



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FİBER KATKILAR İLE MODİFİYE EDİLEN ATIK MALZEMELİ  
GEÇİRİMLİ ASFALT KARIŞIMLARIN TASARIM  
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

**GÖKHAN ORAL**

**DANIŞMAN**

**DOÇ.DR. ALTAN ÇETİN**

**BARTIN-2021**





**T.C.**

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FİBER KATKILAR İLE MODİFİYE EDİLEN ATIK MALZEMELİ GEÇİRİMLİ  
ASFALT KARIŞIMLARIN TASARIM PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZIRLAYAN  
GÖKHAN ORAL**

**BARTIN-2021**

## BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Altan ÇETİN danışmanlığında hazırlamış olduğum “FİBER KATKILAR İLE MODİFİYE EDİLEN ATIK MALZEMELİ GEÇİRİMLİ ASFALT KARIŞIMLARIN TASARIM PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ ” 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.

03.08.2021

Gökhan ORAL

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada bana en büyük katkısı olan, güler yüzlü ve motive edici konuşmasıyla desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Altan ÇETİN' e, manevi anlamda her zaman desteğini yanımda hissettiğim aileme teşekkürlerimi sunarım.

Gökhan ORAL



## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **FİBER KATKILAR İLE MODİFİYE EDİLEN ATIK MALZEMELİ GEÇİRİMLİ ASFALT KARIŞIMLARIN TASARIM PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

**Gökhan ORAL**

**Bartın Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Altan ÇETİN**

**Bartın-2021, sayfa: 83**

Şehirleşmenin yoğun olduğu bölgelerde, yağmur suyu büyük oranda geçirimsiz yüzeylerde toplanmakta, yeraltı suyuna sızması engellenmektedir. Özellikle yerleşim bölgeleri için çevre dostu olarak nitelendirebileceğimiz geçirimli kaplama uygulamaları, yüzey akışını büyük oranda azaltarak, yağmur suyunun temiz kalması ve sızma yoluyla yeraltı suyunun beslemesine olanak sağlamaktadır. Geçirimli Kaplamalar boşluklu yapısı itibariyle, çevresel gürültü kirliliğini azaltmaktadır. Bu faydaları düşünüldüğünde bu kaplamaların kentleri insan doğasına daha uygun hale getirmeye yardımcı olacağı açıktır. Diğer yandan, boşluklu yapısı itibariyle hizmet ömürleri kısa olan bu kaplamaların, performansının geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu bağlamda, geçirimli asfaltın daha yaygınlaştırılmasına katkı sunmak amacıyla, kaplama karışımların hidrolik geçirgenlik düzeyinden ödün vermeden, bazalt elyaf, polipropilen, cam elyaf ve atık lastik kullanılarak performansının iyileştirilmesi düşünülmüştür. Geçirimli asfalt karışım tasarımında, agrega olarak ferrokrom üretim sürecinde açığa çıkan cüruf malzemesi kullanılmıştır. Ferrokrom cürufunun özelliklerine uygun bir alanda geri dönüşümü ile ekonomik ve çevresel açılardan optimum fayda amaçlanmıştır. Çalışmada,

Elazığ Ferrokrom Tesisinden temin edilen ferrokrom cürufu ve İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.' den temin edilen PMB 76-22 polimer bitümlü bağlayıcı yanında, filler takviyesi olarak F tipi uçucu kül ve bitüm stabilizasyonu için selülozik elyaf kullanılmıştır. Çalışmada ferrokrom cürufu agrega için bir karışım tasarımı gerçekleştirilmiştir. En iyi tasarım sonuçlarının elde edildiği %6,0 ve %6,5 bitüm oranlarında, karışım ağırlığının %0,2, %0,4, %0,6, %0,8 ve %1,0 oranlarında polipropilen, bazalt elyaf, cam elyaf ve kırıntı kauçuk ilavesinin karışım performansı üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Hazırlanan numunelere hacim analizi, permeabilite, Cantabro aşınma kaybı, dolaylı çekme mukavemeti ve nem hasarına karşı dayanım gibi tasarım deneyleri gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Geçirimli asfalt, Bazalt elyaf, Polipropilen, Cam elyaf, Kırıntı kauçuk Ferrokrom cürufu, Permeabilite, Nem hassasiyeti, Cantabro parça kaybı.

**Bilim Alanı Kodu:** 624.04.01

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

# **INVESTIGATION OF DESIGN PARAMETERS OF PERMEABLE ASPHALT MIXTURES CONTAINING WASTE MATERIALS MODIFIED WITH FIBER ADDITIVES**

**Gökhan ORAL**

**Bartın University**

**Graduate School**

**Department of Civil Engineering**

**Thesis Advisor: Assoc. Prof. Altan ÇETİN**

**Bartın-2021, pp: 83**

In areas where urbanization is intense, rainwater is mostly collected on impermeable surfaces and leakage into groundwater is prevented. Permeable coating applications, which can be qualified as environmentally friendly especially for residential areas, greatly reduce the runoff, keep the rainwater clean and allow groundwater to be fed through infiltration. Permeable Coatings reduce environmental noise pollution due to their porous structure. Considering these benefits, it is clear that these coatings will help make cities more suitable for human nature. On the other hand, there is a need to improve the performance of these coatings, which have a short service life due to their porous structure.

In this study, in order to contribute to the more widespread use of permeable asphalt, it was considered to improve the performance of the coating mixtures by using basalt fiber polypropylene, glass fiber and crumb rubber without compromising the hydraulic permeability level. The slag material released during the ferrochrome production process was used as aggregate in the permeable asphalt mixture design. With the recycling of ferrochrome slag in an area suitable for its properties, optimum benefit is aimed in economic



and environmental terms. In the study, besides the ferrochrome slag obtained from Elazığ Ferrochrome Plant and polymer bituminous binder (PMB 76-22), F-type fly ash as filler addition and cellulosic fiber for bitumen stabilization were used. In the study, a mixture design was carried out for ferrochrome slag aggregate. The effects of the addition of polypropylene, basalt fiber, glass fiber and crumb rubber at the rates of 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1,0% of mixture weight on the blend performance at 6.0% and 6.5% bitumen rates where the best design results are achieved has been determined. Design tests such as volume analysis, permeability, Cantabro abrasion loss, indirect tensile strength and resistance to moisture damage were carried out on the prepared samples.

**Keywords:** Porous asphalt, Basalt fiber, Polypropylene, Glass fiber, Crumb rubber, Ferrochrome slag, Permeability, Moisture susceptibility, Cantabro part loss.

**Scientific Field Code:** 624.04.01



# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

KABUL VE ONAY...	ii
BEYANNAME...	iii
ÖNSÖZ...	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER...	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ...	xii
TABLolar DİZİNİ...	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ...	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KARAYOLU ÜSTYAPISI VE GEÇİRİMLİ SİSTEMLER.....	3
2.1. Alt Temel Tabakası.....	3
2.2. Temel Tabakası.....	3
2.3. Kaplama Tabakası.....	5
2.3.1 Rijit Kaplamalar (Rijit Üstyapı).....	5
2.3.1.1 Derzli-Donatısız Rijit Kaplamalar.....	5
2.3.1.2 Derzli-Donatılı Rijit Kaplamalar.....	6
2.3.1.3 Sürekli-Donatılı Rijit Kaplamalar.....	7
2.3.2 Esnek Kaplamalar (Esnek Üstyapı).....	7
2.3.2.1 Aşınma Tabakası.....	9
2.3.2.2 Binder Tabakası.....	9
2.3.2.3 Sathi Kaplamalar.....	9
2.4. Geçirimli Üstyapı Sistemleri.....	10
3. GEÇİRİMLİ ASFALT KAPLAMALAR VE UYGULAMALARI.....	13
3.1. Geçirimli Asfalt Deneyimleri ve Tarihsel Gelişimi.....	13
3.2. Geçirimli Asfalt Kaplama Sistemlerinin Faydaları.....	15
3.3. Geçirimli Asfalt Kaplama Sistemlerinde Yaşanan Sorunlar ve Çözüm Yolları.....	17
3.3.1 Yapısal (Tasarım ve Yapım Aşamaları).....	17
3.3.2 Bakım ve Onarım.....	19
4. GEÇİRİMLİ ASFALT KARIŞIMLAR ÜZERİNE YAPILAN ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	22

4.1. Agrega ve Karışım Gradasyonu .....	23
4.2. Bitümlü Bağlayıcı ve Modifiye Bitüm .....	29
4.3. Fiber Modifikasyonu .....	31
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>35</b>
5.1. Kullanılan Malzemeler .....	35
5.1.1 Agrega .....	35
5.1.2 Bitümlü Bağlayıcı .....	37
5.1.3 Bazalt Elyaf .....	37
5.1.4 Cam Elyaf.....	38
5.1.5 Polipropilen Elyaf.....	39
5.1.6 Atık Lastik Kırpıntısı.....	40
5.1.7 Selülozik Fiber .....	41
5.2. Deney Yöntemleri.....	42
5.2.1 Karışım Numunelerinin Hazırlanması.....	42
5.2.2 Sıkıştırılmış Karışım Numunelerinin Boşluk Analizi .....	43
5.2.3 Sabit Seviyeli Permeabilite Deneyi .....	45
5.2.4 Cantabro Dane Kaybı Deneyi .....	47
5.2.5 Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi .....	49
5.2.6 Su Hasarı Deneyi .....	51
<b>6. DENEY SONUÇLARI .....</b>	<b>53</b>
6.1. Boşluk Analiz Sonuçları .....	53
6.2. Permeabilite Deneyi Sonuçları.....	57
6.3. Cantabro Parça Kaybı Deneyi Sonuçları .....	61
6.4. Dolaylı Çekme Dayanım Deneyi Sonuçları.....	65
6.5. Nem Hasarı Deney Sonuçları.....	69
6.6. Karışım Tasarım Sonuçları.....	73
<b>7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>74</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>77</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>84</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa N
2.1: Karayolu üst yapı tabakaları .....	4
2.2: Derzli donatısız rijit kaplama .....	6
2.3: Asfalt kaplama katmanları.....	7
2.4: Esnek üst yapı kesiti ve gerilme dağılımı.....	8
2.5: Esnek ve rijit kaplama katmanları için tipik yük dağılımı .....	9
2.6: Sathi kaplama yapım aşamaları .....	10
2.7: Kısmi tahliye sistemi .....	11
2.8: Otoparkta uygulanan geçirimli asfalt kesiti.....	12
4.1: Ferrokrom cürufun inşaat mühendisliğindeki kullanım alanları .....	28
4.2: Bazalt elyafın elektron mikroskobu (SEM) altında görünümü .....	33
5.1: Ferrokrom cüruf agregası .....	36
5.2: Kullanılan bazalt elyafın görünümü .....	38
5.3: Kullanılan cam elyafın görünümü .....	39
5.4: Polipropilen elyaf .....	40
5.5: Atık lastik kırıntılarının görünümü.....	41
5.6: Selülozik fiber .....	42
5.7: Geçirimli asfaltın hazırlanma aşamaları (a) mikserle karıştırılan karışıma lif ilave edilmesi (b) mumunenin Marshall tokmağı ile sıkıştırılması.....	43
5.8: Numunelerin boşluk analizleri (a) parafilmle kaplı numuneler (b) özgül ağırlık sehpası .....	43
5.9: Maksimum teorik özgül ağırlık deneyi (a) deney kullanılan piknometre ve vakum pompası (b) deneye tabi tutulan gevşek karışım numunesi.....	44
5.10: Laboratuvarında kullanılan permeabilite deney düzeneği (a) kabarcık tüplü sabit seviyeli permeametre görünümü, (b) permeametreye yerleştirilmiş numune, (c) permeametre şematik görünümü ve bölümleri.....	47
5.11: Los Angeles deney cihazı .....	48
5.12: Cantabro aşınma deneyi öncesinde ve sonrasında numuneler .....	49
5.13: Dolaylı çekme mukavemeti test cihazı.....	50
5.14: Dolaylı çekme deneyi (a) Marshall kırma kırma çenesine sabitlenen çelik şeritler arasına yerleştirilen silindirik numune (b) yükleme durumunun gösterimi .....	51

<b>5.15:</b> Numunelerin koşullandırma aşamaları (a) dondurucudan çıkarılan numune (b) 60 °C' lik su banyosunda bekletilmesi.....	52
<b>6.1:</b> Lifli poroz asfalt karışımların boşluk içerikleri (a) polipropilen lif (b) cam lif (c) bazalt lif (d) lastik lif.....	55
<b>6.2:</b> Lifli poroz asfalt karışımların boşluk içerikleri (a) 6.0% bitüm (b) 6.5% bitüm.....	56
<b>6.3:</b> Lifli poroz asfalt karışımların permeabilite katsayıları (a) polipropilen lif (b) cam lif (c) bazalt lif (d) lastik lif.....	59
<b>6.4:</b> Lifli poroz asfalt karışımların permeabilite katsayıları (a) 6.0% bitüm (b) 6.5% bitüm.....	60
<b>6.5:</b> Lifli poroz asfalt karışımların cantabro parça kaybı (a) polipropilen lif (b) cam lif (c) bazalt lif (d) lastik lif.....	63
<b>6.6:</b> Lifli poroz asfalt karışımların cantabro parça kaybı (a) 6.0% bitüm (b) 6.5% bitüm.....	64
<b>6.7:</b> Lifli poroz asfalt karışımların dolaylı çekme dayanımları (a) polipropilen lif (b) cam lif (c) bazalt lif (d) lastik lif.....	67
<b>6.8:</b> Lifli poroz asfalt karışımların dolaylı çekme dayanımları (a) 6.0% bitüm (b) 6.5% bitüm.....	68
<b>6.9:</b> Lifli poroz asfalt karışımların dolaylı çekme oranları (a) polipropilen lif (b) cam lif (c) bazalt lif (d) lastik lif.....	71
<b>6.10:</b> Lifli poroz asfalt karışımların dolaylı çekme oranları (a) 6.0% bitüm (b) 6.5% bitüm.....	72

## TABLolar DİZİNİ

<b>Tablo</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
<b>3.1:</b> Kaplamada gürültü agrega ilişkisi.....	17
<b>4.1:</b> Türkiye'deki ferrokrom üretim tesislerindeki cürufların kimyasal analizi .	23
<b>4.2:</b> Agreganın özgül ağırlık ve su absorpsiyonu değerleri.....	24
<b>4.3:</b> Geçirimli asfalt karışımında kullanılabilir agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri ve limit değerleri. ....	26
<b>4.4:</b> Geçirimli asfalt karışımında kullanılan bitümlü bağlayıcı özellikleri ve limit değerleri.....	27
<b>4.5:</b> Bazı ülkelerde kullanılan geçirimli asfalt karışım gradasyon limitleri. ....	29
<b>5.1:</b> Ferrokrom cürufuna ait bazı fiziksel özellikler. ....	36
<b>5.2:</b> Karışım tasarımında kullanılan agrega gradasyonu. ....	36
<b>5.3:</b> Agrega özgül ağırlık ve su emme yüzdeleri. ....	37
<b>5.4:</b> Kullanılan bitümlü bağlayıcıya özellikleri.....	37
<b>5.5:</b> Bazalt elyafa ait bazı teknik özellikler .....	38
<b>5.6:</b> Cam elyafa ait bazı teknik özellikler .....	39
<b>5.7:</b> Polipropilene ait bazı teknik özellikler.....	40
<b>5.8:</b> Selülozik fibere ait fiziksel özellikler.....	41
<b>8.1:</b> Lifli geçirimli asfalt karışımların optimum tasarım parametreleri.....	73

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

mm	: milimetre
kg	: kilogram
cm	: santimetre
m <sup>2</sup>	: metrekare
MPa	: megapascal
g	: gram
N	: Newton, Yük
SGT	: Teorik Özgül Ağırlık
SG	: Özgül Ağırlık
k	: Permeabilite katsayısı
Q	: Debi
i	: Hidrolik gradient
QT	: İndirek Çekme Mukavemeti
IDTKoşullanmış	: Koşullandırılmış İndirek Çekme
IDTKoşullanmamış	: Koşullandırılmamış İndirek Çekme

## KISALTMALAR

TS	: Türk Standartları
EN	: Avrupa Normu
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
ASTM	: American Society for Testing and Materials : American Association of State Highway and Transportation
ASSTHO	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
Min.	: Minimum
Maks.	: Maksimum
vd.	: ve diğerleri
vb.	: ve benzer



# 1. GİRİŞ

Eskiden beri insanlar yaşantılarını sürdürüebilmek için doğaya ayak uydurmak zorunda kalmışlardır. Yapılan her tahribat mutlaka doğanın tepkisi ile karşılık bulmuştur. İnsanların doğaya verdikleri tahribatların bir tezahürü olan mevsimsel değişimler sonucu olarak günümüzde toprak kayması, erozyon, kuraklık, sel baskınları gibi felaketlerle daha sık karşılaşılmaktadır. Bu durum, doğanın dengesini bozmayacak uygulamaların hayata geçirilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Şehirleşmenin yoğun olduğu bölgelerde, yağmur suyu büyük oranda geçirimsiz yüzeylerde toplanmakta, yeraltı suyuna sızması engellenmektedir. Özellikle yerleşim bölgeleri için çevre dostu olarak nitelendirebileceğimiz geçirimli kaplama uygulamaları, yüzey akışını büyük oranda azaltarak, yağmur suyunun temiz kalması ve sızma yoluyla yeraltı suyunu beslemesine olanak sağlamaktadır. Bu çevresel katkı ile beraber, yağış esnasında yol kaplama yüzeyinde oluşan ince su filmi sebebiyle taşıt lastiği ile yol yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısının minimum düzeye inmesi ve taşıtların su sıçratma ve sprej etkisi ile görüş mesafelerinin kısıtlanması gibi sebeplerle oluşacak kaza risklerini önemli düzeyde azaltmaktadır. Yuvarlanma gürültüsünün kaplama boşlukları tarafından absorbe edildiği ve çevresel gürültü kirliliğini azalttığı belirtilmektedir. Geçirimli asfalt karışımlar ortalama 60 sene önce bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmıştır. Modifiye bitüm teknolojinin gelişmesiyle birlikte GAK tasarımlarının geliştirilme çabaları artmış ve birçok ülkede kullanım alanı bulmuştur.

Geçirimli asfalt, kaba agregaya nazaran az miktarda ince malzeme içeren açık gradasyona sahip bitümlü karışım tipidir. Yapısı itibariyle dayanım özelliklerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda yapılan çalışmalar, karışım temel bileşenleri (agrega ve bitümlü bağlayıcı) üzerine yoğunlaşmakla birlikte, farklı fiberlerin karışım performanslarına etkilerini de içermektedir. Özellikle parça kopma suretiyle ortaya çıkan bozulmaların önlenmesinde bitüm matriksinin güçlendirilmesinde fiberler öne çıkmaktadır. Fiber modifiyesi, trafik etkisiyle ortaya çıkan gerilme yüklerine karşı ve çatlak oluşumuna karşı dayanımı arttırmaktır. Kullanılan lif türü, miktarı ve boyutlarının optimizasyonu maksimum fayda sağlamak için önemlidir. Liflerin gereğinden uzun seçilmesi topaklanmaya sebep

olacağı gibi çok kısa seçilmesi etkisini azaltacaktır. Bitüm/lif oranı azaldıkça bitüm lif tarafından emilir, agregayı bağlayacak yeterli miktarda bitüm olmayacağından lifin faydasında çok zararı olmuş olacaktır. Liflerin kaplaması için gerekli bitüm miktarı liflerin emilim ve yüzey alanına bağlıdır. Bundan dolayı karışıma katılması gereken bitüm miktarı hem lif konsantrasyonundan hem de lif türünden etkilenir. Ayrıca, liflerin karışımın içinde homojen olarak dağılma derecesi kaplamanın mukavemetini etkileyecektir. Geçirimli asfalt karışımlarda bitüm süzülmesini önlemek amacıyla ilk başlarda selülozik ve doğal lifler kullanılırken, dayanımın iyileştirilmesi için aramid, poliester, cam ve bazalt gibi lifler kullanılmıştır. Karışımlarda bitüm stabilizasyonunun sağlanmasında en yaygın olarak kullanılan lifler, karışımın toplam ağırlığının % 0,2 ile %0,5 kullanılmaktadır.

Doğal kaynakların korunması ve çevre kirliliğinin azaltılması açısından atıkların geri dönüşümü ve sürdürülebilirlik gün geçtikçe daha önemli hale gelmiştir. Bu noktada çalışmada, endüstriyel cürufaların geri dönüşümü göz önüne alınarak, atık potansiyeline sahip olan ferrokrom cürufunun özelliklerine daha uygun bir alanda geçirimli asfalt karışım üretiminde, agrega olarak kullanımının uygun olacağı düşünülmüştür.

Bu çalışmada, FC'nin agrega olarak kullanıldığı GAK'ın tasarım performansının geliştirilmesinde farklı fiber katkılarının etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, gerçekleştirilen karışım tasarımlarında Türk Karayolları Teknik Şartname (THTS) esasları dikkate alınmıştır. Bu çalışmada, çalışmada tek tip polimer katkılı bitümlü bağlayıcı ve karışım agrega gradasyonu (Tip-3) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan malzemeler ve karışım gradasyonu bu şartnameye göre seçilmiştir. Çalışmada polipropilen, cam, bazalt ve lastik esaslı fiberler kullanılmıştır. Seçilen Tip-3 agrega gradasyonu için %6.0 ve %6.5 bitüm yüzdelerinde, karışım agrega ağırlığının %0.2, %0.4, %0.6 ve %0.8 fiber ilavelerinde karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde GAK'ların tasarımında uygulanan boşluk analizleri, permeabilite, Cantabro parça kaybı, dolaylı çekme dayanımı ve nem hasarı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları değerlendirilerek fiber tipi ve konsantrasyonlarının karışım performansına etkileri ve fiberli GAK'a ait tasarım değerleri belirlenmiştir.

## 2. KARAYOLU ÜSTYAPISI VE GEÇİRİMLİ SİSTEMLER

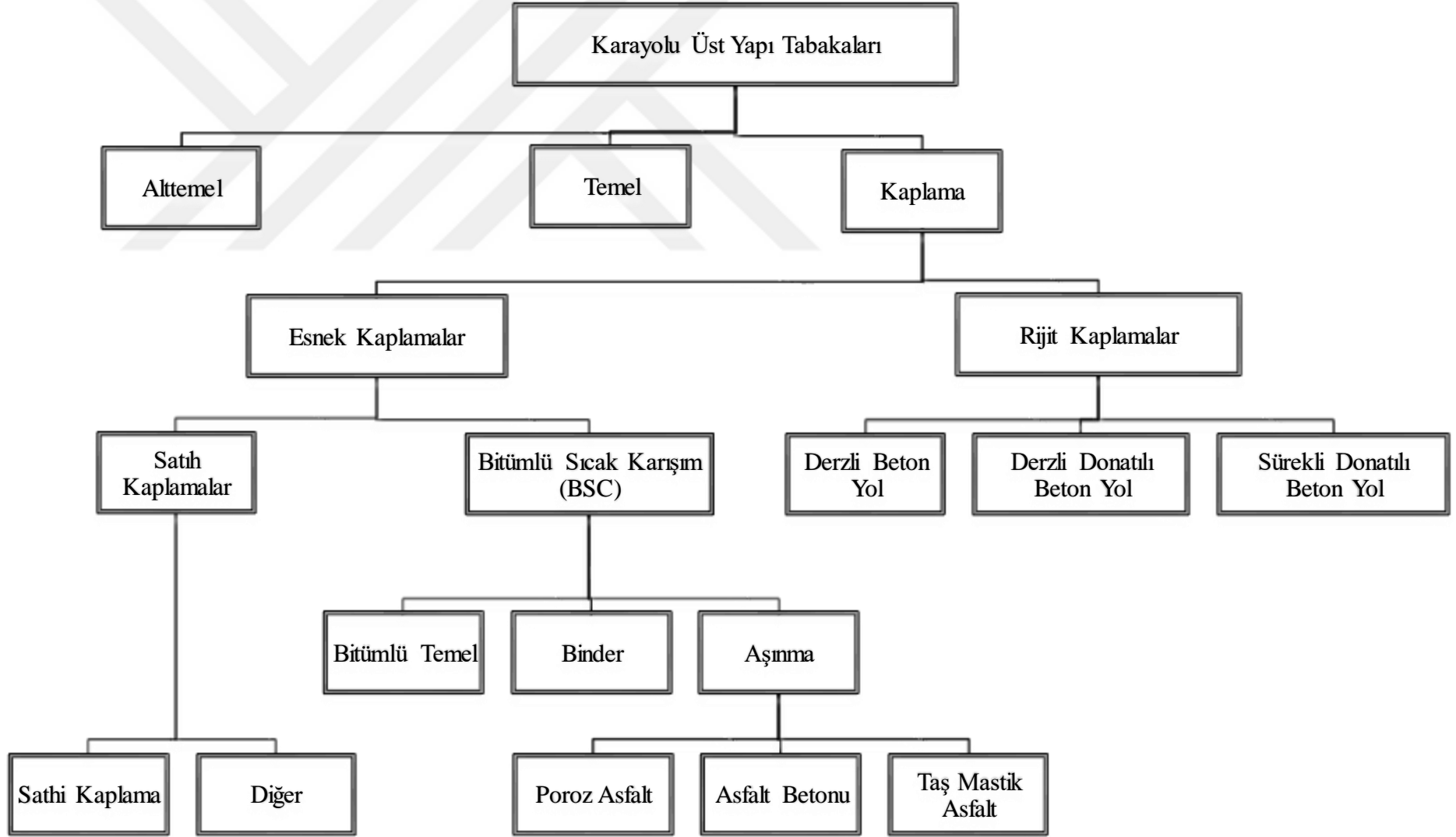
Karayolu üstyapısı tabakalı bir yapıdan meydana gelmektedir. Bu tabakalı yapının esas amacı, üstyapıya etkileyen trafik yüklerinin taban zemininin taşıyabileceği değere indirmek, düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak ve altyapıyı korumaktır. Karayolu üstyapısı kaplama tabakalarında kullanılan malzeme türüne göre rijit kaplama ve esnek kaplama diye iki ana başlığa ayrılır. Zemin yapısına, trafik yoğunluğuna, çevre koşulları ve ekonomik koşullar göz önüne alınarak ihtiyacı karşılayan üst kaplama türü tercih edilebilir. Şekil 2.1’de geleneksel üstyapıyı oluşturan tabakalar esas alınarak sınıflandırılmıştır. Buradan da anlaşılacağı gibi kaplama tabakasını oluşturan malzemeye göre ayrılmaktadır. Alt temel ve temel tabakaları her iki üstyapı tipi için ortak tabakalardır. Diyagramda “Esnek Kaplamalar - Bitümlü Sıcak Karışımlar altında belirtilen poroz asfalt geçirimli sistemlerin kaplamasını oluşturmaktadır. Geçirimli üstyapıların tabakalaşma sistemi geleneksel üstyapıdan farklılık gösterdiğinden ayrı olarak sınıflandırılmaları daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Aşağıda diyagramdaki sınıflamada yer alan üstyapı elemanları kısaca açıklanmıştır.

### 2.1. Alt Temel Tabakası

Yola gelen yükleri daha ucuz bir malzeme ile alt yapıya aktarmak için alt yapıyla temel tabakası arasına konulan tabakadır. Alt temel tabakası üst tabakalardan gelen yükleri, zemine etki etmesini önlemek, oluşabilecek su ve don tesirlerine karşı direnç sağlamak ve tampon bölge oluşturmak için doğal zemin üstüne serilen çoğunlukla iri yapılı taşlardan oluşmaktadır. Alt temel sadece taşıma gücü yeterli olmayan zemin ve don olaylarına karşı hassas olan doğal zeminler üzerine yapılmaktadır. Ortada böyle bir durum yoksa, yapılmamasında bir sakınca olmayabilir. Alt temel tabakasının bir diğer görevi ise, zeminden sızabilecek suları tutarken üst tabakaların da drenajına imkan sağlamaktır.

### 2.2. Temel Tabakası

Kaplama tabakası ile toprak yüzey veya varsa alt temel tabakası arasına serilen, alt temel tabakasına göre daha ince yapıda malzemedan oluşan, serilince üst tabakalar için daha düzgün bir yüzey sağlayan, trafik yüklerini karşılayıp alt tabaka veya zemine aktaran tabaka yapısıdır. Temel tabakasında bağlayıcı malzeme kullanılan uygulamalar olduğu gibi, hiç



Şekil 2.1: Karayolu üst yapı tabakaları

bağlayıcı malzeme kullanılmaması da mümkündür. Asıl görevi, üstyapının yük taşıma kapasitesini artırmaktır. Ayrıca, drenaja yardımcı olabilecek, trafik hareketlerinden doğan yüksek kayma gerilmelerine karşı koyabilecek ve don olaylarına karşı da koruma sağlayabilecek özellikte olmalıdır. Bundan dolayı bu tabaka belirli özellikleri olan, kaliteli malzemedan imal edilmelidir.

### **2.3. Kaplama Tabakası**

Kaplama tabakası, üst yapının en üst tabakasıdır. Don olaylarının, hava ısısının, trafiğin aşındırma etkilerinin, trafik basınç ve çekme gerilmelerinin en çok tesir ettiği tabakadır. Bu etkilere karşı direnç sağlayabilmesi için diğer tabakalara göre daha dayanımlı bir yapıda imal edilmelidir. Kaplama tabakası, düzgün ve güvenli bir sürüş sağlamak, tekerlek aşındırma etkisine karşı koruma sağlamak ve yolu kalıcı deformasyonlardan korumak gibi görevleri de üstlenmektedir. Kaplama tabakası kendisini oluşturan malzemelerin doğasına bağlı olarak rijit ve esnek olarak ikiye ayrılır. Bunlar aynı zamanda üstyapıya genel isimlerini vermektedir.

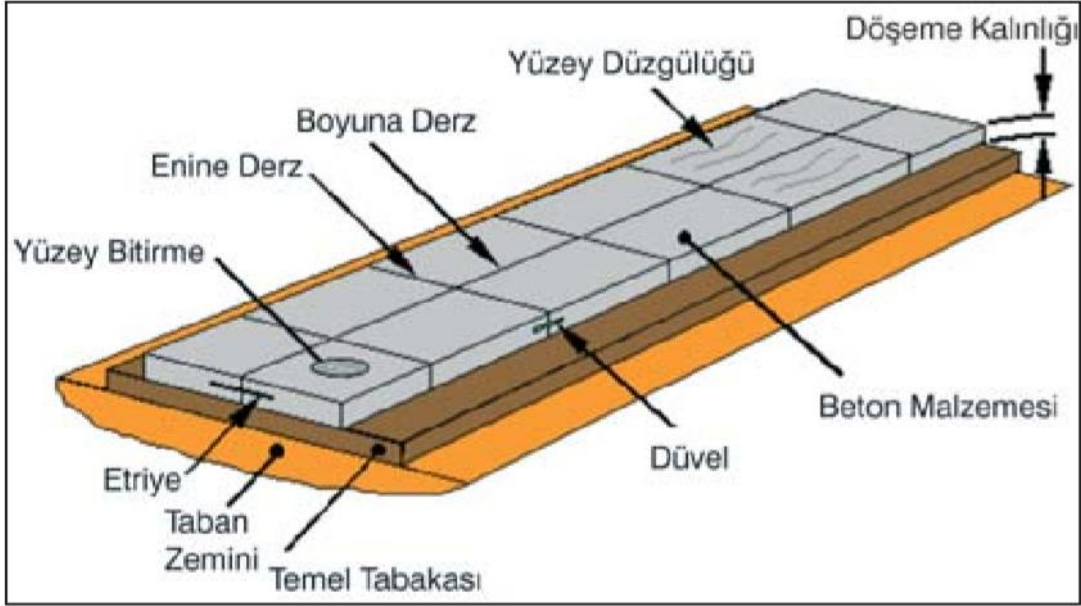
#### **2.3.1 Rijit Kaplamalar (Rijit Üstyapı)**

Rijit kaplama tabakası, iri agrega, kum, portland çimentosu ve su karışımından oluşur. Yerine göre tek veya iki tabaka halinde dökülen bir üstyapı tipidir. İhtiyaç halinde granüler bir kaplama altı tabakası ile beraber dökülebilir. Rijit kaplamada trafik yükünün en fazla etki ettiği katman yüzeydeki betondan imal edilen plaktır. 1891 yılında dünyanın ilk beton yolu olarak tarihe geçen yol ABD'li bilim adamı George Bartholomew tarafından Ohio kentindeki mahkeme önündeki yolda dökülmüştür. Şekil 2.2'de genel elemanlarının gösterildiği rijit kaplamalar, derzli-donatısız, derzli-donatılı ve sürekli olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır.

##### **2.3.1.1 Derzli-Donatısız Rijit Kaplamalar**

Derzli donatısız tipteki rijit kaplamalarda 3 ile 6 m aralığında enine derz ve yolun genişliğine göre ise mümkün olduğunca yolun ortasına gelecek şekilde boyuna derz verilerek plakalar oluşturulur. Oluşturulan bu plakalar mümkün olduğunca kare şeklinde ayrılır. Plaklar 127 ile 356 mm kalınlığında donatısız imal edilmelerine rağmen derz bölgelerine çelik çubuklar

konulur. Enine derzlerde nervürsüz ‘kayma çubuğu’ kullanılırken; boyuna derzlerde ise nervürlü çubuk demir kullanılır. Kullanılan bu demir çubuklar sayesinde plaklar birlikte hareket eder. Yolda kasis oluşumunun önüne geçilmekte ve daha konforlu bir sürüş sağlanmaktadır.



Şekil 2.2: Derzli donatısız rijit kaplama (Engin, 2014)

### 2.3.1.2 Derzli-Donatılı Rijit Kaplamalar

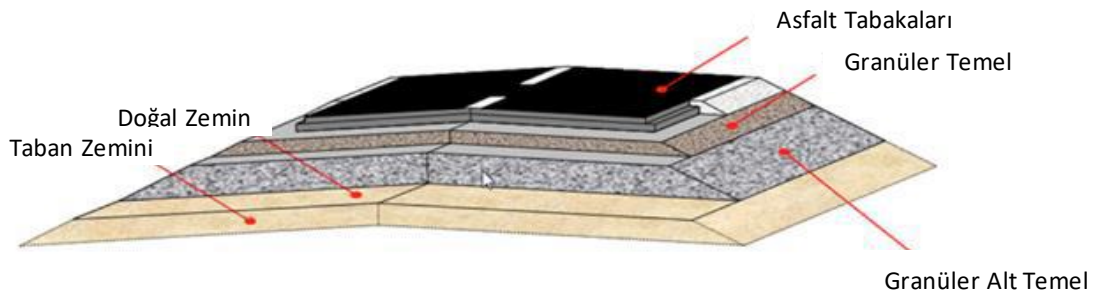
Derzli donatılı tipteki rijit üstyapı inşasında kullanılan döşeme, uzunlukları 8 ila 30 m olan plaklardan oluşur. Plak kalınlıkları 150 ile 350 mm olup, ortalarından donatı geçmektedir. Temel tabakası kalınlıkları 102 ile 204 mm'dir. Daha uzun derz boşluğu verildiğinde, trafik yüklerine, kurumadan dolayı büzülmeye ve ıstıdan dolayı kıvrılmaya bağlı olarak derzli donatılı tipteki rijit üstyapılarda çapraz çatlaklar oluşur. Donatı kullanılmasındaki amaç, oluşan bu plak ortası çatlaklarını sıkıca kapalı tutmaktır. Çatlakları sıkı tutarak, yük transferinin harç kenetlenmesi yoluyla sürdürülmesi, donatı tarafından yapılır, burada donatı, beton plağın esneklik kapasitesini arttırmak için kullanılmaktadır. Daha uzun derz boşluğu kullanılması ayrıca daha büyük derz açıklıklarına neden olur. Dolayısı ile derzler arası yük transferini sağlamak için donatı kullanılır. Derzli donatılı tipteki üstyapılar, donma ısısındaki (kuzey) bölgelerde ve nemli (doğu) bölgelerdeki şehirlerarası yollarda yoğun olarak kullanılmaktadır.

### 2.3.1.3 Sürekli-Donatılı Rijit Kaplamalar

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı döşemeleri, çapraz derzler olmaksızın döşenen rijit bir plaktan oluşur. Donatı plak boyunca sürekli olarak devam eder ve derzler yalnızca her gün – iş bitiminde zorunlu olarak bırakılmaktadır. Plak kalınlıkları 152 ile 254 mm olur. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda derzli donatılı tipteki rijit üstyapıdan oldukça fazla donatı vardır: Tipik olarak plak kesit alanının %5 ile %7'si. Uzun derz boşluklarının bir sonucu olarak sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda üstyapı ömrünün ilk birkaç yılı boyunca 0.6 ile 2.4 m'lik aralıklarla enine çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar plak içindeki donatı sağlam olduğu sürece sıkıca kapalı kalırlar. Eğer donatı yüksek çekme gerilmeleri sonucu kırılırsa, enine çatlaklar açılarak bozulabilir. Uzunlamasına çatlaklarla birleşen bozulmuş enine çatlak bölgeleri, ciddi üstyapı bozulmasını işaret eden yüzeysel oyulmalara yol açabilir. Plak desteğini arttırmak ve tekerlek yükleri altındaki plak gerilmelerini azaltmak için, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı ile birlikte genellikle bir stabilize temel kullanılır.

### 2.3.2 Esnek Kaplamalar (Esnek Üstyapı)

Esnek üstyapılar, kaplama, temel ve alt temel tabakasından oluşan bir üstyapı tipidir. Kaplama tabakası, aşınma ve binder tabakasından oluşan iki tabaka şeklinde sıcak bitümlü karışımdan ya da sathi kaplama şeklinde soğuk bitümlü karışımdan oluşturulur. Diğer tabakalar ise granüler bir malzeme veya az miktar bağlayıcı ile işlem görmüş karışımlardan oluşmaktadır. Esnek üstyapı Şekil 2.3'teki şematize edilebilir.

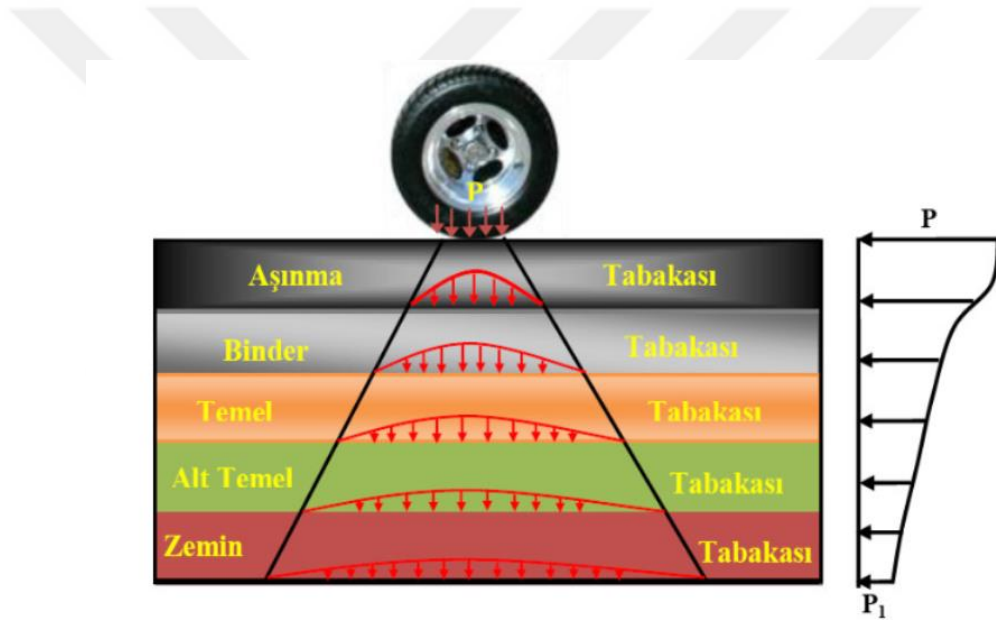


Şekil 2.3: Asfalt kaplama katmanları (EAPA, 2011)

Esnek üstyapıda yük iletimi alt tabakalarda daha geniş alana yayılarak taban zemininin taşıyacağı değere indirgeme esasına dayanmaktadır. Tekerlek yükleri altında esnek üstyapı deforme olur ve her tabaka, üzerine gelen yükü bir alttakine biraz daha yayarak iletir.

Böylece, taban zeminine ulaşan yük kısmen büyük bir alana yayılmış olur (Şekil 2.4). Esnek üst yapıda oluşan gerilmelerin değeri yolun en üst tabakasından alt tabakalara inildikçe düştüğü için, kullanılacak malzemelerin mekanik özellikleri de bu gerilme dağılışına uygun olarak seçilir. Bitümlü karışımlardan, asfalt betonundan yapılan kaplama tabakası, trafiğin ve iklimin bozucu etkilerine doğrudan doğruya maruz kaldığı için, yüksek elastisite modülü, kaymaya direnç yanında geçirimsizlik özelliğine de sahip bulunmalıdır.

Şekil 2.4'te görüldüğü gibi en fazla gerilmeye maruz kalan tabaka kaplama tabakasıdır. Kaplama tabakası binder tabakası ve aşınma tabakasından oluşur. Bazı durumlarda kaplama tabakası sadece aşınma tabakasından oluşmaktadır. Bu nedenle kaplama tabakasının fiziksel ve mekanik özellikleri gerilmeleri karşılayabilecek nitelikte olmalıdır.

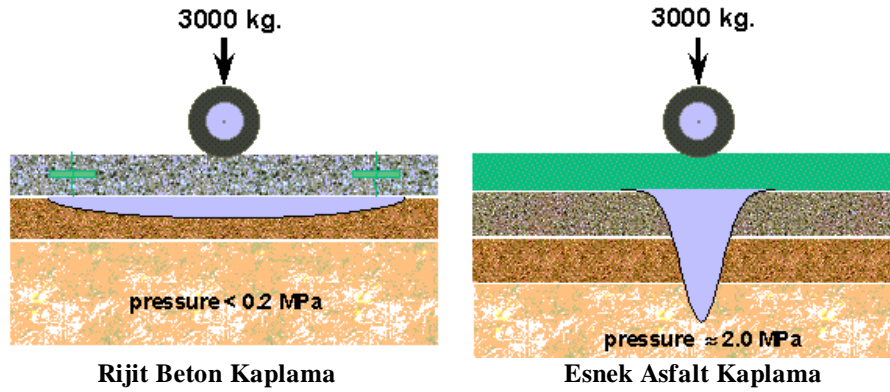


Şekil 2.4: Esnek üst yapı kesiti ve gerilme dağılımı (Gür, 2016)

Esnek kaplamalar ile rijit kaplamalar yük altında farklı davranır. Esnek kaplamalarda yük altında tabakalar belli oranlarda esneyebildiği için yük kolaylıkla bir alt tabakaya tesir edebilmektedir. Ancak alt tabakaya aktarılan yükün bir kısmı üst tabakada soğrulduğundan alt tabakaya daha az yük geçmiş olur. Rijit kaplamalarda ise üst tabaka yük altında esneme göstermediğinden yükü daha geniş bir alana yayarak alt tabakaya aktarır. Rijit tabakanın bu özelliği sayesinde temel tabakasına hem daha az yük biner hem de aktarılan yük daha büyük bir alana yayılmış haldedir. Bu yüzden gevşek zeminlerde ve yük taşıma kapasitesi az olan



alanlarda rijit kaplamalar tercih edilir. Aşağıda verilen Şekil 2.5’de iki kaplama türü arasındaki farkı net bir şekilde görmemiz mümkün.



Şekil 2.5: Esnek ve rijit kaplama katmanları için tipik yük dağılımı (Concrete, 2016)

### 2.3.2.1 Aşınma Tabakası

Üstyapının en üst tabakası olan aşınma tabakası, genellikle 5 cm kalınlığında asfalt betonu olarak uygulanmaktadır. Ağır trafikli devlet yollarında ve otoyolların aşınma tabakasında yüksek mukavemetli, kayma direnci yüksek Taş Mastik Asfalt (Stone Mastic Asphalt SMA) gibi bitümlü sıcak karışımlar kullanılmaktadır. Taş Mastik Asfalt (TMA), ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda, dingil yükleri nedeniyle oluşan tekerlek izleri yani oluklanmaları azaltmak ve yolun ömrünü arttırmak amacıyla, %70-80 oranında kaba agrega, %20-30 oranında ince agrega ve %6-7 bitüm oranıyla hazırlanan bitümlü sıcak kaplama türüdür.

### 2.3.2.2 Binder Tabakası

Bitümlü temel veya granüler temel üzerine uygulanan binder tabakası, trafiğe bağlı olarak genellikle 6-8cm kalınlıklarda asfalt betonu ile teşkil edilmektedir.

### 2.3.2.3 Sathi Kaplamalar

Sathi kaplamalar, inşa edilen temel tabakası tamamlandıktan sonra püskürtülen bitümlü yapıştırma tabakası üzerine serilen belli boyuttaki agrega malzemesinin sıkıştırılarak yapılmaktadır (Şekil 2.6). Bu şekilde yapılan sathi kaplamanın bir katmanı tamamlanmış olmaktadır. Katman sayıları ihtiyaca göre artırılabilir. Oldukça hızlı ve pratik olan bu

yöntemde kaplamanın yük taşıma kapasitesinden bahsedilemez. Bu tür kaplamalar özellikle köy yolları ve tali yollar gibi ağır trafik yüklerinin olmadığı yollarda tercih edilmektedir.

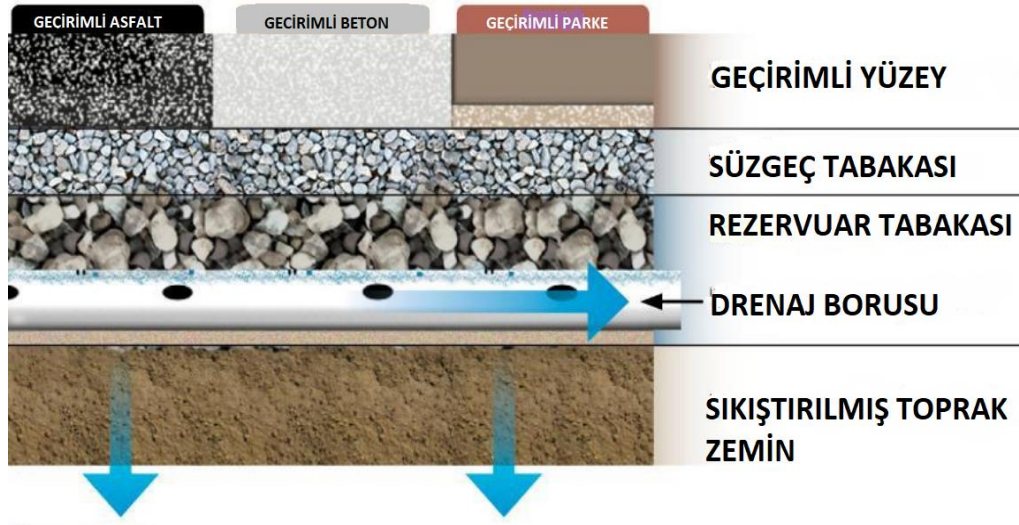


Şekil 2.6: Sathi kaplama yapım aşamaları (Marastanhaber, 2018; Dinçel, 2018)

#### 2.4. Geçirimli Üstyapı Sistemleri

Geçirimli (poroz) kaplamalar amacına uygun tabakaları içeren bir üstyapıyı gerektirmektedir. Bu sebeple geçirimli üstyapı üstyapı sistemleri oluşturan tabakalar açısından geleneksel üstyapı sistemlerinden ayrılmaktadır. Geçirimli kaplama yüzeyi ihtiyaca göre geleneksel üstyapıda olduğu gibi asfalt, beton ve kilitli beton parke sistemlerden seçilebilir. Geçirimli üstyapının geleneksel üstyapıdan ayrılan kaplama altı tabakaları ise; geçirimli kaplama tabakası altında süzme görevi gören bir filtre tabakası, onun altına ise gelen suyun depolanabilmesi açısından daha kaba agregadan oluşturulan bir rezervuar tabakası, bu tabakanın da alt kısmına gelecek şekilde de yağış miktarına göre farklı çaplarda seçilen drenaj borusu yerleştirilmektedir (Şekil 2.7). En alt tabaka ise kazı işleri sonucunda oluşan ve üstyapının oturduğu doğal taban zeminidir. Doğal zemin kazısı, drenaj kanalına doğru eğimli bir şekilde yapılmalıdır (Özay, 2011).

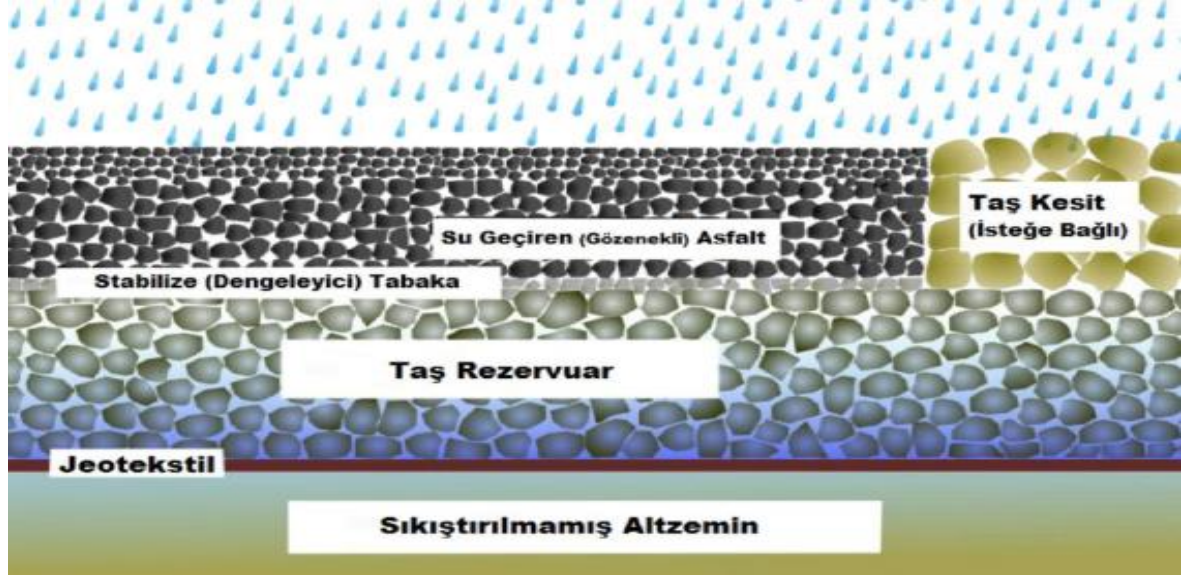
Bitümlü bağlayıcı, bitümlü sıcak karışım kaplamanın (asfalt kaplamanın) en temel yapı taşıdır. 20. yüzyılın başlarında, işlenmemiş petrolden asfalt üretiminin keşfedilmesi ve araç üretiminin artmasıyla yol yapımında bitüme olan talep artmıştır. Bitüm, gelişmiş yolları inşa etmede o zamanın şartlarında en ucuz ve en ideal madde olarak kullanılmıştır. Günümüzde ise kullanım amacına, trafik yükü ve çevre koşullarına göre değişik tipte asfalt ile imal edilen kaplamalar üretilmektedir. (Geçirimli asfalt, ultra ince asfalt, renkli asfalt, taş mastik asfalt vb.). Asfaltın geliştirilmesi ve daha etkin bir malzeme haline getirilip kullanılması üzerine çalışmalar halen devam etmektedir. Yeni geliştirilen yöntemlerle ve bitümü daha dayanıklı



Şekil 2.7: Kısmi tahliye sistemi (Hein, 2020)

hale getirme çalışmaları sayesinde daha konforlu yollar geliştirme çabaları tüm dünyada halen araştırılan bir konudur. Bu çalışmaların neticesinde ortaya çıkan ve son yıllarda daha fazla dikkatleri üzerine çeken bitümlü sıcak kaplama tiplerinden birisi de geçirimli asfaltdır. Kaplama tipi olarak geçirimli üstyapılarda yaygın olarak geçirimli asfalt kaplamalar tercih edilmektedir. Geçirimli asfalt kaplama ile ilgili ilk çalışmalar 1950'lerin ortalarına doğru İngiltere'de başlamıştır. İngiltere'nin ardından Danimarka, Norveç ve Hollanda'da suyun etkisiyle oluşan kızaklanmanın önlenmesi amacıyla bu kaplama türü kullanılmaya başlanmıştır. Fransa'da Paris kent içi yollarındaki gürültüyü azaltmak amacıyla bu kaplamayı kullanmaya karar vermiş ve daha sonra ülkedeki gürültü kirliliğinin yoğun olduğu bölgelerde bu kaplama türünü kullanmıştır. Ayrıca Avrupa'nın birçok ülkesinde (İspanya, İsviçre, Belçika, İtalya) ve Amerika'da trafiğin yoğun olduğu kentlerde geçirimli asfalt uygulamasına geçilmiştir.

Geçirimli asfalt kaplama, yüzeyi ve alt temeli asfalt, çakıl ve kırılmış agregadan oluşan, içindeki boşluk yüzdesi yüksek olan, yola gelen yağmur suyu veya eriyen kar suyunun hemen kaplama tabakası içine girmesini sağlayan bir kaplama türüdür (Şekil 2.8). Geçirimli asfalt tabakası diğer kaplamalardan farklı olarak, serildikten ve sıkıştırıldıktan sonra ortalama %20 gibi fazla miktarda boşluk oranına ve daha büyük çapta agregaya sahip olmasındır.



Şekil 2.8: Otoparkta uygulanan geçirimli asfalt kesiti (Öztürk, 2017)

### 3. GEÇİRİMLİ ASFALT KAPLAMALAR VE UYGULAMALARI

Geçirimli asfalt aslında ince filler malzemenin azaltıldığı standart sıcak karışım asfaltlardır. İlk olarak yağışlı havalarda suyu yüzeyden uzaklaştırarak sürtünme katsayısını arttırmak ve drenaj maliyetini düşürmek amacıyla kullanılmıştır (Khalid ve Perez, 1996). Kullanılan malzeme bakımından geleneksel asfalta göre yüzde 15-25 kat daha pahalı olmasına karşın boşluklu yapısı sayesinde suyu doğrudan toprağa iletmektedir. Böylece alttaki daha yüksek sıcaklıktaki toprağın da etkisiyle yol yüzeyinde donma sıcaklıklarında dahi buzlanmalara rastlanılmamaktadır. Bu sayede kışın yapılan yol tuzlama çalışmalarından tasarruf edilirken, aynı zamanda güvenli bir sürüş ve yürüme alanı sağlanmış olunur (Gündoğmuş, 2017).

#### 3.1. Geçirimli Asfalt Deneyimleri ve Tarihsel Gelişimi

Geçirimli asfalt ilk olarak yol güvenliğini arttırmak amacıyla 1944 yılında ABD'nin California eyaletinde deneysel olarak ortaya çıkmıştır. 1970 yılına gelindiğinde Federal Otoyol İdaresi (Federal Highway Administration-FHWA) tarafından kayma direncini arttırmak için kullanılmış ve yaygın hale gelmiştir. Kullanım alanı arttıkça geçirimli asfalt kaplamaların gürültüyü azalttığı fark edilmiştir. Yeraltı suyunu besleyen ve arıtma yoluyla su kalitesini arttıran bu kaplama tipi şehir içi yollar, otoyollar ve park alanlarında kullanılabilen çevre dostu bir kaplama olarak benimsenmeye başlanmıştır (Ndon, 2017).

Geçirimli asfalt 1950'lerden beri aşınma yüzeyi olarak dünyanın farklı yerlerinde kullanılmaktadır. Avustralya'da ilk yaygın kullanımı 1973'lere ve Japonya'da ise 1987'lere kadar rastlanmaktadır. Geleneksel asfaltlardan farklı olarak, suyu yüzeyden uzaklaştırmak yerine doğrudan asfaltın bünyesine alıp alt tabakalara, oradan da doğrudan toprağa iletmek için tasarlanan kaplama teknolojisi yenilikçi bir girişimdir. Özel olarak oluşturulan bu karışım, serilip sıkıştırıldıktan sonra su drenajını sağlamak için %20 den fazla boşluk oranına izin verecek şekilde tasarlanmıştır. Özellikle yağışlı havalarda trafik güvenliğini sağlamada umut veren; ayrıca gürültü ve göz kamaşmasını da önemli oranda azaltmayı sağlayan çevre dostu bir kaplama türü olarak ortaya çıkmıştır (Sasana ve Ismanto, 2003). Batı ülkelerinde geçirimli asfalt kullanımı esas olarak kayma direnci, suda kızaklama, sıçrama, püskürtme, görüş mesafesi, yuvarlanma gürültüsü, kalıcı deformasyona karşı direnç gibi yaygın bilinen avantajlarından dolayı kullanımı son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır (Decoene, 1989).

Geçirimli asfalt 1950'lerden sonra Danimarka, Norveç, Hollanda gibi bazı Avrupa ülkelerinde otoyollarda, askeri ve sivil havaalanlarında yol yüzeyinde biriken suyu ve kızaklamayı önlemek amacıyla kullanılmıştır. Fransa'da başta Paris olmak üzere birçok şehirde trafiğin ve trafikten kaynaklanan gürültünün yoğun olduğu alanlarda geçirimli asfalt sistemler kullanılarak çevreye daha duyarlı yollar inşa edilmiştir. Günümüzde başta Avrupa ülkeleri ve Amerika olmak üzere birçok ülkede çevre dostu geçirimli asfalt kaplamalar yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Öztürk, 2008).

Avrupa'da seksenlerin başından beri geçirimli asfalta uygulanacak tasarım testleri hakkında bir fikir birliğine varılamamış ve farklı prosedürler uygulanagelmiştir. Ancak temel olarak en fazla boşluk oranı ve en fazla bağlayıcı içeriğinin sağlanması amaçlanmaktadır. Tasarım aşamalarında numunelerin genelde Marshall kompaktör cihazıyla sıkıştırıldığı ve numuneler üzerinde parça kaybı, permeabilite, su hasarı gibi testler uygulandığı anlaşılmaktadır. Ancak Fransa'da numunelerin sıkıştırılmasında Marshall cihazı yerine Gyrotory kompaktör (yoğurmalı pres) kullanılmıştır (Ruiz, 1997).

Fransa'da geçirimli asfalt kullanımına 1976 yılında başlanmıştır. 1984 yılından 1990 yılına kadar gitgide yaygınlaşmıştır. 1995 yılına gelindiğinde Fransa'daki otoyolların yüzde 15'i geçirimli asfalt kaplamalar ile kaplanmıştır. Otoyollarda kullanılan geçirimli asfaltın neredeyse tamamına yakını polimer veya elyaf modifiyeli bitüm kullanılarak imal edilmiştir (Bonnot, 1997). İsveç'te geçirimli asfalt uzun bir zamandan beridir tek veya iki katman halinde serilerek kullanılmaktadır. Başlangıçta yağış sırasında yol güvenliği ve trafik akışını sağlamak amacıyla kullanılan geçirimli asfaltlar zamanla gürültüyü azaltmak için kullanılmaya başlanılmışlardır. İki katman halinde serilen geçirimli asfaltın dayanımını arttırmak için İsveç'in farklı bölgelerinde üç test yolu inşa edilmiştir (Jacobson, 2016).

### **3.2. Geçirimli Asfalt Kaplama Sistemlerinin Faydaları**

Mevcut altyapı sistemleri yerleşim alanına düşen yağışı nehir veya göl gibi kaynaklara iletmede zaman zaman yetersiz kalmaktadır. Bu gibi durumlarda su taşkınları ve sel baskınları meydana gelmektedir. Kentlerin büyümesi taşınacak su miktarını ve altyapı ağı toplam uzunluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu da gün geçtikçe artan yerleşim yüzey alanlarına düşen suyu tahliye etmeyi zorlaştırmaktadır. Yüksek yağış alan bölgelerde bile, toprak sızdırmazlığı nedeniyle yeraltı suyunun düşürülmesi, bitki örtüsü için su kıtlığına

neden olmaktadır. Geçirimsiz yüzey alanlarındaki artış, toprağın su filtreleme yeteneğini azaltmış ve su döngüsüne giren yabancı madde ve kirleticilerin miktarında artmaya sebep olmuştur (Vale vd., 2013). Bundan dolayı doğal ekosistemdeki dengeyi yeniden sağlama yeteneği ile sürdürülebilir sistemler inşa etmek hayati önem arz etmektedir.

Geçirimli asfaltın yüksek sürtünme direnci sağlayan yüzeyi, permeabilite, ıslak koşullarda kayma direncini artırıp su püskürmelerini azaltarak yol güvenliğini sağlaması, çevre ve lastik/yüzey gürültüsünü azaltması, doğal yolla su tahliyesini sağlayarak altyapı çalışmalarına olan ihtiyacı azaltması ve bunun gibi birçok faydasından dolayı son yıllarda birçok ülkede kullanım alanı bulmuş ve bu alan geçirimli asfaltın özellikle kısa servis ömrünü geliştirmek için yapılan çalışmalarla birlikte daha da gelişmiştir (Luo vd., 2015).

Üst kaplamanın güvenliği yolda hareket eden araç lastiği ile kaplama dokusu arasında oluşan kayma-sürtünme katsayısına bağlıdır. Bu katsayı ise kaplamanın mikro ve makro dokusuna bağlıdır (Bulut, 2018). Kayma direnç katsayısını etkileyen faktörlerden bir diğeri, yağış sırasında kaplama yüzeyinde meydana gelen ince su film tabakasıdır. Geleneksel kaplamalarda yüzeye düşen ilk damlalar ile yüzeyde birikmiş olan toz ve toprak parçacıkları birleşerek kaygan bir yol yüzeyine neden olmaktadır. Daha etkili yağışlarda ise yüzeydeki su tahliyesi hemen gerçekleşemediğinden yol ile tekerlek arasında ince bir su tabakası meydana gelmesine neden olmakta, bu da yağışlı havalarda kazalara sebebiyet vermektedir. Geçirimli asfalt kaplamanın en büyük avantajı böyle durumlarda ortaya çıkmaktadır. Boşluklu yüzeyi sayesinde kaplama yüzeyine düşen yağışlar eş zamanlı olarak alt tabakalara sızdığı için yol yüzeyi ile kaplama arasında kayma direnci sürekli korunmaktadır. Bu da yağışlı havalarda bile güvenli bir sürüş deneyimi sağlamaktadır.

Yağmur yağışı sırasında meydana gelen kazaların en büyük nedeni, geleneksel kaplama yüzeyinde meydana gelen ince su filminin bir sonucu olarak, lastik ile yol arasındaki yapışma ve sürtünme katsayısının minimum düzeye düşmesidir. Bir diğer neden ise hem yağın yağmur hem de akış halindeki trafikten dolayı havaya saçılan su damlacıklarının görüş mesafesini düşürmesidir. Bu iki durumun etkisiyle, sürücünün hızlı gittiği durumlarda kolaylıkla araç hakimiyetini kaybedebilir (Rojas ve Ruiz, 1999). Geçirimli asfalt yüzey yapısı sayesinde yağışlı havalarda yağmur sularını tahliye edebilen birbiriyle bağlantılı boşluklu yapıya sahiptir. Bu boşluklu yapı aynı zamanda tekerlek ve kaplama arasındaki gürültü miktarında da önemli düzeyde düşüş sağlamaktadır. Geçirimli asfalt kaplamaların

yüksek yüzey sürtünmesine sahip olduğu, yağışlı havalarda kızaklama ve su sıçratmalarını azalttığı tespit edilmiştir (Brown, 2003). Şiddetli yağışlarda yüzey suyunun bir anda emilmesi oldukça önem arz etmektedir. Yüksek seyir hızlarında, asfalt yüzeyindeki ince su tabakası sürtünmeyi azalttığından yapılan ani frenlemede araç kontrolü kaybedilebilmektedir. Özellikle yağışlı günlerde geçirimli asfaltın kaza sayısını azaltmada katkı sağladığı yapılan araştırmalarda belirtilmektedir (Maupin, 1976). Geçirimli asfalt kaplamanın yağışlı havalarda yol güvenliğini sağlamanın yanı sıra, yağmur suyunun depolanmasında, artırılmasında ve suyu kirleten maddeleri süzme yoluyla uzaklaştırarak su kalitesini iyileştirmesi gibi yağmur suyu yönetiminde önemli faydaları bulunmaktadır (Scholz ve Grabowiecki, 2007).

Taşıt tekerleği ile yol teması sırasında lastik boyutu, üzerine gelen yük ve yapısındaki kauçuktan dolayı hareket esnasında kısalmaya ve yüzeyindeki kanallarda hava sıkışır. Sıkışan hava az basınç olan yöne doğru harekete geçer. Tekerleğin sürekli dönmesinden dolayı yük taşıyan kısım tekerlek eksenine paralel hizaya geldiğinde sıkışan yüzey boşlukları bu sefer genişlemiş olacaktır. Kısa süre zarfında meydana gelen olay yüksek frekanslı gürültüye neden olmaktadır. Bu olaya "Hava Pompalama" adı verilir (Bay ve Güney, 1998). Küçük boyutta agrega kullanımı tekerlek ve kaplama arasına sıkışan hava miktarında azalmaya neden olur. Bu da daha az basınç dolayısıyla daha az gürültülü bir trafik olanağı sağlar (Sousa vd., 2004). Tablo 3.1.'den anlaşılacağı üzere en etkili sonuç çift tabaka halinde imal edilen, üst kısmı daha ince agregadan, alt kısmı daha iri agregadan oluşturulan 60 mm kalınlığındaki kaplamada düşük hızlarda iyi sonuç elde edilmiştir. Ancak aynı etkiye yüksek hızda rastlanmamıştır (Öztürk, 2008). Geçirimli asfalt kaplamalarda yapısındaki boşluklar havanın tahliyesini sağlayarak tekerlek ve kaplama arasında havanın sıkışmasından kaynaklanan yuvarlanma gürültüsünü önemli düzeyde azaltmaktadır.

İsveç'te 2000'li yılların başlarında iki katman halinde imal edilen geçirimli asfaltın yeniye 7-8 dB(A)'e kadar gürültüyü azalttığı tespit edilmiştir. Zaman içinde asfaltta meydana gelen aşınma, parça kaybı, çukur oluşumu ve gözeneklerin çevre etkilerine bağlı olarak kısmen tıkanmasından dolayı her sene yaklaşık 0,5-1 dB(A)'e kadar daha az gürültüyü absorbe ettiği ölçülmüştür (Sandberg, 2012).



Tablo 3.1: Geçirimli asfalt yüzeylerde gürültü sönümlenme karşılaştırması (Civelek, 2011)

Kaplama Tipi	Agrega Derecesi	Kalınlık (mm)	Maksimum Absorbsiyon Frekansı (Hz)	Maksimum Absorbsiyon (%)
Klasik Asfalt	0-16	-	-	-
Boşluklu	6-16	55	840	89
Boşluklu	4-8	60	810	95
Çift sıra boşluklu	4-8 (üst)	25(üst)	600	92
Boşluklu	8-11	40(alt)	900	87

İki yıllık performans değerlendirmesi sonucunda geçirimli asfaltın kuzey iklimlerinde gayet iyi performans sergilediği görülmüştür. Donma-çözünme döngüleri yapısal bütünlük olarak geçirimli asfaltta büyük hasarlar meydana getirmemiştir. Ayrıca eriyen karlar doğrudan toprağa doğru süzülmediğinden, yüzeyde çok az veya hiç buzlanma görülmemiştir. Bu da geçirimli asfaltın geleneksel asfalta göre daha çabuk kar ve buzdan arınarak daha yüksek sürtünme direnci sağladığı, bunun yanında buz çözme uygulamaları için kullanılan tuzlama masrafında yüzde 70'in üzerinde tasarruf edildiği tespit edilmiştir (Houle vd., 2010)

### 3.3. Geçirimli Asfalt Kaplama Sistemlerinde Yaşanan Sorunlar ve Çözüm Yolları

Geçirimli kaplamaların faydaları yanında, geçirgenliğin sağlanması gerektiğinden, kullanılan gradasyon ve bağlayıcı miktarından dolayı bazı yapısal sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu bölümde daha önceki çalışmalarda karşılaşılan sorunlar ve çözüm yolları verilmektedir.

#### 3.3.1 Yapısal (Tasarım ve Yapım Aşamaları)

Geçirimli asfaltlar gözenekli yapısı itibarıyla, geleneksel asfaltlara göre daha kırılabilir ve daha az yapısal dayanıma sahip olma eğilimindedirler. Bu nedenle genelde ağır yüklü vasıtaların güzergahından ziyade, yerleşim bölgelerindeki yollar, ticari otoparklar, yaya yolu, bisiklet yolları, yol kenarları, cadde üzeri park alanı ve durak alanlarında kullanıma daha uygundur. Ayrıca aracın kayabileceği veya dönüş yapacağı alanlarda tekerlek ve yol arasındaki yüksek sürtünmeden dolayı buralarda geçirimli asfalt kullanımından kaçınılması gerekmektedir. (ASCE, 2015)

Geçirimli asfaltta görülebilecek bir diğer sorun ise çok soğuk iklimlerde gündüz eriyen kar sularının, kaplamanın altına sızıp gece donması ile kaplamada don kabarmaları meydana getirerek zarar vermesidir. Böyle bir durumda kaplamayı don derinliğinin altına kadar uzatmak riski azaltacaktır (Jackson, 2003). Kaplamayı korumanın bir diğer yöntemi ise kaplama ile doğal zemin arasına iri daneli stabilize tabaka sermektir. Alt tabakaya sızan sular, bu tabakadan rahatça geçerek doğrudan toprağa veya drenaj sistemine ulaşmış olacaktır. Böylece suyun kaplama altında toplanması, donup kabarması ve genişerek kaplamaya zarar vermesinin önüne geçilmiş olur (Jackson, 2003).

Geçirimli asfaltlar yüksek miktarda iri agrega, düşük miktarda ince malzeme içerdiğinden geleneksel asfalta oranla daha çabuk yaşlanmaktadır. Kış aylarında araçlarda zincir kullanımı ve ağır taşıtların yüklerinden dolayı, izole boşluklara dolan suyun donma-çözünme döngüsü gibi etmenlerle geçirimli asfalta parça kaybı, çukur oluşumu meydana gelebilmektedir (Jacobson ve Viman, 2010).

Gözenekli yapısından dolayı agregayı saran bağlayıcı filmin büyük bir kısmının doğrudan su, oksijen, güneş ışığı ve taşıtlardan damlayan birtakım çözücülerle doğrudan temas eden yüzeyin geleneksel asfalta oranla daha fazla olmasıdır. Bu tür etmen bağlayıcının sertleşmesine ve hizmet ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Gözenekli yapısı geçirimli asfaltların hizmet ömrünü önemli miktarda düşmesine sebebiyet vermektedir. İngiltere’de yapılan tam yol denemelerinde asfaltın sertleşmesinden kaynaklı hizmet ömründe önemli oranda düşüş olduğu saptanmıştır (Daines, 1992).

Karışımın serilmesi sırasında, sıcaklığın sıkıştırma için harcanan efor ve boşluk içeriği ile sıkıştırma derecesi arasındaki bağlantı üzerine çalışma yapmıştır. Yüksek boşluk içeriği elde etmek için sıkıştırma derecesinin düşürülmesi kesinlikle kabul edilmeyeceği sonucuna varmıştır. Ayrıca, iyi derecede sıkıştırılmış kaplamada deformasyon ve parçacık kaybına karşı direnci arttırıp, kaplamanın hizmet ömrünü uzatacağını tespit edilmiştir (Renken, 2000).

Asfalt karışımların temel prensibi olarak hava boşluk yüzdesi arttıkça, karışımın mukavemet değeri düşmektedir (Subagio vd., 2005). Karışımın boşluk içeriğinden ödün vermeden mukavemet değerini geliştirmek için farklı yaklaşımlar uygulanabilmektedir. Bitüm ve karışım modifikasyonu ve farklı modifiye edicilerin etkilerinin araştırılması yağın olarak

sürdürülmektedir. Ayrıca, çalışmamızın da konusunu teşkil eden karışım dayanımlarının fiber katkıları ile iyileştirilmesi önemli bir yaklaşımdır. Modifiye edilen bitümün elastik özelliği geliştiği için agrega ile daha sağlam bağlar oluşturularak soyulma, sökülme ve deformasyona karşı dayanım iyileşmektedir.

Modifiye edilmemiş bitüm oda sıcaklığında yarı katı halde bulunur. Sıcaklık değeri arttıkça daha da akışkan hale gelip bağlayıcı özelliği azalmaktadır. Geçirimli asfalt karışımlarında ince malzeme miktarı çok az olduğundan karışımdaki agregalar arasında bağlayıcılığı arttırmak için bitümü daha kıvamlı hale getirmek gerekmektedir. Bu uygulama için de ya birtakım sentetik maddelerden faydalanılır ya da karışıma lif katılıp bitümün süzülmesi engellenmektedir.

Belçika'da yapılan geçirimli asfalt uygulamalarında saf bitümlerle bile gayet iyi sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir. Ancak herhangi bir lif veya polimer katılmadan yapılan uygulamalarda karıştırma, taşıma ve döşeme sırasında sıcaklığın etkisiyle iyice akışkan hale gelen bitüm, yerçekimi etkisiyle de süzüldüğü, agregaların bitüm içeriğinin zayıf kaldığı noktalarda kaplamanın trafik tarafından aşındığı tespit edilmiştir (Drainants, 1988). Bu soruna çözüm bulmak için Belçika'da karışıma asbest lifi katılarak bitüm süzülmesi başarılı bir şekilde önlenmiştir. Ancak asbest kullanımı yasalarla yasaklanınca karışımda selüloz lifi kullanılmasına yönelik çalışmalar artmıştır (Bauduin vd., 1989).

### **3.3.2 Bakım ve Onarım**

Geçirimli asfalt kaplamalarda soğuk iklimlerde yapılan kar ve buzla mücadelede daha fazla efor sarf edilmektedir. Danimarka'da soğuk iklim koşullarından dolayı geçirimli asfalt kaplamaların buzlanmaya karşı fazla tuzlama yapılmayı gereksinim duyduğu belirtilmektedir. Yoğun tuzlama çalışmalarından dolayı geçirimli asfalt boşluklarının tıkanmaması için normal tuzlama yapmak yerine tuz çözeltisi kullanılmaktadır. Bu durum, normalde kullanılması gereken tuzdan yüzde 50 daha fazla tuz kullanılmasına neden olmaktadır (Kayhanian ve Harvey, 2020).

İtalya'da kar küreme yapıldıktan sonra yol koşullarına bağlı olarak metrekaeye 10 ile 20 gram arası tuzlama yapılır. İtalyan araştırmacılar karışımda kullanılan maksimum agrega boyunu 20 mm'den 16 mm'ye düşürmek kış koşullarında kaplamada önemli iyileşmeye yol

açtığını kaydettiler. İtalya’da kış aylarında kullanılan tuzun çevre için sorun teşkil ettiğinden dolayı magnezyum ve kalsiyum kombinasyonundan oluşan bir çözelti kullanılmaktadırlar. Ayrıca buz çözme çalışmaları yerine maliyeti düşürmek için kaplama yüzey sıcaklığını donma seviyesi veya üstünde tutmak için alt katmana ısıtma sistemi yerleştirmeyi önermektedirler (Kayhanian ve Harvey, 2020).

Geçirimli asfaltta görülen sorunlardan bir diğeri de kaplama yüzeyindeki boşlukların tıkanmasıdır. Tıkanma dış etkenlerle yüzeyde görülebileceği gibi yoğun yağışların görüldüğü durumlarda, doğal zemin tabakasının doygun hale gelip, suyun yükselerek zemindeki toprak tanelerini kaplama içine kadar taşınmasıyla da olabilmektedir

Minimum bakım ile geçirimli asfaltlar yaklaşık 20 senelik hizmet ömrüne sahip olabilirler. Ancak boşluklu yapının zaman içinde tıkanmasıyla gitgide geçirimsizlik özelliğini yitirir. İyi derece performansla işlev görmesi için kaplamanın iki yılda bir temizlenmesi gerekmektedir. Yapılan araştırmalara göre en etkili temizleme yöntemi, ilk olarak kaplamayı toksik olmayan bir deterjan temizleme solüsyonunun basınçlı bir dozunu uygulayarak, yeterli ıslatma süresini sağladıktan sonra yüksek performanslı bir vakumlama aracıyla vakumlamak olduğunu ortaya koymuştur (Associates).

Geçirimli asfaltlar küçük parçaların ve çözünmüş kirleticilerin aşağıdaki agrega tabakasına geçmesine izin verirken, suyla taşınan daha büyük parçacıkları yakalayan filtre görevi görmektedir. Yüzeyde oluşan birikintiden dolayı zamanla daha küçük parçacıklar da filtrelenerek daha az miktarda atık maddenin yeraltı suyuna sızmasının önüne geçmektedir. Bununla birlikte bu durum yavaş yavaş kaplamanın geçirgenlik özelliğini yitirmesine sebep olmaktadır. Sızma ve filtreleme kapasitesini geri kazandırmak için yüzeyde oluşan birikintileri düzenli olarak temizleyerek sistemin korunması sağlanabilir (Bean vd., 2020). Filtreme özelliğiyle yeraltı suyunu koruduğundan, bu durum geçirimli asfalt için artı bir özellik olarak değerlendirilirken, tıkanan yüzeyin belli aralıklarla temizlenmesi gerektiğinden negatif bir özellik olarak değerlendirilebilmektedir.

Otopark alanlarında yapılan geçirimli asfalt uygulamalarında kaplamanın altına 45-100 cm kalınlığında kırma taştan meydana gelen bir tabaka yerleştirilir. Yüzeydeki kaplama boşluklarını tıkayabilecek küçük parçacıklardan temizlenmiş olmasını sağlamak için bu tabakayı meydana getiren kırma taşın yıkanmış olması gerekmektedir (Özay, 2011). Kazım

sırasında iş makinası, kazılan alana mümkünse hiç girmemelidir. Kaplamanın altındaki doğal zemin kesinlikle sıkıştırılmamalı, bilakis olabildiğince gevşek bırakılmalıdır. Bu sayede zemine sızan sular daha kolay bir şekilde toprağın içinde ilerleme imkanı bulmuş olur. Taş tabakanın içinde su birikintileri meydana gelmesi durumunda doğal zeminden kaplama içine parçacık taşmasına engel olmak için doğal zemin ile taş tabaka arasına geotekstil malzeme serilmelidir (AASHTO, 2003).

Otopark alanlarında kullanılan geçirimli asfalt boşlukları, zaman içinde dolabilir ve geçimli asfalt işlevini yitirebilir. Böyle bir durumda yağışların otopark alanında toplanmaması ve yüzeyde akan suyun alttaki taş tabakaya iletiminin sağlanması için kaplamanın kenarı kırma taşla doldurulmalıdır. Meydana gelebilecek bir diğer sorun ise taş tabaka altındaki doğal zemin kanallarının zaman içinde tıkanması veya ani yağışlarda doğal zeminin doygunluğa ulaşp, suyun yükselerek asfalt kaplamaya ulaşmasıdır. Böyle bir ihtimali ortadan kaldırmak için doğal zeminin kazımı, drenaj kanalına doğru eğimli bir şekilde yapılmalıdır (Özay, 2011).

Geçirimli asfalt sistemler, rüzgâr etkisiyle taşınan toz, kum, araç tekerleğiyle taşınan çamur, kışın yapılan tuzlamanın etkisiyle kaplamadaki boşlukların bir kısmı tıkanabilmektedir. Böyle durumlarda kaplama normal kaplama gibi davranmakta ve kaplama yüzeyinde su akıntıları hatta su birikintileri oluşabilmektedir. Bu yüzden geçirimli asfaltta tıkanmış olan bu boşlukların basınçlı su, süpürme veya vakumlama yoluyla belli periyotlarla açılması gerekmektedir (Hamzah, 2005).

## 4. GEÇİRİMLİ ASFALT KARIŞIMLAR ÜZERİNE YAPILAN ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Geleneksel asfalt karışımlarda yüzeyden suyu olabildiğince uzak tutmak amaçlanmışken, geçirimli asfaltta bunun tam tersi suyun asfalttan geçerek doğrudan toprağa ulaşması amaçlanmıştır. Geçirimli asfalt imalatında parça kaybı, su etkilerine ve yaşlanmaya karşı maksimum film kalınlığını istenmesine rağmen, permeabilite düzeyini ve sıcak asfalt karışımın taşınması, karıştırılması ve yerleştirilmesi sırasında bitüm süzülmesine engel olmak için minimum film kalınlığını sağlamak arasında bir denge kurulması gerekmektedir (Ruiz, 1997). Bu dengenin sağlanamaması durumunda gerekli boşluk oranı sağlansa bile amaçlanan düzeyde su tahliyesine ulaşılamayabilir. Nitekim geçirimli asfaltta iki tür boşluk türü vardır. Bunlardan bir tanesi hava ile toprak arasında doğrudan bağlantılı (açık boşluklar), bir diğeri ise kendi içinde kapalı olan (izole boşluklardır). Su tahliyesinde sadece açık boşluklar önemli düzeyde rol oynar (Liu ve Cao, 2009).

Geçirimli asfalt karışımlar ortalama 60 sene önce bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmıştır (Khalid ve Perez, 1996). Ancak gözenekli yapısından dolayı geleneksel asfaltlara göre nispeten daha kırılğan bir yapıya sahiplerdir. Bu durum ne yazık ki geçirimli asfalt hizmet ömrünün düşük olmasına sebebiyet vermektedir. Buna bağlı olarak geçirimli asfaltı karışımların geliştirmesine yönelik birçok akademik çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda yapılan çalışmalar, karışım temel bileşenleri (agrega ve bitümlü bağlayıcı) üzerine yoğunlaşmakla birlikte, farklı fiberlerin karışım performanslarına etkilerini de içermektedir. Özellikle parça kopma suretiyle ortaya çıkan bozulmaların önlenmesinde bitüm matrisinin güçlendirilmesinde fiberler öne çıkmaktadır.

Ulusal Asfalt Teknolojileri Merkezi (NCAT) Avrupa ülkeleri ve dünyanın farklı ülkelerinin geçirimli asfalt deneyimlerinden topladığı verilerle yeni nesil bir geçirimli asfalt tasarım yöntemi önermiştir. Bu yeni yöntemde göre geçirimli asfalt imalatı için dikkat edilmesi gereken dört ana başlık sıralanmıştır. 1) malzeme seçimi, 2) tasarım derecelendirmesinin seçimi, 3) optimum asfalt bağlayıcı içeriğinin seçimi, 4) nem duyarlılığının belirlenmesi. Ayrıca orta ve yüksek trafik hacminin olduğu yollarda polimer modifiyeli bitüm bağlayıcının yanında lif kullanılmasını ve düşük trafik hacmin olduğu yollarda en az lif veya modifiye edilmiş bitümün kullanılması gerektiği önerilmiştir (Alvarez vd., 2006).

#### 4.1 Agregaya ve Karışım Gradasyonu

Kaplamayı oluşturan en önemli bileşenlerden biri bitüm içeriği agregadır. Agregaya yola gelen trafik yükünü doğrudan karşılar; bitüm ise bu yükü karşılayan agregayı bir arada tutmaya çalışır. Yani agregaya basınç kuvvetine karşı direnç sağlarken, bitüm çekme kuvvetine karşı direnç sağlar. Bu yüzden yol kaplamasının hizmet ömrünü doğrudan etkilediğinden malzeme seçiminde agreganın birtakım şartları sağlaması gerekmektedir. Dünya’da ve ülkemizde geçirimli asfaltta kullanılacak agreganın seçiminde sağlanması gereken bazı kriterler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Geçirimli asfalt karışımında kullanılacak agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri ve limit değerleri (Topaloğlu, 2019)

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	-
Kırılma, 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 agregaya Özgül Ağırlık	-	> 2,45	> 2,50	> 2,674	-
Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler, %	-	< 0,25	-	0	-

Geçirimli asfaltların tercih edilmesinin belli başlı sebepleri vardır. Bunlar ani yağışlarda sel oluşumunu önlemek, kaplama yüzeyindeki su birikintilerini önleyerek kızıklama ve trafik kazalarını azaltmak, trafik gürültüsünü düşürmek, yeraltı su kaynaklarını zenginleştirmek gibi birçok faydası sıralanabilir. Geçirimli asfaltın uygulanacağı bölge için geçirimli kaplamaların hangi özelliğinden faydalanılmak isteniyorsa kaplamada kullanılacak gradasyon değerleri değiştirilerek o özellik biraz daha öne çıkarılabilir. Örnekleme gerekirse; tropikal iklimin yaşandığı ve nispeten daha az yoğunluklu trafiğin olduğu bir alanda uygulanacak geçirimli asfalt için daha iri boyuttaki gradasyonlu agregaya seçilerek yağış sırasında daha iyi sonuç elde edilebilir. Dünya’da geçirimli asfaltta üretiminde ihtiyaçlara cevap verecek şekilde birçok gradasyon kullanılmaktadır. Ülkemiz ve dünyadaki bazı ülkelerde kullanılan gradasyon tipleri Tablo 4.2’de gösterildiği gibidir.

Tablo 4.2: Bazı ülkelerde kullanılan geçirimli asfalt karışım gradasyon limitleri (Poulikakos vd., 2006; Alvarez vd., 2006; KTŞ, 2013; Nakanishi vd., 2018)

Elek Boyutu No(ınc)	mm	İngiltere	İspanya	Danimarka	Türkiye				İsviçre				Japonya	Singapur	Tayland	Endonezya			
		PA	6/20 PA	2/10	PA12	PA 0/5	PA 0/8	PA 0/16	Tip-3	Tip-4	DRA 6	DRA 11	DRAT16	DRAT22	0/20	0/13			
<b>1,24</b>	31,5	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>7/8</b>	22,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	-	-	-	-	
<b>0,79</b>	20	95-100	-	100	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>3/4</b>	19	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	95-100	-	100	100	100	
<b>5/8</b>	16	-	-	-	-	-	97	-	-	-	100	90-100	25-60	-	-	-	-	-	
<b>0,55</b>	14	55-75	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>0,52</b>	13,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	53-78	92-100	84	100	-	
<b>1/2</b>	12,5	-	-	70-100	-	-	55	85-95	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	93
<b>7/16</b>	11,2	-	-	-	-	100	30	-	-	100	90-100	20-50	15-30	-	-	-	-	-	
<b>0,39</b>	10	-	90-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>3/8</b>	9,5	-	-	-	-	-	-	5-15	85-95	-	-	-	-	35-62	62-81	72	64,2	65	
<b>5/16</b>	8	-	-	38-62	100	94	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>1/4</b>	6,3	20-30	40-55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>0,22</b>	5,6	-	-	-	99	35	9	-	-	90-100	15-40	10-25	10-20	-	-	-	-	-	
<b>No:4</b>	4,75	-	-	-	-	-	-	5-15	5-12	-	-	-	-	10-31	10-31	21,5	15,6	18	
<b>No:5</b>	4	-	-	-	65	11	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>No:7</b>	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	15-40	8-20	7-17	-	-	-	-	-	-	
<b>No:8</b>	2,36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10-21	10-21	18	15	8	
<b>No:10</b>	2	5-12	19-25	-	10	9	8	5-10	5-10	10-25	-	-	6-15	-	-	-	-	-	
<b>No:18</b>	1	-	-	-	9	8	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>No:30</b>	0,59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4-17	4-17	5	-	-	
<b>No:35</b>	0,5	-	-	-	8	7	7	-	-	4-10	4-10	4-10	4-10	-	-	-	-	-	
<b>No:50</b>	0,297	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3-12	3-12	9	-	-	
<b>No:60</b>	0,25	-	-	-	7	6	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>No:100</b>	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3-8	3-8	7	-	-	
<b>No:170</b>	0,09	-	-	-	-	-	-	-	-	3-5	3-5	3-5	3-5	-	-	-	-	-	
<b>No:200</b>	0,075	-	-	-	6	5,5	5	3-5	3-5	-	-	-	-	2-7	2-7	6	5,1	3	
<b>No:230</b>	0,063	3,5-5,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	



Agrega gradasyonlarının laboratuvarında hazırlanan numunelerin birbirine bağlı boşluk oranı, tekerlek izi oturması ve numune dayanımı üzerindeki etkilerinin incelendiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında 9,5 mm, 12,5 mm ve 19 mm olmak üzere üç farklı maksimum agrega boyutu içeren gradasyon araştırılmıştır. Ayrıca karışımda bağlayıcı olarak %4 Stiren-Butadien-Stiren SBS ile modifiye edilmiş AC-20 bitümden % 3,6 ile % 5,2 arasındaki oranlarda bitüm eklenmiştir. Karışımlardaki agrega boyutu arasındaki geçiş arttıkça birbirine bağlı boşluk oranında ve Cantabro parça kaybında artış olduğu tespit edilmiştir. Tekerlek izi oturmalarının benzer sonuçlar verdiği belirlenmiştir (Momm ve Filho, 2001).

Farklı gradasyonlar kullanılarak oluşturulan çift katmanlı bir kaplama sayesinde yolda meydana gelen trafik gürültüsünün azaltılmasının amaçlandığı bir çalışmada, üst katman için 2 mm ile 5 mm ve 5 mm ile 8 mm agrega derecelendirme boyutları seçilmiştir. Alt katman için ise 11 mm ile 16 mm ve 16 mm ile 22 mm arası gradasyon değerleri kullanılmıştır. Her iki tabakanın da yaklaşık yüzde 20 ile 25 arası bir hava boşluk oranına sahip olduğunun belirtildiği çalışmada gürültüyü azaltmanın yanı sıra, üst tabakanın daha ince yapılı gradasyonu sayesinde suyla taşınan toz ve birikintilerin alt tabakaya ulaşarak boşlukları tıkamasının engellediği belirtilmiştir. Hollanda'da uygulanan bu çift katmanlı geçirimli asfalt deneyimleri, hem tekerlek-kaplama arasında hem de aracın mekanik yapısından dolayı meydana gelen gürültüyü azaltmada önemli derecede başarılar elde edildiğini göstermiştir. Bunun nedeni kaplamanın iç yapısında bulunan boşluklu yapının, hareket halindeki aracın oluşturduğu gürültünün çoğunu absorbe etmesidir (DRD, 1999).

Asfalt karışımlarda geri-dönüşüm agregası olarak cürüfler kullanılmaktadır. Ferrokrom cürufu bu agregalar arasında yer almaktadır. Ferrokrom, krom ve demir metallereinden elde edilen ve genelde içerisinde %45 ile %90 oranında krom bulunduran çoğunlukla paslanmaz çelik üretiminde kullanılan bir alaşımdır (Çınar, 2018). Ferrokrom üretim sürecinde ortaya ferrokrom cürufu çıkmaktadır. Bir ton ferrokrom üretiminden yaklaşık olarak ortaya 1.5 ton ferrokrom cürufu çıkmaktadır (Taşdemir, 2006).

Ülkemizde her yıl ferrokrom tesislerinde toplamda 100 ile 150 bin ton ferrokrom cürufu ortaya çıkmaktadır. Bu cürufun bir kısmı agrega olarak kullanılmakta; bir kısmı da öğütülerek çimentoya katılmaktadır. Sıcaklığa karşı oldukça dayanıklı olan bu madde, kullanımından çok daha fazlası ferrokrom tesislerinde üretildiğinden depolama alanlarında

oldukça fazla miktarda bulunmaktadır (Erdoğan, 2011).

Ülkemizde, değişik bölgelerde krom yatakları bulunmasına karşın, iki yerde endüstriyel boyutta ferrokrom üretimi yapılmaktadır. Ferrokrom üretimi sonucu ortaya çıkan ferrokrom cürufun büyük çoğunluğu atık toplama alanlarında biriktirilmektedir. Bunlardan birisi Elazığ Ferrokrom İşletmesi, diğeri Antalya Ferrokrom işletmesidir (Yılmaz, 2002). Kimyasal analizleri yapılan cürufların barındırdıkları bileşenler benzer olmakla birlikte, miktar olarak farklılık göstermektedir. Her iki üretim merkezi için elde edilen kimyasal analiz sonuçları Tablo 4.3' de gösterildiği gibidir.

Tablo 4.3: Türkiye'deki ferrokrom üretim tesislerindeki cürufların kimyasal analizi (Yılmaz, 2002; Kantarcı, 2013)

Bileşen (%)	Kimyasal Analiz (%)					
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Elazığ ferrokrom kimyasal özellikleri</b>	33,80	25,48	0,61	1,10	35,88	2,12
<b>Antalya ferrokrom kimyasal özellikleri</b>	31	9	1	45	13	1

Ferrokrom cürufun doğal agrega yerine yol temel malzemesi olarak kullanılmasının araştırıldığı bir çalışmada bağlayıcı içermeyen granül karışımlar üzerine CBR ve Proctor deneyleri, bağlayıcı içeren karışımlara üzerinde de serbest dayanım deneyleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlara dayanarak cürufun yol temel malzemesi olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Yapılan deneylerde cürufun boşluklu yapısından dolayı su absorpsiyon oranı doğal agregadan daha yüksek çıkmıştır. Ancak Karayolları Teknik Şartnamesi KTŞ'nin sınır değeri olan %2,5 değerinin altında kalmıştır. Elde edilen su absorpsiyon ve özgül ağırlık değerleri Tablo 4.4'te verildiği gibidir. Agreganın Los Angeles aşınma değerleri kıyaslandığında Ferrokrom cürufun aşınma direnci doğal agregaya göre %15 daha yüksek ölçülmüştür. Bu da cürufun ağır yükler altında doğal agregaya göre daha iyi direnç sağlayacağını gösterir. Ayrıca donma-çözünme değerleri ölçülen agregalardan, yine %31'den daha fazla bir farkla cürufun daha yüksek direnç gösterdiği ölçülmüştür. Bu da iklim ısıl farkın yüksek olduğu iklimlerde ferrokrom cürufun daha iyi performans sergileyebileceği anlamına gelmektedir. Ancak boşluklu yapısından dolayı ferrokrom

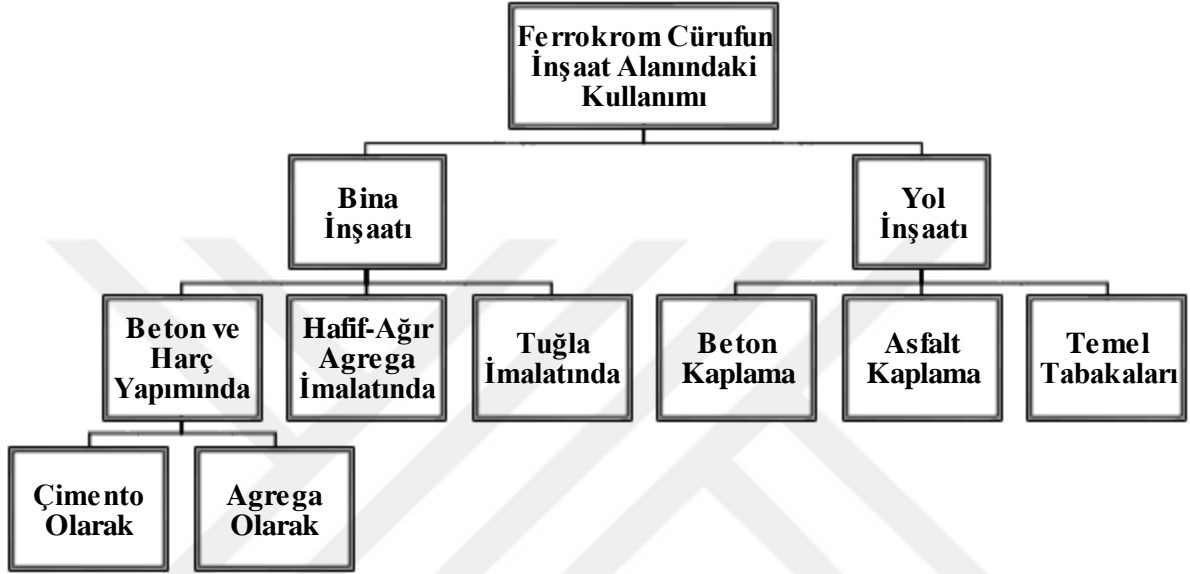
cürufun su absorpsiyonu daha yüksek çıkmıştır. Bu da donma-çözünme olayının sık tekrarlandığı bölgelerde, ferrokrom cürufun iklim şartlarının bu olumsuz etkilerine daha fazla maruz kalacağını göstermektedir. Ferrokrom cürufun kristal yapısından dolayı keskin ve köşeli bir yapıya sahiptir. Bu özelliğinden dolayı karışımlarda kullanılan ferrokrom cürufun, içsel sürtünmesinin yapılan ölçümlerde diğer malzemelere göre yüksek çıkmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada yapılan CBR deneyi sonuçlarına göre ferrokrom cürufun kuru CBR değeri, şartnamede en iyi temel malzemesi olarak gösterilen kırma kayadan %60, doğal kayadan %30 daha yüksek çıkmıştır. Sonuç olarak, yapılan ölçümlerde de görüldüğü üzere ferrokrom cürufun sağladığı fiziksel ve mekanik değerler, yol kaplamasında doğal agrega yerine kullanılabileceğini göstermektedir (Yılmaz ve Süttaş, 2008).

Tablo 4.4: Agreganın özgül ağırlık ve su absorpsiyonu değerleri (Yılmaz ve Süttaş, 2008)

Özellik	İndis / birim	FeCr cürufu	SiFeCr cürufu	Doğal Agregası
İri agrega hacim özgül ağırlığı	$G_{kb}$ , gr/cm <sup>3</sup>	2,862	2,766	2,698
İri agrega zahiri özgül ağırlığı	$G_{ka}$ , gr/cm <sup>3</sup>	3,066	2,824	2,725
İri agrega su absorpsiyonu	P %	2,32	0,74	0,37
İnce agrega hacim özgül ağırlığı	$G_{ib}$ , gr/cm <sup>3</sup>	3,148	2,780	2,646
İnce agrega zahiri özgül ağırlığı	$G_{ia}$ , gr/cm <sup>3</sup>	3,119	2,787	2,716

Sadece toz haline getirilmiş ferrokrom cüruf kullanarak jeopolimer harç ve hamur elde etmek için bir çalışma yapılmıştır. Böylece ülkemizde ve dünyada depolama alanlarında oldukça fazla miktarda bulunan, içerdiği bileşenlerden dolayı çevreye ve yeraltı suyuna zararlı olan, halihazırda inşaat mühendisliğinin birçok alanında kullanılan (Şekil 4.1) atık bir maddeye daha fazla kullanım alanı sağlamak amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında alkali içeren kimyasallarla karıştırılıp oda sıcaklığının üstündeki sıcaklıkta bir miktar bekletilen cürufun portland çimentosuyla kıyaslanabilecek yakınlıkta dayanım değerleri elde edildiği; oda sıcaklığında kürlendiğinde ise daha düşük dayanım değerleri elde edildiği belirtilmiştir. Hem portland çimentosu hem de ferrokrom cüruf ile hazırlanan numuneler çeşitli kimyasallar ve asitlere maruz bırakılıp bozulma değerleri gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgularda ferrokrom cürufu ile hazırlanan numunelerin çok daha az bozulduğu görülmüştür. Numunelere uygulanan bir diğer dayanım testi ise her iki bağlayıcıyla hazırlanan

numunelerin, 1100 °C'a kadar ısıtılıp soğutulularak dayanım değerlerini ölçmek olmuştur. Elde edilen dayanım sonuçlarına göre ferrokrom cürufuyla hazırlanan numunelerin dayanım değerlerindeki düşüş daha az olduğu; hatta ferrokrom cürufuyla hazırlanan numunelerin bazılarında ısıl işlemden sonra dayanım değerlerinde artış dahi olduğu görülmüştür. Sonuç olarak sadece ferrokrom cürufu kullanarak alkali aktivasyonu ile jeopolimer harç ve hamurların üretilebileceği görülmüştür (Erdoğan, 2011).



Şekil 4.1: Ferrokrom cürufun inşaat mühendisliğindeki kullanım alanları (Fares vd., 2021)

Esnek kaplamalarda ferrokrom cürufu, cam tozu ve mermer tozunun filler malzemesi olarak kullanılmasının araştırıldığı bir çalışmada hazırlanan numunelere Marshall stabilite deneyi, pratik özgül ağırlık, boşluk oranı, asfaltla dolu boşluk yüzdesi gibi birtakım deneyler uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, kullanılan filler malzemelerin optimum bağlayıcı oranı bu çalışmada kullanılan tüm malzemeler için %5,78 ile %5,99 arasında kaldığı tespit edilmiştir. Çalışmada her üç malzeme de 200' nolu elekten elenip altında kalan filler kısmı kullanılmıştır. Marshall deney sonucuna göre en yüksek stabilite değerine ferrokrom cürufu kullanıldığı numuneler ile ulaşıldığı bulunmuştur. Kırmataş tozunun kullanıldığı numunelerde ise cam ve mermer tozunun kullanıldığı numunelerden daha yüksek değerler görülmüştür. Fakat kullanılan bütün malzemelerde elde edilen sonuçlar, teknik şartnamenin belirttiği değeri geçtiği belirtilmiştir. Çalışmada bulunan sonuçlara göre filler malzeme oranı arttıkça boşluk oranı yüzdesi düşüş göstermiştir. Ferrokrom cürufu filler malzeme olarak kullanılan numunelerde filler içeriği arttıkça akma değeri artmış; belli

bir yüzdeden sonra ise düşüş göstermiştir. Aynı şekilde ferrokrom cürufunun kullanıldığı numunelerin birim ağırlık değeri filler malzemesinin artmasıyla sürekli artış göstermiş ve en yüksek değere %9 filler oranı ile ulaşılmıştır. Sonuç olarak her üç malzemenin de kırma taş tozu yerine filler malzeme olarak kullanılmasının uygun olduğu deneylerden elde edilen sonuçlarla tespit edilmiştir (Taşgın, 2014).

#### 4.2. Bitümlü Bağlayıcı ve Modifiye Bitüm

Ülkemizde ve bazı gelişmiş ülkelerde geçirimli asfaltta kullanılan bitümün sağlaması gereken değerler Tablo 4.5’ te gösterildiği gibidir.

Tablo 4.5: Geçirimli asfalt karışımında kullanılan bitümlü bağlayıcı özellikleri ve limit değerleri (Topaloğlu, 2019)

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

Bitüm, polimer veya elyafla modifiye edildiğinde sürüş konforu iyileştirildiği gibi kaplamanın daha uzun ömürlü olmasında da doğrudan rol oynar. Modifiye edilmiş bitüm ayrıca termal çatlama, tekerlek izi oluşumunu, kuma ve esneklik kaybı gibi sıcak kaplamaların genel problemleri üzerinde de önemli derecede iyileştirme sağlar (Lan vd., 2015).

Geçirimli asfaltın kaplamaların geliştirilmesi üzerine yapılan bir araştırmada, karışıma katılan lifin, polimerin ve polimer-lif kombinasyonunun numunenin dayanımı ve geçirimsizliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Karışımda lif olarak selülozik elyaf ve polimer olarak styrene-butadiene-styrene (SBS) kullanıldı. Üç farklı gradasyon kullanılarak hazırlanan numunelere üzerinde yapılan testler sonucunda, karışıma lif veya polimerle

beraber lif katılması bir miktar karışım mukavemetini geliştirmiş olsa da boşluk oranında önemli bir azalmaya neden olmuştur. Karışıma sadece polimer ilave edilmeyeyle hem numunenin mukavemet hem de boşluk oranında iyileşme gözlemlenmiştir. Dolayısıyla mukavemet ve geçirgenlik özelliklerinin optimize etmek için karışıma lif veya polimer – lif kombinasyonu yerine sadece polimer katılması tavsiye edilmiştir. Ayrıca sıcaklığın numunelerin dayanım ve geçirgenlik özellikleri üzerindeki etkilerine değinilen çalışmada; sıcaklığın artmasıyla geçirimliliğin arttığını mukavemet değerlerinde de azalmalar görüldüğü aktarılmıştır (Faghri ve Sadd, 2002).

Agrega/bitüm oranının geçirimli asfalt numune dayanımı ve permeabilite üzerindeki etkilerine değinildiği çalışmada, yüksek bitüm oranı Marshall stabilitesinde azalmaya neden olurken daha yüksek akış değeri ve daha düşük boşluk oranına neden olmuştur. Fakat, bitüm ile agrega arasındaki yapışmayı iyileştirerek parça kaybında kayda değer düzeyde azalma sağlamıştır. Optimum agrega bitüm oranını %4,51 olarak belirlenmiştir. (Cheng vd., 2019).

Asfalt karışımların temel prensibi olarak hava boşluk yüzdesi arttıkça, karışımın mukavemet değeri düşer. Subagio ve arkadaşlarının (2005) gerçekleştirmiş olduğu çalışmada karışımın boşluk içeriğinden ödün vermeden mukavemet değerini geliştirmek için Tafpack Super ile modifiye edilmiş bitüm kullanmışlardır. Bitüm miktarının %5, %10 ve %15 oranında kullandıkları Tafpack Super ile vizkozitesi yüksek bitüm elde etmişlerdir. Karışımdaki Tafpack Super miktarı arttıkça vizkozite ve yumuşama noktası artarken penetrasyon değerini düşürmüştür. Modifiye edilen bitümün elastik özelliği geliştiği için agrega ile daha sağlam bağlar oluşturarak soyulma, sökülme ve deformasyona karşı dirençli hale gelir. Yapılan deneyler karışıma katılan polimer oranı arttıkça karışımın dolaylı çekme, parça kaybı ve mukavemet değerini geliştirdiği, karışımın performansına olumlu etki ettiği göstermiştir.

Malezya'daki ilk geçirimli asfalt çalışmaları 1990 yıllarında Japonya'dan alınan örnek uygulamalarla hayata geçirildi. Ancak Japonya'da rastlanan benzer sorunlara Malezya'da yapılan uygulamalarda da rastlanıldı. Bu sorunların en başında gelenleri ise tekerlek izinde oturma, gözeneklerin tıkanması ve kısa hizmet ömrü olarak sıralanabilir. Malezya gibi tropikal ülkelerde yüksek sıcaklık ve sürekli yağışlardan dolayı geçirimli asfaltın bu ilk modifiye edilmemiş bitüm ve iyi derecelendirilmemiş gradasyonlu uygulamalarında bu tür sorunların baş göstermesi gayet olasıdır. Japonya'da yapılan çalışmalarda bitüme Tafpack Super (TPS) katılarak yüksek vizkoziteli bitüm elde edilerek tekerlek izi oturmalarında ve

parça kaybı sorununda büyük düzeyde iyileşmeler sağlanmıştır. Ayrıca agrega gradasyonunda yapılan çalışmalar sonucunda 2,36 mm ile 4,75 mm arasındaki agrega gradasyonunda bir boşluk oluşturarak birbirine bağlı hava boşlukları yüzdesinde önemli oranda artış elde edilmiştir. Böylece kaplamanın geçirgenliği artırılıp, tıkanmaya karşı direnci sağlanmıştır (Nakanishi vd., 2018).

### **4.3. Fiber Modifikasyonu**

Asfaltta lif kullanımı çok eskilere dayanmaktadır. 1920 yılında ABD’de asfalt karışımlarda kullanımına başlanan asbest lifleri 1960 yılına kadar kullanımı devam etmiştir. Ancak sağlık üzerindeki olumsuz etkileri tespit edildikten sonra kullanımı durdurulmuştur (Serfass ve Samanos, 1996). 1930’lu yıllarda pamuk liflerinin kullanımı denenmiştir. Fakat, sıcakla etkileşimleri sonucu çabuk bozulmalarından dolayı kullanımına son verilmiştir (Freeman ve Gee, 1989). Avrupa’da ilk elyaf kullanımı geleneksel asfaltlarda, kışın lastiğe takılan zincir etkilerine karşı direnç sağlamak için kullanılmıştır. Ancak zaman içinde karışıma katılan elyafın kalıcı deformasyona karşı da önemli oranda direnç sağladığı ortaya çıkmıştır. Asfaltta elyaf uygulamaları Avrupa’da 30 yıldan fazla bir süre uygulandıktan sonra ABD’de çabuk yaygınlaşmıştır. Ulusal Asfalt Teknolojileri Merkezi (NCAT) 1997 yılına kadar bu alanda 140 tan fazla proje hayata geçirmiştir (Cooley ve Brown, 2001).

Fiber modifiyesi, trafik etkisiyle ortaya çıkan gerilme yüklerine karşı ve çatlak oluşumuna karşı dayanımı arttırmaktır (Maurer ve Gerald, 1989). Kullanılan lif türü, miktarı ve boyutlarının optimizasyonu maksimum fayda sağlamak için önemlidir. Liflerin gereğinden uzun seçilmesi topraklanmaya sebep olacağı gibi çok kısa seçilmesi etkisini azaltacaktır (Mahrez ve Karım, 2003). Bitüm/lif oranı azaldıkça bitüm lif tarafından emilir, agregayı bağlayacak yeterli miktarda bitüm olmayacağından lifin faydasında çok zararı olmuş olacaktır. Liflerin kaplaması için gerekli bitüm miktarı liflerin emilim ve yüzey alanına bağlıdır. Bundan dolayı karışıma katılması gereken bitüm miktarı hem lif konsantrasyonundan hem de lif türünden etkilenir (Button ve Lytton, 1987). Ayrıca, liflerin karışımın içinde homojen olarak dağılma derecesi kaplamanın mukavemetini etkileyecektir (Mills ve Keller, 1982).

Geçirimli asfalt karışımlarda bitüm süzülmesini önlemek amacıyla ilk başlarda selülozik ve doğal lifler kullanılırken, dayanımın iyileştirilmesi için aramid, poliester, cam ve bazalt gibi

lifler kullanılmıştır (McDaniel, 2015). Karışımlarda bitüm stabilizasyonunun sağlanmasında en yaygın olarak kullanılan lifler, karışımın toplam ağırlığının % 0,2 ile %0,5 kullanılmaktadır (Cooley vd., 2009). Bazalt elyafın geçirimli asfaltta kullanıldığı bir çalışmada, lif oranı %0,4'e kadar yükseltildiğinde karışımı bir arada tutan iç kuvvetlerin arttığı; lif oranının daha da artmasıyla karışım içindeki liflerin bir araya gelerek topaklanmalar oluşturduğu ve yapısal kusurlar meydana getirdiği deneyimlenmiştir (Wang vd., 2019). Ayrıca yüksek oranda lif kullanımı karışımdaki bitümü emeceğinden agregayı bir arada tutan bağın zayıflamasına nedene olur (Cheng vd., 2019). Farklı liflerin geçirimli asfalt karışımlara etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, karışıma eklenen polipropilen, poliakrilonitril ve selüloz liflerin her üçünün de katkısız hazırlanan kontrol numunesine kıyasla Marshall stabilitesi ve dolaylı çekme dayanımını arttırdığı saptamıştır. Ayrıca Cantabro parça kaybında önemli düzeyde bir iyileşme sağlamıştır (Pasetto, 2000).

Aramid lifleri kullanılarak yapılan geçirimli bir asfalt çalışmasında 6 mm ve 12 mm uzunluğunda lifler kullanılmıştır. Ayrıca poliüretan, lastik kaplı ve saf haldeki aramid liflerin karışımdaki farklı etkilerini saptayabilmek için aynı lif oranı ve aynı bitüm oranları kullanılmıştır. Yapılan çalışmada kuru koşullarda kullanılan tüm aramid liflerin, numunenin dolaylı çekme gerilmesine ve aşınma direncine olumlu etki ettiğini göstermiştir. Karışımda kullanılan 12 mm uzunluğundaki aramid lifleri 6 mm olanlara nazaran daha iyi performans sergilemiştir. Ancak ıslak koşullarda liflerin numunenin dolaylı çekme direncinde önemli oranda düşüşe neden olduğu; poliüretan ve lastik kaplı olanların ise nispeten daha az düşüşe neden olduğundan bahsedilmiştir. Bu durumun muhtemel nedeni ise aramid liflerin suya karşı aşırı hassas olmasından kaynaklandığını ve kaplanmış liflerin lifi suyun etkilerinden koruduğunu gösterir (Gupta vd., 2021).

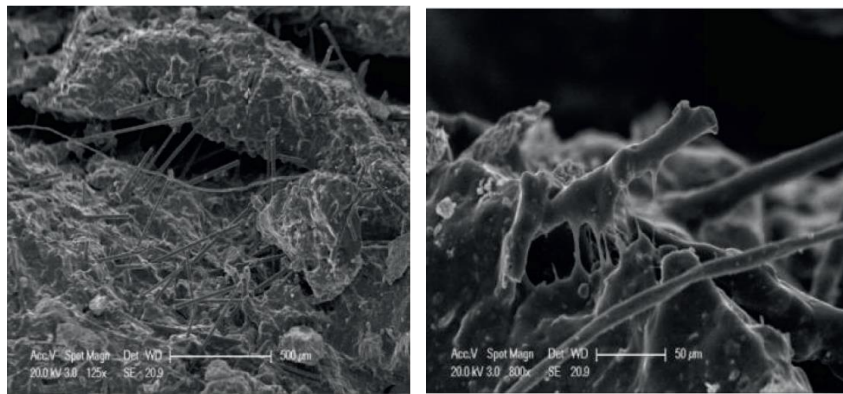
Wang vd., (2021) geçirimli asfalt karışımında yüksek sıcaklık performansını iyileştirme potansiyeline sahip seramik elyafı çalışmalarında kullanmışlardır. Yüksek sıcaklıklarda eritilmiş kilden üretilen seramik elyafı asbest elyafına alternatif olmanın yanında bazalt ve cam gibi inorganik elyafların sahip olduğu mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. Ayrıca 1000 ile 1600 derece aralığındaki çalışma sıcaklığına sahip bu malzeme metalürji, makine, inşaat, havacılık gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır (Ebihara, 2019; Wei vd., 2008). Karışıma %1, %2, %3, %4, %5 ve hiç elyaf katılmadan hazırlanan numuneler üzerine testler uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda seramik elyafın katılması karışımın mekanik özelliklerini, yüksek sıcaklık stabilitesini, neme duyarlılığını ve düşük sıcaklıkta çatlama



direncini arttırabildiği gözlemlenmiştir. Optimum değerlerde de karışıma katılan %4 lif oranıyla ulaşıldığı belirlenmiştir.

Öğütülmüş lastik kırıntıları ve selülozik lif kullanılarak hazırlanmış karışımlarda aşınma kaybının azaldığı, genel olarak daha dayanıklı karışımlar elde edildiği yapılan deneylerle tespit edilmiştir. Karışıma selülozik lif ve lastik kırıntısı eklenmesi dolaylı çekme gerilmesinde %90'a varan iyileşmeye; karışımın nem duyarlılığını düşürmeye, tekerlek izi direncini arttırmaya fayda sağladığı belirlenmiştir. Ancak karışıma kauçuk eklenmesi sıcaklık artışlarında karışım viskozitesinin artışına neden olmuştur (Lyons, 2012).

Wang ve arkadaşları (2019) bazalt elyafı geçirimli asfalt performansını geliştirmesinde kullanmışlardır. Bunun için lifsiz, %3 ve %4 oranında 3 mm, 6 mm, 9 mm ve 12 mm uzunluklarındaki bazalt lifleri geçirimli asfalt karışımlarında kullanmışlardır. Hazırlanan numunelere Cantabro parça kaybı, donma-çözünme, tekerlek izi ve dolaylı çekme gibi birtakım testler uygulanmıştır. Ayrıca deneylerden sonra kırılan numunelerdeki bazalt lif dağılımı taramalı elektron mikroskobu (SEM) altında görüntülemişlerdir (Şekil 4.2). Deney sonuçlarına göre karışıma bazalt lifi eklenmesi agregalar arasında bitüm ve lifli yapıdan oluşan üç boyutlu bir ağ meydana getirip karışımı daha sağlam bir şekilde birbirine bağladığından, numune performansını geliştirmede etkin bir rol almıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde en iyi performansa %0,3 lif oranı ve 9 mm uzunluğuyla ulaşıldığı saptanmıştır (Wang vd., 2019).



Şekil 4.2: Bazalt elyafın elektron mikroskobu (SEM) altında görünümü (Wang vd., 2019)

Asfalt karışımlara %1, %3, %5, %7 ve %9 oranında çelik lif ilavesinin etkilerinin incelendiği çalışmada, %1 ve %3 lif oranlarıyla hazırlanan numunelerin performanslarında artışlar olurken %5 ve üzeri oranlarda liflerin bir araya gelerek topaklanmalar meydana getirdiği

tespit edilmiştir. Lif oranı %3'ün üzerinde olan numunelerde hava boşluklarına ve bitüm-agrega etkileşiminde azalmaya neden olmuşlardır. Bu durum numunelerde sıkışma, stabilite ve dayanıklılık sorunlarına neden olmuştur. Ayrıca nem hasarı ölçülen numunelerin %5 lif oranına kadar aynı kaldığı; daha yüksek lif oranlarında ise önemli düzeyde azaldığı belirlenmiştir (Kofteci, 2018).

Diğer bir çalışmada Geçirimli asfalt karışımların özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla çelik cüruf tozu ve kırıntı kauçuk kullanılmıştır. Modifiye bitüm kullanarak çalışmada, çelik cüruf tozu ilavesinin yumuşama noktası ve süneklik özelliklerinde iyileştirme sağlarken, penetrasyon değerini düşürdüğü tespit edilmiştir. Ayrıca kauçuk kırıntısı ve çelik cüruf tozu kullanılarak hazırlanan numunelerin kontrol numunesine göre Marshall stabilite ve dolaylı çekme mukavemetinde de önemli derecede iyileştirmelere belirlenmiştir (Nazarinasab vd., 2018).

Geri dönüştürülmüş polietilen (plastik poşet) ve kırıntı kauçuk (atık lastik) ile modifiye edilmiş bitüm kullanılarak hazırlanmış, farklı gözenekli asfalt karışımların laboratuvar performansının incelendiği bir çalışmada; numunelerin aşınma, nem hasarı, yorulma, plastik deformasyon ve sürtünme katsayısını belirlemek için deneyler yapılmıştır. Çalışmada, tek tip gradasyon ve bağlayıcı olarak saf bitüm kullanılmıştır. Bitüm süzülmesini önlemek için ise selülozik elyaf kullanılmıştır. Yaklaşık 3 mm x 3 mm boyutunda kesilen polietilenin yüksek hızda dönen bir karıştırıcıyla ilave edilerek modifiye bitüm elde edilmiştir. Geri kazanılmış polietilen ile modifiye edilmiş bitümün kullanıldığı karışımlarda, yüksek servis sıcaklıklarında karışımın rijitliğinin ve tekerlek izi direncini arttırdığı belirtilmiştir. Karşıma karıştırma esnasında eklenen kırıntı kauçuk ise düşük sıcaklıklarda kaplamanın rijitliğini azalttığı için yorulma çatlama önlediği ve yorulma ömründe önemli düzeyde geliştirme sağladığı vurgulanmıştır. Cantabro aşınma deney sonuçlarına göre en düşük parça kaybına, geri kazanılmış polietilen modifikasyonu ulaştığına; en yüksek parça kaybı ise kırıntı kauçuk kullanılan numunelerde gözlemlenmiştir. Polietilen ve kırıntı kauçuk ile modifiye edilen karışımların, sadece selülozik fiber katılarak hazırlanan numunelere göre dolaylı çekme dayanımı ve tekerlek izi dirençlerinde önemli düzeyde iyileşme meydana gelmiştir. Bitüm içeriğinin artışıyla permeabilite değerlerinde azalma olduğu belirlenmiştir. Ayrıca her iki modifikasyonun karışımlardaki asfalt içeriğini, dolayısıyla film kalınlığını ve dayanıklılığını arttırdığı ve agregayı kaplayan daha kalın bir tabaka oluşmasını sağladığından bitüm oksidasyonu ve agregaya parçalanmasını azaltacağı belirtilmektedir (Punith vd., 2004).

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, kullanılan malzemelere ait özellikler ve hazırlanan karışım numunelerine uygulanan deney yöntemlerinin detayları anlatılmaktadır.

### 5.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada temel malzemeler olarak ferrokrom cüruf agregası ve bağlayıcı malzemesi olarak polimer bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. Ayrıca, karışımlardan bitümün süzülmesini önlemek için bitüm emdirilmiş selülozik fiber, filler takviyesi olarak ise F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Karışımların performans özelliklerinin iyileştirilmesi için bazalt elyaf, cam elyaf, polipropilen ve atık lastik kırıntısı ilave edilmiştir.

#### 5.1.1 Agregası

Kaba agregası, ince agregası ve filler malzemesi olarak Elazığ Ferrokrom Tesisinden temin edilen cüruf malzemesi kullanılmıştır (Şekil 5.1). Ferrokrom cürufuna ait olan bazı fiziksel özellikler Tablo 5.1’de verilmiştir. Tablodaki değerler incelendiğinde büyük oranda kübik yapıda olan ferrokrom cüruf agregasının aşınma dayanımının iyi düzeyde olduğu görülmektedir. Geçirimli asfalt karışım agregası gradasyonu olarak Tablo 5.2’de verilen Karayolları Teknik Şatnamesi (KTŞ)’nin 417. kısmında yer alan TİP-3 gradasyonu seçilmiştir. Karışımlarda ilave filler takviyesi olarak (%4,45 oranında) Çatalağzı Termik Santralinden temin edilen F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Ferrokrom cürufunun karışımların boşluk analizleri için TS EN 1097-6’ya göre belirlenen özgül ağırlık ve su emme değerleri Tablo 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.1: Ferrokrom cürufu agregası

Tablo 5.1: Ferrokrom cürufuna ait bazı fiziksel 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

Tablo 5.2: Karışım tasarımında kullanılan agrega gradasyonu (KTŞ, Tip-3)

Elek Boyutu		Yüzde Geçen, %
No	mm	Tip-3
3/4"	19	100
1/2"	12.5	85-95
3/8"	9.5	5-15
No.4	4.75	5-15
No.10	2	5-10
No.80	0.18	-
No.200	0.075	3-5

Tablo 5.3: Agregâ özgül ağırlık ve su emme yüzdeleri

Özellikler	Kaba Agregâ	İnce Agregâ	Mineral Filler
Zahiri Özgül Ağırlık	2.996	2.781	3.209
Hacim Özgül Ağırlık	2.966	2.616	-
Su emme yüzdesi, %	0.33	2.27	-

### 5.1.2 Bitümlü Bağlayıcı

Çalışmada, karışımın fiber modifikasyonunun etkisi konu edildiğinden tek tip polimer bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. Geçirimli asfalt karışımlar için bir gereklilik olan ve İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilen polimer bitümlü bağlayıcıya (PMB 76-22) ait bazı özellikler Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4: Kullanılan bitümlü bağlayıcıya özellikleri

Özellikler	Standartlar	Sonuçlar
Penetrasyon, 25°C, 100 g, 5 s (0.1 mm)	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, $S \leq 300 \text{MPa}$ , $m \geq 0,300$ )	TS EN 14771	-6°C
DSR dinamik kesme reometresi, ( $G^*/\sin \delta > 1 \text{kPa}$ )	TS EN 14770	76°C
Özgül ağırlık	TS 1087	1.026

### 5.1.3 Bazalt Elyaf

Çalışmada kullanılan elyaf katkılardan birisi Şekil 5.2'de görülen bazalt elyafıdır. Bazalt elyaf karışımlara karışım ağırlığının %0,2, %0,4, %0,6, %0,8 ve %1,0 oranlarında ilave edilmiştir. Elyafın karışım içerisinde homojen dağılımını sağlayabilmek için karışım mikserde karıştırılırken üzerine azar azar serpiştirilerek ilave edilmiştir. Bazalt elyafa ait bazı özellikler tedarik edilen firmadan alınan teknik özellikleri Tablo 5.5 'te verilmiştir (Dost Kimya, 2021).



Şekil 5.2: Kullanılan bazalt elyafın görünümü

Tablo 5.5: Bazalt elyafa ait bazı teknik özellikler (Dost Kimya, 2021).

<b>Teknik Özellikler</b>	<b>Bazalt Lif</b>
Çekme Dayanımı	4840 MPa
Elastisite Modülü	89 GPa
Uygulama Sıcaklık limitleri	-260°C- +982°C
Erime Sıcaklığı	1450°C
Özgül Ağırlık	2.60-2.80 g/cm <sup>2</sup>
Lif Çapı	9-23 mikron
Lif Uzunluğu	12 mm

#### 5.1.4 Cam Elyaf

Çalışmada kullanılan bir diğer elyaf türü Şekil 5.3'te görüldüğü gibi cam elyafıdır. Cam elyaf karışımlara karışım ağırlığının %0,2, %0,4, %0,6, %0,8 ve %1,0 oranlarında ilave edilmiştir. Sıcağa karşı direnci ve çekme dayanımı oldukça yüksek olan cam elyafın tedarik edilen firmadan alınan özellikleri Tablo 5.6'da görülmektedir (Dost Kimya, 2021).



Şekil 5.3: Kullanılan cam elyafın görünümü

Tablo 5.6: Cam elyafa ait bazı teknik özellikler

<b>Teknik Özellikler</b>	<b>Cam Elyaf</b>
Çekme Dayanımı	3400 MPa
Elastisite Modülü	77 GPa
Uygulama Sıcaklık Limitleri	-66 °C - +650 °C
Erime Sıcaklığı	1120 °C
Özgül Ağırlık	2,60 gr/cm <sup>2</sup>
Elyaf Çapı	13 mikron
Elyaf Uzunluğu	12 mm

### 5.1.5 Polipropilen Elyaf

Bu çalışmada yer alan bir diğer lif türü Şekil 5.4'te gösterildiği gibi polipropilen elyafıdır. Polipropilen elyaf yine aynı şekilde karışımlara karışım ağırlığının %0,2, %0,4, %0,6, %0,8 ve %1,0 oranlarında ilave edilmiştir. Polipropilenin 130 °C ile 171 °C arasındaki erime sıcaklığından dolayı karışım içerisinde erime eğiliminde olduğu görülmüştür. Polipropilenin tedarik edilen firmadan alınan özellikleri Tablo 5.7' de verildiği gibidir.



Şekil 5.4: Polipropilen elyaf

Tablo 5.7: Polipropilene ait bazı teknik özellikler

<b>Teknik Özellikler</b>	<b>Polipropilen Elyaf</b>
Çekme Dayanımı	300 kg/cm <sup>2</sup>
Elastisite Modülü	1700 MPa
Uygulama Sıcaklık Limitleri	0 °C - +100 °C
Erime Sıcaklığı	+167 °C
Yoğunluk	0,91 gr/cm <sup>3</sup>
Elyaf Çapı	9 mikron
Elyaf Uzunluğu	12 mm

### 5.1.6 Atık Lastik Kırpıntısı

Çalışmada ayrıca atık otomobil lastiklerinden elde edilen No.10 ve No.20 elek boyutları arasındaki lastik parçacıkları diğer lif tipi olarak kullanılmıştır. Bu liflerin şeklini ifade eden bir görüntü Şekil 5.5'te sunulmuştur. Yoğunluğunun 0.94 g/cm<sup>3</sup> olan lastik parçalarının ortalama uzunlukları 8 mm olarak belirlenmiştir. Bu lif tipinin katkı oranları diğer fiberlerle aynıdır. Sıcak karışıma ilavesiyle içeriğindeki kauçuğun etkisiyle yumuşayarak bitüm matriksi ile kohezif elastik bağlar oluşturduğu görülmüştür.





Şekil 5.5: Atık lastik kırıntılarının görünümü

### 5.1.7 Selülozik Fiber

Hazırlanan karışıma ilave edilen bir diğer malzeme de selülozik fiberdir. İnce malzeme miktarının yok denecek kadar az olduğu geçirimli asfalt karışımlardan bitümlü bağlayıcının süzülmesini önlemek amacıyla toplam karışım ağırlığının %0,03 oranında bitüm emdirilmiş selülozik fiber ilave edilmiştir. Bu malzemen karışım içerisinde homojen dağılımının sağlanması için bitüm ilave edilmeden önce agrega ile kuru olarak 2 dakika karıştırılmıştır. Kullanılan selülozik fiberin bazı özellikleri Tablo 5.8’de görülmektedir. Karışımda kullanılan selülozik fiber Şekil 5.6 da gösterildiği gibidir.

Tablo 5.8: Selülozik fibere ait fiziksel özellikler (HiperCell, 2021)

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



Şekil 5.6: Selülozik fiber (HiperCell®)

## 5.2. Deney Yöntemleri

Bu kısımda karışım deney numunelerinin hazırlanması ve bu numuneler üzerinde gerçekleştirilen performans testlerinin detayları yer almaktadır.

### 5.2.1 Karışım Numunelerinin Hazırlanması

Karayolları teknik şartnamesi Tip-3 karışım gradasyonu için belirlenen optimum tasarım civarındaki iki bitüm yüzdesinde %6,0 ve %6,5 bitüm oranlarında geçirimli asfalt karışımlar hazırlanmıştır. Selülozik fiberin karışımlar içerisinde homojen şekilde dağılmasını sağlamak için bitüm ilavesinden önce agrega ile kuru olarak iki dakika boyunca mikserde karıştırılmıştır. Bitüm ilave edildikten sonra yaklaşık 175-180 °C sıcaklıkta üç dakika boyunca karıştırılan karışıma, liflerin karışım içinde homojen dağılmasını sağlamak için her numune için farklı tip ve oranlarda azar azar bazalt elyaf, cam elyaf, polipropilen ve atık lastik kırıntısı ilave edilmiştir. Karışım homojen hale gelecek şekilde karıştırıldıktan sonra mikserden alınıp 115-120 °C'ye kadar soğumaya bırakılmıştır. Soğumanın hızlandırılması ve bitümün süzülmesini önlemek için karışımlar spatula ile sürekli olarak karıştırılmıştır. Isıtılmış kalıba yerleştirilen karışımlar otomatik Marshall Kompaktörü ile numunenin her iki yüzüne 50 darbe vurularak sıkıştırılmıştır. Hazırlanma aşamalarına ait bazı fotoğraflar Şekil 5.7' de verilmiştir.



Şekil 5.7: Geçirimli asfaltın hazırlanma aşamaları (a) mikserle karıştırılan karışıma lif ilave edilmesi (b) numunenin Marshall tokmağı ile sıkıştırılması

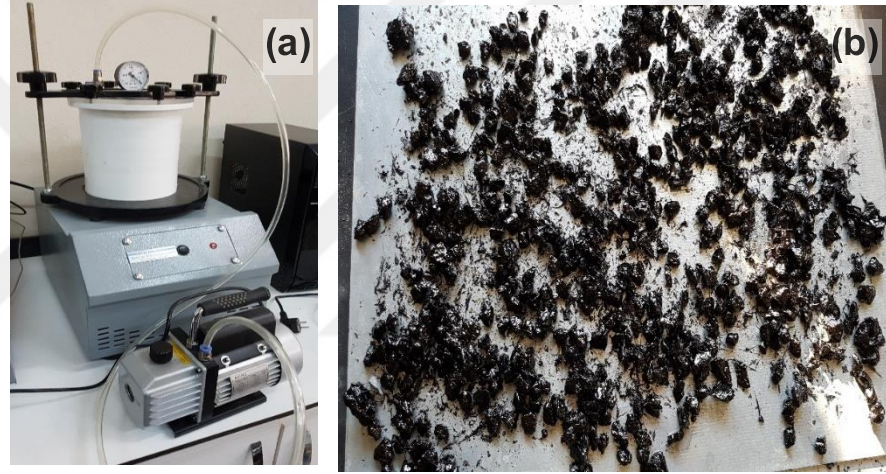
### 5.2.2 Sıkıştırılmış Karışım Numunelerinin Boşluk Analizi

Boşluk oranı, Geçirimli asfalt karışımların tasarımında esas alınan temel parametrelerden birisidir. Geçirimli asfalt karışımlar yüksek boşluk oranına sahip olduğundan, özgül ağırlıkları ve boşluk oranların hesaplanması için geleneksel kaplamalardan farklı olarak, numunelerin içerisine su almaması için Şekil 5.8’de görüldüğü gibi parafilm ile kaplanması gerekmektedir. Boşluk analizlerinin gerçekleştirilmesinde, sıkışmış karışım numunelerinin özgül ağırlıkları (AASHTO T275) ve bitümlü karışım teorik özgül ağırlıklarının (ASTM D2041) belirlenmesine gereksinim duyulmaktadır.



Şekil 5.8: Numunelerin boşluk analizleri (a) parafilmle kaplı numuneler (b) özgül ağırlık sehpası

Karışımın boşluk oranını bulmak için hesaplanması gereken değişkenlerden bir tanesi karışımın teorik özgül ağırlığı (SGT)'dir. Bu değer, kabaca 25°C'deki bitümlle kaplanmış gevşek malzemenin kütlesinin, malzemeyle eşit hacim ve sıcaklıktaki suyun kütlesine 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, piknometredeki karışım ve su içindeki hava kabarcıklarının daha hızlı çıkması için titreşim 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: Maksimum teorik özgül ağırlık deneyi (a) deney kullanılan piknometre ve vakum pompası (b) Deneye tabi tutulan gevşek karışım numunesi

Deneyde, 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  $25^\circ\text{C}$ 'ye geldiğinde, piknometre hemen kurulularak tartılır. Tartım kayıt edilir (L). Tüm tartım işlemleri tamamlandıktan sonra Eşitlik 1'de yerine yazılarak karışım maksimum teorik özgül ağırlığı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

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

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:

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

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

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,

SGT: Karışım teorik özgül ağırlık.

### 5.2.3 Sabit Seviyeli Permeabilite Deneyi

Bu metot, taban alanı ve yüksekliği belli olan iri daneli, yüksek geçirimli numunelerin geçirgenliğini tespit etmek için kullanılmaktadır. Silindir şeklinde, 100 mm çapında hazırlanan numuneler kalıptan çıkarılmadan Şekil 5.10'da görülen "kabarcık tüplü sabit seviyeli permeametre" olarak adlandırılan deney sistemine yerleştirilmektedir. Silindirin kenarından su sızıntısını önlemek için numunenin hem alt hem üst kısmına lastik contalar yerleştirilmektedir. Su dolu hazneye yerleştirilen permeametrenin rezervuarına vakum pompa yardımıyla su çekilip kabarcık tüpünün ucu tıkaç yardımıyla kapatılmaktadır. Sistemin içerisinde bulunduğu hazne tamamen su ile doldurulmaktadır. Rezervuarın üst

kısımında stabil hale gelen su seviyesi ( $H_{ilk}$ ); tıkaç çıkarıldıktan sonra boşalan suyun stabil hale geldiği son seviye ( $H_{son}$ ) olarak kaydedilmektedir. Dolu haznenin su üst seviyesi ( $H_2$ ), kabarcık tüpünün alt seviyesinin su yüksekliği ise ( $H_1$ ) olarak kaydedilmiştir. Numune yüksekliği ( $L$ ), numuneden ( $H_{ilk}$ ) ve ( $H_{son}$ ) seviyeleri arasındaki fark kadar suyun geçtiği süre ( $t$ ), bu süre zarfında geçen su debisi ( $Q$ ) olarak kayıt altına alınmıştır. Permeabilite katsayısını bulmak için Darcy yasası kullanılmıştır (Çetin vd., 2014). Bu yasaya göre permeabilite katsayısı ( $k$ )

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

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

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

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

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

$Q$  : Debi (Su akış hızı)

$i$  : Hidrolik gradient

$H_2$  : Su haznesindeki su yüksekliği, cm

$H_1$  : Kabarcık tüpü alt ucu yüksekliği, cm

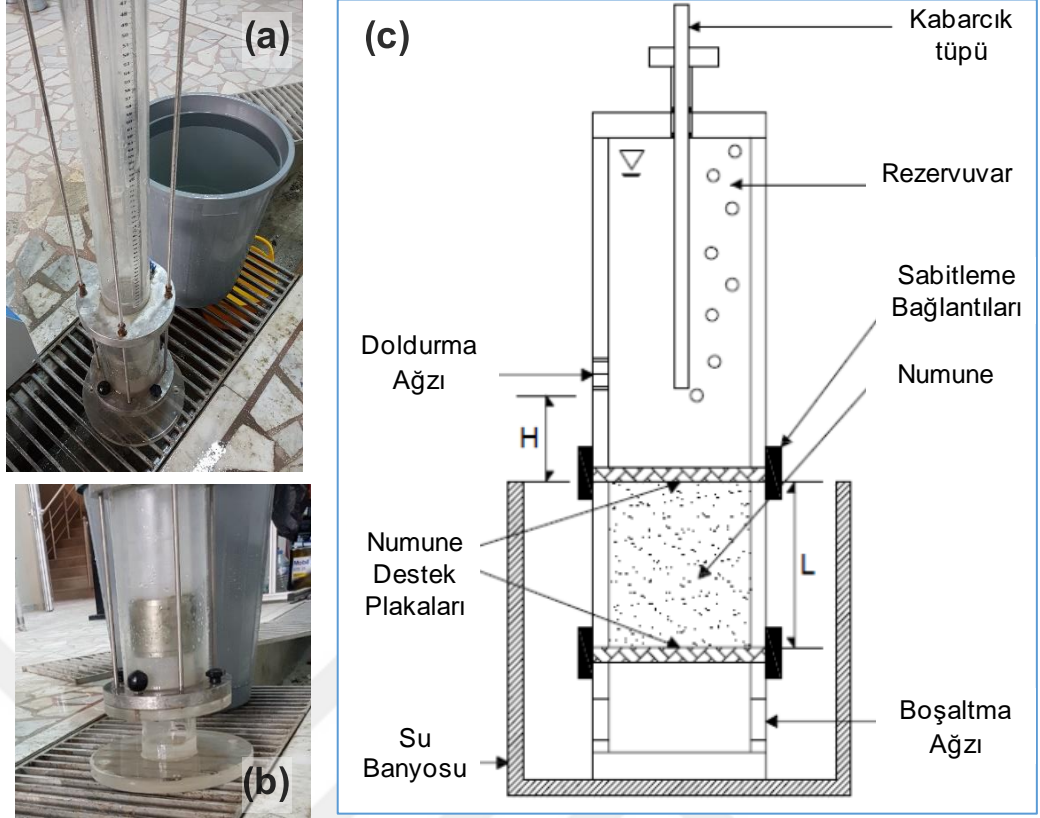
$H_{start}$ : Başlangıç su yüksekliği, cm

$H_{finish}$ : Bitiş su yüksekliği, cm

$L$  : Numune yüksekliği, cm

$A$  : Numune Kesit Alanı,  $cm^2$

$t$  : Başlangıç ile bitiş arasında geçen zaman



Şekil 5.10: Laboratuvarda kullanılan permeabilite deney düzeneği (a) kabarcık tüplü sabit seviyeli permeametre görünümü (b) permeametreye yerleştirilmiş numune (c) Permeametre şematik görünümü ve bölümleri

Geçirimli kaplamalarda permeabilite katsayısının en az 102 cm/s ( $\approx 100$  m/gün) olması önerilmektedir (Mallick vd., 2000; Transportation, 2012)

#### 5.2.4 Cantabro Dane Kaybı Deneyi

Geçirimli asfalt karışımlarda mastik kısmı geleneksel asfalt karışımlara nazaran yok denecek kadar az olduğundan karışım sadece kaba agrega temas noktalarında bağ oluşturabilmekte ve daha kırılgan hale gelmektedir. Bu sebepten ötürü geçirimli asfaltlarda sökülme ve parça kaybı daha fazla oluşmaktadır. Dünya genelinde geçirimli asfalt karışımlardaki parça kaybını bir standarta bağlamak ve belli bir değerin altında tutmak amacıyla parça kaybı deneyi geliştirilmiştir. Parça kaybı deneyi Şekil 5.11'de görülen Los Angeles deney cihazında gerçekleştirilmektedir.

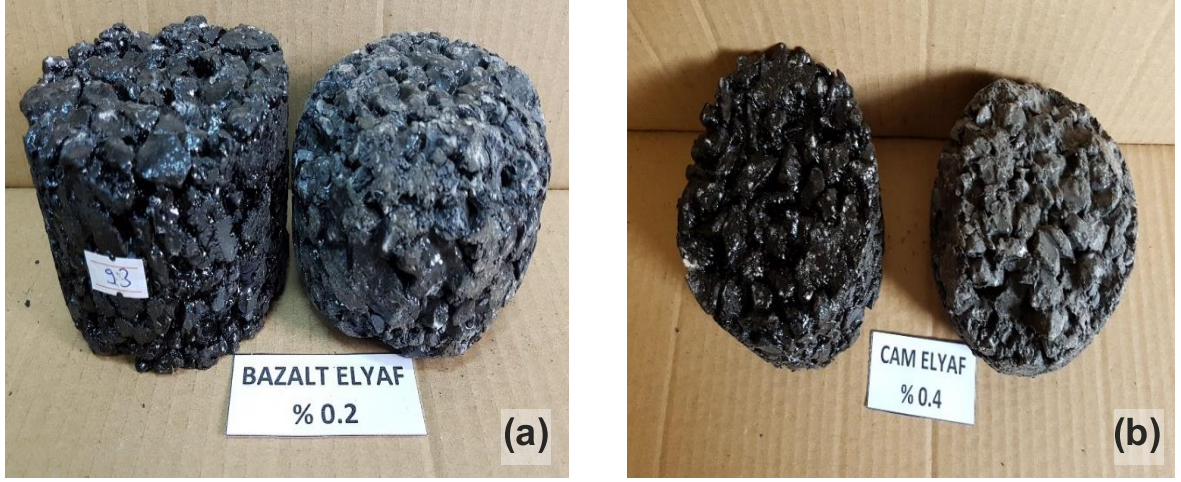


Şekil 5.11: Los Angeles deney cihazı

Bu deneyde, en az 2 gün oda sıcaklığında bekletilen sıkıştırılmış numuneler, Los Angeles deney cihazına her seferinde birer adet yerleştirilerek, yaklaşık 33 devir /dak hızda 300 devir sonundaki ağırlıkça kütle kaybı yüzdesi belirlenmektedir. Aynı lif oranıyla hazırlanan deney öncesi ve sonrasına ait numune örnekleri Şekil 5.12’de verilmiştir. Bu deneyde aşınma kaybının %20’den fazla olmaması istenmektedir. Numunenin Cantabro’ya atılmadan önceki kütlesi ( $M_1$ ), Cantabro’dan çıkarıldıktan sonraki kütlesi ( $M_2$ ) olarak adlandırılırsa kütle kaybı yüzdesi aşağıdaki formüller hesaplanır.



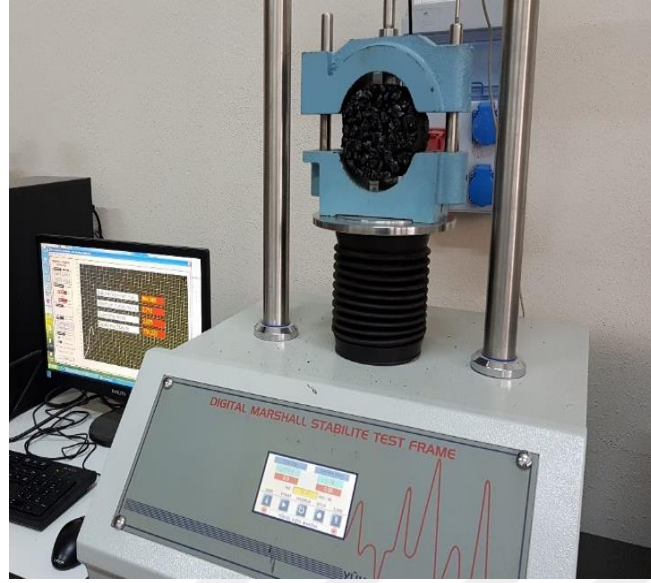
$$K.K. (\%) = \left( \frac{M_1 - M_2}{M_1} \right) \times 100 \quad (5)$$



Şekil 5.12: Cantabro aşınma deneyi öncesinde ve sonrasında numuneler

### 5.2.5 Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi

Dolaylı çekme mukavemeti deneyi, hazırlanan geçirimli asfalt numunelerin tek eksenli çekme gerilmesine karşı dayanımını saptamak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Çekme gerilmesinin uygulanmasının zorluğundan dolayı genelde numuneye düşey yönde basınç uygulanarak, yatay yönde dolaylı yoldan çekme kuvveti elde edilip; numunenin kırılması sağlanır. Bu deney ile gerçekte geçirimli asfalt üzerine gelen yükün oluşturacağı çekme gerilmesine karşı, bitüm film kalınlığı ve özellikle lif ilavesinin etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu deney ASTM D6931 prosedürüne uygun olarak 50 mm/dakika deformasyon hızı ve 25 °C sıcaklıkta Marshall stabilite test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.13'te deneyde kullanılan Marshall stabilite test cihazı görülmektedir. Numunenin kırılma anında kaydedilen en yüksek yük değeri, numune çap ve alanı hesaba katarak dolaylı çekme mukavemeti değeri hesaplanır.



Şekil 5.13: Dolaylı çekme mukavemeti test cihazı

Marshall cihazı çelik kırma çenesine sabitlenen çelik şeritler arasına yerleştirilen numune ve numuneye uygulanan yükleme durumu Şekil 5.14' te gösterildiği gibidir. 50 mm/dak deformasyon hızında numunenin çeneler arasında sıkıştırılması ile numune üzerinde dikey yönde doğrudan bir basınç yükü oluşturularak yatay yönde dolaylı bir çekme kuvveti ile kırılması sağlanmaktadır. Numunenin kırılması esnasında üst segmenta iki noktada temas eden ve bilgisayara anlık veri aktaran yük hücresi (load cell) ve deformasyon ölçer (LVDT) ile numunenin kırılma yükü ve kırılma deformasyonu ölçülmektedir. Belirlenen yük değere ve numune özellikleri kullanılarak dolaylı çekme mukavemeti Eşitlik 6'da gösterildiği şekilde hesaplanır.

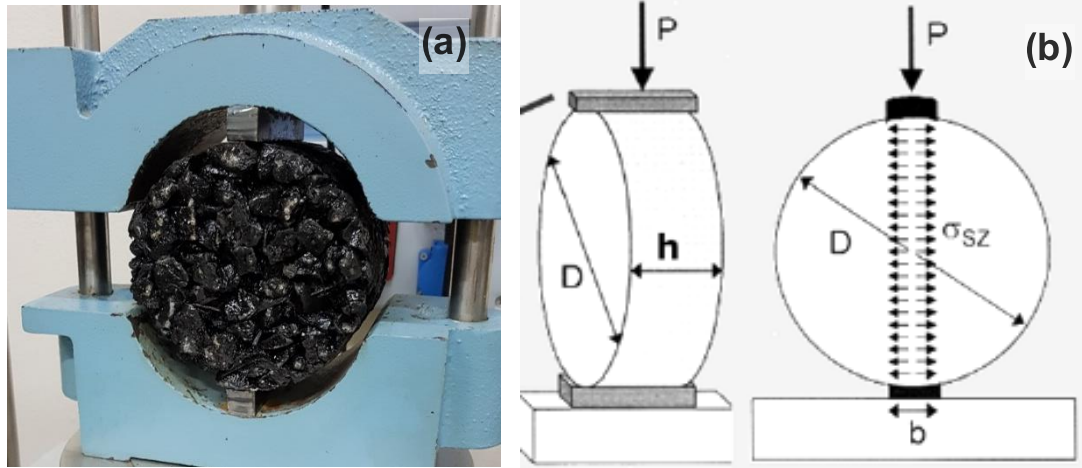
$$\sigma_T = \frac{2.P}{\pi.h.D} \times 1000 \quad (6)$$

$\sigma_T$  : İndirek Çekme Mukavemeti, MPa

P : Kırılma yükü, N

h : Numune yüksekliği, mm

D : Numune çapı, mm



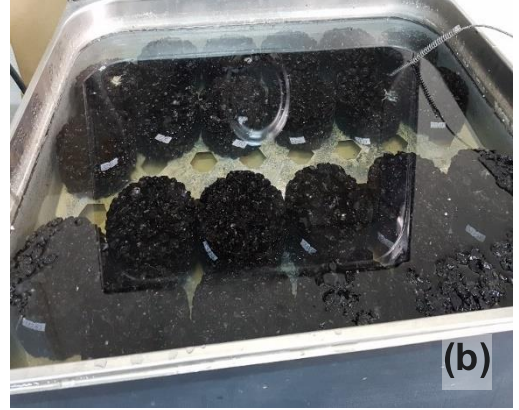
Şekil 5.14: Dolaylı çekme deneyi (a) Marshall kırma çenesine sabitlenen çelik şeritler arasında yerleştirilen silindirik numune (b) yükleme durumunun gösterimi

### 5.2.6 Su Hasarı Deneyi

Bu deney, iklim şartlarından dolayı yaşlanan ve nem etkisiyle agrega yüzeyinden soyulan bitüm ve matriksde meydana gelen güç kaybının bir ölçüsüdür. AASHTO T-283 standardında belirtilen prosedüre göre uyularak yapılan deneyde aynı bitüm ve lif oranıyla hazırlanmış altı adet numuneden üç tanesi koşullandırılmış, üç tanesi de koşullandırılmadan çekme gerilmeleri ölçülmüştür. Şekil 5.15 'te görüldüğü üzere koşullandırma işleminde, ıslatılan numuneler ince film tabakaya sarılıp içinde bir miktar su bulanık plastik torbalara konulmuştur. 16 saat boyunca  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de dondurucuda bekletilen numunelere daha sonra 24 saat boyunca  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki su banyosunda bekletilmiştir. Buradan da alınan numunelere  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktaki suda 2 saat boyunca tutulmuştur. Daha sonra Marshall test cihazında dolaylı çekme gerilmeleri ölçülmüştür. Koşullandırılmış numunelerin dolaylı çekme gerilme ortalamalarının, koşullandırılmamış numunelerin dolaylı çekme gerilme ortalamalarına bölünmesi ile "dolaylı çekme oranı" tanımlanmıştır. Bu değer, asfalt karışımların suyun etkilerine karşı direnci hakkında bilgi vermektedir. Hesaplanan dolaylı çekme oranlarının %80 nin altında kalmaması gerekmektedir (Liang, 2008). Nem hasarı direnci oranı Eşitlik 7 kullanılarak hesaplanır.

$$ITR = \frac{IDT_{Koşullanmış}}{IDT_{Koşullanmamış}}$$

(7)



Şekil 5.15: Numunelerin koşullandırma aşamaları (a) dondurucudan çıkarılan numune, (b) 60 °C'lik su banyosunda bekletilmesi

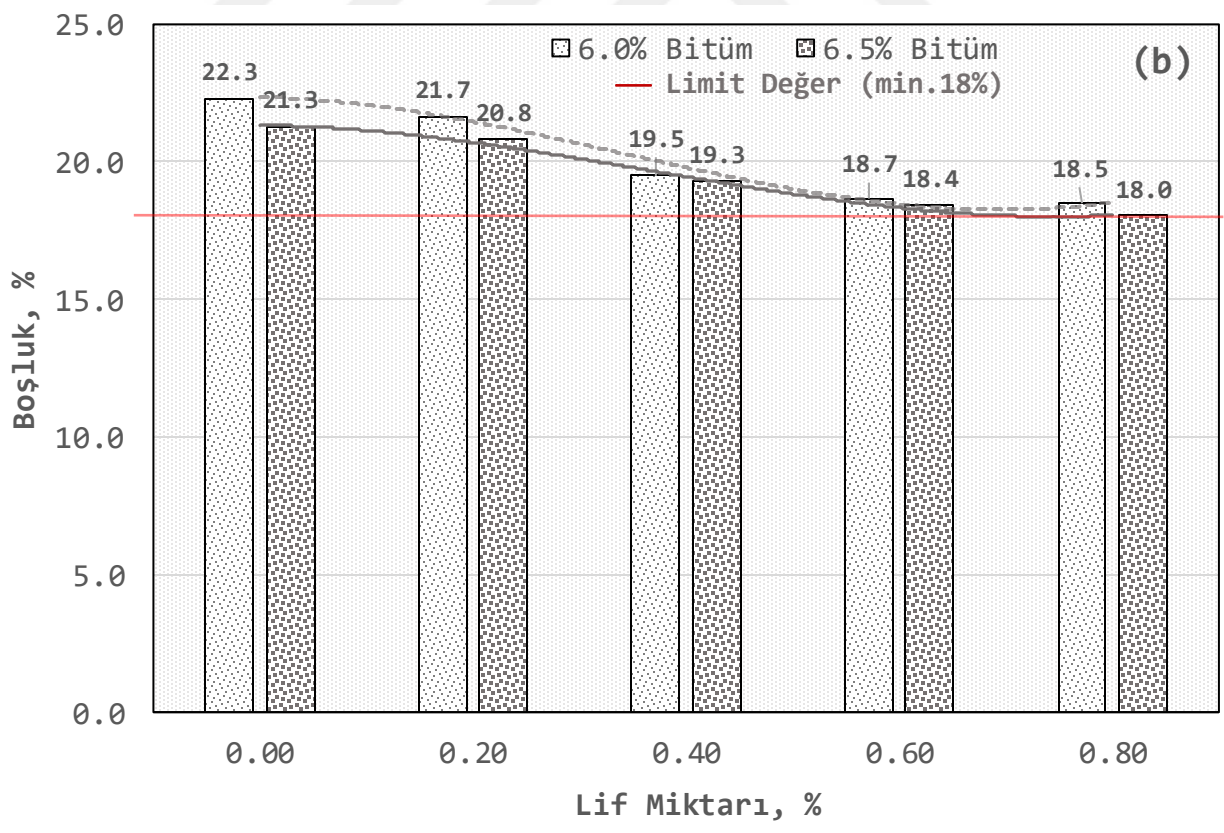
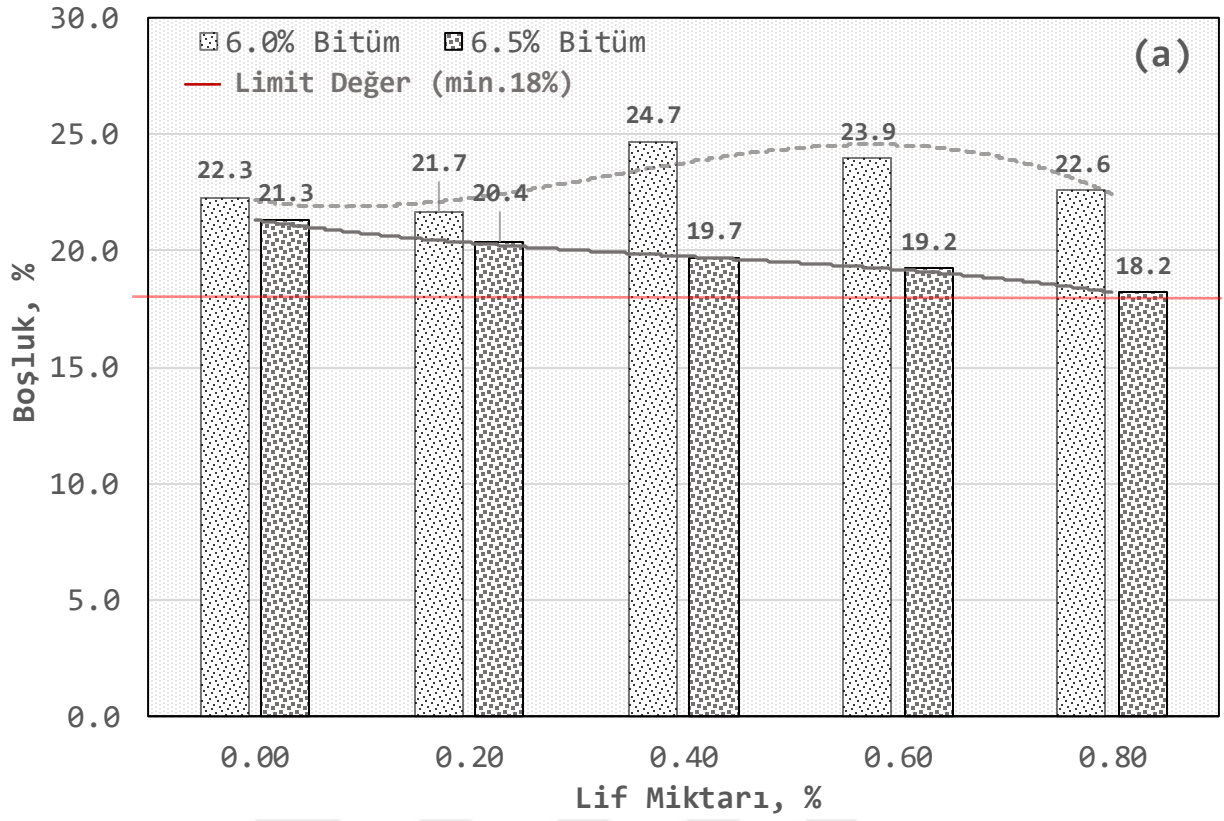
## 6. DENEY SONUÇLARI

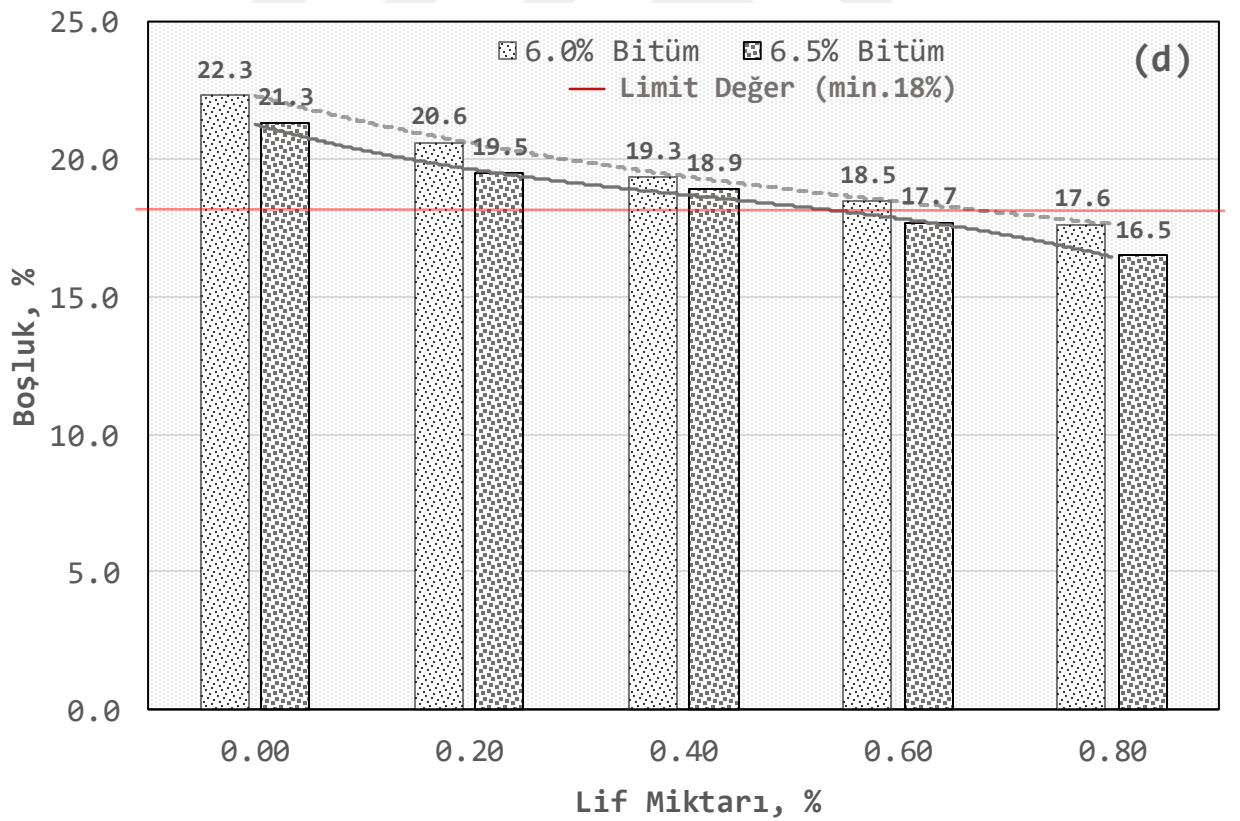
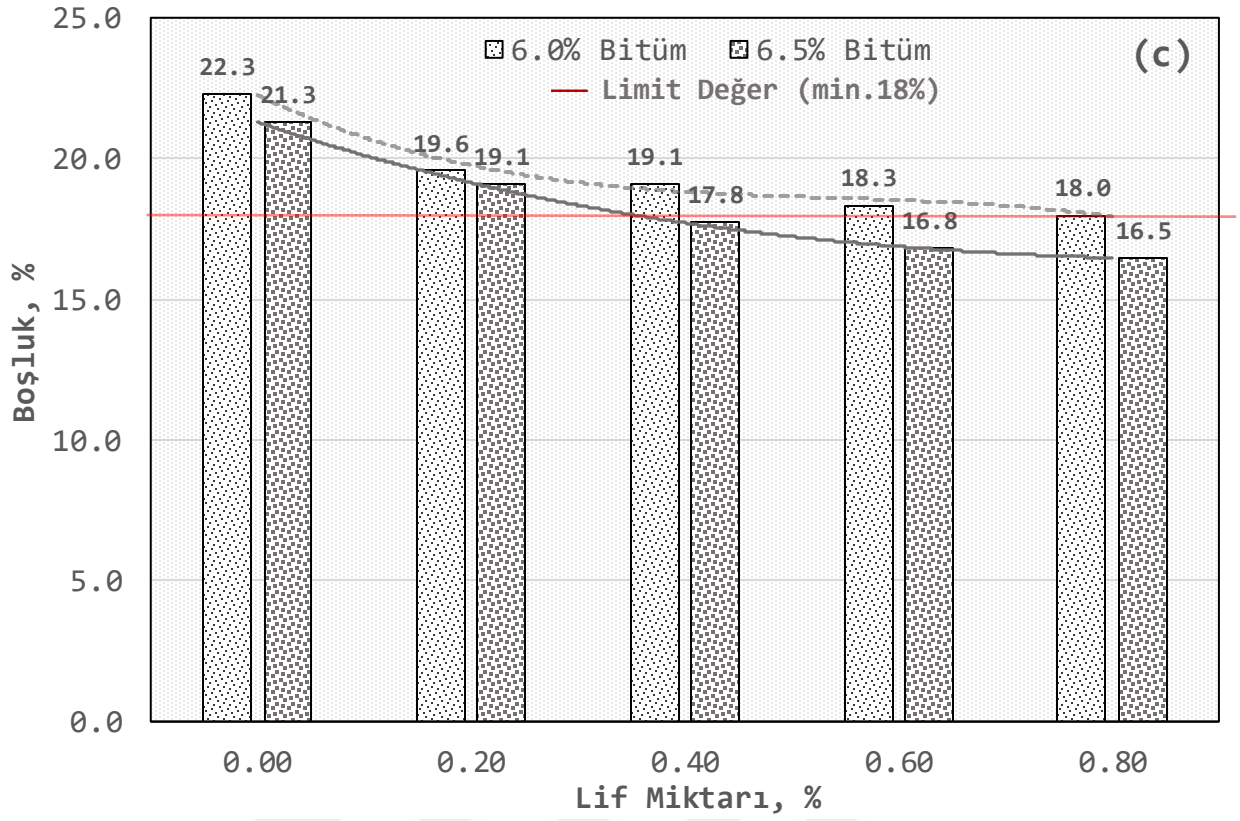
Bu bölümde, geçirimli asfalt kaplamaların performans test sonuçları yer almaktadır. Sıkışmış numuneler üzerinde gerçekleştirilen boşluk analizleri, permeabilite, Cantabro (parça kopma oranı), dolaylı çekme ve su hasarı deney sonuçları değerlendirilmektedir. Fiber katkıların sonuçları karşılaştırılarak en iyi performans sergileyen katkı tipi ve oranları belirlenmiştir.

### 6.1. Boşluk Analiz Sonuçları

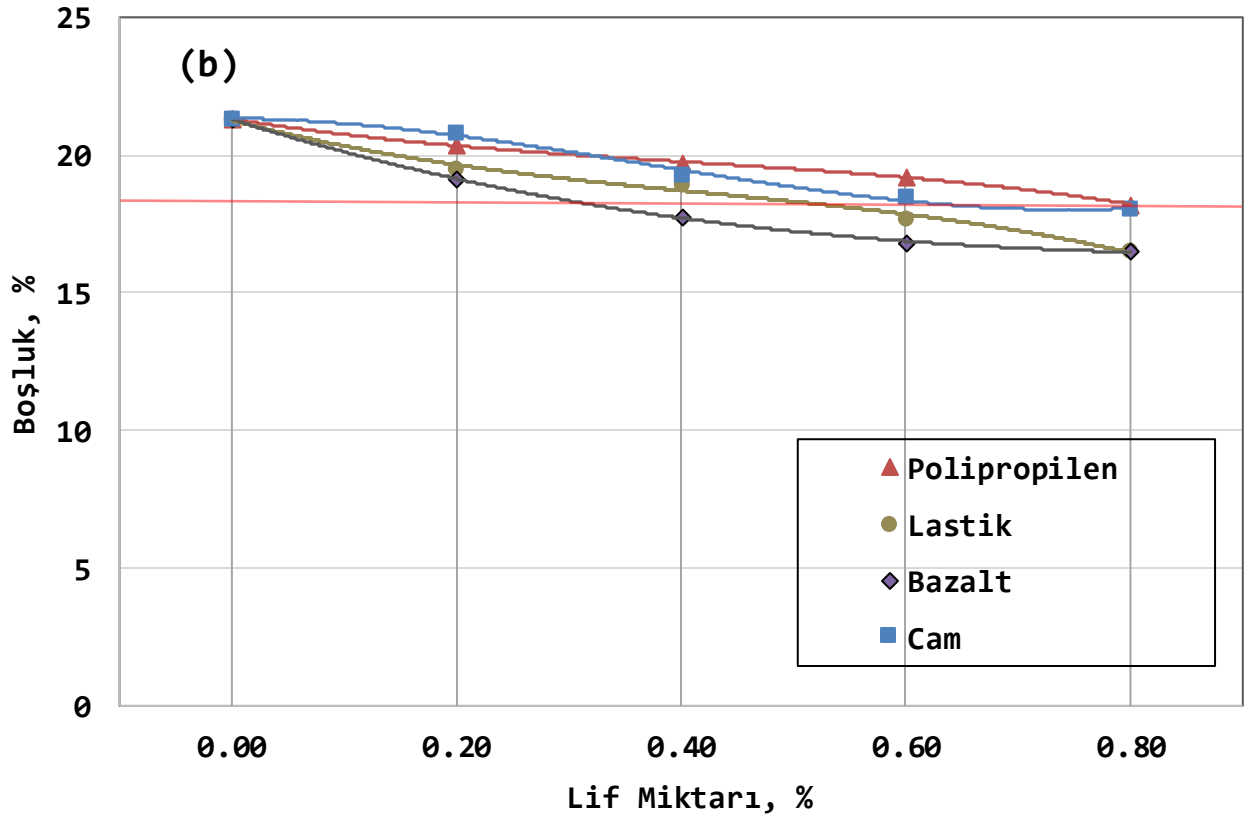
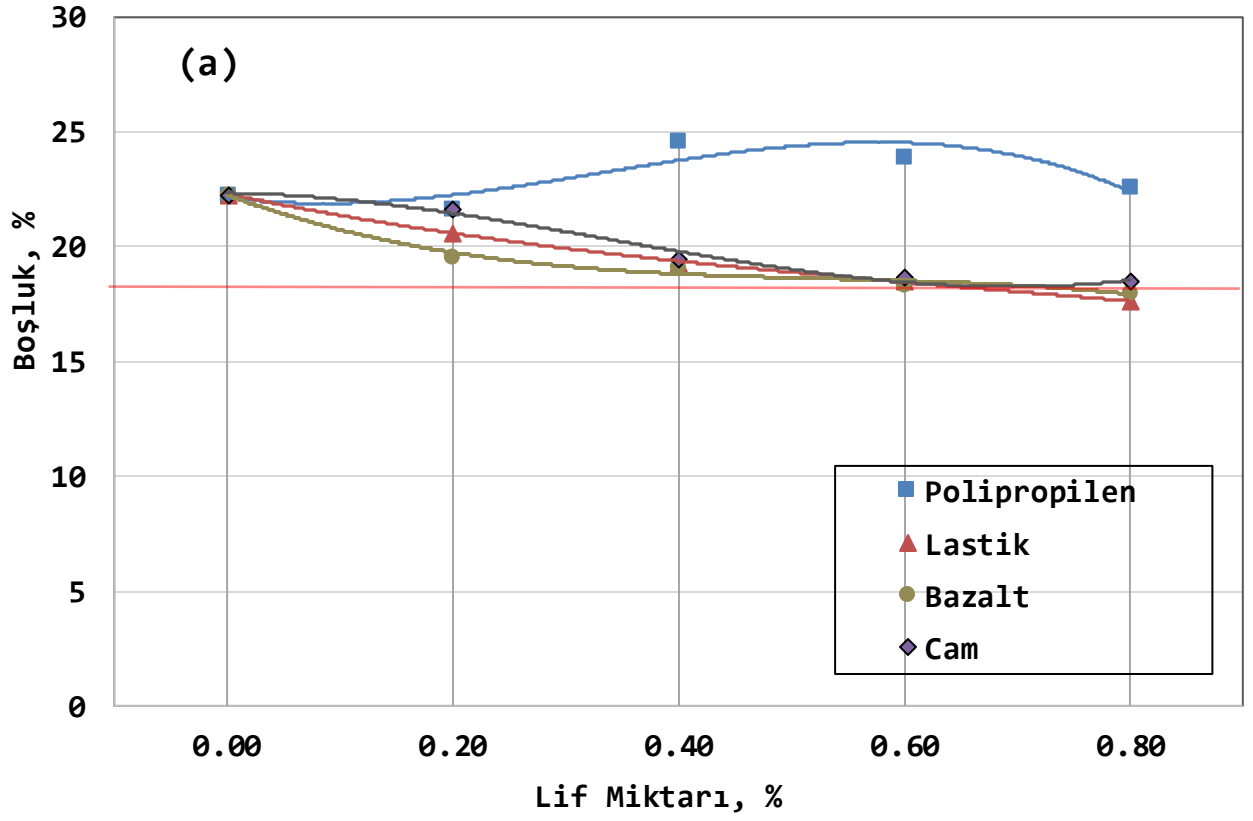
Analizler her bir bitüm oranı ve fiber ilave miktarı için en az üç numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. %6 ve %6.5 bitüm için fiber katkı yüzdelere göre karışım boşluk değerlerinin değişimleri Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de verilmiştir. Dünyada uygulanan GAK tasarım kriterleri incelendiğinde minimum boşluk değerinin %18-22 arasında kabul edildiği görülmektedir (Allex vd., 2006; Moriyoshi vd., 2014).

Polipropilen fiberde boşluk değerlerinin tüm ilave oranlarında kabul edilen minimum boşluk değerinin (%18) üzerinde kaldığı belirlenmiştir (Şekil 6.1a). Ayrıca, %6.0 bitümde fiber katkısının artması ile diğer katkı tiplerinin aksine boşluk oranlarında bir artış görülmektedir (Şekil 6.1a ve 6.2a). Bu durum, karışım içerisinde eriyen polipropilen liflerin bitüm matriksi içerisinde bir büzölmeye sebep olması ile ifade edilebilir. %6.5 bitümde polipropilen lifler diğer liflere göre en büyük boşluk değerlerine sahiptir (Şekil 6.2b). Bazalt fiber ve lastik parçalarında (crumb rubber) beklenildiği gibi bitüm ve fiber katkı miktarları artışıyla boşluk oranları azalmakla birlikte %6.5 bitüm %0.8 lastik parça ilavesi haricinde limit değer elde edilmiştir (Şekil 6.1c ve 6.1d). Cam fiberde ilave oranı arttıkça boşluk oranları azalmaktadır. Her iki bitüm oranında boşluk değerlerinin birbirine yakın olduğu ve tüm ilave oranlarında boşluk değerlerinin %18’den büyük olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.1b). %6.5 bitümde bazalt fiber diğer fiberlere göre en düşük boşluk değerlerine sahipken (Şekil 6.2b), %0.2 ilaveden sonra boşluk değerleri minimum değer altında kalmıştır. Bunda bazalt fiberin karışım içerisinde liflenmesinin daha iyi olduğuna bağlanabilir.





Şekil 6.1: Lifli poroz asfalt karışımların boşluk içerikleri (a) polipropilen lif (b) cam lif (c) bazalt lif (d) lastik lif



Şekil 6.2: Lifli poroz asfalt karışımların boşluk içerikleri (a) 6.0% bitüm (b) 6.5% bitüm

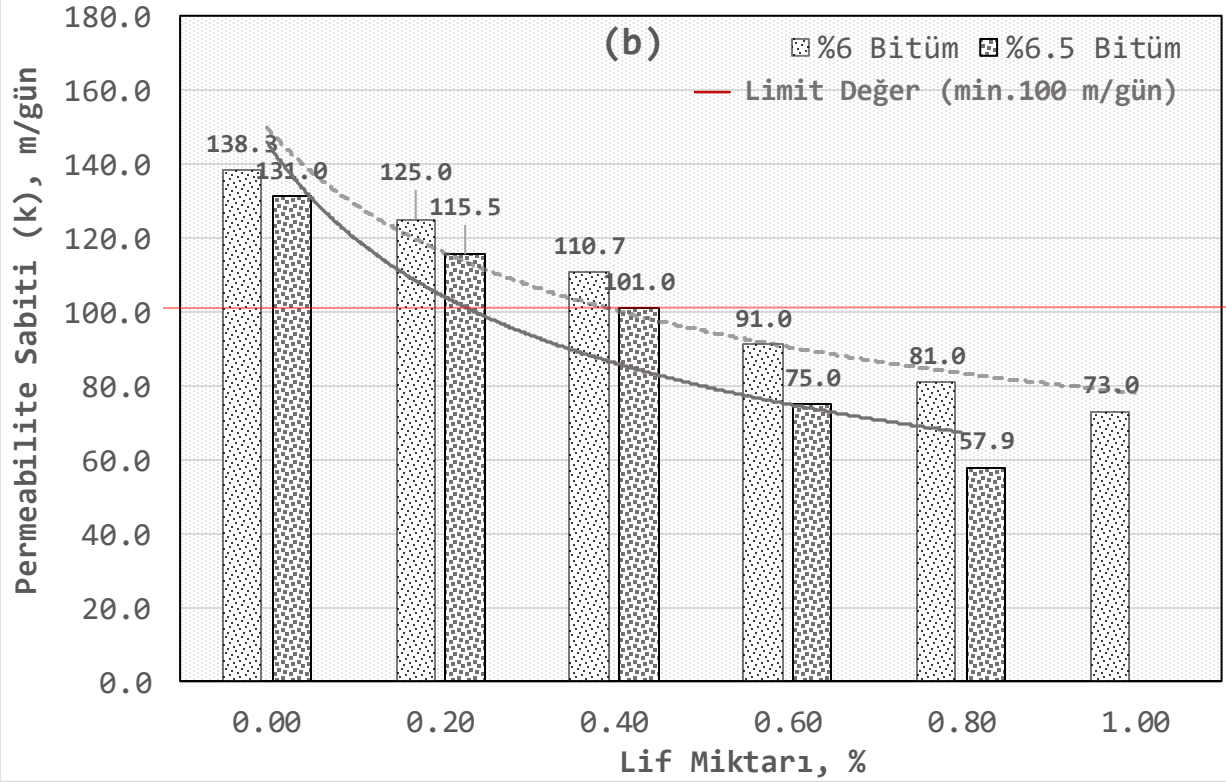
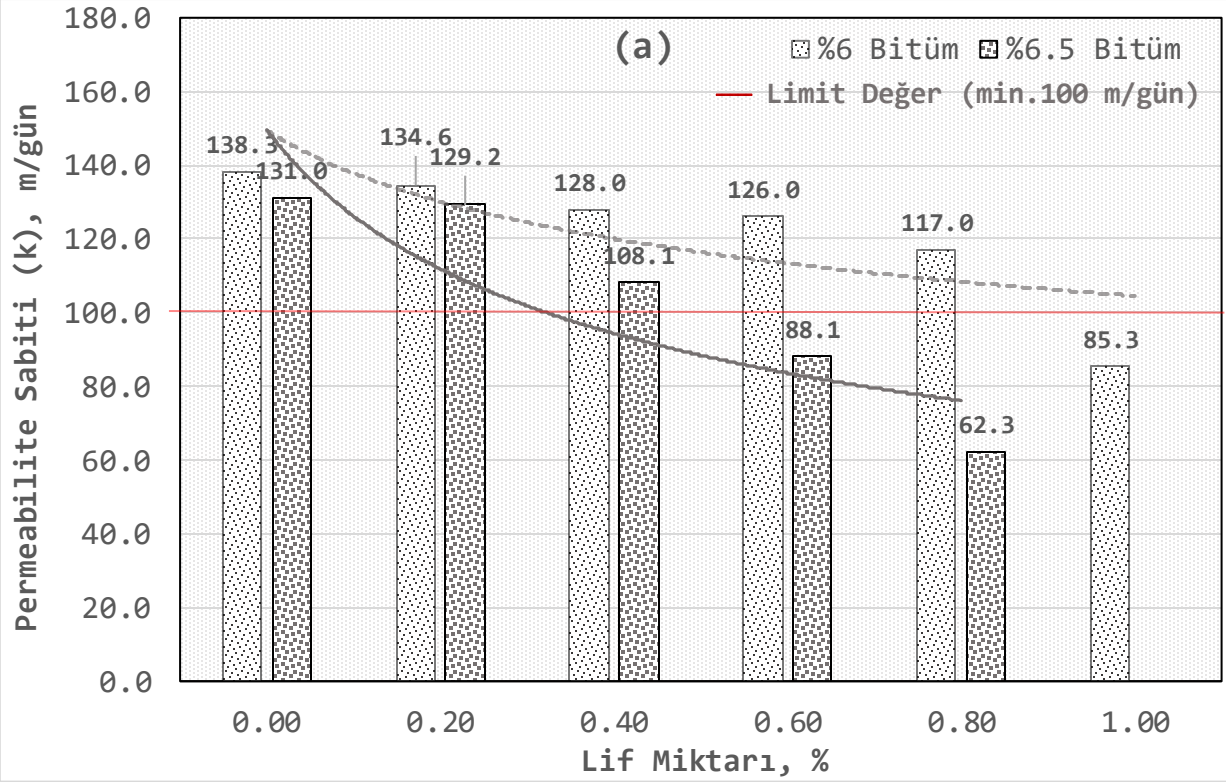


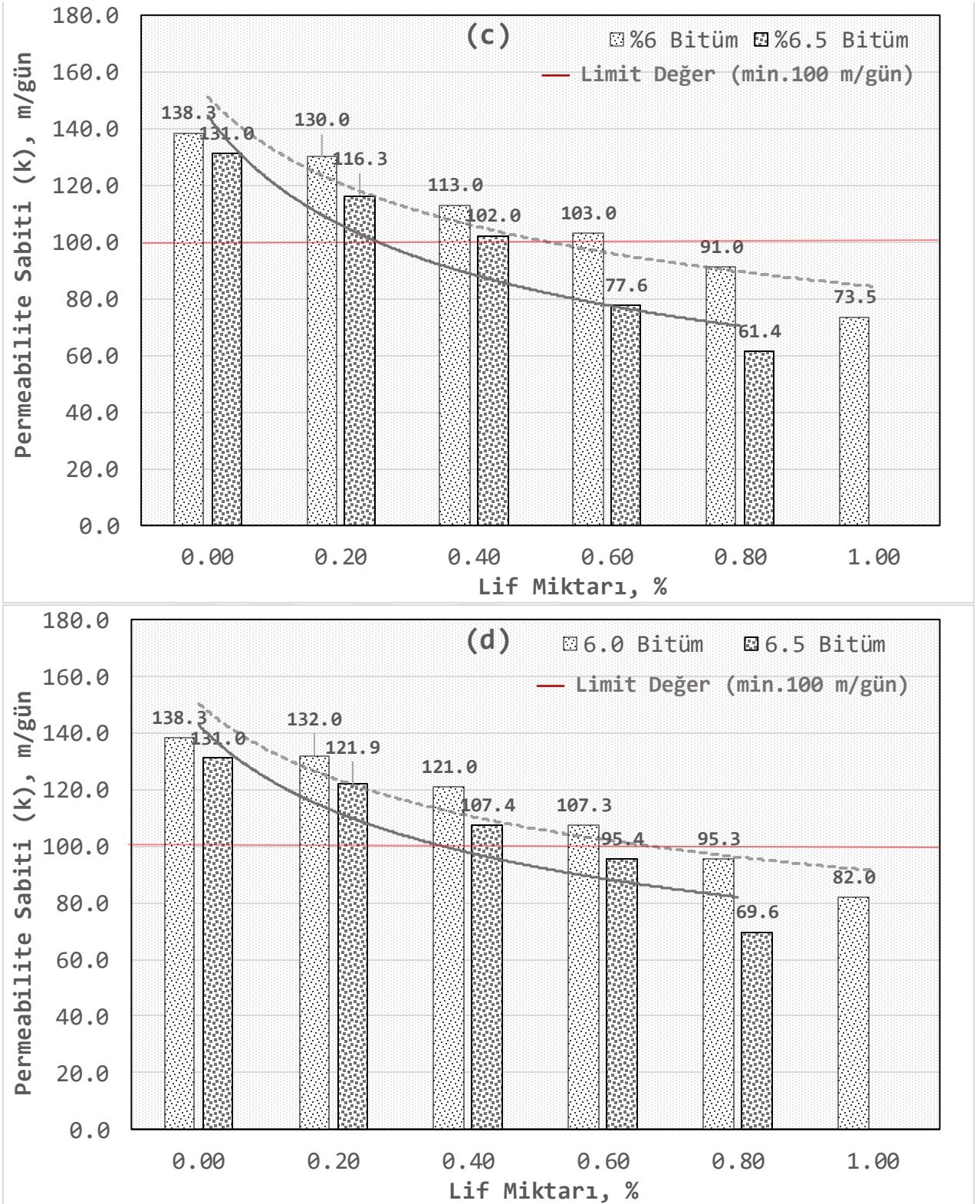
## 6.2. Permeabilite Deneyi Sonuçları

GAK geliştirilme amacına yönelik olan en önemli tasarım parametresi permeabilite özelliğidir. GAK'ların bu özelliğinin bir ölçüsü olan permeabilite katsayıları, deneysel yöntemler kısmında anlatılan "kabarcık tüplü sabit seviyeli permeametre" ile belirlenmiştir. Bu deney, değişen her bir parametre için en az üç numune üzerinde beşer kez gerçekleştirilmiştir. Deneyden elde edilen ortalama değerler Şekil 6.3 ve 6.4'te verilmiştir.

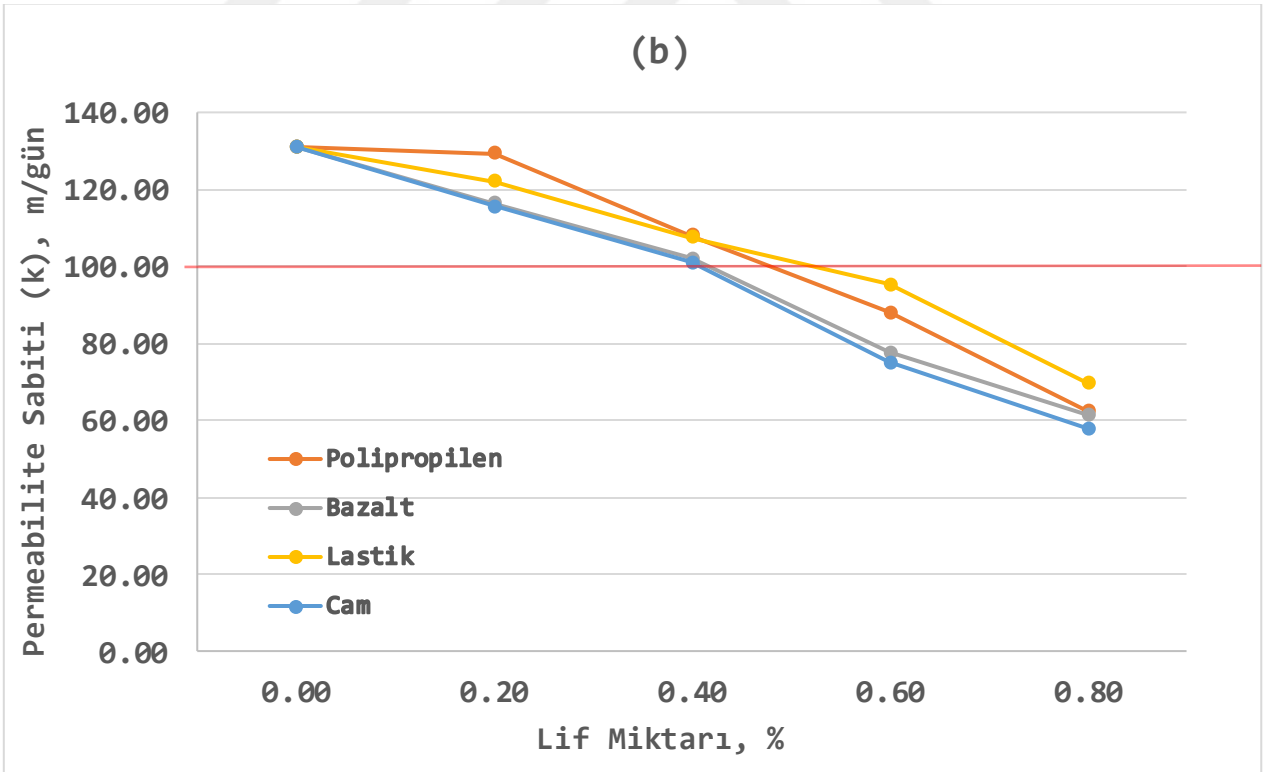
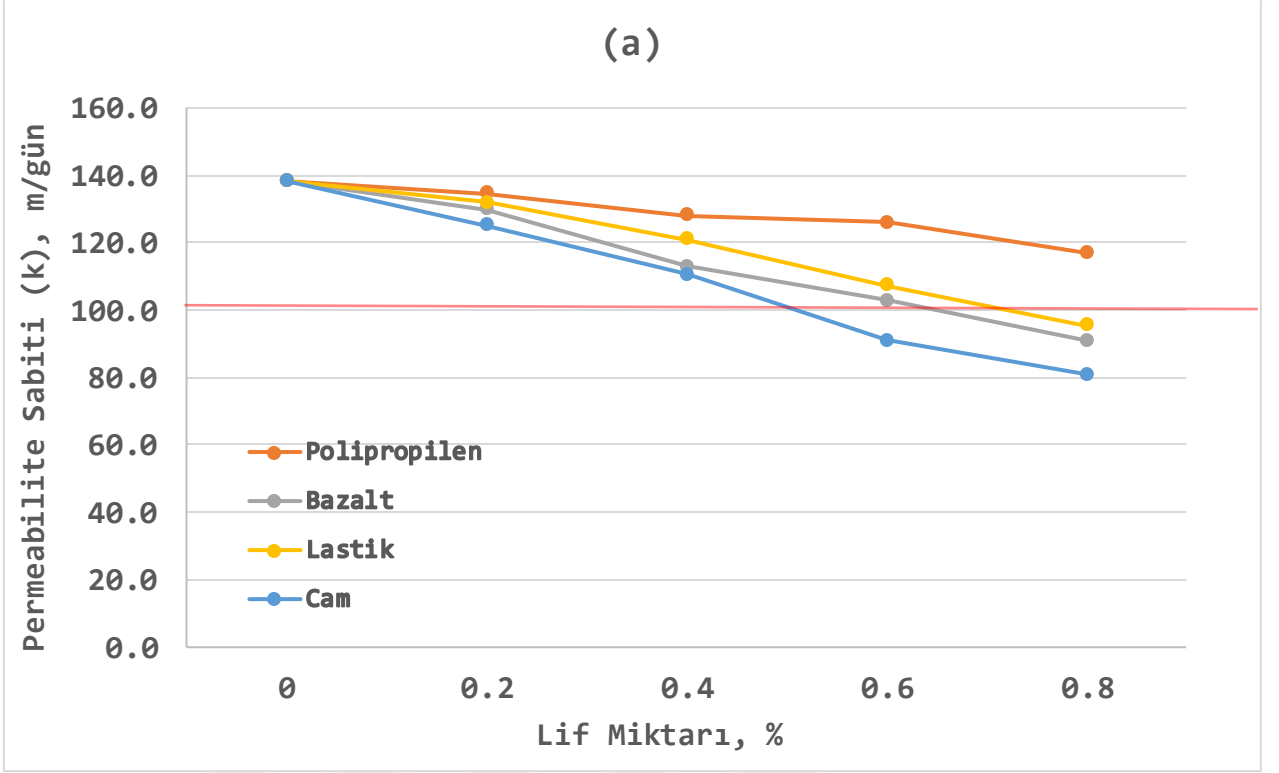
Yapılan önceki çalışmalar ve dünyada kabul gören bazı standartlarda, geçirimli kaplama sistemleri için permeabilite katsayısı değerinin yaygın olarak 0,12-0,50 cm/s aralığında olduğu görülmektedir (Mallick vd., 2000; FDOT, 2012). Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde, öngörülen kriterler arasındaki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

Deney sonuçları beklenildiği gibi bitüm ve fiber miktarlarındaki artışla permeabilite katsayılarının azaldığı görülmektedir (Şekil 6.3 ve 6.4). Fakat bu azalma oranı %6.0 bitümdeki poliprobilende daha az düzeyde olup iki bitüm oranı arasındaki farkın diğer fiberlerden yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 6.3a). Polipropilenin karışımındaki bu davranışı boşluk analizi ile örtüşmektedir. %6.5 bitümde tüm fiberler için genel olarak %0.4'ten sonra permeabilite katsayılarının kabul edilen limit değer (100 m/gün) altına düştüğü belirlenmiştir (Şekil 6.3). %6 bitümde tüm katkı oranlarında ve %6.5 da %0.2'de polipropilen lifden en iyi hidrolik geçirgenlik değerleri elde edilmiştir (Şekil 6.4a ve 6.4b).





Şekil 6.3: Lifli poroz asfalt karışımların permeabilite katsayıları (a) polipropilen lif (b) cam lif (c) bazalt lif (d) lastik lif

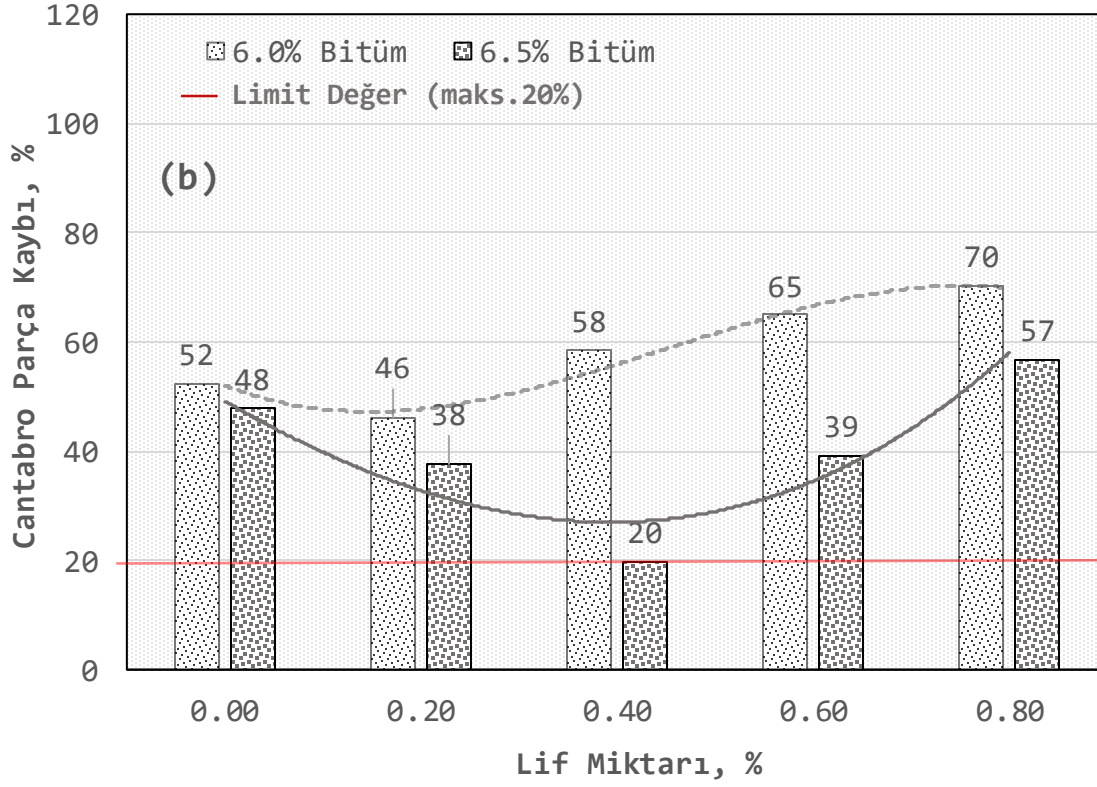
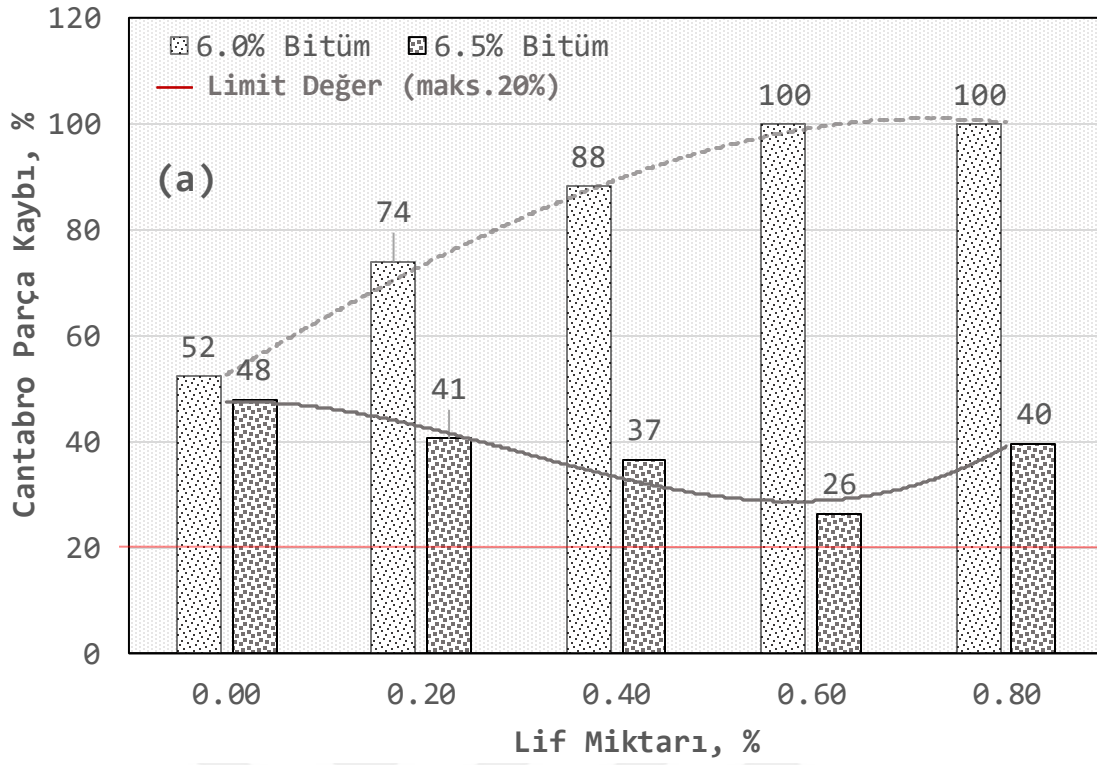


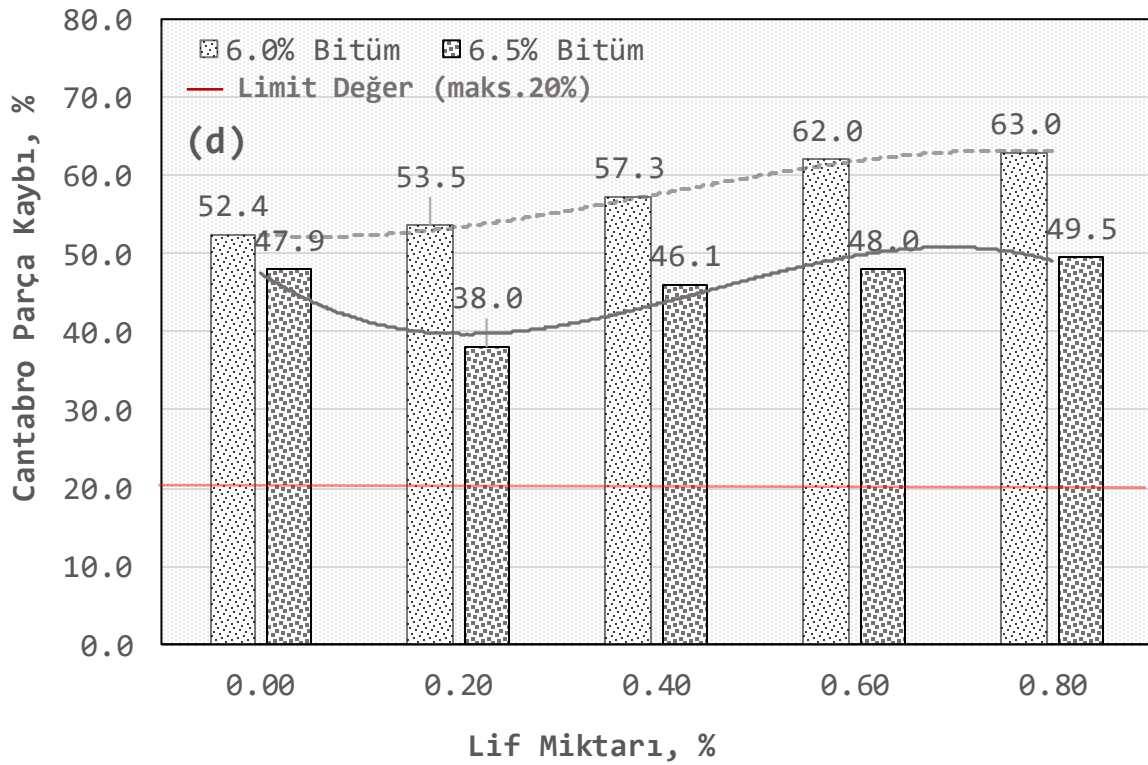
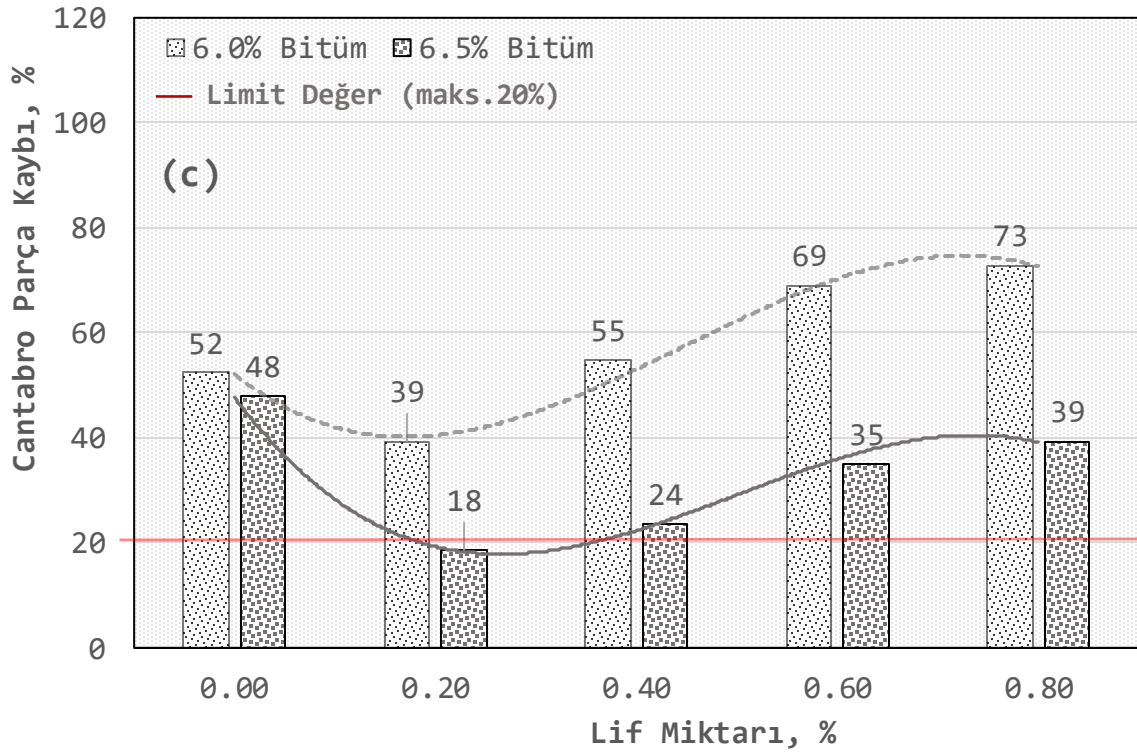
Şekil 6.4: Lifli poroz asfalt karışımların permeabilite katsayıları (a) 6.0% bitüm (b) 6.5% bitüm

### 6.3. Cantabro Parça Kaybı Deneyi Sonuçları

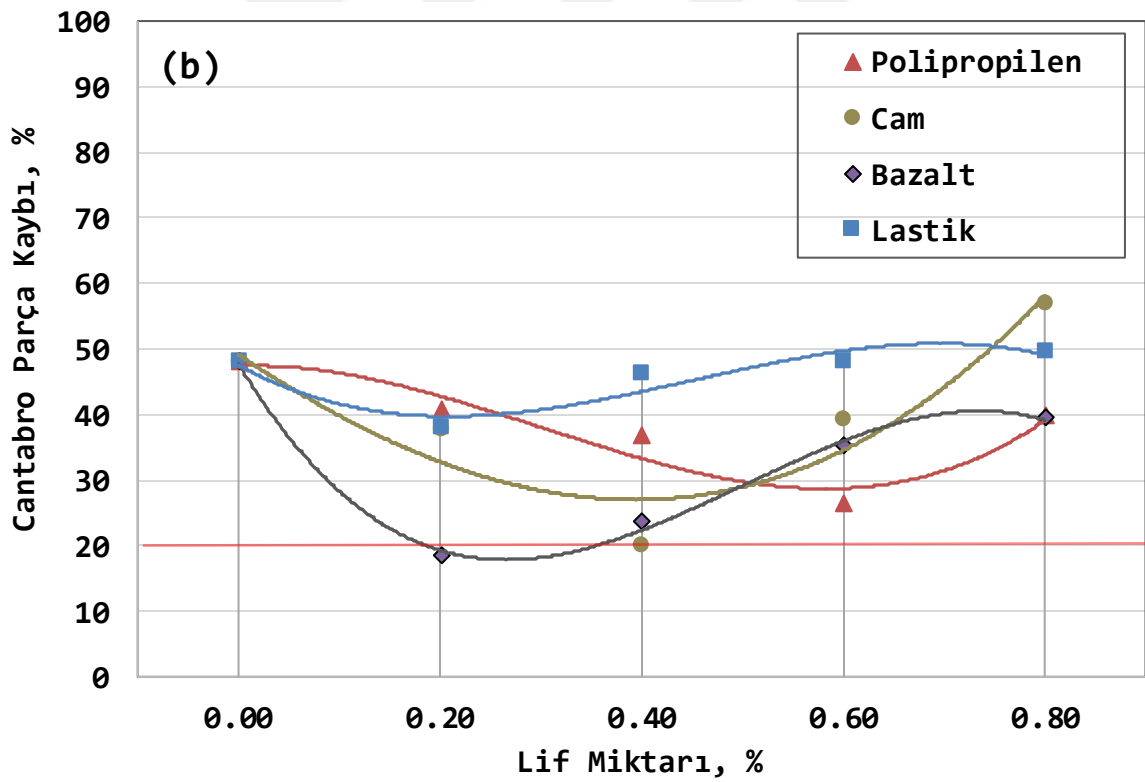
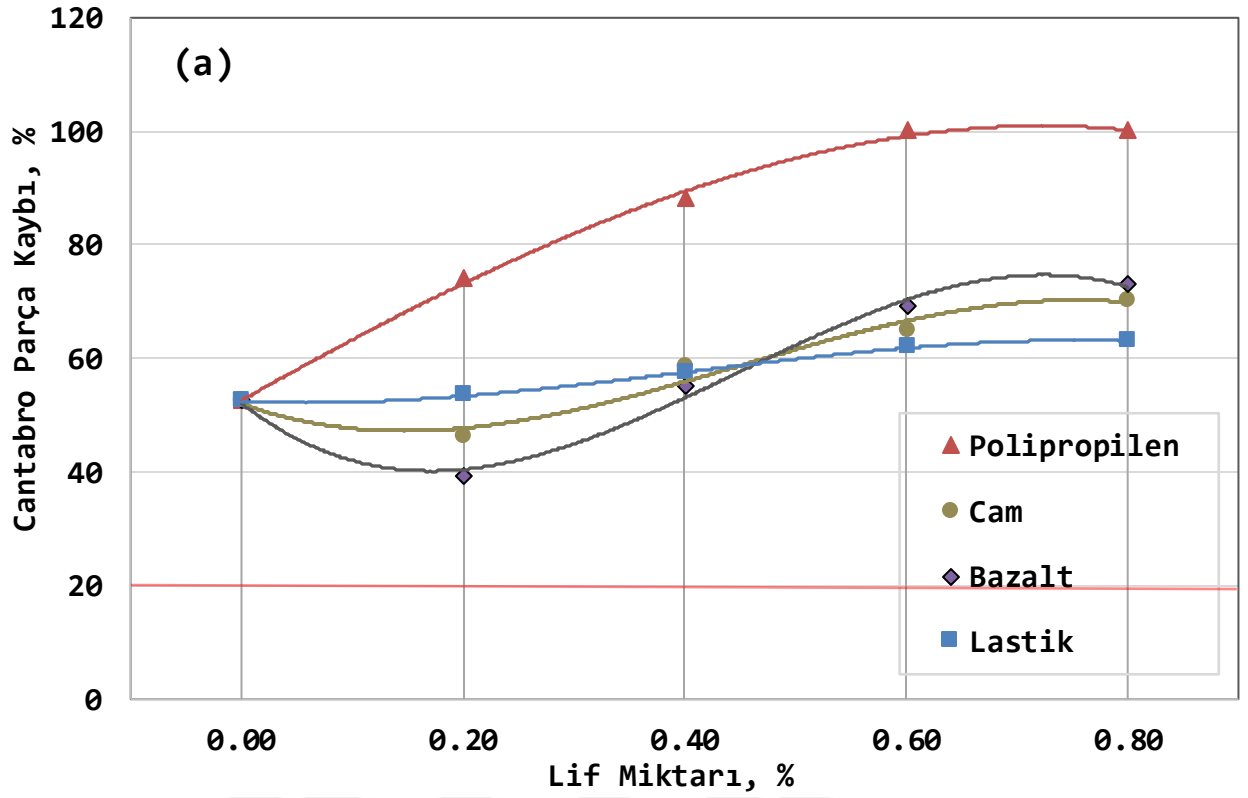
GAK'larda yapısı itibariyle görülen en önemli bozulma, kaplamada meydana gelen parça kaybı (sökülmeler)'dir. Bu çalışmada fiber katkılarıyla iyileştirilmesi amaçlanan en önemli tasarım kriterlerinden biri de sökülme direncidir. Bu özelliğin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan Cantabro parça kaybı deneyi, bitüm ve fiber katkı oranları için en az üç numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu deney için genellikle kabul gören maksimum değer %20 olduğu anlaşılmaktadır (Alvarez vd., 2006; Moriyoshi vd., 2014).

Fiber tiplerine ait Cantabro parça kaybı deney sonuçlarının verildiği Şekil 6.5 incelendiğinde %6.5 bitümde parça kaybı oranının %6.0'ya göre önemli düzeyde azaldığı görülmektedir. Bu %6.5 karışımlarda optimum bitüm kalınlığına işaret etmektedir. %6.0 bitümde genel olarak fiber ilavesiyle parça kaybı miktarının arttığı görülmektedir (%0.2 bazalt ve cam fiber hariç). %6.5 bitümde ise belli bir fiber ilavesinde minimum parça kaybı elde edilmiştir. Polipropilen lifde %6.0'da aşınma değerlerinin en yüksek değerde olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.6a). Bu sonuç, eriyen polipropilen liflerin bitüm matrisini gevreklettiği ve karışımları kırılğan hale getirdiği şeklinde yorumlanabilir. %6.5 bitümde bu durum azalmış %0.6 ilavede %26 aşınma kaybı elde edilmiştir (Şekil 6.5a). Cam fiberde ise %0.40'da kabul edilebilir sınır değer olan %20 elde edilmiştir (Şekil 6.5b). Genel olarak %6.5 bitüm oranında en iyi sonucun alındığı bazalt fiberin %0.2 ilave oranında parça kaybı değeri %18 olarak belirlenmiştir (Şekil 6.5c ve 6.6a). Lastik liflerde ise en büyük aşınma değerlerinin olduğu görülmektedir. Bu, lastik liflerin özgül ağırlığı ve lif yapısına dayandırılabilir.





Şekil 6.5: Lifli poroz asfalt karışımların cantabro parça kaybı (a) polipropilen lif (b) cam lif (c) bazalt lif (d) lastik lif



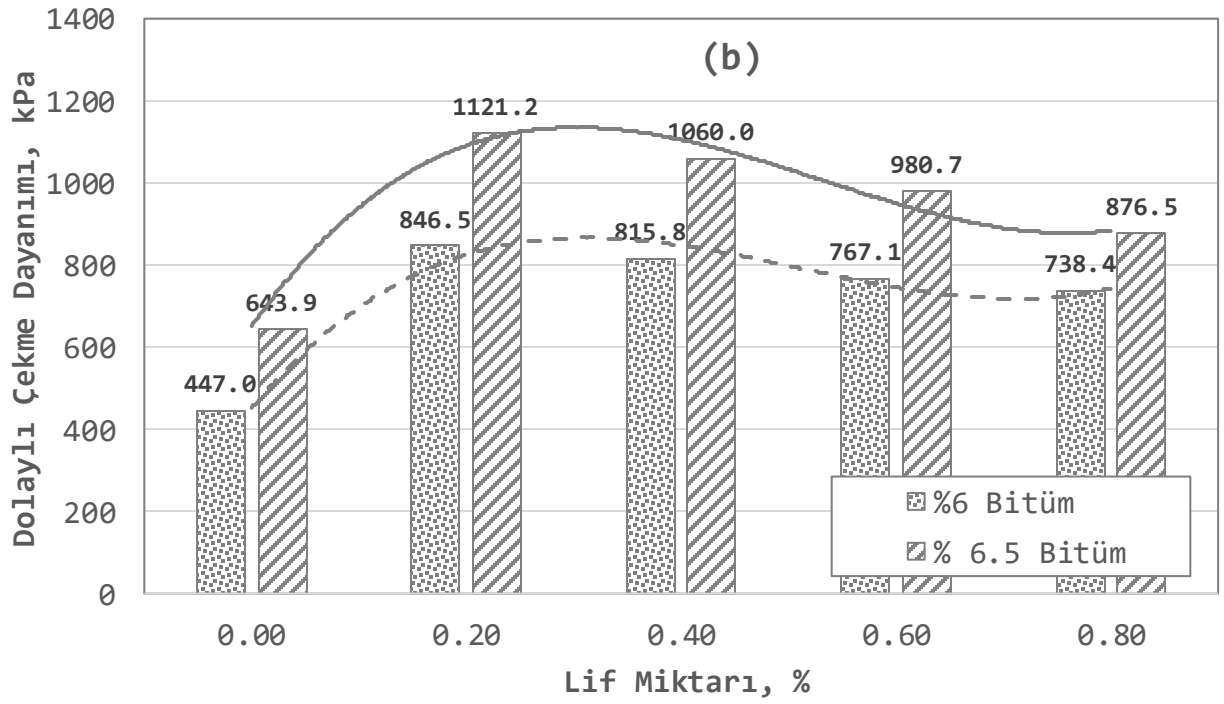
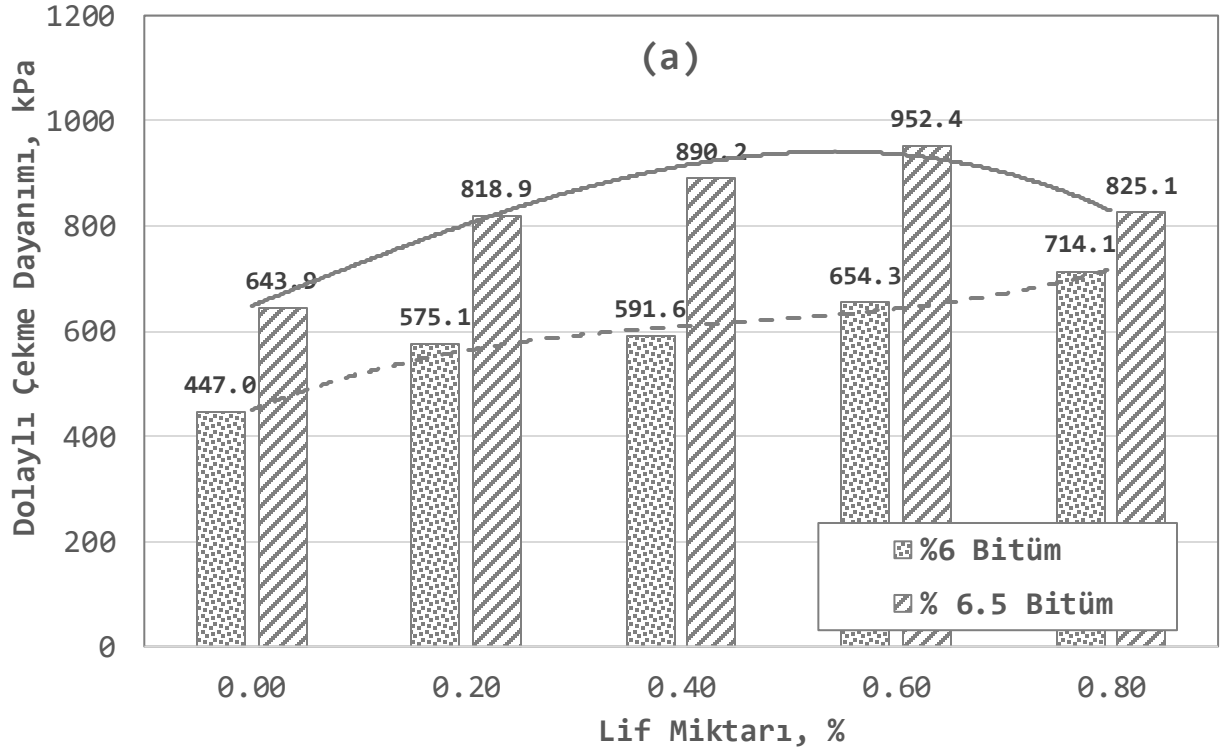
Şekil 6.6: Lifli poroz asfalt karışımların cantabro parça kaybı (a) 6.0% bitüm (b) 6.5% bitüm

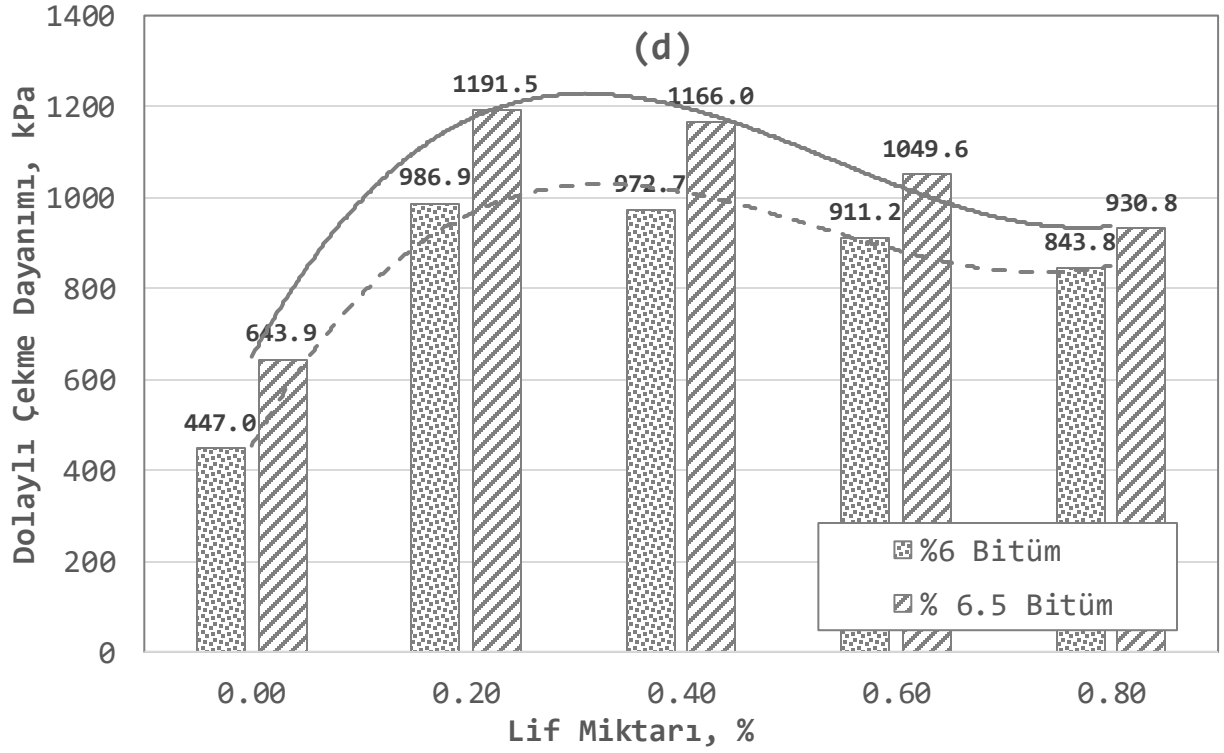
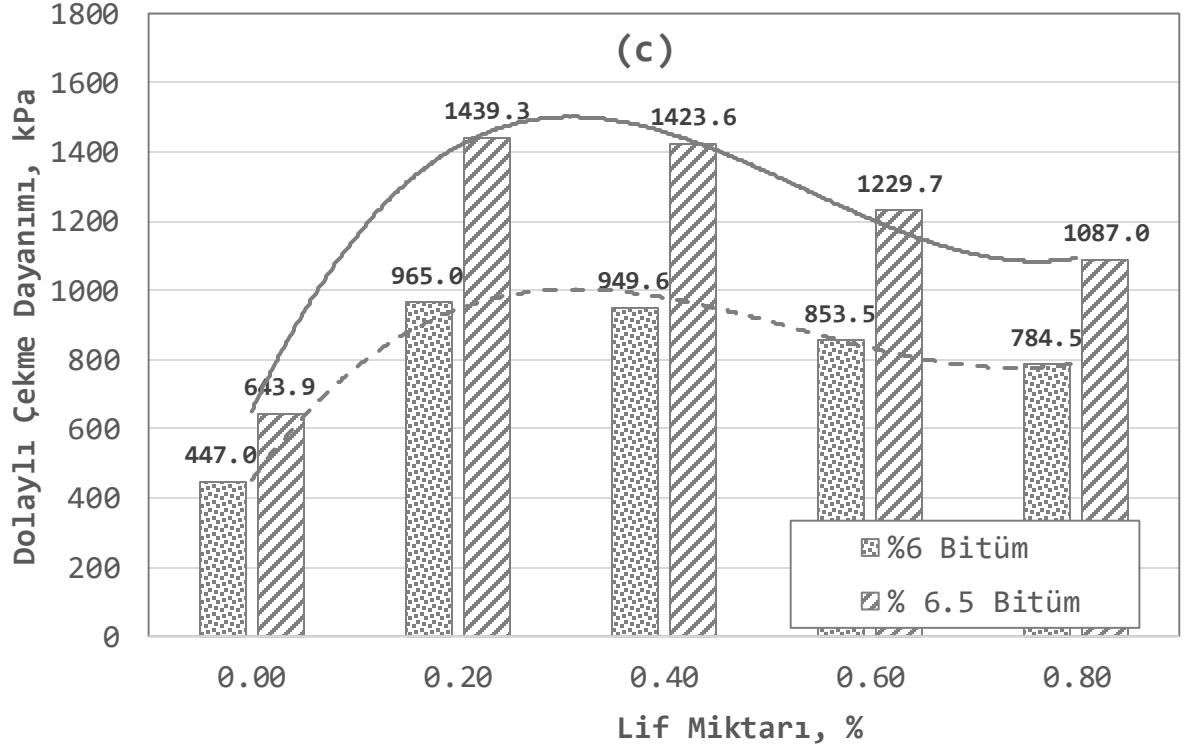


#### 6.4. Dolaylı Çekme Dayanım Deneyi Sonuçları

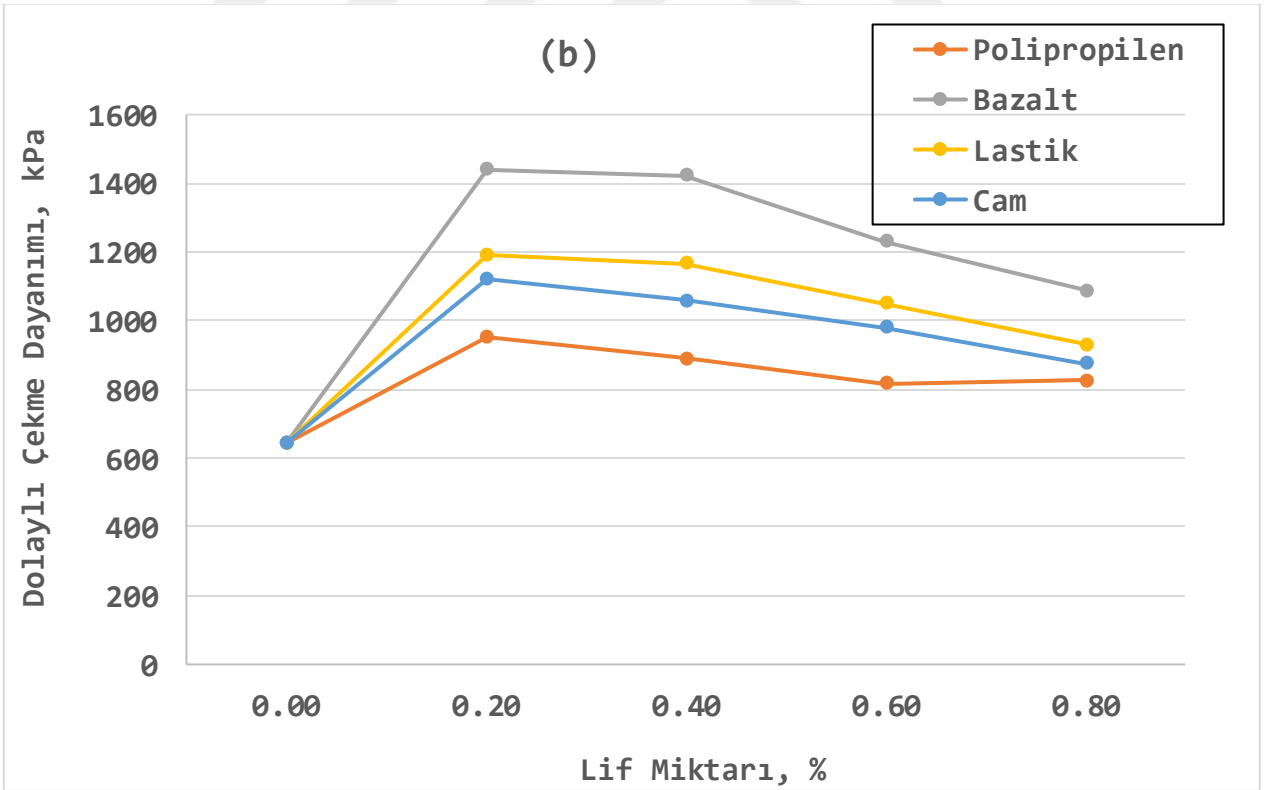
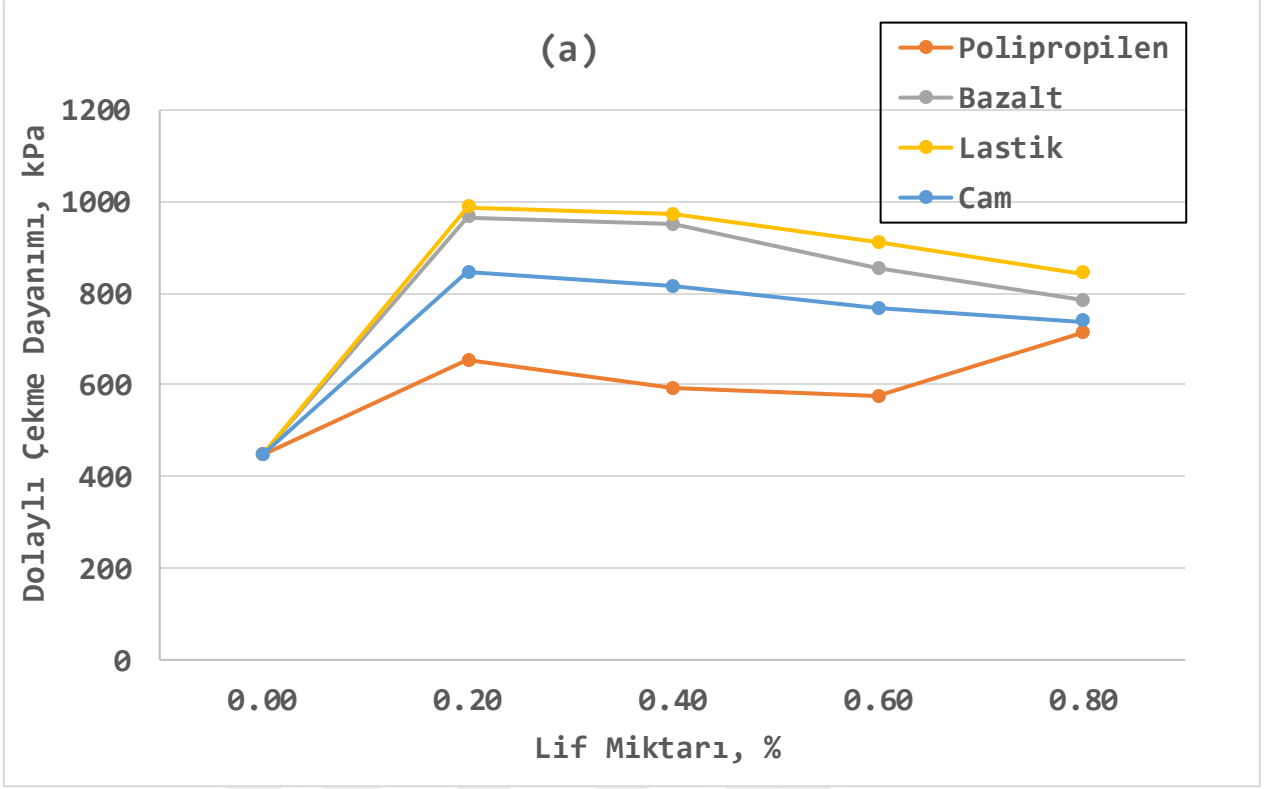
Bu deney, bitüm filminin çekme dayanımının ön plana çıktığı geçirimli asfalt kaplama karışımların tasarımı açısından önemlidir. Çalışmada kullanılan fiber katkıların etkisinin belirlenmesi olan araştırma konusu açısından ayrıca önem taşımaktadır. Değişen her bir parametre için en az üç numune üzerinde yapılan deneyde, dolaylı çekme dayanım değerleri Eşitlik 4 kullanılarak hesaplanmıştır.

Dolaylı çekme dayanım deney sonuçları Şekil 6.7 ve 6.8'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde %6.5 bitümde daha yüksek değerlerin elde edildiği görülmektedir. Tüm fiber tiplerinde DÇD değerlerinin iyileştiği ve belirli katkı oranlarında maksimum değerlere ulaşıldığı belirlenmiştir. Bu deneyde, fiber katkılı karışımların sergilediği davranışlar Cantabro deneyini yansıtmaktadır. %6.5 bitümde polipropilen fiber ilavesiyle görülen artış eğiliminde maksimum değer %0.6'da elde edilmiştir (Şekil 6.7a). Bu ilave oranı Cantabro deneyinde en iyi sonucun alındığı ilave oranı ile aynıdır. Cam fiberde maksimum DÇD %0.2 ilavesindedir. %6.5 bitümde %0.2 ilave oranında dayanım değeri %74 artmıştır. Cantabro aşınma deneyinde limit değerin elde edildiği %0.4'de DÇD değerinin maksimum değere yakın olduğu görülmektedir (Şekil 6.7b). %6.5 bitümde bazalt fiberden en yüksek DÇD değerleri elde edilmiştir (Şekil 6.8b). Cantabro aşınmanın en iyi sonucunun alındığı oran olan %0.2'de DÇD kontrol numunelerine göre %124 oranında iyileşmiştir (Şekil 6.7c). %6.0 bitümde en yüksek DÇD değerlerin, %6.5 bitümde ise bazalt fiberden sonra en iyi sonucun lastik liflerden elde edildiği belirlenmiştir (Şekil 6.8a ve 6.8b). Lastik lifler, %6.0 ve %6.5 bitümlerdeki DÇD dayanım değerlerinin birbirine yakın olduğu lif tipidir. Lastik fiberde maksimum DÇD %0.2'de elde edilmiştir (Şekil 6.7d). Dolaylı çekme dayanımında iyi bir performans sergilen lastik fiberin Cantabro parça kaybı deney sonuçlarında limit değere ulaşamadığıdır.





Şekil 6.7: Lifli poroz asfalt karışımların dolaylı çekme dayanımları (a) polipropilen lif (b) cam lif (c) bazalt lif (d) lastik lif

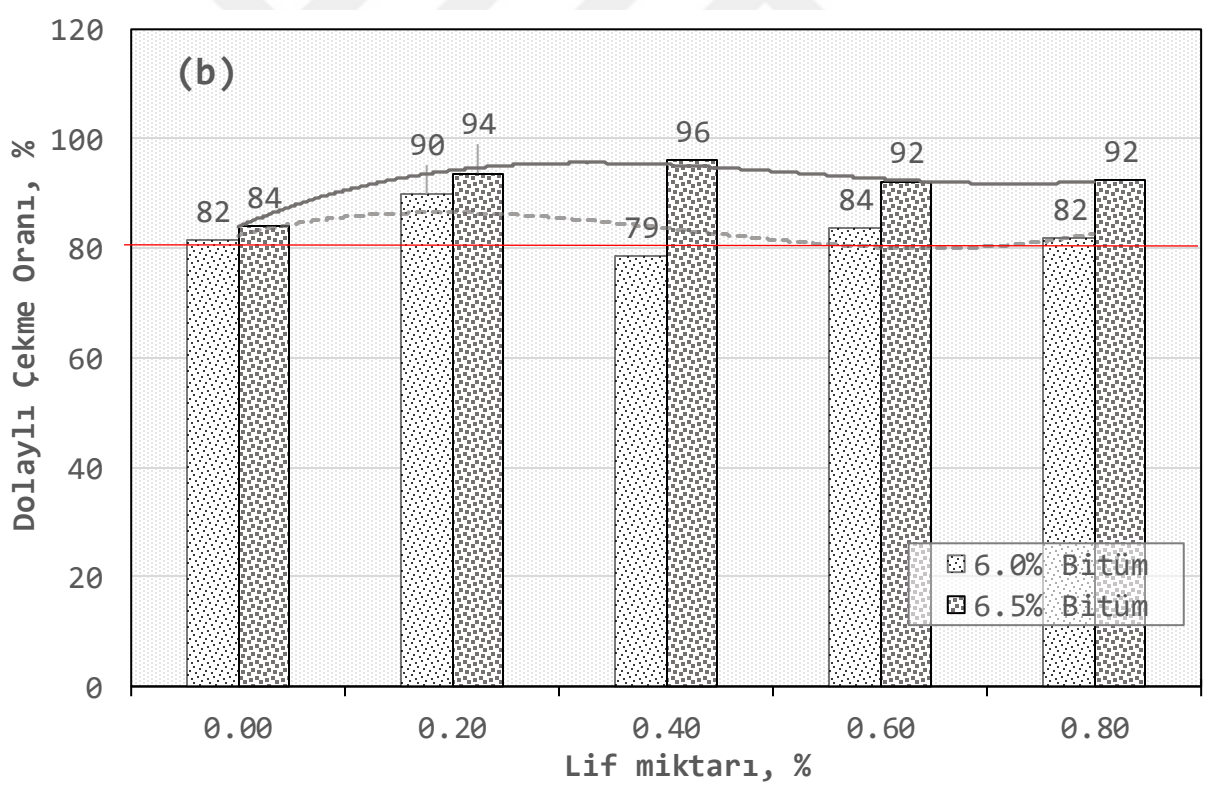
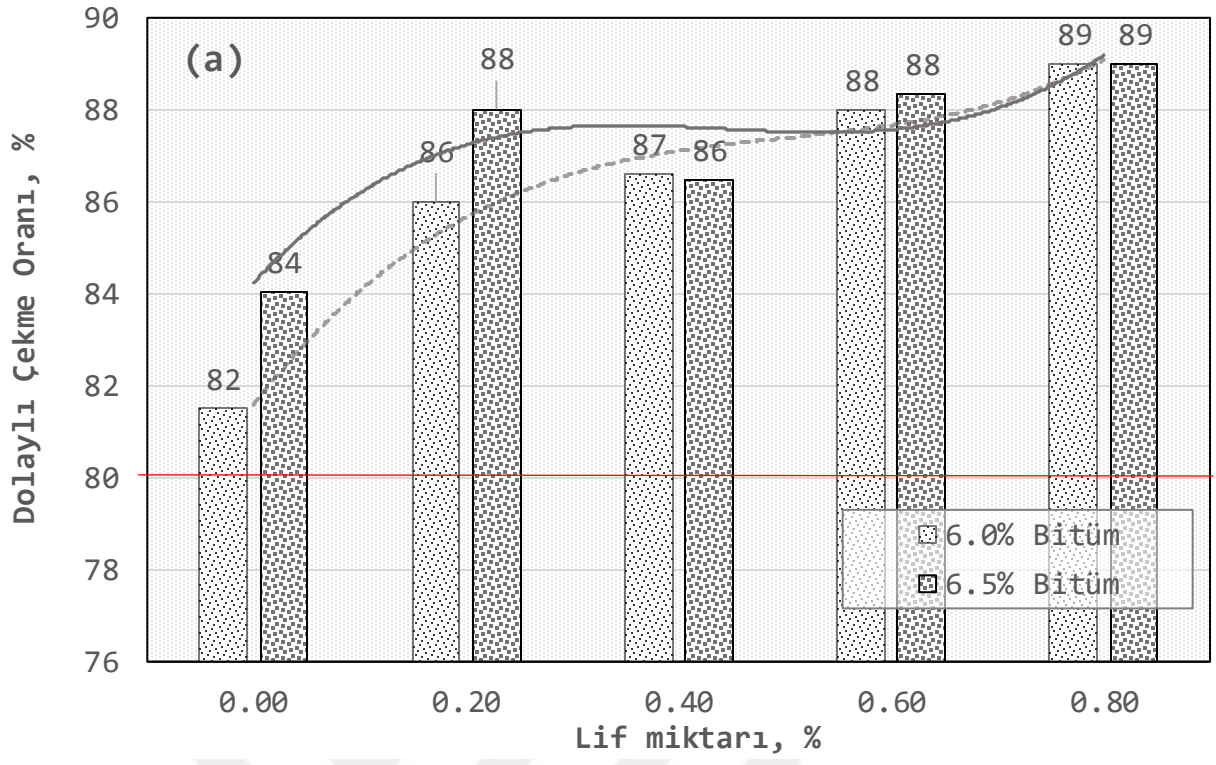


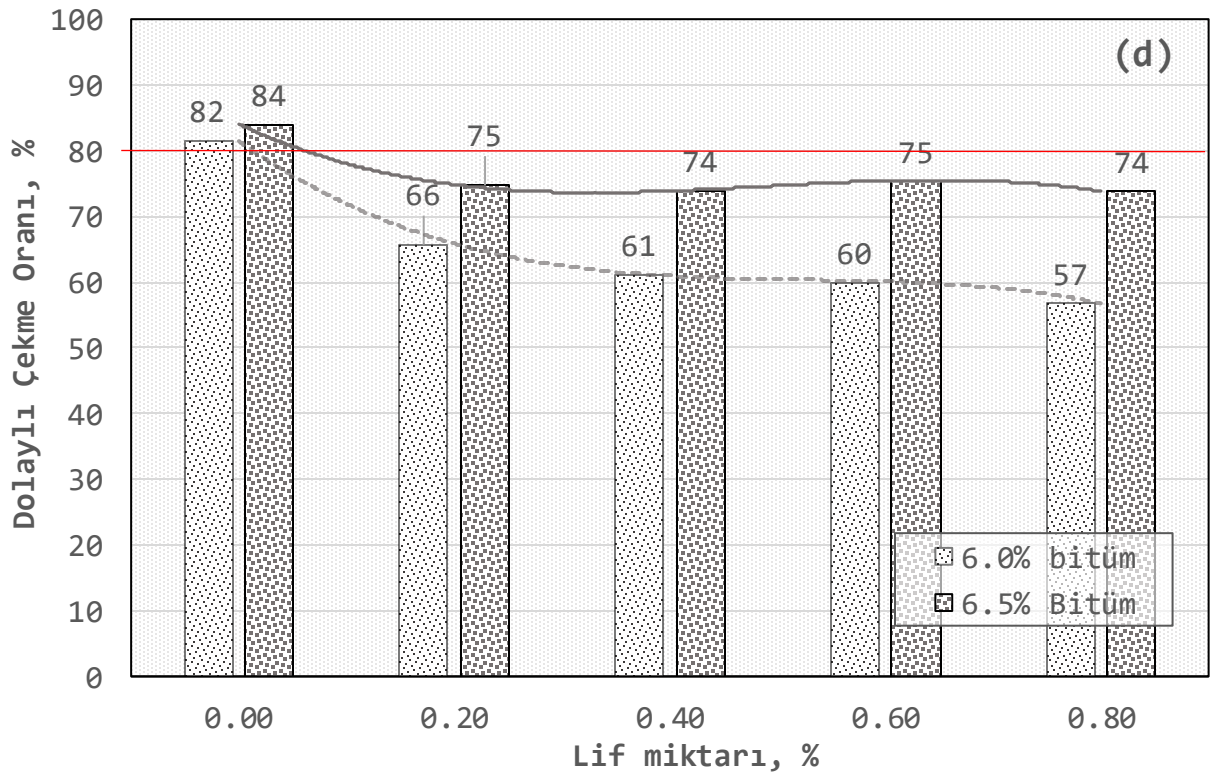
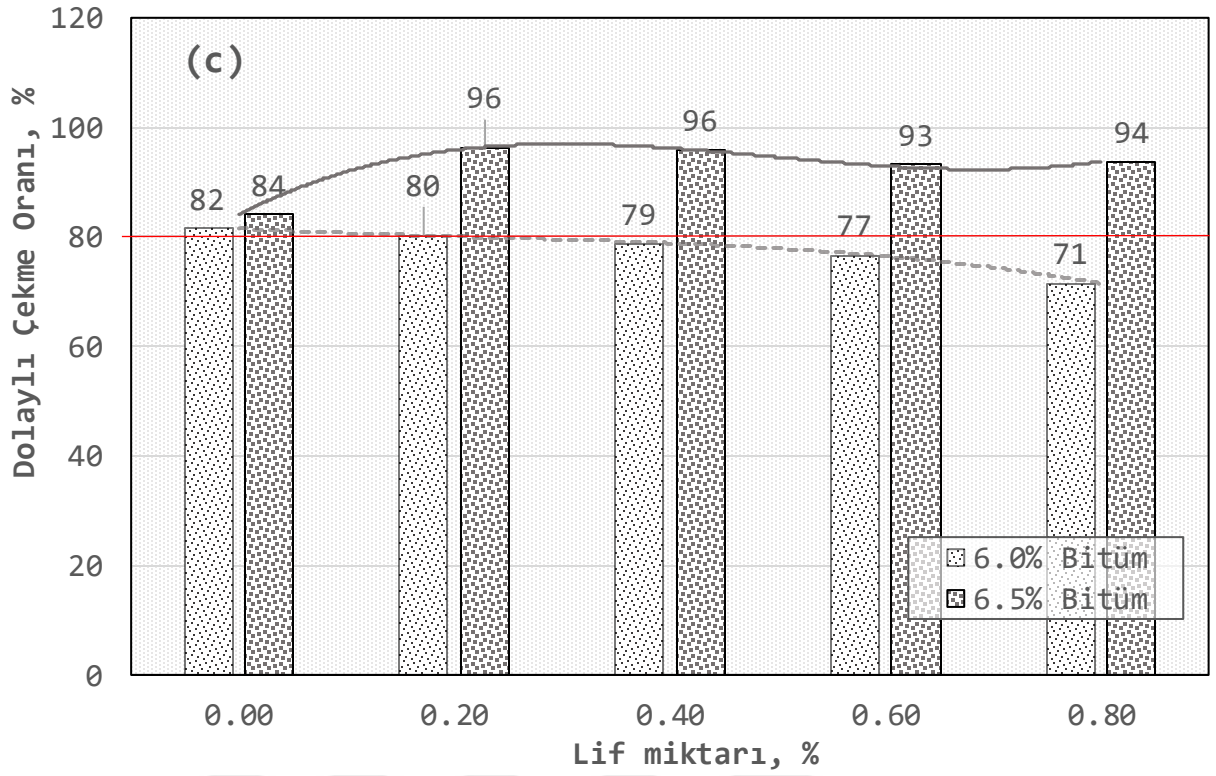
Şekil 6.8. Lifli poroz asfalt karışımların dolaylı çekme dayanımları (a) 6.0% bitüm (b) 6.5% bitüm

## 6.5. Nem Hasarı Deney Sonuçları

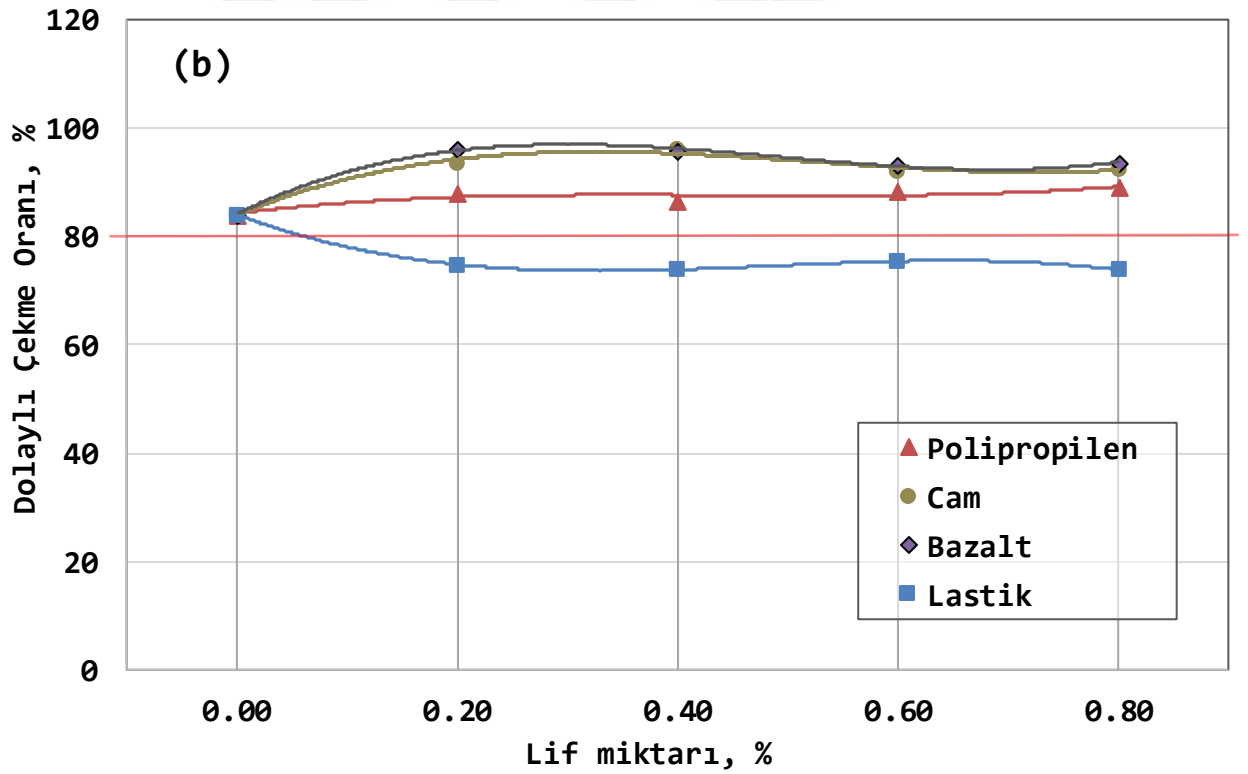
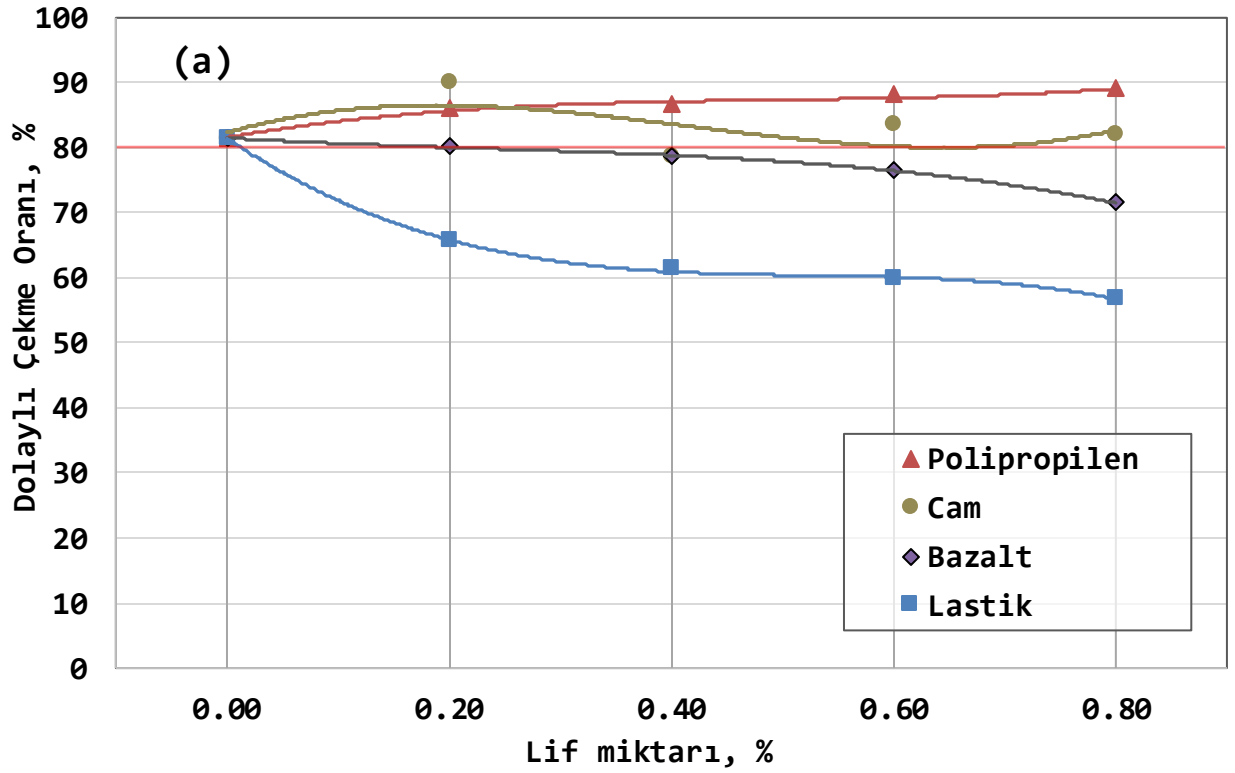
Geçirimli asfalt kaplamaların tasarım doğası gereği suyla temasları geleneksel karışımlara nazaran çok daha fazladır. Agregası ve bitüm aderansını ve bitüm matriksinin kohezyonunu zayıflatarak soyulmaya sebep olan nem, geçirimli kaplamada oluşan bozulmaları hızlandırmaktadır. Karışımların nem hasarından 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. Nem hassasiyetinin bir ölçüsü olarak, “çekme dayanım oranı” belirlenmiştir.

Katkısız kontrol numunelerinin nem hassasiyetlerinin ölçüsü kabul edilebilir değer olan %80 sağlamaktadır. Polipropilen katkısının DÇO iyileştirdiği görülmektedir. %0.40 ilave miktarından sonra her iki bitüm yüzdesinde DÇO değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.9a). Fiber tipleri incelendiğinde genel olarak %6.5 bitümde nem hassasiyetlerinin %6.0 bitüme göre daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 6.9). %6.5 bitümde bazalt ve cam fiber DÇO değerlerinin birbirine yakın olduğu ve en iyi sonuçları verdiği belirlenmiştir (Şekil 6.10b). Bu fiberlerde %6.0 bitümde genel itibariyle kontrol numunelerine göre bir iyileşme sağlanamamıştır. Bu durum, optimum bitümde film kalınlığının etkisinin nem hassasiyetindeki önemini göstermektedir. Lastik fiberde ise her iki bitüm yüzdesinde de DÇO değerlerinin kontrol karışımlarından daha düşük olduğu ve kabul edilen minimum sınır değerinin (%80) altında kaldığı belirlenmiştir (Şekil 6.9d). Bu durum Cantabro dane kaybında açıklandığı gibi kaba agregası danelerini saran bitüm matriksinin aderansını zayıflatmaktadır.





Şekil 6.9: Lifli poroz asfalt karışımların dolaylı çekme oranları (a) polipropilen lif (b) cam lif (c) bazalt lif (d) lastik lif



Şekil 6.10: Lifli poroz asfalt karışımların dolaylı çekme oranları (a) 6.0% bitüm (b) 6.5% bitüm



## 6.6. Karışım Tasarım Sonuçları (Results of mixture design)

Tablo 6.1’de kontrol ve fiber katkıli karışımlara ait optimum tasarım sonuçları verilmiştir. Tüm karışımlar için en iyi tasarım değerlerinin %6.5 bitüm oranında elde edildiği belirlenmiştir. Basalt ve cam fiberlerde tüm tasarım kriterleri sağlanırken polipropilen lif ve lastik parçalarında özellikle Cantabro parça kaybı değerinin sağlanamamıştır. Cantabro parça kaybı değeri kontrol karışımlarında da sağlanamamıştır. Tasarım değerleri incelendiğinde en iyi sonuçların %0.2 basalt fiber ilavesinden elde edildiği belirlenmiştir. %0.4 cam fiber ilavesinde elde edilen değerler yeterli düzeydedir. Polipropilen ve lastik parçaları için Cantabro parça kaybı değerleri kabul gören maksimum limit değerinin üzerinde kalmıştır. Lastik parçalarının ilavesinde nem hassasiyeti de sağlanamamıştır.

Tablo 6.1: Lifli geçirimli asfalt karışımların optimum tasarım parametreleri

Tasarım Parametreleri	Kontrol Numunesi	Polipropilen Elyaf	Cam Elyaf	Bazalt Elyaf	Kırıntı kauçuk	Sınır Değer
Optimum Lif Oranı (%)	-	0.5	0.4	0.2	0.2	-
Optimum bitüm (%)	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	-
Boşluk Oranı, (%)	21.3	19.5	19.3	19.1	19.5	Min. 18
Cantabro Parça Kaybı (%)	<b>48</b>	<b>32</b>	20	18	<b>38</b>	Max. 20
Permeabilite Katsayısı, k (m/gün)	131	<b>98</b>	101	116	122	Min. 100
Dolaylı Çekme Dayanımı (kPa)	644	921	1060	1439	1191	-
Nem Hasarı Oranı (%)	84	87	96	96	<b>75</b>	Min. 80

## 7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Fiber tipi ve konsantrasyonunun geçirimli asfalt karışımların tasarım performansı üzerindeki etkileri ve optimizasyonunun araştırıldığı deneysel çalışmanın genel sonuçları ve konu hakkındaki öneriler aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Bitüm miktarındaki artışla doğal olarak boşluk oranları ve permeabilite katsayılarında azalma olduğu tespit edilmiştir. Fiber konsantrasyonundaki artışta da genel itibariyle aynı eğilim sözkosu olmakla birlikte, %6.0 bitümdeki polipropilen fiber ilavesinde diğer katkı tiplerinin aksine boşluk oranlarında bir artış görülmektedir. Permeabilite deneyinde geçirgenlik katsayılarındaki azalmanın daha az düzeyde olması şeklinde gözlemlenen bu durum, karışım içerisinde eriyen polipropilen liflerin büzülerek bitüm matriksinin hacminin azalması ile açıklanabilir. %6.5 bitümde polipropilen konsantrasyonu azaldığından bu etkinin azaldığı söylenebilir.
- %6.5 bitümde tüm fiberler için genel olarak %0.6 ve %0.8'de permeabilite katsayılarının kabul edilen limit değerin (100 m/gün) altına düştüğü belirlenmiştir. %6.5 bitümde polipropilen lifler diğer liflere göre en büyük boşluk değerlerine sahip iken bazalt lif boşluk değerlerinin %0.4 ilaveden sonra minimum değerin altında kalmıştır. Bu durum bazalt fiberin karışım içerisinde liflenmesinin daha iyi olmasına bağlanabilir.
- Bazalt fiber ve lastik parçalarında optimum lif oranının %0.2 olmasında permeabilite değerlerinin diğer fiberlere göre düşük düzeylerde olması etkilidir. Ayrıca, polipropilen liflerin matriks içerisinde tam eriyememesi ve topaklanması sebebiyle özellikle %6.5 bitümde boşluklar arasındaki bağlantıların kesintiye uğradığı söylenebilir.

- Optimum bitüm kalınlığına işaret eden %6.5 bitümde Cantabro parça kaybının %6.0'ya göre önemli düzeyde azaldığı belirlenmiştir. %0.2 bazalt fiberde en az parça kaybı değeri elde edilirken %0.4 cam fiberde sınır değeri sağlanabilmiştir. Karışım içerisinde yüksek liflenme ve homojen dağılıma sahip olan bazalt fiberde daha düşük konsantrasyonda optimum tasarım değerlerine ulaşılmıştır.
- %6.0 bitümde polipropilen liflerde numunelerde dağılmaya varan yüksek parça kopma oranları, karışım içerisinde eriyen polipropilen liflerin kaba agregalar arasında oluşan ince bitüm filmini gevreklettiği ve karışımları kırılğan hale getirdiği şeklinde açıklanabilir. Polipropilen lif ve lastik parçalarının hiçbir oranında istenilen limit değerlere ulaşamamıştır.
- %6.5 bitümde daha yüksek dolaylı çekme dayanım değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Fiber modifikasyonunun DÇD değerlerinin önemli düzeylerde iyileştirdiği ve belirli ilave oranlarında pik değerlere ulaşıldığı belirlenmiştir. En yüksek DÇD değerleri elde edildiği %0.2 bazalt fiberde DÇD değeri kontrol numunelerine göre %124 oranında iyileşmiştir. Fiber katkılı karışımların sergilediği DÇD sonuçları Cantabro deney sonuçları ile örtüşmektedir. Her iki deneyde bitüm matriks dayanım özelliklerini doğru olarak yansıtmaktadır.
- %6.5 bitümde nem hassasiyetlerinin tüm fiberler için genel olarak %6.0 bitüme göre daha yüksek olduğu görülmektedir. %6.0 bitümde genel itibariyle kontrol numunelerine göre bir iyileşme sağlanamaması, optimum bitümde film kalınlığının nem hassasiyetindeki etkisini göstermektedir. %6.5 bitümde bazalt ve cam fiberin nem hassasiyeti açısından da katkı sağladığı belirlenmiştir. Lastik fiberde ise DÇO değerlerinin kontrol karışımlarından daha düşük ve kabul edilen minimum sınır değerinin (%80) altında olması, kaba agrega danelerini saran bitüm matriksinin aderansını zayıfladığına işaret etmektedir.
- Tüm tasarım kriterlerinin sağlanamadığı lastik parçacıklarının ilavesinde, onların boyut ve şeklinin önemli olduğu, lif formunun elde edileceği lastik katkısından daha iyi sonuçların elde edileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla atık lastik parçalarının

etkilerinin daha geniş bir çerçevede incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca özellikle GAK tasarım kriterlerini genel olarak iyileştiren bazalt ve cam fiber boylarının etkileri üzerine çalışmalar gerçekleştirilebilir.

- Poliprobilen lif ilavesinin GAK tasarımında olumlu etkileri görülse de, karışım içerisinde eriyerek lif formunu kaybetmesi ve bitüm matriksini daha gevrek ve kırılğan hale getirdiği için Cantabro sonuçlarına bakıldığında uygun olmadığı kanısına varılmaktadır. Bu malzeme için bitüm modifikasyonunun GAK'ların performansı üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Özellikle dayanımla ilgili tasarım kriterlerinin önemli ölçüde iyileştiği belirlenen bazalt ve cam fiber ilavelerinin uygulamaya yönelik performans analizleri gerçekleştirilmelidir.
- Bu çalışma, ferrokrom cürufunun karışımlarda agrega olarak kullanılması itibariyle, sürüş güvenliği ve çevresel faydalar ile öne çıkan geçirimli asfalt kaplamaların yağışlı bölgelerde, başta karayolu ulaşımı olmak üzere farklı uygulama alanlarının yaygınlaştırılması ile beraber farklı sanayi atıklarının uygun alanlarda kullanımının araştırılarak çevresel kirliliğin önlenmesi ve doğal kaynakların korunması ile ekonomik fayda sağlanması açısından da katkılar sunmaktadır.
- GAK'lar üzerinde temel karışım tasarımlarının gerçekleştirildiği bu araştırma, ileriye yönelik olarak fiber katkıların kaplamaların kayma-sürtünme ve gürültü düzeyleri gibi işlevsel özelliklerinin belirlenmesi yönünde de geliştirilebilir.

## KAYNAKLAR

(DRD), D. R. (1999). "Noise-Reducing Pavements for Urban Roads.". Nordic Road & Transport Research. Volume No. 3.

(TRB), T. R. (2015). "Fiber Additives in Asphalt Mixtures". Washington D.C. : NCHRP Synthesis Report 475.

AASHTO. (2003). "Standart Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage". AASHTO T 283 Standard.

Allex, E. (2006). *Synthesis of Current Practice on The Design, Construction, and Maintenance of Porous Friction Course*. Austin: Tech Rep FHWA/TX-06/0-5262-1. Texas Transportation Institute.

Alvarez, A., Epps Martin, A., Estakhri, C., Button, J., Glover, G., ve Jung., S. (2006). "Synthesis of Current Practice on the Design, Construction, and Maintenance of Porous Friction Courses.". Texas: FHWA TX-06/0-5262-1. Texas Transportation Institute. College Station.

Alvarez, A., Martin, A., Estakhri, C., Button, J., Glover, C., ve Jung, S. (2006). *Synthesis of Current Practice on the Design, Construction, and Maintenance of*. Texas : Texas Transportation Institute.

ASCE. (2015). *American Society of Civil Engineers (ASCE). Permeable Pavements*. Reston, VA: ASCE PermeablePavement Task Committee:  
<https://www.asce.org/templates/publications-book-detail.aspx?id=15418> adresinden alındı

Associates, C. (tarih yok). *Porous Pavement Operation And Maintenance Protocol*. San Diego: San Diego County Facilities.  
[https://www.sandiegocounty.gov/reusable\\_components/images/dgs/Documents/Grants\\_Prop40\\_AppendIII\\_.pdf](https://www.sandiegocounty.gov/reusable_components/images/dgs/Documents/Grants_Prop40_AppendIII_.pdf)

Bauduin, A., Chambon, B., Darrieumerlou, B., Durand, B., Tessonneau, H., ve Thirriot, B. (1989). *Trois grands chantiers d'enrobes drainants Drainoflex*. Revue Generate des Routes at Aerodromes.

Bay, F., ve Güney, A. (1998). *Lastik Yol Gürültüsü*. Antalya: 4. Akustik ve Gürültü Kongresi.

Bean, E., Clark, M., ve Larson, B. (2020). "Permeable Pavement Systems: Technical Considerations". Florida: IFAS Extension: University of Florida.

Bonnot, J. (1997). French experience on porous asphalt European conference on porous asphalt. Madrid.

Brown, D. (2003). "Thinking Green with Porous Asphalt.". *Hot Mix Asphalt Technology*.

- Bulut, İ. (2018, Eylül 28). *KAYMA DİRENCİ YÜKSEK, GÜVENLİ BETON YOLLAR! SAFE CONCRETE ROADS WITH HIGH SKID RESISTANCE!* LinkedIn: <https://www.linkedin.com/pulse/kayma-direnci-yüksek-güvenli-beton-yollar-high-sliding-ismail-bulut> adresinden alındı
- Button, J., ve Lytton, R. (1987). "Evaluation of Fabrics, Fibers and Grids in Overlays". *Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*.
- Cheng, Y., Chai, C., Zhu, B., ve Zhang, Y. (2019). A New Eco-Friendly Porous Asphalt Mixture Modified by Crumb Rubber and Basalt Fiber. *Sustainability*, 19.
- Civelek, U. (2011). *Poroz Asfalt*. Isparta: <https://www.slideshare.net/UfukCivelek2/poroz-asfalt-112475142>.
- Concrete. (2016). *Typical Load Distribution For Flexible and Rigid Pavement Layers*. [www.cement.ca: http://www.cement.ca/en/Highways/Description-of-Concrete-Pavement.html](http://www.cement.ca/en/Highways/Description-of-Concrete-Pavement.html) [Accessed 16 12 2016]. adresinden alındı
- Cooley, I., ve Brown, E. (2001). *Potential Of Using Stone Matrix Asphalt For Thin Overlays*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Potential-of-using-stone-matrix-Asphalt-for-thin-Cooley-Brown/bd7553a23e5640c969eeb59ef4f6164edbf92113>.
- Çetin, A., Kaya, Z., Çetin, B., ve Aydılek, A. (2014). "Influence of laboratory compaction method on mechanical and hydraulic characteristics of unbound granular base materials". *Road Materials and Pavement Design*.
- Çınar, S. (2018, 12 05). *Ferrokrom Nasıl Üretilir ? Nerelerde Kullanılır ?* Mühendis Alemi: <http://www.muhendisalemi.com/ferrokrom-nasil-uretilir-nerelerde-kullanilir/> adresinden alındı
- Daines, M. (1992). *Trials of porous asphalt and rolled asphalt on the A38 at Burton*. Crowthorne: Department of transport TRRL Report RR323, Transport and Road research Laboratory.
- Decoene., Y. (1989). *Knowledge Acquired After 10 Years of Research on Porous Asphalt in Belgium*. Madrid: Presented at 4th Eurobitime Symosium.
- Dinçel, H. (2018, 8 29). *BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ BÜLTENİ (KIRSALDA SATHİ KAPLAMA ÇALIŞMALARI DEVAMEDİYOR)*. [www.ikragazetesi.com](http://www.ikragazetesi.com): <http://www.ikragazetesi.com/2018/08/29/buyuksehir-belediyesi-bulteni-kirsalda-sathi-kaplama-calismalari-devam-ediyor/> adresinden alındı
- Drainants, L. E. (1988). *Belgian Road Research Centre*. Brussels: Demi-journee d'etudes.
- EAPA. (2011). *asphalt pavement layers*. [www.eapa.org](http://www.eapa.org): <http://www.eapa.org/promo.php?c=173> [Accessed 16 12 2016]. adresinden alındı
- Ebihara, M. (2019). "Dissolution properties of refractory ceramic fiber in aqueous solutions from strong acids to strong bases". *Glass Physics and Chemistry*.
- Engin, Y. (2014, 11 29). *Beton Yollar*. [www.slideshare.net](https://www.slideshare.net/yasinengin/beton-yollar-42162931): <https://www.slideshare.net/yasinengin/beton-yollar-42162931> adresinden alındı

- Erdoğan, S. T. (2011). *Öğütülmüş Ferrookrom Cürufu Kullanılarak Jeopolimer Üretimi*. Ankara: Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- Faghri, M., ve Sadd, H. (2002). "Performance Improvement of Open Graded Asphalt Mixes.". Report on URI\_TC Project No. 536144.
- Fares, A. I., Sohel, K., Jabri, K., ve Mamun, A. (2021). *Characteristics of ferrochrome slag aggregate and its uses as a green material in concrete – A review*. Oman: Department of Civil and Architectural Engineering, Sultan Qaboos University, P.O. Box 33, Al-Khoudh Post Code 123.
- Freeman, H., ve Gee, G. (1989). *Hanford Protective Barriers Program Asphalt Barrier Studies*. Pacific Northwest Lab., Richland, WA (USA).
- Gupta, A., Gonzalez, P., Fresno, D., ve Hernandez, J. (2021). "Laboratory Characterization of Porous Asphalt Mixtures with Aramid Fibers". <https://doi.org/10.3390/ma14081935>, 11-12.
- Gündoğmuş, Y. (2017, 11 14). *Anadolu Ajansı*. Anadolu Ajansı web sitesi: <https://www.aa.com.tr/tr/turkiye/su-geciren-beton-ve-asfalt-sartnamesi-hazirlandi/965070> adresinden alındı
- Gür, A. (2016). "Öğütülmüş araç lastiği ve sasobit modifiyeli bitüm ve bitümlü sıcak karışım özelliklerinin araştırılması." s. 4.
- Hamzah, M. (2005). "Characterization of the Clogging Behaviour of Double Layer Porous Asphalt". *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 968-980.
- Hein, D. K. (2020). Integrating Hydraulic and Structural Design Using Permeable Design Pro. *New Zealand Concrete Masonry Association Inc.*, [https://cdn.ymaws.com/concretenz.org.nz/resource/resmgr/docs/masonry/m\\_suds\\_david\\_hein.pdf](https://cdn.ymaws.com/concretenz.org.nz/resource/resmgr/docs/masonry/m_suds_david_hein.pdf).
- Hipercell. (2021, 7 7). *İstanbul Teknik, Hipercell Selülozik elyaf*. <https://www.istanbulteknik.com/asfalt-urunleri/hipercell-selulozik-elyaf> adresinden alındı
- Houle, K. M., Roseen, R., Ballesterro, T., Briggs, J., ve Houle, J. (2010). "Examinations of Pervious Concrete and Porous Asphalt Pavements Performance for Stormwater Management in Northern Climates." *Low Impact Development . Redefining Water in the City* , 1281-298.
- Jackson, N. (2003). "Design, Construction and Maintenance Guide for Porous Asphalt Pavements". *National Asphalt Pavement Association*.
- Jacobson, T. (2016). "How do we improve the durability of porous asphalt?" 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Prague, Czech Republic. P. 1-11.
- Jacobson, T., ve Viman, L. (2010). "Inventering av bullerreducerande beläggningar (Survey of noise-reducing pavements)". *Swedish National Road and Transport Research Institute*.

- Kantarci, F. (2013). *Elazığ Ferrookrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması*. Malatya: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kara, Ç. (2012). *Fayans Atıklarının Bitümlü Sıcak Karışımların Performans Özelliklerine Etkisi*. Eskişehir: Osmangazi Üniversitesi.
- Kara, Ç., Özden, A., Akalin, K., ve Karacasu, M. (2018). *Poroz Asfalt Kaplamaların Sürdürülebilir Çevre Kapsamında Değerlendirilmesi*. Denizli: International Symposium on Urban Water and Wastewater Management.
- Kayhanian, M., ve Harvey, J. (2020). *Optimizing Rubberied Open Graded Friction Course*. California : University of California Pavement Research Center.
- Khalid, H., ve Perez, J. (1996). "Performance assessment of spanish and british porous asphalts". *Proceedings for Performance and Durability of Bituminous Materials*, 3-5.
- Kofteci, S. (2018). "Experimental Study Concerning Iron Wire Fiber Reinforced Asphalt Concrete". *Teknik Dergi*, 2018 8515-8535, 510.
- KTŞ. (2013). *Karayolu Teknik Şartnamesi*. Karayolları Genel Müdürlüğü. Ankara.
- Lan, W., Ghani, R., Yongming, X., ve Gang, C. (2015). "Microstructure and rheological properties of aged and unaged polymer-modified asphalt binders". *Road Materials and Pavement Design*, 592.
- Liang, R. (2008). *Refine AASHTO T283 Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage for Superpave*. USA: FHWA/OH-2008/1,.
- Liu, Q., ve Cao, D. (2009). "Research on Material Composition and Performance of Porous". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 135.
- Luo, S., Lu, Q., ve Qian, Z. (2015). "Performance evaluation of epoxy modified open-graded porous asphalt concrete". *Construction and Building Materials*, 97-102.
- Lyons, K. R. (2012). *Evaluation of Rubber Modified Porous Asphalt Mixtures*.
- Mahrez, A., ve Karim, M. (2003). "Prospect Of Using Glass Fiber Reinforced Bituminous Mixes". *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 3.
- Mallick, R., Kandhal, P., Cooley, L., ve Watson, D. (2000). *Design Construction and Performance of New Generation OpenGraded Friction Courses*. Auburn University: Ncat Raport No.2000-01 National Center for Asphalt Technology.
- Marastanhaber. (2018, 5 21). *İlk sathi kaplama Kuruçay'a*. www.marastanhaber.com: <https://www.marastanhaber.com.tr/ilk-sathi-kaplama-kurucaya-31442h.htm> adresinden alındı
- Maupin, G. W. (1976). "Virginia's Experience with Open-Graded Surface Mix". *Transportation research Record*, 48-51.



- Maurer, D. A., & Gerald, M. (1989). "Field performance of fabrics and fibers to retard reflective cracking". *Transportation Research Record*, 13-23.
- McDaniel, R. (2015). "Fiber additives in asphalt mixtures". *Transportation Research Board of the National Academies*.
- Mills, D., ve Keller , J. (1982). "The Effectiveness of Synthetic Fibre – Reinforced Asphaltic Concrete Overlays in Delaware". *Delaware Department of Transportation*.
- Momm, L., ve Filho, E. (2001). "Study of the Aggregate for the Pervious Asphalt Concrete." . Auburn, Alabama. : 2nd International Symposium on Maintenance and Rehabilitations of Pavements and Technological Control.
- 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.
- Nakanishi, H., Hamzah, M., Mohd Hasan, M., Karthigeyan, P., ve Haur, O. (2018). *Mix design and application of porous asphalt pavement using Japanese technology*. 10th Malaysian Road Conference & Exhibition.
- Nazarinasab, A., Ghasemi, M., ve Marandi, S. (2018). "Performance Improvement of Porous Asphalt Mixtures using Crumb Rubber and Steel Slag Powder". *International Journal of Transportation Engineering*, 2-12.
- Ndon, U. (2017). *Trends in the application of permeable pavement as sustainable highway storm water management option for safe-use of roadways*. Civil Environ Eng. Vol. 7(6): 1-15.
- Özay, O. (2011). "Farklı Modifiye Katkılarla Hazırlanan Poroz Asfalt Karışımların Performansının İncelenmesi".
- Öztürk, D. (2008). "Türkiye 'de Poroz Asfaltın Uygulanabilirliği". Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri.
- Öztürk, M. (2017). "Su Geçiren Beton ve Asfaltlar". Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- Poulikakos, L., Takahashi, S., ve Partl., M. (2006). "Evaluation of Improved Asphalt by Various Test Methods." . EMPA.
- Punith, V. S., Suresha, S., Veeraragavan, A., Raju, S., ve Bose, S. (2004). "Characterization of Polymer and Fiber-Modified Porous Asphalt Mixtures." . Washington, D.C.: Transportation Research Board. National Research Council.
- Renken, P. (2000). Perspective on optimisation of porous asphalt surface course 2nd Eurasphalt. *Eurobitume Congress*, 129.
- Rojas, M., ve Ruiz, R. (1999). *Metodología de diseño y colocación de mezclas drenantes*. España: 10º Congreso IberoLatinoamericano del Asfalto.

- Ruiz, A. (1997). Mixture design. 309.
- Sandberg, U. (2012). *Lågbullerbeläggningar i Sverige, State-of-the-art (Low noise road surfaces in Sweden)*. VTI projektrapport. Swedish National Road and Transport Research Institute:  
<http://www.metodgruppen.nu/getfile.ashx?cid=322552&cc=3&refid=10> adresinden alındı
- Sasana, P., ve Ismanto, B. (2003). "The influence of using local materials on quality of porous asphalt in Indonesia". *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 4.
- Scholz, M., ve Grabowiecki, P. (2007). "Review of Permeable Pavement Systems". *Building and Environment*, 42(11): 3830-3836.
- Serfass, J., ve Samanos, J. (1996). *Fiber-Modified Asphalt Concrete Characteristics, Applications And Behavior (With Discussion)*.
- Shahiri, J., ve Ghasemi, M. (2017). "Utilization of Soil Stabilization with Cement and Copper Slag as Subgrade Materials in Road Embankment Construction". *International Journal of Transportation Engineering (IJTE)*, 45-58.
- Sousa, J. B., Way, G., ve Zhu, H. (2004). "Asphalt-rubber noise data Compilation". Synthesis of Current Practices.
- Subagio, B., Kosasih, D., ve Tenrilangi, D. (2005). *Development Of Stiffness Modulus And Plastic Deformation Characteristics Of Porous Asphalt Mixture Using Tappack Super™*. Bandung: Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, pp. 803 - 812.
- Tanzadeh, J., ve Shahrezagamasaei, R. (2017). *Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nano-silica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures. Construction and Building Materials*.
- Taşdemir, A. (2006). "Enjeksiyon Yöntemiyle Üretilen Kristal Yapılı Ferrokrom Cürufu Katkılı Betonların Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması". Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı. .
- Taşgın, Y. (2014). *Mermer, Ferrokrom Cürufu Ve Cam Atıklarının Asfalt Beton Kaplamalarında Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Tunceli: TUNCELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTİSÜ.
- Topaloğlu, S. (2019). *Ferrokrom Cüruf Agregasının Geçirimli Bitümlü Karışımların Performansına Etkilerinin Araştırılması*. Bartın: Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Transportation, F. D. (2012). *Florida Department of Transportation Standard Specifications, Florida Method of Test to Measurement of Water Permeability of Compacted Asphalt Paving Mixtures*. Florida: Florida Department of Transportation, Tallahassee.
- Vale, A., Casagrande, M., ve Soares, J. (2013). *Behavior of Natural Fiber in Stone Matrix*

*Asphalt Mixtures Using Two Design Methods*. J. Mater. Civ. Eng.

- Wang, S., Kang, A., Xiao, P., Li, B., ve Fu, W. (2019). "Investigating the Effects of Chopped Basalt Fiber on the Performance of Porous Asphalt Mixture". *Advances in Materials Science and Engineering*, 12.
- Wang, X., Zhou, H., Hu, X., Shen, S., ve Dong, B. (2021). *Investigation of the Performance of Ceramic Fiber Modified Asphalt Mixture*. *Advances in Civil Engineering*.
- Wei, C. C., Chen, O., ve Liu, Y. (2008). "Ceramic asymmetric hollow fiber membranes— one step fabrication process". *Journal of Membrane Science*.
- Yılmaz, A. (2002). *Antalya Ferrokrom İşletmesinin Elektrik-Ark Fırını Cüruflarının ve Baca Tozu Atıklarının Asfalt Betonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Antalya: Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zhang, H., Li, H., Zhang, Y., Wang, D., Harvey, J., & Wang, H. (2018). *Performance Enhancement of Porous Asphalt Pavement Using Red Mud as Alternative Filler*. *Construction and Building Materials*, 160: 707-713.