayıcı ile daha iyi bir aderans saēlamasına baēlı olarak, geçirimli asfalt karışımların bu zelliēini kısmen iyiletirdiēi ortaya konulmuştur.
- Tip-2 karışımların Cantabro aşınma deēerleri, agrega temas yüzeylerinin artışına baēlı olarak tüm bitüm yüzdelerinde maksimum sınır deēer olan %20'nin altında kalırken, Tip-3 ve Tip-4 karışımlarda bu deēer sadece % 6,50 bitüm yüzdesinde saēlanmışır. Tip-3 ve Tip-4 karışım tiplerinde bitüm yüzdesindeki artış, karışımların elastiklemesi ve gevsek davranışa baēlı kopmaların büyük oranda azalmasına karşın, Tip-2 karışımının agrega yüzey alanı fazla olduēundan bitüm artıı ile film kalınlıēının diēer karışım tipleri kadar etkilenmediēi belirlenmiştir.
- Bitüm filminin çekme dayanımının ön plana ıktıēı geçirimli asfalt kaplama karışımların tasarımı açısından önemli olan dolaylı çekme dayanım deney sonuçlarından, en iyi performansın Tip-2 karışımların %6,00 bitüm oranında elde edildiēi, bu deēerin Tip-3 ve Tip-4 karışımlarından oldukça yüksek olduēu belirlenmiştir. Ferrokrom cürufu ile hazırlanan karışımlar kireçtaşı agrega ile karılatırıldıēında dolaylı çekme dayanım deēerlerinin yaklaşık %11-15 oranında daha yüksek olduēu belirlenmiştir. Bu sonuç, ferrokrom cürufunun bitümlü baēlayıcı ile daha iyi aderans saēlaması ve cürufun yüzey boşlukları ile kısmen absorbe edilen bitüm miktarı sebebiyle daha ince film kalınlıklarının elde edilmesi ile açıklanabilir. Karışım aderansı ve bitüm film kalınlıēının etkili olduēu dolaylı çekme ve Cantabro deneylerinden belirlenen optimum bitüm deēerleri birbirlerini desteklemektedir.
- Tasarım amacı ve yapısından kaynaklı daha büyük temas yüzeyinde suya maruz kalan geçirimli asfalt karışımların nem hasarı sonuçları, ferrokrom cürufu ile hazırlanan Tip-3 ve Tip-4 karışımların tüm bitüm yüzdelerinde minimum sınır deēerini saēladıēını, Tip-2 karışımların nem hasarına karşı direnç deēeri ise sınır deēerin altında kaldıēını göstermiştir. Tip-2 gradasyonunda yüksek agrega yüzey alanı baēlı olarak aynı bitüm yüzdelerindeki bitüm film kalınlıēının ince olmasından kaynaklı olarak agrega ile bitüm arasındaki aderansı zayıflatarak suya karşı direnci azalttıēı sylenabilir.

- Ferrokrom cürüflü karışımların (Tip-3) tüm bitüm oranlarında nem hasarına karşı direnç minimum sınır değeri 0,80'i sağladığı, kireçtaşı agrega ile hazırlanan numunelerin nem hasarına karşı direnç oranlarının %7,00 bitüm yüzdesi haricinde sınır değerinin altında kaldığı belirlenmiştir. Ferrokrom cürüflü karışımlarda kısmen azalan film kalınlıklarına bağlı olarak nem hasarına karşı direnç oranlarının kireçtaşı agregaya nazaran azalması beklenirken, daha önce de belirtildiği üzere cüruf agregasının bitümlü bağlayıcı ile sağladığı aderans sebebiyle arttığı belirlenmiştir. Dolayısıyla, ferrokrom cürufunun su hasarına karşı direnci olumlu yönde etkilediği belirtilebilir.
- Optimum bitüm oranının belirlenmesi için tasarım parametreleri göz önüne alındığında; permeabilite ve boşluk oranı açısından en büyük değerler, tüm gradasyon tipleri için minimum bitüm yüzdesi olan %5,50'de elde edilmiştir.
- Tip-3 karışımların Cantabro aşınma oranı maksimum sınır değerinin (%20) sağlandığı minimum bitüm oranı %6,50 olduğundan, Tip-3 karışımlar için optimum bitüm değeri olarak seçilmiştir. Bu bitüm yüzdesinde bu karışımların diğer tasarım parametreleri sınır değerleri sağlamaktadır.
- Tip-4 karışımlarda da Cantabro aşınma değeri sadece %6,50 bitüm yüzdesinde sağlanmakla birlikte, bu bitüm yüzdesinde 100 m/gün olan permeabilite sınır değeri sağlanamamıştır. Dolayısıyla permeabilite parametresinin Cantabro aşınma değerinden önemli olduğu düşüncesiyle optimum bitüm yüzdesi %6,00 olarak belirlenmiştir.
- Tip-2 karışımlar, hiçbir bitüm yüzdesinde boşluk oranı ve permeabilite sınır değerlerini sağlayamamakla birlikte, tüm bitüm yüzdesinde Cantabro aşınma maksimum sınır değerinin altında kalmış ve diğer karışımlara nazaran gösterdiği yüksek dolaylı çekme dayanım değerleri ile iyi bir performans sergilemiştir. Bitüm yüzdesi değişimiyle boşluk ve permeabilite değerlerinin fazla etkilenmediği Tip-2 karışımların nem hasarı minimum sınır değerini (0,80) değerini sadece %6,50 bitüm yüzdesinde sağladığından optimum bitüm muhtevası %6,5 olarak belirlenmiştir.
- Farklı karışım gradasyonları ve bitüm oranlarındaki geçirimli asfalt tasarım performansına etkilerinin değerlendirildiği deneysel çalışma sonucunda, ferrokrom

cürufunun tüm parametreleri kısmen iyileştirdiği belirlenmiş ve ferrokrom cürufunun geçirimli asfalt kaplama karışımlarında agrega olarak kullanılabilir olduğu kanıtlanmıştır.

- Geçirimli asfalt karışımlarda boşluklu yapısından kaynaklanan düşük stabilite ve dayanım performansının bu çalışmada kullanılan ferrokrom cürufu ile kısmen iyileştiği görülmekle birlikte, ferrokrom cürufu karışımların farklı bitüm tipleri ve fiber katkıları ile permeabilite düzeylerinden ödün vermeden dayanım performansının iyileştirilmesine yönelik araştırmalar gerçekleştirilebilir.
- Geçirimli asfalt karışımlar üzerinde temel karışım tasarımlarının gerçekleştirildiği bu araştırma, ileriye yönelik olarak ferrokrom cürufunun kaplamaların kayma-sürtünme ve gürültü düzeyleri gibi işlevsel özelliklerinin belirlenmesi yönünde de geliştirilebilir.
- Bu çalışma konusu itibarıyla, sürüş güvenliği ve çevresel faydalar ile öne çıkan geçirimli asfalt kaplamaların ülkemizin yağışlı bölgelerinde, başta karayolu ulaşımı olmak üzere farklı uygulama alanlarının yaygınlaştırılması ve ferrokrom cürufu gibi farklı sanayi atıklarının uygun alanlarda kullanımının araştırılması, çevresel kirliliğin önlenmesi, doğal kaynakların korunması ve ekonomik fayda sağlanması açısından da katkı sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Acharya, P.K. ve Patro, S.K. (2016). Use of Ferrochrome Ash (FCA) and Lime Dust in Concrete Preparation. *Journal of Cleaner Production*, 131: 237-246.
- Ahmed, I. (1991). Use of Waste Materials in Highway Construction. Final Report, Purdue University Department of Civil Engineering, Indiana, 112 s.
- Ahmed, I. ve Lovell, C.W. (1992). Use of Waste Materials in Highway Construction: State of the Practice and Evaluation of the Selected Waste Products. *Transportation Research Record*, 1345: 1-9.
- Akbulut, H., İağa, Y. ve Grer, C. (2003). Atık Agregaların Asfalt Yol Kaplamalarında Tekrar Kullanım İmkanları ve CEN Standartları. *III. Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, İstanbul, s. 271-276.
- Akyıldız, A. (2012). Beton Üretiminde Bor Atıklarının Puzzolan Materyal Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ, 112 s.
- Al-Jabri, K.S. (2018). Research on the use of Ferro-Chrome slag in civil engineering applications. *MATEC Web of Conference* 149, Morocco.
- Al-Jabri, K.S. (2018). Reuse of Waste Ferrochrome Slag in the Production of Mortar with Improved Thermal and Mechanical Performance. *Journal of Materials Civil Engineering*, 30 (8): 1-10.
- Alvarez, A.E., Martin, A.E., Estakhri, C.K., Button, J.W., Glover, C.J. ve Jung, S.H. (2006). Synthesis of Current Practice on the Design, Construction, and Maintenance of Porous Friction Courses. Texas Transportation Institute, Texas, 86 s.
- Anupam, A.K., Kumar, P. ve Ransinchung, G.D. (2013). Use of Various Agricultural and Industrial Waste Materials in Road Construction. *2nd Conference of Transportation Research Group of India*, s. 264-273.
- Aravind, K.S. ve Das, A. (2007). Industrial Waste in Highway Construction, Technical Report, Indian Institute of Technology Kanpur.
- Aravind, K.S. ve Das, A. (2012). Possible Use of Some Waste Materials in Road Construction, The Masterbuilder, <http://www.masterbuilder.co.in/> (13.05.2019).
- Asi, İ.M. (2007). Evaluating Skid Resistance of Different Asphalt Concrete Mixes. *Building and Environment*, 42: 325-329.
- ASTM D2041 / D2041M-19 (2019). Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D6931-07 (2007). Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA.

- Azanov, B.K. (2014). Recommendations on the use of Industrial Wastes in Road Construction. *Metallurgist*, 58: 91-94.
- Barišić, I., Dimter, S. ve Netinger, I. (2010). Possibilities of Application of Slag in Road Construction. *Technical Gazette*, 17 (4): 523-528.
- Beeghly, J.H. (2003). Recent Experiences with Lime - Fly Ash Stabilization of Pavement Subgrade Soils, Base, and Recycled Asphalt. *International Ash Utilization Symposium*, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, s. 46.
- Bhanuprasad, V. ve Ganesh, B. (2017). Industrial Waste Materials Application in Highway Construction. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 47: 486-494.
- Bhavani, V.D., Sowjanya, P. ve Rakesh, J. (2018). Experimental Study on Coarse Aggregate Replaced by Ferro Chrome Slag. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 8 (7): 18617-18620.
- Chen, M., Lin, J. ve Wu, S. (2011). Potential of Recycled Fine Aggregates Powder as Filler in Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, 25: 3909-3914.
- Claytor, R. (1999). New Developments in Street Sweeper Technology. *Watershed Protection Techniques*, 3 (1): 601-604.
- Çağlar, G.A. (2007). Endüstriyel Atık Malzemelerin Karayollarında Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Mühendisliği Programı, İstanbul, 115 s.
- Çetin, A., Kaya, Z., Çetin, B. ve Aydilek, A.H. (2014). Influence of Laboratory Compaction Method on Mechanical and Hydraulic Characteristics of Unbound Granular Base Materials, Road Materials and Pavement Design, 15 (1): 220-235.
- Das, B.B. (2014). Characterization of Ferrochrome Slag as an Embankment and Pavement Material. Master of Technology, National Institute of Technology, Department of Civil Engineering, India, 65 s.
- Dash, M. ve Patro, S. (2018). Effects of Water Cooled Ferrochrome Slag as Fine Aggregate on the Properties of Concrete. *Construction and Building Materials*, 177: 457-466.
- De Bock, L.P. ve Van den Bergh, H. (2004). Stainless Steel Slag in Hydraulic Bound Mixtures for Road Construction, Two Case Studies in Belgium. *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, Spain, s. 1095-1104.
- Demir, İ. (2010). İnşaat Yıkıntı Atıklarının Beton Üretiminde Kullanımı ve Beton Özelliklerine Etkisi, *AKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 2: 105-114.
- EAPA (2019). Asphalt İn Figures, European Asphalt Pavement Association, <https://eapa.org/asphalt-in-figures/> (23.03.2019)

- Ecevit, O. (2007). Karayollarında Rijit Üstyapı Uygulamaları ve Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 397 s.
- Elibol, C. ve Şengül, Ö. (2016). Effects of Activator Properties and Ferrochrome Slag Aggregates on the Properties of Alkali-Activated Blast Furnace Slag Mortars. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41: 1561-1571.
- Emery, J. (1984). Steel Slag Utilization in Asphalt Mixes. *Canadian Technical Asphalt Association Proceedings*, Canada, MF 186-1.
- Erkan, O. (2012). Eti Krom A.Ş., Çevre Durum Raporu, Elazığ.
- FDOT (2012). Florida Method of Test for Measurement of Water Permeability of Compacted Asphalt Paving Mixtures. Florida Department of Transportation Standart Specifications, FM 5-565, Florida.
- FHWA (2015). Porous Asphalt Pavements with Stone Reservoirs. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Office of Asset Management, Pavement, and Construction, Washington DC.
- Giriş, Ü. (2007). Esnek Üstyapılar ile Rijit Üstyapıların Teknik ve Ekonomik Yönden Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 186 s.
- Hamad, B.S., Rteil, A.A. ve El-Fadel, M. (2003). Effect of Used Engine Oil on Properties of Fresh and Hardened Concrete. *Construction and Building Materials*, 17: 311-318.
- Hamzah, M.O. ve Hardiman. (2005). Characterization of the Clogging Behaviour of Double Layer Porous Asphalt. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*,6: 968-980.
- Han, C. (1993). Waste Products in Highway Construction. Final Report, Minnesota Local Road Research Board, Minnesota.
- Hawkins, G.J., Bhatti, J.I. ve O'Hare, A.T. (2003). Cement Kiln Dust Production, Management and Disposal. *Portland Cement Association*, PCA, R&D Report No. 2737.
- İSFALT (2018). İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul.
- İstanbul Teknik (2017). Hipercell selülozik elyaf, <https://www.istanbulteknik.com/asfalt-urunleri/hipercell-selulozik-elyaf>, (23.04.2018).
- Javed, S., Lovell, C.W. Ve Wood, L.E. (1994). Waste Foundry Sand in Asphalt Concrete. *Transportation Research Record*, 1437: 27-34.
- Kandhal, P.S. ve Mallick, R.B. (2015). Open-Graded Friction Course: State of the Practice. National Center for Asphalt Technology, Washington DC.

- Karle, S., Modha, D. ve Shah, M. (2016). Use of Recycled Material in Road Construction: Literature Review. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 6 (5): 5550-5551.
- Kaya, A.O. (2014). Esnek Üstyapıların Aşınma Tabakasında Elektrik Ark Fırını Cürufunun Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Mühendisliği Programı, İstanbul, 115 s.
- Kozak, M. (2011). Beton Yollar ve Beton Yol Yapımının Araştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7 (1): 89-99.
- KTŞ. (2013). Karayolu Teknik Şartnamesi. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kumar, P.H., Srivastava, A., Kumar, V. ve Majhi, M. R. (2014). Implementation of Industrial Waste Ferrochrome Slag in Conventional and Low Cement Castables: Effect of Microsilica Addition. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2: 169-175.
- Lees, G. (1978). Skid Resistance of Bituminous and Concrete Surfacing. Developments in Highway Pavement Engineering-1, Applied Science Publishers, London, s. 272-273.
- Lewis, D.W. (1982). Properties and Uses of Iron and Steel Slags. *National Slag Association Symposium*, South Africa, MF 182-6.
- Lind, B.B., Fallman, A.M. ve Larsson, L.B. (2001). Environmental Impact of Ferrochrome Slag in Road Construction. *In Waste Management*, 21 (3): 255-264.
- Mahamaya, M. ve Das, S.K. (2018). Characterization of Ferrochrome Slag as a Controlled Low-strength Structural Fill Material. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1-10.
- Mahieux, P.Y., Aubert, J.E. ve Escadeillas, G. (2009). Utilization of Weathered Basic Oxygen Furnace Slag in the Production of Hydraulic Road Binders. *Construction and Building Materials*, 23: 742-747.
- Mäkikyrö, M. (2004). Converting Raw Materials Into the Products - Road Base Material Stabilized with Slag-Based Binders. Academic Dissertation, University of Oulu Department of Process and Environmental Engineering, Finland.
- Mallick, R.B., Kandhal, P.S., Cooley, L.A. ve Watson, D.E. (2000). Design, Construction, and Performance of New-Generation Open-Graded Friction Courses. Paper Prepared for Presentation at the Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists, National Center for Asphalt Technology, Auburn, 132 s.
- Mishra, B. ve Mishra R.S. (2015). A Study on Use Industrial Wastes in Rural Road Construction. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4 (11): 10387-10398.

- Mishra, M. (2016). Use of Industrial Waste Materials in Road Construction. *International Journal for Reserach in Applied Science & Engineering Technology*, 4 (11): 191-194.
- Moodie, E. (2016). The Benefits of Using Ferrochrome Slag as Waste Aggregate in South Africa. Magister Scientiae, Potchefstroom Campus, Geography and Environmental Management, North-West University, South Africa, 74 s.
- Moriyoshi, A., Jin, T., Nakai, T., Ishikawa, H., Tokumitsu, K. ve Kasahara, A. (2014). Construction and Pavement Properties After Seven Years in Porous Asphalt with Long Life. *Construction and Building Materials*, 50: 401-413.
- Mroueh, U.M. ve Wahlström, M. (2002). By-products and Recycled Materials in Earth Construction in Finland--an Assessment of Applicability. *Resources, Conservation and Recycling*, 35: 117-129.
- Muhmood, L., Vitta, S. ve Venkateswaran, D. (2009). Cementitious and Pozzolanic Behavior of Electric Arc Furnace Steel Slag. *Cement and Concrete Research*, 39: 102-109.
- Mutlugeldi, C. (2015). Elektrik Ark Fırını Cürufunun Karayolu Esnek Üstyapı Bitümlü Temel Tabakasında Agrega Olarak Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Mühendisliği Programı, İstanbul, 99 s.
- NAPA (2019). Porous Apshalt Pavement Design, Construction and Maintenance, <http://www.flexiblepavements.org/sites/www.flexiblepavements.org/files/events/conferences/Porous%20Asphalt%20Pavements.pdf>, (21.04.2019).
- Niemelä, P. ve Kauppi, M. (2007). Production, Characteristics and use of Ferrochromium Slags. *The Eleventh International Ferro Alloys Congress (INFACON XI)*, India, s. 171-179.
- Nunes, M.C.M., Bridges, M.G. ve Dawson, A.R. (1996). Assessment of Secondary Materials for Pavement Construction: Technical and Environmental Aspects. *Waste Management*, 16 (1-3): 87-96.
- Okagbue, C.O. ve Onyeobi, T.U.S. (1999). Potential of Marble Dust to Stabilise Red Tropical Soils for Road Construction. *Engineering Geology*, 53: 371-380.
- Okubay, M. ve Yardım, M.S. (2016). Mermer Atıklarının Bitümlü Sıcak Karışımların Stabilité Özelliklerine Etkisi. *Engineering Science*, 11 (3): 73-82.
- Özay, O. ve Öztürk, E.A. (2013). Modifiye Edilmiş Poroz Asfalt Karışımların Performansı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28 (3): 577-586.
- Özcan, A. (2017). Geçirimli Beton Kullanılması, Bartın Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, <http://www.bartın.csb.gov.tr/gecirimli-beton-kullanilmasi-haber-22026> (14.02.2019).

- Öztürk, D. (2008). Türkiye'de Poroz Asfaltın Uygulanabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Samsun, 82 s.
- Palmer, M.A. ve Leed, A.P. (2013). Porous Asphalt: Design and Construction. WSU Puyollup Technical Workshop Series- Permeable Paving Design, City Engineer, Puyollup.
- Panda, C.R., Mishra, K.K., Panda, K.C., Nayak, B.D. ve Nayak, B.B. (2013). Environmental and Technical Assessment of Ferrochrome Slag as Concrete Aggregate Material. *Construction and Building Materials*, 49: 262-271
- Prasad, D.S.V., Raju, G.V.R. ve Kumar, M.A. (2009). Utilization of Industrial Waste in Flexible Pavement Construction. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 13 (1): 1-12.
- Raaberg, J., Schmidt, B. ve Bendtsen, H. (2001). Technical Performance and Long-Term Noise Reduction of Porous Asphalt Pavements. Danish Road Institute, Report 112.
- Rand, D. (2011). TxDOT's Use of Permeable Friction Courses (PFC), Texas Department of Transportation, Arkansas Asphalt Pavement Association, Texas.
- Rao, A. (2005). Experimental Investigation on use of Recycled Aggregates in Mortar and Concrete. Master of Technology, Indian Institute of Technology Kanpur, Department of Civil Engineering, India, 84 s.
- Roa, A., Jha, K.N. ve Misra, S. (2007). Use of Aggregates From Recycled Construction and Demolition Waste in Concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 50: 71-81
- Sanghamitra, B. ve Satyanarayana Reddy, C.N.V. (2012). Potential of Ferro Chrome Slag as Construction Material. In *Young Geotechnical Engineers Conference of Andhra Pradesh*, India.
- Semiz, M. (2006). Beton Kilit Taşlarının Fiziksel Özellikleri ve Alternatif Üretiminin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programı, Ankara, 65 s.
- Sen, T. ve Mishra, U. (2010). Usage of Industrial Waste Products in Village Road Construction. *International Journal of Environmental Science and Development*, 1 (2): 122-126.
- Shen, D.H., Wu, C.M. ve Du, J.C. (2008). Performance Evaluation of Porous Asphalt With Granulated Synthetic Lightweight Aggregate. *Construction and Building Materials* 22, s. 902-910.
- Shen, W., Zhou, M., Ma, W., Hu, J. ve Cai, Z. (2009). Investigation on the Application of Steel Slag-Fly-Ash-Phosphogypsum Solidified Material as Road Base Material. *Journal of Hazardous Materials*, 164: 99-104.

- Sherwood, P.T. (1995). *Alternative Materials in Road Construction: a Guide to the use of Waste, Recycled Materials, and By-Products*. American Society of Civil Engineers, Publications Sales Department, New York.
- Sree, N.A.S. (2017). Partial Replacement of Natural Aggregates with Ferrochrome Slag. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 5 (6): 1357-1361.
- Tanzadeh, J. ve Shahrezagamasaei, R. (2017). Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nano-silica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, 144: 260-270.
- Terzi, S. ve Karaşahin, M. (2003). Mermer Toz Atıklarının Asfalt Betonu Karışımında Filler Malzemesi Olarak Kullanımı. *İMO Teknik Dergi*, 193: 2903-2922.
- The British In-situ Concrete Paving Association, (2002). *Cement&Concrete Association in Pavement Construction*, BCA Crowthorne, Berkshire.
- TS EN 12697-17 (2004). Gözenekli Asfalt Numunelerde Tanecik Kaybı. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- Tunç, A. (2007). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. 2. basım, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
- Umar, F. ve Ağar, E. (1985). *Yol üstyapısı*. 3. basım, İstanbul Teknik Üniversitesi Ulaştırma Anabilim Dalı Karayolu İnşaatı ve Trafik Bilim Dalı Yayınları: İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- URL-1 (2017). <https://www.haberler.com/karabuk-te-sicak-asfalt-uretim-tesisi-kuruluyor-9961330-haberi/>, Karabük'de Sıcak Asfalt Üretim Tesisi Kuruluyor, (24.05.2019).
- URL-2 (2018). <https://www.mynet.com/buyuksehirden-ceyhanda-asfalt-calismasi-180104075650> , Büyükşehir'den Ceyhan'da Asfalt Çalışması, (24.05.2019).
- URL-3 (2019). <https://tr.redsearch.org/images/1290816>, Resimler: Bitümlü Sıcak Karışım Fiyatı, (24.05.2019).
- URL-4 (2007). <http://www.gmoinsaat.com.tr/sathi.asp>, Sathi Kaplama Uygulamaları, (27.06.2019).
- URL-5 (2018). <http://www.hatayekspres.com/kisecik-mahallesinde-sathi-kaplama-calismalari-39132.html>, Kisecik Mahallesi'nde Sathi Kaplama Çalışmaları, (24.05.2019).
- URL-6 (2018). <https://www.marasaktif.com/gundem/ilk-sathi-kaplama-yapildi-h14927.html>, İlk Sathi Kaplama Yapıldı, (24.05.2019).
- URL-7 (2019). <https://www.izbeton.com.tr/bagimsiz/17>, Sathi Kaplama Uygulamasi, (24.05.2019).

- URL-8 (2019). <https://www.wirtgen-group.com/ankara/tr/teknolojiler/yeni-yol-yap-m/>, Yeni Yol Yapımı, (24.05.2019).
- URL-9 (2013). http://metiebar.acpa.org/Concrete_Pavement/Technical/Fundamentals/Concrete_Types.asp, Concrete Types, (01.07.2019).
- URL-10 (2018). <https://www.pwdplanreview.org/manual/chapter-4/4.2-porous-pavement>, Chapter 4- Stormwater Management Practice Guidance, 4.2 Porous Asphalt, (24.05.2019).
- URL-11 (2017). <http://civilogistix.com/permeableporous-asphalt-pavement/>, Permeable /Porous Asphalt Pavement, (24.05.2019).
- URL-12 (2019). <http://www.santiyegunlukleri.com/gecirimli-beton-uygulamasi/>, Geçirimli Beton Uygulaması, (18.04.2019).
- URL-13 (2019). http://www.iztasbeton.net/iztasbeton_izmir_beton_elemanlari/index.asp, Beton Elemanları, (02.07.2019).
- URL-14 (2013). <https://nacto.org/publication/urban-street-design-guide/street-design-elements/stormwater-management/pervious-pavement/>, Urban Street Design Guide, (02.07.2019).
- URL-15 (2019). <https://www.marshalls.co.uk/homeowners/view-driveline-priora-permeable-block-paving>, Driveline Priora, (02.07.2019).
- URL-16 (2011). <https://www.on5yirmi5.com/haber/yasam/dunya-hali/63048/yagmurda-guvenli-surusun-12-altin-kurali.html>, Yağmurda Güvenli Sürüşün 12 Altın Kuralı, (24.05.2019).
- URL-17 (2018). <http://balkupuile.com/yaya-haklari-nelerdir/>, Yaya Hakları Nelerdir?, (24.05.2019).
- URL-18 (2019). <http://www.flexiblepavements.org/sustainability/porous-asphalt/porous-asphalt>, Porous Asphalt, (19.04.2019).
- URL-19 (2016). <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/fs2.cfm>, User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, (22.06.2019).
- URL-20 (2013). <http://www.nationalslag.org/slag-history>, Slag in History, (25.06.2019).
- URL-21 (2016). <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/intro.cfm>, User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, (25.06.2019).
- URL-22 (2013). <https://www.nationalslag.org/steel-furnace-slag>, Steel Furnace Slag, (25.06.2019).

- Urs, N. ve Anwer, MD.D. (2018). Using of Ferro-Chrome Slag as a Coarse Aggregate and Stone Dust as a Fine Aggregate. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5 (11): 686-692.
- Üstümkol, F.N. ve Turabi, A. (2009). Endüstriyel Atıkların Karayolu Üstyapısında Değerlendirilmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11 (1): 15-27.
- Vapur, H., Top, S., Teymen, A. ve Türkmenoğlu M. (2013). Elazığ Ferrokrom Tesisi Cürüflarının Agrega Özelliklerinin Araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28 (1): s. 77-88.
- WAPA (2015). Porous Asphalt Pavements. Wisconsin Asphalt Pavement Association, Wisconsin.
- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q. ve Chen, Y. (2007). Utilization of Steel Slag as Aggregates for Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixtures. *Building and Environment*, 42: 2580-2585.
- Yıldız, T., Yıldız, S. ve Keleştemur, O. (2011). Cam Lif Katkılı Betonda Filler Malzemesi Olarak Atık Mermer Tozunun Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *e-Journal of New World Sciences Academy*, 6 (4): 1315-1326.
- Yılmaz, A. (2002). Antalya Ferrokrom İşletmesinin Elektrik-Ark Fırını Cürüflarının ve Baca Tozu Atıklarının Asfalt Betonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 76 s.
- Yılmaz, A. (2017). Yol Üstyapısında Kullanılan Cüruf Atıklarının Çevresel Etkilerinin İncelenmesi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (2): 123-134.
- Yılmaz, A. ve Karaşahin, M. (2010). Mechanical Properties of Ferrochromium Slag in Granular Layers of Flexible Pavements. *Materials and Structures*, 43: 309-317.
- Yılmaz, A. ve Süttaş, İ. (2015). Ferrokrom Cürufu Kullanılarak Hazırlanan Asfalt Betonu Numunelerinin Mühendislik Özellikleri. Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya.
- Yılmaz, A. ve Yıldız, A.H. (2015). Cüruf Atıklarının Yol İnşaatında Kullanılması Durumunda Çevresel Etkileri. *Uluslararası Burdur Deprem ve Çevre Sempozyumu*, Burdur, s. 267-279.
- Yılmaz, M. ve Kök, B.V. (2008). Ferrokrom Cürufu Kullanımının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12 (3): 186-194.
- Yüceer, A. ve Çelik, O.N. (1991). Polimerlerin Asfalt Betonunda Kullanılması ve Atık Plastiklerin Değerlendirilmesi. *İMO Teknik Dergi*, 18: 227-234.
- Zelic, J. (2005). Properties of Concrete Pavements Prepared with Ferrochromium Slag as Concrete Aggregate. *Cement and Concrete Research*, 35: 2340-2349.

- Zhang, H., Li, H., Zhang, Y., Wang, D., Harvey, J. ve Wang, H. (2018). Performance Enhancement of Porous Asphalt Pavement Using Red Mud as Alternative Filler. *Construction and Building Materials*, 160: 707-713.
- Zhang, J., Gong, C., Lu, L., Wang, S. ve Hou, P. (2015). Effect of MgO on the Composition and Properties of Belite-Barium Calcium Sulphoaluminate Cement in the Presence of Na₂O and K₂O. *Ceramics – Silikáty*, 59 (2): 135-144.
- Zheng, L., Xuehua, C. ve Mingshu, T. (1992). Hydration and Setting Time of MgO-Type Expansive Cement. *Cement and Concrete Research*, 22 (1): 1-5.

EKLER

EK 1: Yol yapımında kullanılan kaplama sınıfı bitümlerin özellikleri(TS EN 12591).

SIRA NO	DENEY ADI	STANDARDI	BİTÜM SINIFLARI				
			B 40/60	B 50/70	B 70/100	B 100/150	B 160/220
1	PENETRASYON, (25°C) 0,1 mm	TS EN 1426	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220
2	YUMUŞAMA NOKTASI, °C	TS EN 1427	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43
3	FRAASS KIRILMA NOKTASI ^a , °C	TS EN 12593	≤ -7	≤ -8	≤ -10	≤ -12	≤ -15
4	YAŞLANMAYA KARŞI DAYANIM ^b	TS EN 12067-1					
4.1	KÜTLE DEĞİŞİMİ, %		≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 1,0
4.2	KALICI PENETRASYON, %	TS EN 1426	≥ 50	≥ 50	≥ 46	≥ 43	≥ 37
4.3	YUMUŞAMA NOKTASI YÜKSELMEŞİ, °C	TS EN 1427	≤ 9	≤ 9	≤ 9	≤ 10	≤ 11
5	PARLAMA NOKTASI, °C	TS EN ISO 2592	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 220
6	ÇÖZÜNÜRLÜK, %	TS EN 12592	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0
7	PARAFİN MUMU İÇERİĞİ ^c , %	TS EN 12606-1	≤ 2,2	≤ 2,2	≤ 2,2	≤ 2,2	≤ 2,2
		TS EN 12606-2	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5

^a Soğuk bölgelerde kullanılacak bitümlere yapılacaktır.

^b Kalite kontrol amaçlı olarak bu deney için TS EN 12607-02 (TFOT) deney standardı kullanılabilir.

^c Gerek duyulduğunda yapılacaktır.

EK 2: Modifiye bitümün fiziksel özellikleri(TS EN 14023).

SIRA NO	DENEY ADI		STANDARTI	BİRİMİ	PMB 64-28	PMB 70-16	PMB 70-22	PMB 70-28	PMB 76-16	PMB 76-22	PMB 76-28	PMB 82-16
1	PENETRASYON (25°C, 100g, 5sn.)		TS EN 1426	0,1mm	50-90	30-70	30-90	30-90	20-60	20-70	20-70	10-50
2	YUMUŞAMA NOKTASI	min.	TS EN 1427	°C	52	62	62	62	67	67	67	72
3	KUVVET ÖLÇÜMLÜ DÜKTİLİTE ^a (25°C, 5cm/dk)		TS EN 13589	J	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1
4	ELASTİK GERİ DÖNME (25°C)		TS EN 13398	%	80	60	70	80	60	70	80	60
5	PARLAMA NOKTASI		TS EN ISO 2592	°C	220	220	220	220	220	220	220	220
6	ÖZGÜL AĞIRLIK		TS EN 15326	g/cm ³	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1
7	DEPOLAMA STABİLİTESİ ^b											
7,1	YUMUŞAMA NOKTASI FARKI	maks.	TS EN 13399	°C	5	5	5	5	5	5	5	5
7,2	PENETRASYON FARKI	maks.		0,1mm	12	12	12	12	9	9	9	9
8	DİNAMİK KESME REOMETRESİ (DSR) (G* $\sin\delta$ >1kPa)	Yenilme Sıcaklığı min.	TS EN 14770 ASSHTO T315	°C	64	70	70	70	76	76	76	82
9	DÖNME Lİ İNCE FİLM ETÜVÜ DENEYİ ^c		TS EN 12607-1									
9,1	KÜTLE KAYBI	maks.		%	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	0,5
9,2	YUMUŞAMA NOKTASI	min.	TS EN 1427	°C	50	60	60	60	65	65	65	70
9,3	Yumuşama Noktasındaki Değişiklik											
	artma	maks.		°C	8	8	8	8	8	8	8	8
	azalma	maks.		°C	5	5	5	5	5	5	5	2
9,4	KALICI PENETRASYON	min.	TS EN 1426	%	50	50	50	50	45	45	45	40
9,5	DİNAMİK KESME REOMETRESİ (DSR)(G*/ $\sin\delta$ >2,2kPa)	Yenilme Sıcaklığı min.	TS EN 14770 AASHTO T315	°C	64	70	70	70	76	76	76	82
10	RTFOT+PAV İle Yaşlandırılmış Modifiye Bitüme Yapılan Deneyler		TS EN 14769 ASSHTO R28									
10,1	DSR (G* $\sin\delta$ <5000kPa)	Yenilme Sıcaklığı maks.	TS EN 14770 AASHTO T315	°C	22	31	28	25	34	31	28	37
10,2	KİRİŞ EĞME REOMETRESİ (BBR) Eğilme-Sünme Sertliği (S \leq 300 mPa, m \geq 0,300)	Sıcaklık maks.	TS EN 14771 AASHTO T313 ASTM D6648	°C	-18	-6	-12	-18	-6	-12	-18	-6

^aBu koşul gerekli olduğunda aranacaktır.

^bModifiye bitüm depolanmadan kullanılacaksa, depolama stabilitesi deneyinin yapılması zorunlu değildir.

^cYüksek viskoziteli modifiye bitümlerde RTFO deneyi 163°C'den daha yüksek (180°C geçmeyen) sıcaklıkta yapılabilecektir.

TFO deneyi İdarenin izni ile RTFO yerine kullanılabilir. NOT: 1, 2, 4, 9,1, 9,2 ve 9,4 sıra nolu deneylerin şantiyede yapılması zorunludur.

EK 3: Boşluk analizi deneyine ait tüm veriler.

Agrega	Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi %	Numune	Ağırlık, g.	Parafilmli Ağırlık, g.	Parafilmli Suda Ağırlık, g.	Parafilm Özgül Ağırlığı, g.	Özgül Ağırlık, g.	Teorik Özgül Ağırlık, g.	Boşluk Oranı %
F E R R O K R O M C Ü R Ü F Ü	Tip 2	5,50	1	1142,61	1150,56	641,97	0,90	2,291	2,652	13,788
			2	1134,46	1142,61	632,44		2,264		14,635
			3	1130,57	1137,45	613,29		2,189		17,465
		6,00	4	1140,41	1148,67	641,65		2,291		13,623
			5	1095,41	1103,80	627,67		2,347		11,516
			6	1138,75	1147,16	635,21		2,266		14,567
		6,50	7	1165,92	1173,98	674,80		2,378		10,319
			8	1105,35	1113,39	620,77		2,285		13,828
			9	1093,84	1101,69	609,42		2,267		14,509
	Tip 4	5,50	10	1119,73	1129,56	552,49		1,978	2,545	22,287
			11	1116,07	1123,75	549,40		1,972		22,495
			12	1115,01	1120,09	546,79		1,964		22,820
		6,00	13	1098,89	1106,75	561,70		2,049		19,491
			14	1139,57	1147,58	583,36		2,052		19,367
			15	1133,27	1141,61	580,50		2,053		19,308
		6,50	16	1177,26	1184,36	610,33		2,079		18,293
			17	1214,62	1222,62	623,33		2,057		19,164
			18	1163,54	1172,60	597,90		2,060		19,029
	Tip 3	5,50	19	1131,20	1138,31	537,92		1,909	2,594	26,398
			20	1088,61	1094,19	558,54		2,056		20,736
			21	1079,24	1085,83	545,06		2,023		22,007
		6,00	22	1149,33	1157,51	595,31		2,078		19,894
			23	1119,10	1124,06	553,62		1,981		23,633
			24	1125,46	1133,45	579,43		2,064		20,411
		6,50	25	1172,75	1180,54	615,26		2,107		18,778
			26	1154,23	1162,32	584,45		2,029		21,783
			27	1072,58	1080,55	560,30		2,097		19,146
		7,00	28	1116,88	1124,81	580,92		2,087		19,533
			29	1119,19	1127,51	584,51		2,097		19,166
			30	1118,59	1125,77	581,71		2,087		19,560

EK 3: (devam ediyor).

Agrega	Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi %	Numune	Ağırlık, g.	Parafilmli Ağırlık, g.	Parafilmli Suda Ağırlık, g.	Parafilm Özgül Ağırlığı, g.	Özgül Ağırlık, g.	Teorik Özgül Ağırlık, g.	Boşluk Oranı %
K İ R E Ç T A Ş I	Tip 3	5,50	31	1113,45	1120,46	536,327	0,90	1,932	2,474	21,911
			32	1109,12	1117,00	538,813		1,948		21,271
			33	1114,41	1121,95	534,328		1,924		22,235
		6,00	34	1123,00	1130,53	547,901		1,956		20,956
			35	1118,63	1125,55	540,455		1,937		21,692
			36	1135,68	1142,83	561,37		1,980		19,959
		6,50	37	1104,42	1112,29	528,605		1,921		22,355
			38	1106,93	1114,64	546,578		1,978		20,031
			39	1133,89	1141,66	562,254		1,987		19,701
		7,00	40	1120,66	1128,58	537,425		1,924		22,217
			41	1138,41	1146,21	571,265		2,010		18,741
			42	1144,59	1150,55	572,754		2,007		18,883

EK 4: Permeabilite deneyine ait tüm veriler.

Agrega	Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi %	Numune	H _{start} cm	H _{finish} cm	t, 100/60 (100/dk)	L cm	H ₁ cm	H ₂ cm	k m/gün	
F E R R O K R O M C Ü R U F U	Tip 2	5,50	1	2,30	75,00	84,816	61,20	67,00	96,10	25,958	
				3,80		84,533				25,508	
				4,00		83,333				25,802	
				5,00		82,033				25,842	
				5,50		81,417				25,815	
		5,50	2	2,40	75,00	74,483	61,05	67	95,90	29,650	
				3,40		73,533				29,620	
				3,90		71,833				30,109	
				4,30		71,767				29,967	
				6,80		67,917				30,546	
		5,50	3	3,00	75,00	100,700	60,76	67	95,80	21,722	
				3,40		100,650				21,612	
				4,00		100,350				21,495	
				5,00		98,700				21,546	
				6,30		96,367				21,658	
	Tip 2	6,00	4	75,00	2,40	75,00	77,033	59,44	67	95,70	28,107
					2,80		76,767				28,049
					3,60		75,633				28,154
					4,00		75,817				27,929
					6,40		74,067				27,622
		6,00	5	75,00	2,50	75,00	96,133	63,13	67	96,00	23,641
					3,80		91,650				24,352
					4,60		88,783				24,857
					5,00		85,033				25,805
5,50					84,983		25,636				
6,00		6	75,00	2,40	75,00	128,233	62,23	67	96,00	17,494	
				3,20		126,933				17,479	
				3,50		126,200				17,507	
				3,90		125,417				17,518	
				4,20		125,167				17,4790	

EK 4: (devam ediyor).

Agrega	Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi %	Numune	H _{start} cm	H _{finish} cm	t, 100/60 (100/dk)	L cm	H ₁ cm	H ₂ cm	k m/gün
F E R R O K R O M C Ü R Ü F Ü	Tip 2	6,50	7	1,80	85,00	157,050	59,41	73,40	95,70	20,324
				3,50		155,750				20,075
				4,50		154,167				20,032
				5,10		151,650				20,213
				5,60		150,933				20,181
		6,50	8	2,10	85,00	156,067	59,85	73,40	95,80	20,437
				2,90		155,200				20,353
				4,40		154,950				20,013
				5,10		154,550				19,890
				7,00		151,700				19,783
		6,50	9	1,80	85,00	156,717	59,44	73,40	95,60	20,469
				2,50		156,583				20,314
				3,30		155,267				20,288
				4,80		155,633				19,868
				6,10		150,250				20,247
	Tip 4	5,50	10	8,00	90,00	42,567	70,03	78,50	96,60	107,328
				9,50		40,000				112,125
				9,80		42,800				104,400
				10,10		39,017				114,095
				11,10		37,500				117,223
		5,50	11	4,80	90,00	34,433	69,23	78,80	96,60	138,579
				5,60		34,350				137,311
				6,20		32,183				145,831
				7,80		32,800				140,357
				9,30		29,850				151,414
		5,50	12	4,00	90,00	32,400	67,38	78,90	96,60	145,504
				4,40		32,033				146,485
				5,10		29,967				155,306
				7,00		30,200				150,658
				12,10		29,783				143,379

EK 4: (devam ediyor).

Agrega	Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi %	Numune	H _{start} cm	H _{finish} cm	t, 100/60 (100/dk)	L cm	H ₁ cm	H ₂ cm	k m/gün
F E R R O K R O M C Ü R Ü F Ü	Tip 4	6,00	13	3,40	90,00	50,833	69,05	79,00	96,60	96,246
				4,00		50,417				96,369
				4,50		50,050				96,511
				5,30		49,367				96,931
				7,00		49,267				95,178
		6,00	14	3,90	90,00	47,667	70,00	79,00	96,60	103,451
				4,50		47,883				102,266
				5,30		47,550				102,019
				6,40		46,633				102,673
				7,10		46,367				102,399
		6,00	15	3,00	90,00	41,933	69,54	79,00	96,60	118,044
				4,80		40,983				118,282
				6,10		40,317				118,403
				6,50		40,133				118,377
				8,10		39,700				117,376
	Tip 4	6,50	16	2,10	90,00	50,783	69,45	73,40	96,60	74,613
				3,10		50,633				73,983
				3,60		49,950				74,563
				4,50		49,383				74,633
				7,00		48,083				74,710
		6,50	17	2,50	90,00	40,217	69,81	73,40	96,50	94,683
				3,00		40,067				94,494
				3,70		40,017				93,851
				5,50		39,317				93,529
				6,50		37,967				95,709
		6,50	18	2,20	90,00	49,533	69,49	73,00	96,60	75,157
				3,00		48,850				75,514
				3,60		48,750				75,147
				4,70		48,333				74,830
				5,20		47,867				75,117

EK 4: (devam ediyor).

Agrega	Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi %	Numune	H _{start} cm	H _{finish} cm	t, 100/60 (100/dk)	L cm	H ₁ cm	H ₂ cm	k m/gün
F E R R O K R O M C Ü R Ü F Ü	Tip 3	5,50	19	2,50	90,00	34,800	69,51	78,90	96,90	139,819
				4,90		34,217				138,302
				5,30		34,367				137,051
				6,70		33,483				138,342
				8,30		33,067				137,394
		3,60	20	5,50	90,00	30,517	69,28	78,90	96,60	159,578
		4,30				30,417				158,806
		5,40				30,100				158,417
		6,00				29,633				159,770
		8,20	29,017	159,892						
		2,60	21	5,50	90,00	25,833	69,51	79,00	96,60	192,410
		4,60				25,383				191,340
		5,60				25,050				191,616
		6,50				24,633				192,779
		8,40				24,533				189,161
	3,90	22	6,00	90,00	25,283	67,99	73,10	96,30	143,711	
	4,30				25,183				143,611	
	4,90				24,767				145,005	
	5,30				24,667				144,908	
	7,10				24,517				142,696	
	3,80	23	6,00	90,00	28,883	66,81	73,10	96,30	123,759	
	4,40				28,083				126,398	
	5,90				28,000				124,553	
	6,30				27,900				124,405	
7,00	27,800	123,808								
4,60	24	6,00	90,00	30,267	66,54	73,10	96,30	116,533		
5,40				30,200				115,697		
6,00				30,117				115,194		
6,80				29,267				117,411		
7,40				29,167				116,964		

EK 4: (devam ediyor).

Agrega	Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi %	Numune	H _{start} cm	H _{finish} cm	t, 100/60 (100/dk)	L cm	H ₁ cm	H ₂ cm	k m/gün
F E R R O K R O M C Ü R Ü F Ü	Tip 3	6,50	25	2,00	90,00	32,767	62,80	67,10	96,10	83,748
				3,30		32,567				83,018
				5,00		32,217				82,274
				5,50		32,083				82,130
				6,40		31,617				82,454
		6,50	26	2,40	85,00	23,317	65,44	67,10	96,10	115,112
				3,60		23,217				113,929
				4,30		22,867				114,678
				4,50		22,700				115,233
				5,10		22,550				115,135
		6,50	27	2,20	85,00	21,467	69,02	67,10	97,00	128,213
				3,40		20,950				129,471
				4,30		20,583				130,324
				4,90		20,683				128,730
				5,50		20,533				128,699
	Tip 3	7,00	28	2,90	90,00	39,633	68,98	67,10	96,20	75,015
				4,10		39,000				75,183
				4,90		38,650				75,158
				5,90		38,550				74,467
				6,40		38,433				74,249
		7,00	29	2,30	90,00	30,000	66,44	67,10	96,20	96,112
				4,60		29,583				94,910
				5,20		28,867				96,582
				5,80		28,683				96,512
				6,10		28,500				96,787
		7,00	30	3,00	90,00	32,150	68,60	67,10	96,30	91,547
				3,80		32,117				90,799
				4,30		32,083				90,366
				4,90		31,133				92,471
				5,40		31,300				91,439

EK 4: (devam ediyor).

Agrega	Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi %	Numune	H _{start} cm	H _{finish} cm	t, 100/60 (100/dk)	L cm	H ₁ cm	H ₂ cm	k m/gün
K İ R E Ç T A Ş I	Tip 3	5,50	31	4,40	90,00	44,117	70,01	73,20	96,60	83,594
				5,20		42,683				85,594
				6,80		41,617				86,132
				9,00		40,517				86,131
				9,50		40,683				85,248
		5,50	32	4,70	90,00	38,117	69,45	73,20	96,60	95,643
				6,50		36,750				97,106
				7,10		35,833				68,875
				7,90		35,150				99,824
				10,20		34,683				98,333
		5,50	33	4,80	90,00	47,450	70,44	73,30	96,50	78,505
				5,10		47,067				78,866
				6,40		46,517				78,576
				7,00		45,767				79,291
				8,30		45,200				79,027
	Tip 3	6,00	34	3,70	90,00	40,733	70,70	73,00	96,70	91,011
				4,30		40,600				90,675
				4,90		40,417				90,449
				5,60		40,017				90,601
				6,40		39,933				89,930
				2,70		62,250				60,644
		6,00	35	3,50	90,00	61,867	71,17	73,00	96,70	60,460
				4,20		61,317				60,509
				5,00		60,633				60,620
6,30				59,767		60,559				
3,90				49,367		74,720				
6,00		36	4,70	90,00	48,567	70,51	73,00	96,70	75,225	
			5,10		48,367				75,201	
			5,40		48,150				75,273	
			6,20		47,700				75,265	

EK 4: (devam ediyor).

Agrega	Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi %	Numune	H _{start} cm	H _{finish} cm	t, 100/60 (100/dk)	L cm	H ₁ cm	H ₂ cm	k m/gün
K İ R E Ç T A Ş I	Tip 3	6,50	37	3,50	90,00	52,417	71,24	73,10	96,70	71,733
				4,60		51,917				71,503
				5,10		51,417				71,776
				5,80		51,133				71,578
				6,30		50,833				71,573
		6,50	38	3,40	90,00	50,983	71,77	73,10	96,80	74,071
				4,90		49,467				75,019
				5,70		49,067				74,920
				6,10		48,833				74,921
				6,90		48,500				74,716
		6,50	39	3,50	90,00	63,533	70,69	73,10	96,70	58,725
				4,20		62,633				59,087
				5,00		61,433				59,679
				5,60		61,300				59,387
				6,30		60,317				59,854
	Tip 3	7,00	40	2,60	90,00	50,033	71,83	73,10	96,70	76,561
				3,80		49,367				76,530
				4,20		48,917				76,875
				5,10		48,183				77,227
				5,90		47,483				77,627
		7,00	41	2,90	90,00	65,800	73,18	73,10	96,70	59,106
				3,40		65,567				58,976
				4,10		64,200				59,745
				5,90		63,167				59,450
6,50				62,717		59,449				
7,00		42	3,10	90,00	75,050	75,12	73,10	96,80	52,849	
			3,80		73,500				53,529	
			4,30		70,800				55,248	
			5,60		68,633				56,128	
			6,40		68,300				55,867	

EK 5: Cantabro aşınma kaybı deneyine ait tüm veriler.

Agrega	Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi %	Numune	İlk Ağırlık g.	Son Ağırlık g.	Kayıp %	
F E R R O K R O M C Ü R U F U	Tip 2	5,50	1	1142,61	1078,85	5,58	
			2	1134,46	1055,46	6,96	
			3	1134,57	1086,88	4,20	
		6,00	4	1140,41	1044,76	8,39	
			5	1095,41	990,20	9,60	
			6	1138,75	1018,38	10,57	
			6,50	7	1165,92	1055,41	9,48
				8	1105,35	999,79	9,55
				9	1093,84	948,91	13,25
	Tip 4	5,50	10	1119,73	415,41	62,90	
			11	1119,07	456,03	59,25	
			12	1115,01	455,90	59,11	
		6,00	13	1098,89	779,63	29,05	
			14	1139,57	926,47	18,70	
			15	1123,27	752,73	32,99	
		6,50	16	977,26	863,82	11,61	
			17	1214,62	993,11	18,24	
			18	1169,54	974,78	19,65	
	Tip 3	5,50	19	1130,20	394,22	65,12	
			20	1086,61	253,38	76,68	
			21	1077,24	532,29	50,59	
		6,00	22	1149,33	791,40	31,14	
			23	1114,10	695,73	37,55	
			24	1125,46	676,63	39,88	
		6,50	25	1172,75	935,00	20,27	
			26	1154,23	917,38	20,52	
			27	1072,58	904,04	15,71	
		7,00	28	1117,88	898,52	19,62	
			29	1119,19	896,62	19,88	
			30	1119,59	854,36	23,69	

EK 5: (devam ediyor).

Agrega	Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi %	Numune	İlk Ağırlık g.	Son Ağırlık g.	Kayıp %
K İ R E Ç T A Ş I	Tip 3	5,50	31	1113,45	452,78	59,34
			32	1109,12	504,08	54,55
			33	1114,41	479,82	56,94
		6,00	34	1123,00	723,06	36,61
			35	1118,63	558,67	50,06
			36	1135,68	649,22	42,83
		6,50	37	1104,42	869,30	21,29
			38	1106,93	722,19	34,76
			39	1133,89	816,10	28,03
		7,00	40	1120,66	890,34	20,55
			41	1138,41	947,64	16,76
			42	1144,59	931,11	18,65

EK 6: Dolaylı Çekme deneyine ait tüm veriler.

Agrega	Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi %	Numune	F Kuvvet kPa	L Numune Ortalama Yüksekliği cm	D Numune Çapı cm	Dolaylı Çekme σ_T
F E R R O K R O M C Ü R Ü F Ü	Tip 2	5,50	1	992,90	62,47	101,60	976,988
			2	1088,60	61,17		1093,919
			3	1080,20	61,69		1076,328
		6,00	4	1122,00	59,98		1149,852
			5	1198,90	59,30		1242,75
			6	1143,00	59,90		1172,937
		6,50	7	1098,10	60,80		1110,181
			8	1109,70	60,72		1123,387
			9	1123,00	61,78		1117,345
	Tip 4	5,50	10	477,40	71,91		408,083
			11	324,90	70,41		283,642
			12	380,00	69,71		335,077
		6,00	13	657,40	70,54		572,862
			14	597,70	70,75		519,293
			15	622,30	66,85		572,208
		6,50	16	769,80	74,91		631,675
			17	703,40	69,90		618,558
			18	734,10	66,35		680,095
	Tip 3	5,50	19	684,00	69,24		607,232
			20	592,20	68,67		530,099
			21	622,40	69,82		547,955
		6,00	22	804,40	69,78		708,592
			23	807,00	70,00		708,649
			24	789,30	66,18		733,113
		6,50	25	888,60	69,14		790,010
			26	819,50	69,47		725,115
			27	839,10	68,92		748,383
		7,00	28	863,10	69,13		767,450
			29	894,10	67,93		809,059
			30	889,60	66,20		826,023

EK 6: (devam ediyor).

Agrega	Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi %	Numune	F Kuvvet kPa	L Numune Ortalama Yüksekliği cm	D Numune Çapı cm	Dolaylı Çekme σ_T
K İ R E Ç T A Ş I	Tip 3	5,50	31	973,78	72,56	101,60	824,935
			32	933,32	70,18		817,474
			33	953,55	71,37		821,267
		6,00	34	1000,07	72,06		853,086
			35	1051,56	70,77		913,354
			36	1025,82	71,42		882,948
		6,50	37	1052,23	71,67		902,460
			38	1096,12	71,35		944,323
			39	1074,18	71,51		923,345
		7,00	40	1189,58	71,46		1023,258
			41	1211,50	72,89		1021,674
			42	1200,54	72,18		1022,458

EK 7: Nem Hasarı deneyine ait tüm veriler.

Agrega	Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi %	Numune	Koşulsuz numuneler				Koşullu numuneler				Nem Hasarı
				F Kuvvet kPa	L Numune Ortalama Yüksekliği, cm	D Numune Çapı, cm	Dolaylı Çekme σ_T	F Kuvvet kPa	L Numune Ortalama Yüksekliği, cm	D Numune Çapı, cm	Dolaylı Çekme σ_T	
F E R R O K R O M C Ü R Ü F Ü	Tip 2	5,50	1	992,90	62,47	101,60	976,988	740,48	61,20	101,60	743,733	0,761
			2	1088,60	61,17		1093,919	753,12	61,05		758,288	0,693
			3	1080,20	61,69		1076,328	778,56	60,76		787,644	0,732
		6,00	4	1122,00	59,98		1149,852	903,80	59,44		934,650	0,813
			5	1198,90	59,30		1242,75	862,20	63,13		839,513	0,676
			6	1143,00	59,90		1172,937	894,30	62,23		883,362	0,753
		6,50	7	1098,10	60,80		1110,181	901,10	59,41		932,328	0,840
			8	1109,70	60,72		1123,387	816,60	59,85		838,688	0,747
			9	1123,00	61,78		1117,345	857,40	59,44		886,666	0,794
	Tip 4	5,50	10	477,40	71,91		408,083	298,40	70,03		261,921	0,642
			11	324,90	70,41		283,642	318,70	69,23		282,972	0,998
			12	380,00	69,71		335,077	328,30	67,38		299,499	0,894
		6,00	13	657,40	70,54		572,862	541,70	69,05		482,226	0,842
			14	597,70	70,75		519,293	521,20	70,00		457,680	0,881
			15	622,30	66,85		572,208	524,40	69,54		463,536	0,810
		6,50	16	769,80	74,91		631,675	618,10	69,45		547,069	0,866
			17	703,40	69,90		618,558	645,40	69,81		568,286	0,919
			18	734,10	66,35		680,095	605,60	69,49		535,697	0,788
	Tip 3	5,50	19	684,00	69,24		607,232	550,10	69,51		486,463	0,801
			20	592,20	68,67		530,099	530,60	69,28		470,777	0,888
			21	622,40	69,82		547,955	528,20	69,51		467,096	0,852
		6,00	22	804,40	69,78		708,592	674,70	64,39		644,092	0,909
			23	807,00	70,00		708,649	637,25	63,71		614,834	0,868
			24	789,30	66,18		733,113	623,10	64,03		598,177	0,816
		6,50	25	888,60	69,14		790,010	785,50	62,80		768,851	0,973
			26	819,50	69,47		725,115	704,20	65,44		661,467	0,912
			27	839,10	68,92		748,383	683,40	69,02		608,633	0,813
		7,00	28	863,10	69,13		767,450	791,20	68,98		705,048	0,919
			29	894,10	67,93		809,059	832,40	66,44		770,119	0,952
			30	889,60	66,20		826,023	794,30	68,60		711,731	0,862

EK 7: (devam ediyor).

Agrega	Karışım Tipi	Bitüm Yüzdesi %	Numune	Koşulsuz numuneler				Koşullu numuneler				Nem Hasarı
				F Kuvvet kPa	L Numune Ortalama Yüksekliği, cm	D Numune Çapı, cm	Dolaylı Çekme σ_T	F Kuvvet kPa	L Numune Ortalama Yüksekliği, cm	D Numune Çapı, cm	Dolaylı Çekme σ_T	
K İ R E Ç T A Ş I	Tip 3	5,50	31	973,78	72,56	101,60	824,935	617,624	70,01	101,60	542,275	0,66
			32	933,32	70,18		817,474	532,478	69,45		471,286	0,58
			33	953,55	71,37		821,267	859,943	70,44		750,422	0,91
		6,00	34	1000,07	72,06		853,086	741,234	70,70		644,453	0,76
			35	1051,56	70,77		913,354	756,508	71,18		653,298	0,72
			36	1025,82	71,42		882,948	785,546	70,51		684,820	0,78
		6,50	37	1052,23	71,67		902,460	816,089	71,24		704,156	0,78
			38	1096,12	71,35		944,323	840,925	71,77		720,228	0,76
			39	1074,18	71,51		923,345	865,133	70,69		752,281	0,81
			40	1189,58	71,46		1023,258	1006,813	71,83		861,586	0,84
		7,00	41	1211,50	72,89		1021,674	1002,905	73,18		842,409	0,82
			42	1200,54	72,18		1022,458	1021,423	75,12		835,659	0,82

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Sedat TOPALOĞLU
Doğum Yeri ve Tarihi : RİZE, 12.10.1992

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans Öğrenimi :
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce
Bilimsel Faaliyet/Yayımlar :
Aldığı Ödüller :

İş Deneyimi

Stajlar : Tork Yapı A.Ş Özel bina inşaatı yapım aşamaları
Rize/merkez
İntekar Yapı A.Ş Otoyol yapım aşamaları Rize/merkez
Projeler ve Kurs Belgeleri :
Çalıştığı Kurumlar : Hızarcıoğlu İnşaat- Özel İnşaat Firması Bartın/merkez
05.2016-devam

İletişim

E-Posta Adresi : topaloglu.sedat53@gmail.com

Tarih : 04/09/2019

