

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**KARAYOLLARI İÇİN YARI RİJİT KAPLAMA TABAKASI DİZAYNI VE
PERFORMANSININ BELİRLENMESİ**

Ahmad Khaled MASBAH
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2019

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARAYOLLARI İÇİN YARI RİJİT KAPLAMA TABAKASI DİZAYNI VE
PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

Ahmad Khaled MASBAH

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 01/07/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ

Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Prof. Dr. Serdal TERZİ



ÖZET

KARAYOLLARI İÇİN YARI RİJİT KAPLAMA TABAKASI DİZAYNI VE PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

Ahmad Khaled MASBAH

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ

Temmuz 2019; 58 sayfa

Yarı rijit kaplama (YRK), akışkan harç malzemeleriyle doldurulmuş %25 ile %35 arası boşluğa sahip poroz asfalttan oluşan kompozit bir kaplama malzemesidir. Bu çalışma ile %30 hava boşluğu içeriğine sahip poroz asfalt iskeleti tasarlamayı ve YRK'nın performansını değerlendirmeyi amaçlanmıştır. Bu bağlamda poroz asfalt, agrega gradasyonuna dayanan bir denklem kullanılarak hesaplanan optimum bitüm içeriğiyle tasarlanmıştır. Daha sonra poroz asfaltın hava boşlukları akışkan harç malzemeleriyle doldurulmuştur. YRK'nın performansı, laboratuvar sıcaklığında üç farklı kürlenme süresinde (3, 7 ve 28 gün) Marshall stabilite, indirekt çekme dayanımı, basınç dayanımı ve cantabro deneylerinin yapılmasıyla belirlenmiştir. Ayrıca poroz asfaltın dizaynında, süzülmeyi önlemek için iki tip katkı maddesi kullanılmıştır. Sonuç olarak fiberle hazırlanan asfalt karışımdan daha fazla hava boşluğu elde edilmiştir. Modifiye katkı maddesi ise asfaltın hava boşluklarını azaltmıştır. Performans deney sonuçları, YRK'nın Marshall stabilitesinin ve basınç dayanımının sırasıyla 3, 7 ve 28 gün kürlenme sürelerinde arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, YRK numunelerinin kütle kaybı, akışkan harç malzemelerinin kullanımı nedeniyle zamana mütakip olarak azalmaya başlamıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Cantabro, Fiber, Marshall stabilite, Poroz asfalt, Yarı-rijit kaplama

JÜRİ: Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ

Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Prof. Dr. Serdal TERZİ

ABSTRACT

DESIGN OF SEMI RIGID PAVEMENT AND DETERMINATION OF ITS PERFORMANCE

Ahmad Khaled MASBAH

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sevil KÖFTECİ

July 2019; 58 pages

Semi-rigid pavement (YRK) is a composite road material consisting of porous asphalt with 25-35% air voids content which is filled by grouting materials. This study aims to design a porous asphalt skeleton with 30% air voids content and to evaluate the performance of semi-rigid pavement. For this, porous asphalt designed with optimum bitumen content which was calculated by use of an empirical equation based on aggregate gradations. Finally, air voids content of porous asphalt were filled with grouting materials. Performance of YRK was calculated by the conducting of various experimental tests including Marshall stability, indirect tensile strength, cantabro and compressive strength test in three different curing time (3day, 7days, 28days) at the laboratory temperature. The results show that asphalt mixture with fiber provided the more air voids content of porous asphalt, while modified additive decreased the air voids content. Moreover, performance test results indicated that Marshall stability and compressive strength of YRK increased in 3 days, 7 days and 28 days respectively. In addition to this, Cantabro loss of YRK specimens decreased after 3 days due to the use of grouting materials in the air voids content of porous asphalt.

KEYWORDS: Cantabro, Fiber, Marshall stability, Porous asphalt, Semi-rigid pavement

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Sevil KÖFTECİ

Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Prof. Dr. Serdal TERZİ

ÖNSÖZ

Esnek kaplamalar, özellikle sıcak bölgelerde çok çabuk deformasyona uğramaktadır. Rijit kaplamaların ise imalat süreci daha uzundur. Bu kaplamalara alternatif oluşturabilecek, esnek kaplamaya göre daha dayanıklı, rijit kaplamaya göre maliyeti düşük ve imalatı daha kolay olan YRK'nın geliştirilmesinin ülke ekonomisi açısından büyük bir avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışma esnasında, bana her türlü desteği sağlayan, fikriyle çalışma sürecinde yolumu aydınlatan, zorlandığım her konuda gerekli destek ve motivasyonu en içten samimiyetle veren, değerli hocam sayın Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ başta olmak üzere çalışma sürecinde büyük desteklerini gördüğüm Dürdane YILMAZ, Mansor NAZARY, Murat YEŞİLBAŞ, Osman SAFAROV ve lisans bitirme çalışması öğrencilerine, ilk harfi öğrendiğim andan itibaren bu güne kadar maddi ve manevi olarak bana hep destek olan ailem ve yakın çevreme en içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
2.1. YRK'nın Yapım ve Özellikleri	3
3. MATERYAL VE METOT	10
3.1. Materyal	10
3.1.1. Agrega	10
3.1.1.1. Los Angeles aşınma deneyi	10
3.1.1.2. Yassılık indeks deneyi	11
3.1.1.3. Özgül ağırlık ve su emme deneyi	12
3.1.1.4. Magnezyum sülfat (MgSO ₄) deneyi	13
3.1.1.5. Agregalara yapılan deneylerin sonuçları	15
3.1.2. Bitüm	15
3.1.2.1. Bitüm özgül ağırlığının deneyi	15
3.1.2.2. Penetrasyon deneyi	16
3.1.3. Modifiye katkı	18
3.1.4. Fiber	19
3.2. Metot	22
3.2.1. Agrega gradasyonu	22
3.2.2. Optimum bitüm içeriği (OBC)	23
3.2.3. Yarı rijid kaplama numunelerin hazırlanması	24
3.2.4. Yarı rijid kaplama performansı	25
3.2.4.1. Marshall stabilite deneyi	25
3.2.4.2. İndirekt çekme dayanım deneyi (ITS)	26
3.2.4.3. Cantabro deneyi	27
3.2.4.4. Basınç dayanım deneyi	28

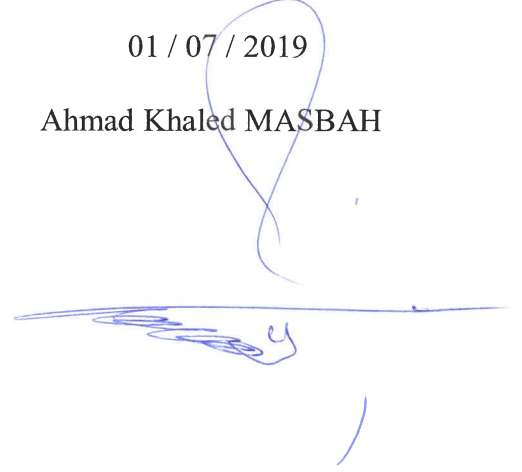
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	30
4.1. Agregat Karışım Oranlarının ve Karışım Gradasyonunun Belirlenmesi.....	30
4.2. Optimum Bitüm İçeriğinin Belirlenmesi (OBC).....	32
4.2.1. Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı.....	32
4.2.2. İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı.....	33
4.2.3. Filler agreganın zahiri özgül ağırlığı.....	34
4.2.4. Birinci karışım formülü için optimum bitüm içeriği.....	35
4.3. Marshall Numuneleriyle Poroz Asfaltın Tasarımı	37
4.4. Yarı Rijid Kaplama Performansı.....	49
4.4.1. Marshall stabilite deneyi.....	49
4.4.2. İndirekt çekme dayanım deneyi (ITS).....	50
4.4.3. Cantabro deneyi	51
4.4.4. Basınç dayanım deneyi.....	52
5. SONUÇLAR.....	54
6. KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisan Tezi olarak sunduğum “Karayolları İçin Yarı Rijit Kaplama Tabakası Dizaynı Ve Performansının Belirlenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

01 / 07 / 2019

Ahmad Khaled MASBAH



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

- Σ : Spesifik yüzey alanı
D : Numune çapı
H : Numune yüksekliği
 G_{mm} : Maksimum teorik özgül ağırlığı
kN : Kilonewton
MPa : Megapascal

Kısaltmalar

- AASHTO : American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM : American Society for Testing and Materials
BSK : Bitümlü Sıcak Karışım
KTŞ : Karayolları Teknik Şartnamesi
 $MgSO_4$: Magnezyum Sülfat
OBC : Optimum Bitüm İçeriği
SHRP : Strategic Highway Research Program
Vh : Numunenin hava boşlukları
WES : Waterways Experiment Station
YRK : Yarı Rijit Kaplama
ITS : Indirekt Çekme Dayanımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yarı rijid kaplamada kullanılan poroz asfalt kaplaması.....	4
Şekil 2.2. YRK uygulaması ; a) poroz asfaltta kullanılacak akışkan harç; b) poroz asfaltın akışkan harcıyla doldurulmuş numunesi.....	6
Şekil 3.1. Los Angeles deneyi; a) Los Angeles deneyinde kullanılan agrega numunesi; b) 12 no'lu elekten geçen agrega.....	10
Şekil 3.2. Yassılık indeks deneyi; a) agregaların şablondan elenmesi; b) deneyden sonra agregaların ağırlığı.....	12
Şekil 3.3. Kaba agrega özgül ağırlığı; a) suda 24 saat sonra agrega numuneleri; b) doymuş agrega ağırlığı; c) suda agrega ağırlığı; d) kuru agrega ağırlığı.....	13
Şekil 3.4. Magnezyum Sülfat deneyi; a) Sepetlerdeki agrega numuneleri; b) Çözeltideki agrega numuneleri; c) Çözeltilerin yoğunluğunun belirlenmesi; d) Magnezyum sülfat deney cihazı.....	14
Şekil 3.5. Agregada deneylerin özeti	15
Şekil 3.6. Bitüm özgül ağırlığı	16
Şekil 3.7. Bitüm penetrasyon deneyi	17
Şekil 3.8. Modifiye katkıle tasarlanan asfaltın sıkışma mukavemeti ve boşluk miktarı.....	18
Şekil 3.9. Bitümde kullanılan modifiye katkı	19
Şekil 3.10. Dört farklı fiber tipiyle asfalt numunelerinin Vh'sı.....	20
Şekil 3.11. Permeabilite katsayısı sonuçları.....	20
Şekil 3.12. Poroz asfaltta kullanılan fiber	21
Şekil 3.13. Referans agrega gradasyonunun limiti	22
Şekil 3.14. Yarı rijid kaplama numuneleri.....	24
Şekil 3.15. Marshall stabilite deneyi	25
Şekil 3.16. İndirekt çekme deneyi	26
Şekil 3.17. Cantabro deneyi; a) 3 günlük cantabro testinden önceki ve sonraki Marshall numuneleri; b) 7 günlük cantabro testinden önceki ve sonraki Marshall numuneleri; c) 28 günlük cantabro testinden önceki ve sonraki Marshall numuneleri.....	27
Şekil 3.18. Kalker bileşiğile kaplanmış Marshall numuneleri	28
Şekil 3.19. Basınç dayanımı deneyi.....	29
Şekil 4.1. İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı; a) suda 24 saat sonra agrega kurutma işlemi; b) ince agreganın doymuş ağırlığının belirlenmesi; c) piknometere artı su ağırlığı; d) piknometere artı numune ağırlığı; e) piknometere artı numune artı su ağırlığı; f) agreganın kuru halı.....	34
Şekil 4.2. Fillerin zahiri özgül ağırlığı; a) Piknometere artı su; b) Piknometere artı su artı numune; c) Piknometere artı numune; e) Piknometere	35

Şekil 4.3. Birinci karışım formülüyle hazırlanan Marshall numuneleri	37
Şekil 4.4. İkinci karışım formülüyle hazırlanan Marshall numuneleri	40
Şekil 4.5. Üçüncü karışım formülüyle hazırlanan Marshall numuneleri	42
Şekil 4.6. % 27.7 boşluklu olan Marshall numunesi	43
Şekil 4.7. Marshall numunelerinin değişik karışımlarda hava boşluğu	43
Şekil 4.8. Agrega gradasyonların özeti	44
Şekil 4.9. Farklı katkılarla tasarlanmış poroz asfaltın hava boşlukları	46
Şekil 4.10. (3.65) bitüm miktarıyla tasarlanmış Marshall numunesi	46
Şekil 4.11. Farklı sıcaklıklarda tasarlanmış poroz asfaltın hava boşlukları	47
Şekil 4.12. YRK numuneleri	48
Şekil 4.13. Akışkan harcıyla tam doldurulmuş YRK numunesi	48
Şekil 4.14. YRK numunelerin Marshall stabilite ve akma değerleri	50
Şekil 4.15. YRK numunelerin indirekt çekme dayanımı	51
Şekil 4.16. YRK numunelerin kütle kaybı yüzdesi	52
Şekil 4.17. YRK numunelerin basınç dayanımı	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. SHRP değerlendirmesinden elde edilen laboratuvar sonuçlarının özeti.....	5
Çizelge 2.2. YRK özelliklerinin diğer kaplama tipleriyle karşılaştırılması	6
Çizelge 2.3. YRK'nın Amerika Birleşik Devletlerindeki yapılmış projeler	7
Çizelge 2.4. Densiphalt'da kullanılan açık gradasyon asfalt bileşimi	9
Çizelge 2.5. Açık gradasyonlu asfalt için şartname değerleri	9
Çizelge 3.1. Yassılık indeks deneyin hesaplama prosedürü.....	11
Çizelge 3.2. Kaba agrega özgül ağırlığının hesaplanması	12
Çizelge 3.3. Bitüm özgül ağırlığının hesaplanması.....	16
Çizelge 3.4. Bitüm penetrasyon değerinin hesaplanması	17
Çizelge 3.5. Modifiye katkı ile modifiye bitümün özellikleri	18
Çizelge 3.6. Fiberin teknik özellikleri.....	21
Çizelge 4.1. Açık gradasyonlu asfalt agregası.....	30
Çizelge 4.2. Asfalt karışımındaki agrega yüzdesi.....	32
Çizelge 4.3. Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı	33
Çizelge 4.4. İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı.....	33
Çizelge 4.5. Fillerin özgül ağırlığı.....	35
Çizelge 4.6. Agreganın birinci karışım gradasyonu	36
Çizelge 4.7. Birinci-optimum karışım formülüyle tasarlanmış poroz asfaltın hava boşluğu içeriği	38
Çizelge 4.8. Agreganın ikinci karışım gradasyonu	39
Çizelge 4.9. İkinci-optimum karışım formülüyle tasarlanmış poroz asfaltın hava boşluğu içeriği	40
Çizelge 4.10. Agreganın üçüncü karışım gradasyonu	41
Çizelge 4.11. Üçüncü-optimum karışım formülüyle tasarlanmış poroz asfaltın hava boşluğu içeriği	42
Çizelge 4.12. Farklı katkılarla tasarlanmış poroz asfaltın hava boşlukları	45
Çizelge 4.13. Marshall deney sonuçları.....	49
Çizelge 4.14. İndirekt çekme deney sonuçları	51
Çizelge 4.15. Cantabro deney sonuçları	52
Çizelge 4.16. Basınç dayanım deney sonuçları.....	53

1. GİRİŞ

Türkiye’de yol üst yapısında büyük çoğunlukla esnek kaplama tipi uygulanmaktadır. Türkiye’de esnek kaplamalar çok yaygın olarak kullanılmakla birlikte, dünyada rijit kaplama türü de kullanılmaktadır. Esnek kaplama, agrega ve bitümün bir birleşimidir. Esnek ve rijit kaplamaların performans özellikleri birbirinden farklıdır. Örneğin esnek kaplamalarda bulunan pürüzlü yüzey, iyi sürüş kalitesi sağlamaktadır ve kaplamada derz bulunmaması bu kaplama türünü rijit kaplamalara göre daha kullanılır hale getirmiştir. Rijit kaplamaların esnek kaplamalara göre avantajı ise daha fazla taşıma kapasitesi, daha uzun ömrü ve daha düşük bakım maliyeti olmasıdır. Genellikle rijit kaplamaların enine derzlerin varlığı ve geç hizmet verebilirliği sebebiyle çoğu ülkede esnek kaplama kullanımı daha yaygındır. Rijit kaplamalardaki enine derzlerin varlığı, kullanıcılar için gürültüye ve düşük kaliteli sürüşe neden olmaktadır.

Son yıllarda birçok araştırmacı, konforlu ve dayanıklı bir kaplamanın tasarımı için birçok araştırmalar yapmışlardır. Bu tez çalışmasının ana konusu, Türkiye koşullarında olan YRK tasarımı yapmaktır. YRK, rijit ve esnek kaplamanın bir kombinasyonudur. YRK ilk kez 1950’de Fransa’da yağ ve yakıtın dökülmesine karşı dayanıklı bir kaplama olarak geliştirilmiştir (Van ve Molenaar 2004). YRK, 1950’den bu yana farklı ülkelerde kullanılmasına rağmen, YRK’de kullanılan poroz asfaltın tasarımında mevcut bilgiler sınırlıdır. İlk poroz asfalt gradasyonunun denemesi ABD’de yapılan bir araştırma projesinde incelenmiştir (Rone ve Anderton 1976). Yapılan bu araştırmanın sonucunda poroz asfaltın hava boşluklarının %15 ile %25 arasında tespit edilmesi, testin başarısızlığının temel faktörü olmuştur.

YRK; uzun ömür, derz bulunmaması, yeterli esneklik, yüksek basınç dayanımı ve diğer tabakalara su girişine karşı iyi koruma gibi özellikleriyle esnek ve rijit kaplamaların avantajlarını birleştirebilen dayanıklı bir tabakadır. Genel olarak, YRK, çimento harcıyla doldurulmuş % 25 ile % 35 hava boşluğu olan, açık gradasyonlu bir asfalt tabakasından oluşmaktadır. Bu karışım, trafik yoğunluğunun yüksek olduğu yollarda, sanayi bölgelerinde, hava limanlarında ve depolarda yüksek dayanım sağlamaktadır. Ayrıca, YRK, genellikle kaplamada meydana gelecek bozulmalara neden olan yakıt ve yağ dökülmelerine karşı dirençli bir yüzeyi sağlamaktadır.

YRK’nın inşaatı, normalde iki ardışık günde gerçekleştirilen iki aşamalı işlemi içermektedir.

1. Birinci aşamasında, poroz asfalt, esnek kaplama tasarımında kullanılan aynı yöntemle %25 ile %35 hava boşluğu içeriğiyle tasarlanmaktadır.
2. İkinci aşamasında, bir gün sonra veya poroz asfalt tabakası soğuduktan sonra, poroz asfaltın hava boşluğunu tamamen doldurmak için kaplama yüzeyinde akışkan harç malzemesi dökülmektedir.

YRK’nın iyi performansı, poroz asfaltın hava boşluklarına ve çimento harcının akışkanlığına bağlıdır. Akışkanlık süresi yetersiz olan harç, poroz asfaltın içerisine tam olarak nüfuz edemez. Dolayısıyla kaplamanın erken kırılmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte, poroz asfaltta akışkan harç malzemelerinin aşırı kullanımı, asfaltın yüzeyini daha pürüzsüz hale getirir ve kürlenmeden sonra uygun olmayan kayma direncine sahip olabilir. Kayma direncinin uygun olmadığı durumlarda, poroz asfaltın hava

boşluklarında akışkan harç malzemelerinin kullanılmasından sonra, asfaltın pürüzsüz yüzeyini pürüzlendirmek için shot-blasting (yüzeyin yüksek devirli demir saçmalarla temizlenmesi) kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle, poroz asfaltın hava boşluğu ve harcın akışkanlık süresi YRK tasarımı sürecinde dikkate alınması gereken iki önemli faktördür.

Bu araştırmanın temel amaçları aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

- Türkiye’de kullanılmamış yeni bir kaplama tasarımının araştırılması.
- Çimento harcının kolayca nüfuz etmesini sağlayan %30 hava boşluğu içeriğine sahip poroz asfalt iskeletinin tasarlanması.
- Farklı katkı maddelerinin poroz asfaltın hava boşluklarına etkisinin belirlenmesi.
- Poroz asfaltın hava boşluklarının farklı sıcaklıklarda değerlendirilmesi.
- YRK performansının belirlenmesi ve YRK’nın esnek ve rijit kaplamalarına göre avantajlarının olup olmadığının kontrol edilmesi.

Bu çalışmada, yaklaşık % 30 hava boşluğu içeriğine sahip poroz asfalt bir kaplama tasarlanmıştır. Poroz asfaltın hava boşlukları, üç farklı sıcaklıkta (100 °C, 110 °C, 120°C) iki katkı maddesiyle (Fiber ve Modifiye katkı) dizaynlar yapılarak denenmiştir. Ayrıca, poroz asfaltın optimum bitüm içeriği, agrega gradasyonu ile doğrudan ilişkisi olan bir denklem kullanılarak hesaplanmıştır. Son olarak, poroz asfaltın hava boşlukları akışkan harç ile doldurulmuş ve YRK’nın performansı Marshall stabilite, indirekt çekme dayanımı, basınç dayanımı ve Cantabro gibi testlerin yapılmasıyla değerlendirilmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

YRK, nispeten kısa ve öz bir geçmişi olduğundan, bu konudaki literatür oldukça sınırlıdır. Ayrıca, üretilen literatürün çoğu, detaylı mühendislik verileri sağlamaktan ziyade ticari ürün tanıtımına yöneliktir. Aşağıdaki bölüm, YRK ve benzer kaplamalar ile ilgili mevcut literatürü tanımlamaktadır.

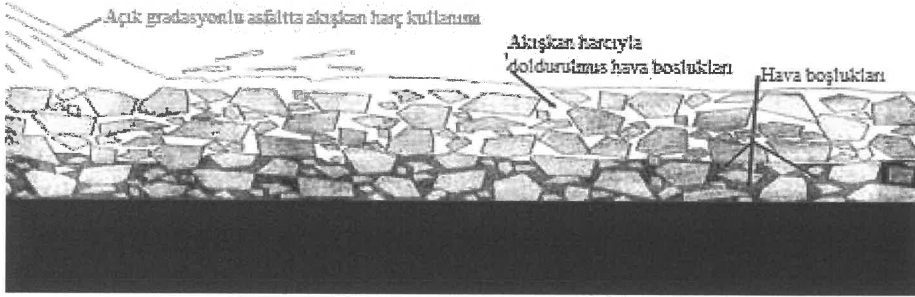
2.1. YRK'nın Yapım ve Özellikleri

YRK, 1960'lı yıllarda Fransa'da benzin atıklarının aşındırıcı etkisine (yağ, mazot vb.) ve aşınmaya dayanıklı bir kaplama türü elde etmek için geliştirilmiştir. Avrupa'da bilindiği gibi yarı rijid kaplama, Fransız inşaat şirketi Jean Lefebvre tarafından Portland çimento betonu (PCC)'ye uygun maliyetli bir alternatif olarak geliştirilmiştir (Anderton 2000). YRK'lar genellikle depo zeminlerinde, tank istasyonlarında, uçak park apronlarında yani ağır yüklerin taşındığı yol kesimlerinde kullanılmıştır. Bu yüzey kaplamasında kullanılan malzemeler, aşındırıcı trafiğe, ağır taşıt yüklerine ve yakıt dökülmesine karşı direçlidir. YRK, Fransa, İngiltere, Güney Afrika, Japonya, Avustralya ve Suudi Arabistan dahil olmak üzere çok sayıda ülkelerde başarıyla kullanılmıştır (Roffe 1989a).

Roffe, 1989 yılında, "Jean Lefebvre" firmaları için "Salviacim" kaplama işleminin genel açıklamalarını sunan iki yayın geliştirmiştir. Bu yayınlar, önerilen açık agrega gredasyonu ve harç formülasyonları gibi temel karışım tasarım rehberliğini içermektedir. Ancak bu yayınlarda kalınlık tasarımı ve mühendislik özellikler hakkında çok az bilgi sunulmuştur. YRK teknolojisinin başladığı Fransa'daki teknik yayınların eksikliğini, uygulamacılar bir çok Avrupa ülkelerinde yapılan saha çalışmalarıyla gidermişlerdir. Bu ülkelerdeki büyük yükleniciler, ileri teknolojilerini şirket gizliliği kararları veya ticari patentlerle korurlar. Bu nedenle, bu şirketler tarafından üretilen yayınlar az sayıdadır ve çok fazla teknik detay içermemektedir. Roffe yayınları ve Jean Lefebvre firmaların tarafından üretilen yayınlanmamış bazı gizli belgeler, 1980'lerde YRK konusunda yapılan Waterways Experiment Station (WES) araştırmalar için altlık verilerini oluşturmuştur (Roffe 1989b).

Rone, 1976 yılında ABD'de Salviacim kaplama sürecinin değerlendirmesini yazılı hale getirmiştir. Bu araştırma, ABD Ordusu için WES tipi kaplamanın yakıt ve petrol dökülmelerinden ve araçların aşındırıcı etkisinden kaynaklanan zararlarına karşı direncini belirleme amacıyla yapılmıştır. WES mühendislerine sağlanan kılavuzda, agregalar arasındaki hava boşluğunun % 15 ile % 25 arasında olmasına izin verilmiş olup genellikle bu boşluk oranı, günümüzde önerilen değerden olan % 10 daha düşüktür. 1976 yılındaki WES çalışmalarında kullanılan karışımdaki düşük hava boşluğunun, deneysel çalışmaların başarısız olmasında temel faktör olduğu görülmüştür. Çünkü Portland çimento harcı, poroz asfaltın boşluklarına tam olarak nüfuz edemediğinden kaplama yüzeyleri, trafik yükünün altında çatlamış ve yakıt ile petrol sızıntılarının, yüzey harcının hemen altındaki boşluklara girmesine neden olmuştur. Elde edilen başarısız sonuçlardan sonra çalışmalara bir süre ara verilmiş olup karışım dizaynında kullanılan malzemelerin miktarlarının dengeli bir şekilde yer aldığı yeni bir rehber geliştirilinceye kadar çalışmalar devam ettirilememiştir (Rone 1976).

1987'de ABD Ordu Mühendisler birliği, Salviacim sürecini yeniden değerlendirmek için WES'deki kaplama araştırmacılarını görevlendirmiştir. WES araştırmacıları, Fransa ve İngiltere'de inşaa edilen sahaları ziyaret etmişler ve bir teknik rapor oluşturmuşlardır. Avrupa'daki askeri mühendislerden gelen raporlara göre birçok ülkede bu teknoloji büyük bir başarı göstermiştir. Jean Lefebvre firmalarından elde edilen yeni teknik tasarım rehberine göre, agregaların gradasyonunun daha açık olması önerilmiştir (yüzde 25 ile 35 aralığında hava boşlukları). Yüzde 25 ile 35 arası hava boşluklarıyla tasarlanan kaplama ağır yakıt, petrol sızıntıları ve zırhlı tanklardan kaynaklanan hasarlara karşı tamamen dirençli bir kaplama olarak kabul edilmiştir. Şekil 2.1'de yukarıda bahis edilen YRK dizaynı görülmektedir (Ahrlich ve Anderton 1991).



Şekil 2.1. Yarı rijid kaplamada kullanılan poroz asfalt kaplaması

İkinci WES testlerinden elde edilen başarılı sonuçlar, çeşitli yeni askeri projelerin geliştirilmesini sağlamıştır. Bu çalışmalardan bir tanesi 1993 yılında yayın haline getirilmiştir. 1992 yılında Fort Campbell ve Kentucky'de çok sayıda havalimanı kaplamaları bu yöntemle yeniden inşa edilmiştir. Bunlardan biri YRK yüzey kaplamasını kullanılarak PCC kaplama yüzeyinin üzerinde yeniden inşaa edilen 6250 m²'lik bir kaplama alanıdır. Bu uygulamada, mevcut PCC'de apron alanı boyunca önemli bir yüzey çatlağı olduğu görülmüştür. Tamir yöntemi olarak PCC'nin sökülüp yeniden yapılması yerine 50 mm ile 150mm arasında kalınlıkta açık gradasyonlu asfalt betonu yapılmış, üzerine 50mm kalınlığında YRK harcı kullanılmıştır. WES mühendisleri yaşanan inşaat deneyimlerinden sonra iki önemli meseleyi tanımlar.

1. Harç materyallerinde homojenlik esastır. Fort Campbell'deki inşaat sırasında, araştırmacı ince agrega bittiğinde, harç içerisine daha kaba agrega kullanmıştır. Bu nedenle, elde edilen harç, açık gradasyon asfalta etkili bir şekilde nüfuz edememiş ve başarısız bir deneyime neden olmuştur.
2. İnşaat sonrasında, harcın fazlalığından kaynaklanan kayma direnci problemi yaşanmıştır. Kürlemeden sonra aşırı yüzey harçlarına sahip çeşitli alanların, uygun olmayan kayma direncine sahip olduğu belirlenmiş ve bu kaygan yüzeye sahip kaplamaları pürüzlendirmek için shot-blasting (yüzeyin yüksek devirli demir saçmalarla temizlenmesi) gerekmiştir (Ron ve Anderton 1991).

İkinci WES testlerinden elde edilen sonuçlara göre hazırlanan tasarım rehberinin yayınlanmasından kısa bir süre sonra Federal Havacılık İdaresi (FAA) üç ticari havaalanında, havalimanı kaplamalarını yeniden inşa etmek için YRK kullanarak üç projenin inşasına izin vermiştir. WES mühendisleri, bu projeleri 1990 ve 1991 yıllarında değerlendirip elde ettikleri sonuçları 1993 yılında rapor haline getirmişlerdir. Bu raporda

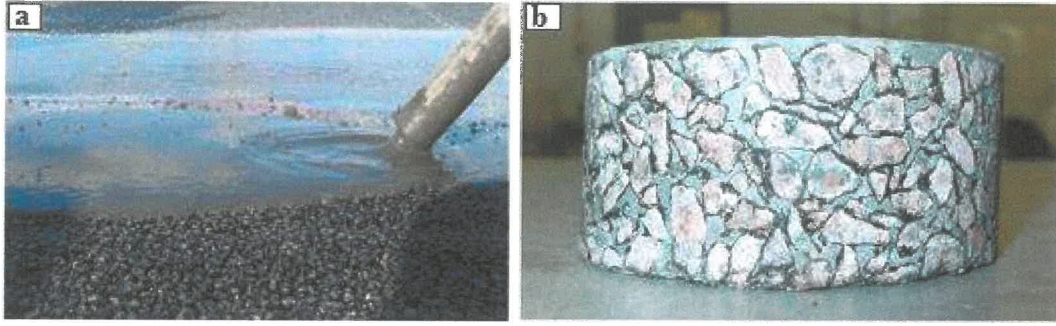
yazarlar, FAA'nın park apronları, düşük hızlı taksi yolları ve bazı havaalanı kaplama uygulamalarında YRK teknolojisini kullanarak başarılı sonuçlar elde ettiklerini, mevcut tasarım rehberinin yeterli olduğunu bildirmişlerdir (Ahrich ve Anderton 1993).

YRK yüzey kaplama malzemesi, Virginia Politeknik Enstitüsünde Strategic Highway Research Program (SHRP) sözleşmesi kapsamında değerlendirilmiştir. SHRP araştırmasının amacı, YRK'nin mekanik özelliklerini değerlendirmek ve beton köprü koruması, onarımı ve rehabilitasyonu ile ilgili dayanıklılık özelliklerini belirlemektir. YRK'nin mekanik özellikleri, Marshall stabilitesi, indirekt çekme mukavemeti, esneklik modülü ve basınç dayanımı gibi çeşitli testlerle değerlendirilmiştir. YRK'nin dayanıklılık özellikleri, su duyarlılığının (suda kalmak üzerine mukavemet kaybı) ve donma-çözülme özelliklerinin test edilmesiyle değerlendirilmiştir. Bu test sonuçlarının özeti Çizelge 2.1'de listelenmiştir. Çizelgedeki veriler, YRK malzemesinin yüksek kaliteli bitümlü sıcak karışım kaplamadan (BSK) daha iyi veya eşit mekanik özelliklere ve dayanıklılık özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir (Al-Qadi, Weyers, Collins, Glanville ve Dillard 1993).

Çizelge 2.1. SHRP değerlendirmesinden elde edilen laboratuvar sonuçlarının özeti (Al-Qadi, Weyers, Collins, Glanville ve Dillard 1993)

Malzeme özelliği	BSK	YRK
Marshall stabilitesi (KN)	8.7	19.0
İndirekt çekme mukavemeti (kpa)	715	985
Su hassasiyeti	0.87	0.72
Donma-çözülme	0.70	0.66-0.89
Esneklik modülü (MPa)	2040	4937
Basınç dayanımı(MPa)	1.2	5.5

Yarı rijit yol kaplaması %25-30 boşluklu poroz asfaltın boşluklarının düşük viskoziteli çimento harcıyla doldurulmasıyla dizayn edilen özel tasarım yol kaplaması çeşididir. Poroz asfaltın ve harcın birleştirilmesiyle oluşan kompozit kaplama tipi, çoğu ülkelerdeki genel mevcut kaplama tiplerine göre yüksek sıcaklığa daha dayanıklıdır. YRK'ların en önemli özelliği beton kaplamaların ve bitümlü sıcak karışım kaplamalarının avantajlarını içinde barındırmasıdır (Zhang ve wong 2011). Aşağıdaki şekilde dizaynda kullanılan harç ve yoldan alınan karot numunesi görülmektedir. Çizelge 2.2'de BSK ve YRK'nın karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 2.2. YRK uygulaması ; a) poroz asfaltta kullanılacak akışkan harç; b) poroz asfaltın akışkan harçıyla doldurulmuş numunesi (Recardo 2006)

Çizelge 2.2. YRK özelliklerinin diğer kaplama tipleriyle karşılaştırılması (Recardo 2006)

Özellikler	Esnek Kaplamalar	Rijit Kaplamalar	Yarı Rijit Kaplamalar
Tekerlek izi karşısında dayanımı	Zayıf	İyi	İyi
Kayma direnci	İyi	Zayıf	İyi
Yağ, benzin gibi kimyasal malzemelere karşı dayanımı	Zayıf	İyi	İyi
Nem hasarına karşı direnci	Zayıf	İyi	İyi
Bakım ve tamir	Kolay	Zor	Kolay
Ömür süresi	Az	Uzun	Uzun
Genleşme derzi	Gerekli değil	Gerekli	Gerekli değil
İnşaatı ve trafiğe açılması	Saatler içinde	0.5-3 ay	24 saat içinde
İnşaat ve bakım masrafı	İnşaat masrafı: Düşük Bakım masrafı: Yüksek	İnşaat masrafı: Yüksek Bakım masrafı: Düşük	İnşaat masrafı: Düşük Bakım masrafı: Düşük

Yukarıdaki Çizelgeden anlaşılacağı gibi YRK'ların özellikleri, rijit ve esnek kaplama tiplerine göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

YRK, yeni kaplama yapımında veya mevcut kaplama yapılarının rehabilitasyonunda (iyileştirilmesinde) kullanılabilir. YRK, PCC rijit kaplamaya göre düşük maliyetli bir alternatif olarak kullanılabilmesi gibi esnek bir kaplamanın performansını iyileştirmek için de kullanılabilir. Yapılan saha deneyimleri, YRK'nin herhangi bir çevresel koşulda pratik olarak kullanılabilmesini göstermektedir. YRK kaplama tipi, havalimanı ve araç depolama alanlarındaki yol yüzey kaplamaları, endüstriyel ve depo zeminleri, yakıt depoları ve ticari benzin istasyonları, şehir meydanları ve alışveriş merkezleri, tren istasyonları ve liman tesisleri dahil olmak üzere uluslararası piyasada çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. 1987'de ABD'deki ilk ticari uygulamasından beri, YRK çoğunlukla havaalanı ve hava alanı kaplama projelerinde kullanılmıştır. ABD'de yapılan YRK projelerinin bir listesi Çizelge 2.3'te verilmiştir (Anderton 2000).

Çizelge 2.3. YRK'nın Amerika Birleşik Devletlerindeki yapılmış projeler

Konum	Alan (m ²)	İnşaat tarihi
New York (Havalimanı apronu)	420	Mayıs 1987
Vicksbutg, MS (WES test bölümü)	835	Ağustos 1989
Orange County, CA (Taksi yolu)	8350	Ekim1990
Tampa havalimanı (Havalimanı apronu)	3350	Ocak 1991
Miami havalimanı (Kargo apronu)	3350	Ocak 1991
McChord AFB	6600	Nisan 1996
Concord, CA (Liman tesisleri)	125000	1992, 1993 1995, 1996

Çizelge 2.3'ün devamı

Fort Campbell, KY (Havalimanı apronu)	6250	Ağustos 1992
Malmstrom AFB, MT (Yakıt depolama alanları)	10835	Haziran 1993
Fort Belvoir, VA (Yükleme tesisleri)	8350	Haziran 1994
Pope AFB, NC (Havalimanı apronu)	29170	Haziran 1994
Altus AFB, OK (Taksi yolu)	8000	Haziran 1994
Johnstown ARC, PA (Havalimanı apronu)	60000	Ağustos 1996
Abdeen PG, MD (Tank yolu)	1625	Eylül 1996
Fort Jackson, SC (Tank istasyonu)	5750	Eylül 1996

Nottingham Üniversitesi'nde Boundy (1979) tarafından, Hardicrete adı altında ağır hizmet yol kaplamalarının mekanik özelliklerinin değerlendirilmesine yönelik bir araştırma projesi gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmaya göre, yüksek akışkanlıklı çimento harcı ile tam olarak doldurulmuş açık-gradasyonlu asfalt dizaynı (genellikle 40 mm kalınlığında) oluşturulmuştur. Bu projede, dizayn edilen yol kaplamasının sertliği, yorulma özellikleri ve kalıcı deformasyonu değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kalıcı deformasyon çok küçük olması nedeniyle önemsiz görülmüştür. Ayrıca Boundy tarafından önerilen Poisson oranı 20 °C'de 0.25 belirlenmiştir.

Collop ve Elliott (1999), laboratuvar ortamında üretilen ve günümüzde ticari bir ürün olarak satılan Densiphalt'ın temel özelliklerini değerlendirmek için bir araştırma çalışmasını yapmışlardır. Sonuç olarak kaba agreganın homojenliği, akışkan harcın poroz

asfaltın hava boşluklarına iyi nüfuz etmesine neden olmuştur. Bu çalışmadaki kullanılan açık gradasyonlu asfalt bileşimi Çizelge 2.4'te sunulmuştur.

Çizelge 2.4. Densiphalt'da kullanılan açık gradasyon asfalt bileşimi

Malzeme	Oran (kütleyle göre %)
10 mm boyutta kaba agrega	91.75
200 dereceli bitüm	4.1
Kalker filler	4.0
Cellulose fiber	0.15

Bir başka çalışmada, Çizelge 2.5'da gösterildiği gibi poroz asfalt dizaynı kullanılmıştır. Elde edilen dizaynın aşağıdaki şartları sağlaması beklenmiştir (Densit 2000).

Hava boşlukları (AASHTO T269): % 25-30

Cantabro Aşınma: Maks: % 15

Binder boşaltma (binder drain-off) Maks: % 0.3

Çizelge 2.5. Açık gradasyonlu asfalt için şartname değerleri

Malzeme	Oran (kütleyle göre %)
Kaba agrega	91.2-92.2
200 dereceli bitüm	3.6-4.6
Kalker filler	4.0
Cellulose fiber	0.2

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

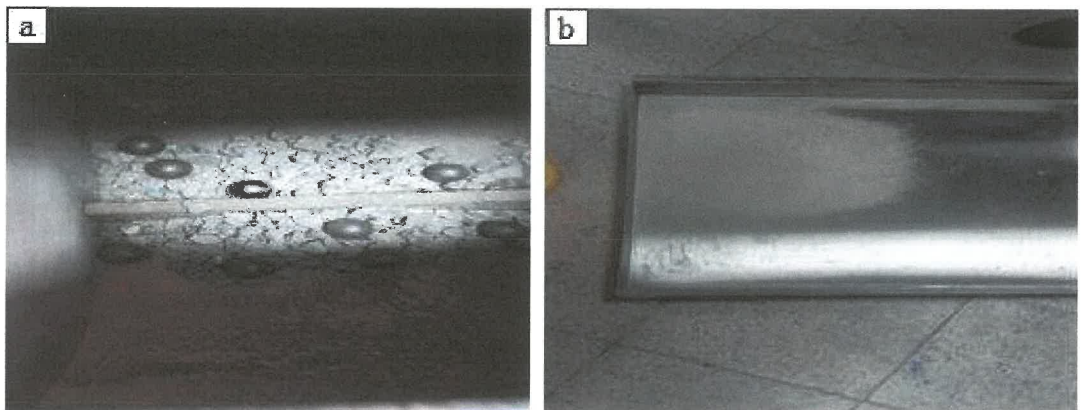
3.1.1. Agregal

BSK dizaynında kullanılan agregalar kırılmış, dayanıklı ve temiz olmalıdır. Bunun için agregalara performans deneyleri yapılmaktadır. Los Angeles aşınma, Magnezyum sülfat ve yassılık indeksi gibi agregaların fiziksel özelliklerinin ve performanslarının incelendiği deneylerin yanısıra agreganın, özgül ağırlığı karışımın direncini etkilemektedir. Bu nedenle, karışım dizaynında kullanılan agregalar, standart şartnamelerde belirtilen tüm testlerin limit değerlerine uygun olmalıdır.

Bu çalışmada, Yarı-rijit kaplama iskeletini oluşturan poroz asfalt karışımının tasarımında kullanılan agregalar kırma kireçtaşıdır. Agregaların karışım tasarımında kullanılmadan önce, agreganın çeşitli koşullardaki direncini değerlendirmek için özgül ağırlık, Los Angeles, magnezyum sülfat ve yassılık indeksi performans deneyleri yapılmıştır. YRK için Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ 2013)'de agregal deneyleri için standart limit değerleri bulunmamaktadır. Bu nedenle agregalara yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar daha önce yapılmış çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

3.1.1.1. Los Angeles aşınma deneyi

Aşınma değeri, Los Angeles makinasında aşındırılan numunelerin 1.6 mm elekten elenerek geçen ağırlığın aşındırılmamış numuneye yüzdesidir. Tez çalışmasında Los Angeles deneyi ASTM C131-03 standardına uygun bir şekilde yapılmıştır. Numuneler Tip B sınıfında belirtilen gradasyon ve miktarlarda hazırlanmıştır. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi Los Angeles makinasına numuneler 11 adet bilyeler ile birlikte koyulup makine 500 devir yapacak şekilde çalıştırılmıştır. Denklem (3.1)'den Los Angeles aşınma oranı bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, yapılmış projelerde kullanılan agregal Los Angeles deney sonucuna göre uygun görülmektedir (Setyawan 2003).



Şekil 3.1. Los Angeles deneyi; a) Los Angeles deneyinde kullanılan agregal numunesi; b) 12 no'lu elekten geçen agregal

$$L. A. aşınma değeri = \frac{W_1}{W_2} 100 \quad (3.1)$$

W1= 12 no'lu elekten geçen agreganın ağırlığı

W2 = Toplam agreganın ağırlığı

$$L. A. aşınma değeri = \frac{1037}{5000} * 100$$

$$L. A. aşınma değeri = 20.72\%$$

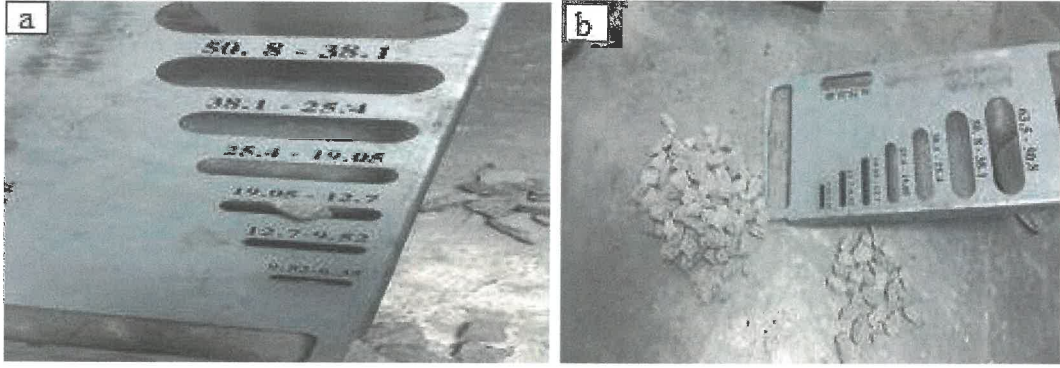
3.1.1.2. Yassılık indeks deneyi

Bu test, agreganın nominal boyutlarınının 0.6'dan küçük bir kalınlığına (en küçük boyut) sahip olduklarında yassı olarak sınıflandırılmasına dayanır. Yassı agreganın taneleri, asfalt karışımının dayanıklılığını etkilemektedir. Çünkü agreganın tek bir tarafa yönelme eğiliminde olduğu için kaplama yüzeyinin altında boşluklar oluşturmaktadır.

Yassılık indeksi deneyi için kullanılan agregaların Çizelge 3.1'de belirtildiği şekilde hazırlanmıştır. Daha sonra her agreganın boyutu kendi aralığından yassılık indeksi şablonu ile tek tek elle elenmiştir. Elde edilen sonuçlar geçmişte yapılan çalışmalara göre değerlendirildiğinde, poröz asfaltın tasarımında kullanılan agreganın gradasyonunun yeterli yassılık indeksi değerine sahip olduğu anlaşılmıştır (Setyawan 2003). Şekil 3.2 yassılık indeksi deneyinin aşamaları gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Yassılık indeks deneyinin hesaplama prosedürü

Elek boyutu (mm)		Kalınlık ölçer boyutu(mm)	Agreganın ağırlığı (gr)	Kalınlık ölçerinden geçen agreganın ağırlığı (gr)
Elekten geçen	Elekte kalan			
19	12.5	19-12.5	1000	107
12.5	9.5	12.5-9.5	500	63
9.5	6.3	9.5-6.3	250	21
Toplam ağırlığı			W 1= 1750	W2 = 191
Yassılık indeks değeri			$\frac{W_2}{W_1} 100$	10.9%



Şekil 3.2. Yassılık indeks deneyi; **a)** agregaların şablondan elenmesi; **b)** deneyden sonra agregaların ağırlığı

3.1.1.3. Özgül ağırlık ve su emme deneyi

Agregaların özgül ağırlığı ve su emme özelliği, bitümlü karışımların tasarımı için değerlendirilmesi gereken önemli iki faktördür.

Çalışmanın bu bölümünde, poroz asfaltta kaba agregaya yüzdesinin yaklaşık %90 kullanılması nedeniyle yalnızca kaba agreganın özgül ağırlığı ve su emmesi hesaplanmıştır. Çizelge 3.2’de gösterildiği gibi, ASTM C127-15 standardına göre kaba agregaya özgül ağırlığını hesaplamak için farklı boyutlarda belirli bir miktar agregaya kullanılmıştır. Hazırlanan kabataki agregaya taneleri, 24 saat suda bekletildikten sonra çıkartılmıştır. Sudan çıkartılan numune bir havlu yardımıyla yüzeyi kurularak doygün hale getirilmiş ve ağırlığı kaydedilmiştir (W1) (Şekil 3.3a, b). Daha sonra numunelerin sudaki ağırlıkları tartılmıştır (W2) (Şekil 3.3c). Numuneler sudan çıkartılarak 24 saat boyunca etüvde kurutulmuş ve kuru ağırlıkları kaydedilmiştir (W3) (Şekil 3.3d).

Çizelge 3.2. Kaba agregaya özgül ağırlığının hesaplanması

Elek boyutu (mm)	Doymuş agregaya ağırlığı (gr)	Suda agregaya ağırlığı (gr)	Kuru agregaya ağırlığı (gr)
19 - 12.5	1983.9	1244.4	1973
12.5 – 9.5	1000.1	624.1	996
9.5 – 4.75	1000.6	623.8	995
Toplam agregaya ağırlığı (gr)	W1 = 3984.5	W2 = 2492.3	W3 = 3964
Zahiri Özgül ağırlığı	$\frac{W3}{W3 - W2}$	2.69	
Hacim Özgül ağırlığı	$\frac{W3}{W1 - W2}$	2.65	
Su absorpsiyonu	$\frac{W1 - W3}{W3} 100$	0.517%	



Şekil 3.3. Kaba agrega özgül ağırlığı; **a)** suda 24 saat sonra agrega numuneleri; **b)** doymuş agrega ağırlığı; **c)** suda agrega ağırlığı; **d)** kuru agrega ağırlığı

3.1.1.4. Magnezyum sülfat ($MgSO_4$) deneyi

Magnezyum sülfat deneyi, asfaltta veya diğer karışım tiplerinde hava koşullarına maruz kaldığında agrega stabilitesini tahmin etmek için kullanılır. Bu test, doymuş çözelti içinde agreganın tekrarlı daldırılmasıyla (beş kez) gerçekleştirilmektedir. Daha sonra, geçirgen agrega boşluklarına sızan magnezyum sülfat miktarını kurutmak için, numuneler fırında kurutmaya bırakılmıştır. Çözelti ve agrega numunesi, test yapılırken dikkat edilmesi gereken iki önemli faktördür.

Bu deneyin ilk aşamasında, çözelti 3000 gr magnezyum sülfat ile 25-30 °C aralığında olan 2 litre suyun karıştırılmasıyla hazırlanmış ve (20 ± 2) °C'de (48 ± 1) saat boyunca bekletilmiştir. Deneyin ikinci aşamasında, 14 mm ve 10 mm elek arasında 500 gr agrega hazırlanıp 110 ± 5 °C'lik etüvde 24 ± 1 saat kurutulmuştur. Kurutulan numunelerden (420 ± 0.1) ve (430 ± 0.1) gr agregalar (M1) alınıp ayrı ayrı sepetlere koyulmuş (Şekil 3.4a). Hazırlanan Magnezyum sülfat çözeltisinin yoğunluğu hidrometreyle kontrol edildikten sonra (çözeltilerin yoğunluğu 1292 ± 0.008 g / ml olmalı), numuneler çözeltiliye daldırılmış ve $(20 \text{ °C} \pm 2)$ sıcaklığında $MgSO_4$ cihazının kabininde (17 ± 0.5) saat boyunca bekletilmiştir (Şekil 3.4b, c, d). Numuneler çözeltiliden

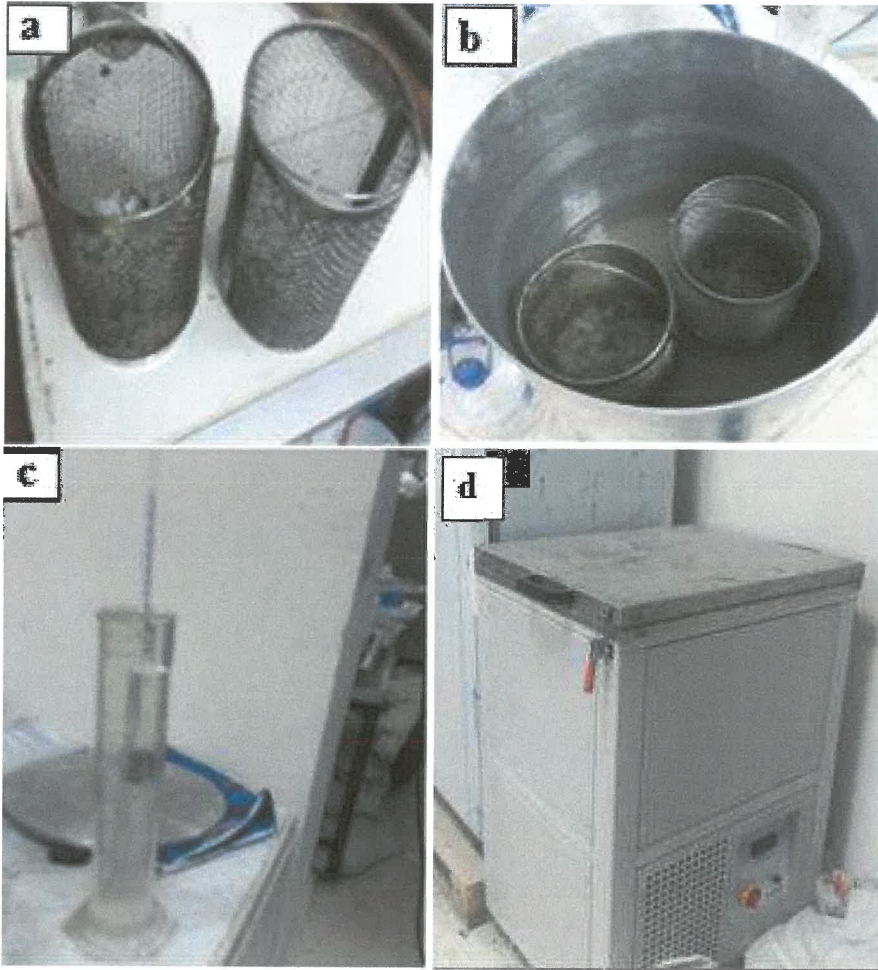
ıkarıldıktan sonra suyunu szme için laboratuvar sıcaklığında (2 ± 0.25) saat bekletilmiştir. Süzülme işlemi tamamlandıktan sonra (24 ± 1) saat (110 ± 5)°C'lik etüvde kurutulmuş, daha sonra laboratuvar sıcaklığında (5 ± 0.25) saat boyunca soğumaya bırakılmıştır. Bu döngü, Şekil 3.4'de gösterildiği gibi TS EN 1367-2 standardına göre 5 kez tekrarlanmıştır. Beşinci döngüden sonra, agregalar 10 mm'lik elekten elenmiş ve ağırlıkları kaydedilmiştir (M_2). Agregalar ağırlık kaybı yüzdesi denklem (3.2) ile hesaplanmıştır.

$$MS = \frac{M_1 - M_2}{M_1} * 100 \quad (3.2)$$

$$MS_1 = \frac{421 - 414.5}{421} * 100 = 1.54$$

$$MS_2 = \frac{431 - 428.8}{431} * 100 = 0.51$$

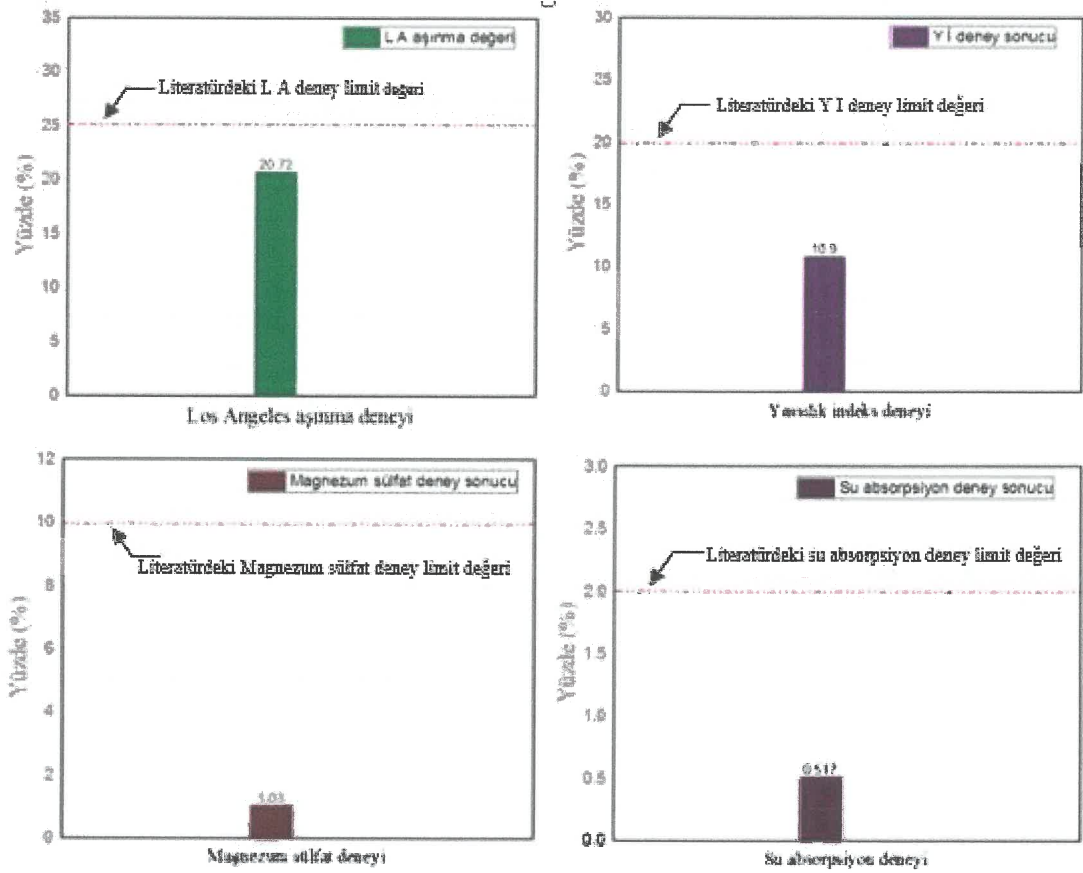
$$MS = \frac{MS_1 + MS_2}{2} * 100 = 1.03$$



Şekil 3.4. Magnezyum Sülfat deneyi; **a)** Sepetlerdeki agregalar numuneleri; **b)** zltideki agregalar numuneleri; **c)** zltilerin yoğunluğunun belirlenmesi; **d)** Magnezyum sülfat deney cihazı

3.1.1.5. Agregalara yapılan deneylerin sonuçları

Agregaların dayanım özelliklerini belirlemek için yapılan özgül ağırlık ve su emme, Los Angeles, yassılık indeksi ve magnezyum sülfat deneyleri yapılmıştır. Şekil 3.5’de gösterildiği gibi Los Angeles, yassılık indeksi, magnezyum sülfat ve su absorpsiyon değerleri sırasıyla 20.72, 10.9, 1.03 ve 0.517 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.5. Agregada deneylerin özeti

3.1.2. Bitüm

Bitüm, petrolden veya kaya asfalttan elde edilen siyah renkli bir malzemedir. Bitüm tipi, asfalt performansını etkileyen önemli bir unsurdur. Bu nedenle bu çalışmada, karışımda kullanılan bitüm özelliklerini değerlendirmek için bitümün özgül ağırlığı ve penetrasyon testleri yapılmıştır.

3.1.2.1. Bitüm özgül ağırlığının deneyi

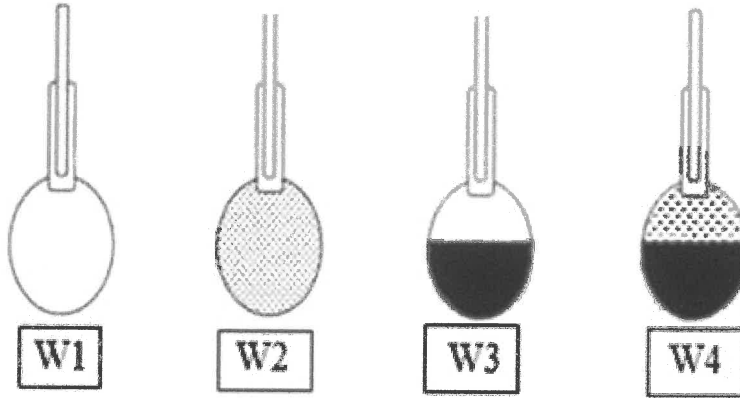
Bitüm özgül ağırlığı, bitüm ağırlığının 25°C’de eşit su hacminin ağırlığına oranı olarak tanımlanır. Genellikle karışımdaki bitüm yayılma oranlarının belirlenmek amacıyla bitümün özgül ağırlığının hesaplanması gerekmektedir. Bu deneyde bitümün özgül ağırlığını hesaplamak için, piknometrenin oda sıcaklığındaki ağırlığı kaydedilmiştir (W2). Bitüm, yeterli akışkan hale gelmesi için etüvde 100 °C’de ısıtılmış ve ısıtılan bitüm piknometrenin yarısına kadar doldurulmuştur. Piknometre içindeki bitüm oda

sıcaklığında 30 dakika soğumaya bırakılmış ve ağırlığı kaydedilmiştir (W3). Daha sonra piknometrenin diğer kalan alanı saf suyla doldurulmuş ve ağırlığı tartılmıştır (W4). Deney sonucunda, bitüm özgül ağırlığı Çizelge 3.3’de gösterildiği gibi hesaplanmış ve 1.01 olarak bulunmuştur. 1.01 özgül ağırlıklı olan bitüm laboratuvarında yapılan bütün deneylerde kullanılmıştır. Şekil 3.6’da bitüm özgül ağırlığının deneyi gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. Bitüm özgül ağırlığının hesaplanması

Piknometre ağırlığı	W1	63.7gr
Pik + su ağırlığı	W2	128.1gr
Pik + bitüm ağırlığı	W3	98.93gr
Pik + bitüm + su ağırlığı	W4	128.4gr
Bitüm özgül ağırlığı	$\frac{W3 - W1}{(W2 - W1) - (W4 - W3)}$	1.01 gr/cm ³

Bitümün özgül ağırlığının hesaplanması



Şekil 3.6. Bitümün özgül ağırlığı (Anonymous 1)

3.1.2.2. Penetrasyon deneyi

Penetrasyon değeri, standart iğne tarafından belirli yük, zaman ve sıcaklık koşulların altında bitümün içine nüfuz eden dikey mesafesidir ve bu mesafe cihazden milimetrenin onda biri olarak okunmaktadır.

Bu deneyde, ASTM D5 standartlarına göre eritilmiş bitüm küçük kabın içine dökülmüş ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra 1.5 saat boyunca su banyosunda bekletilip test edilmiştir. Çizelge 3.4’de gösterildiği gibi ortalama bitüm değeri 59 olarak belirlenmiştir. Bu deneyin sonucuna göre, tüm laboratuvar deneylerinde

50/70 dereceli bitüm kullanılmıştır. Şekil 3.7’de asfalt karışımında kullanılan bitümün penetrasyon değerini belirlemek için kullanılan deney düzeneği gösterilmektedir.

Çizelge 3.4. Bitüm penetrasyon değerinin hesaplanması

Deney numarası	Bitümün penetrasyon derecesi (mm)	Bitümün penetrasyonu (Ortalama değeri (mm))
1	60.4	$\frac{60.4 + 57.5 + 59.3}{3} = 59$
2	57.5	
3	59.3	



Şekil 3.7. Bitüm penetrasyon deneyi

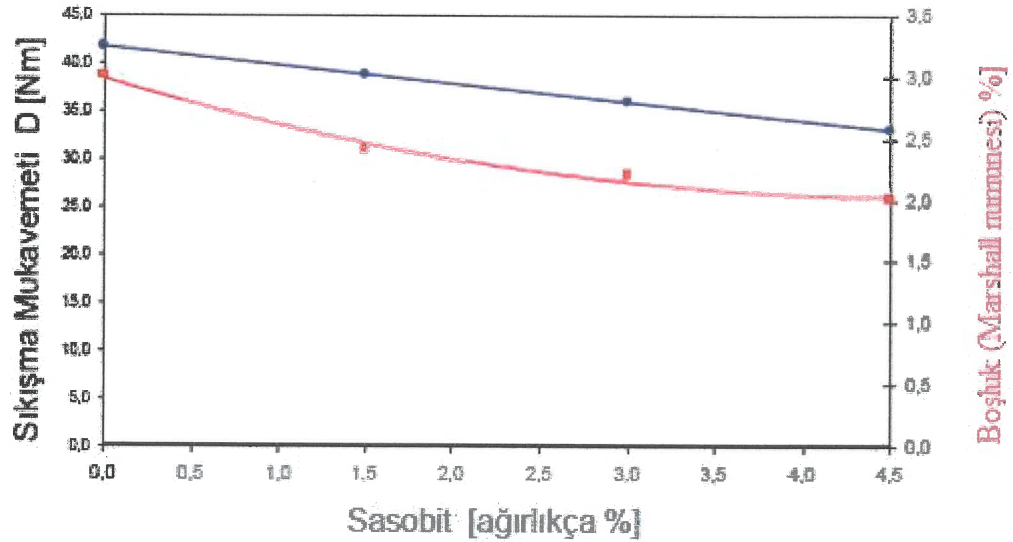
3.1.3. Modifiye katkı

Modifiye katkı, 1997'den beri asfalt yol yapımın alanında kullanılan bir malzemedir. Kaplama kalitesini düşürmeden asfalt kaplamanın, karışım ve sıkıştırma sıcaklığını düşürmek için geliştirilmiş birçok ürün vardır. Modifiye katkı, 115 °C'nin üzerindeki sıcaklıkta (% 1 ile % 4 bitüm ağırlığına göre) bitümle tamamen karıştırılmış bir ürün olup daha uzun taşıma mesafelerine izin veren özelliğe sahiptir. Çizelge 3.5'te gösterildiği gibi, bitümün özellikleri modifiye katkılarıyla karıştırıldığında değişmektedir. Şekil 3.8'de gösterildiği gibi, karışım içindeki modifiye katkı, karışımın sıkıştırma mukavemetinin ve hava boşluklarının azalmasına neden olmaktadır.

Çizelge 3.5. Modifiye katkı ile modifiye bitümün özellikleri (Anonymous 2)

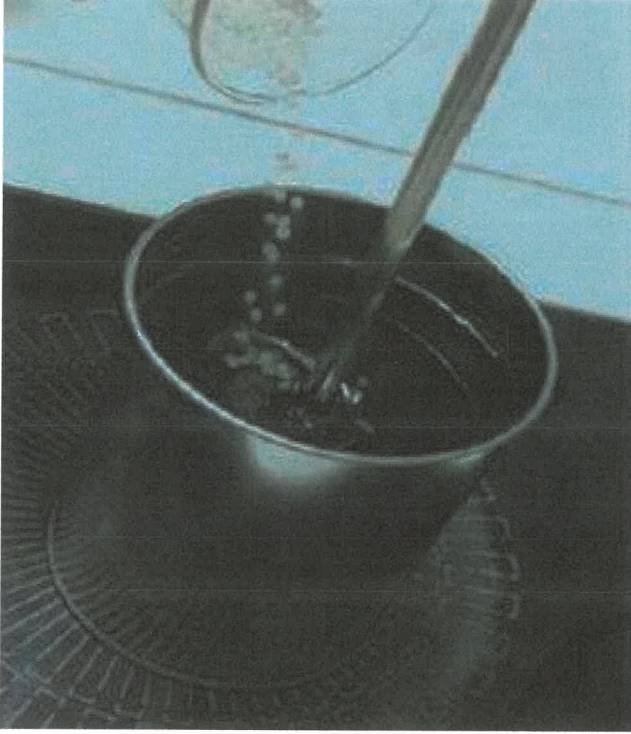
Modifiye bitümün	70/100	70/100 + modifiye katkı
25 °C'de İğne Penetrasyonu 1/10 mm	70-100	35-45
Yumuşama noktası °C	43-49	70-80
Fraass kırılma noktası °C	≤ -10	≤ -10

Taş Mastik Asfalt 0/11 S; 70/100 bitüm



Şekil 3.8. Modifiye katkıle tasarlanan asfaltın sıkışma mukavemeti ve boşluk miktarı (Anonymous 2)

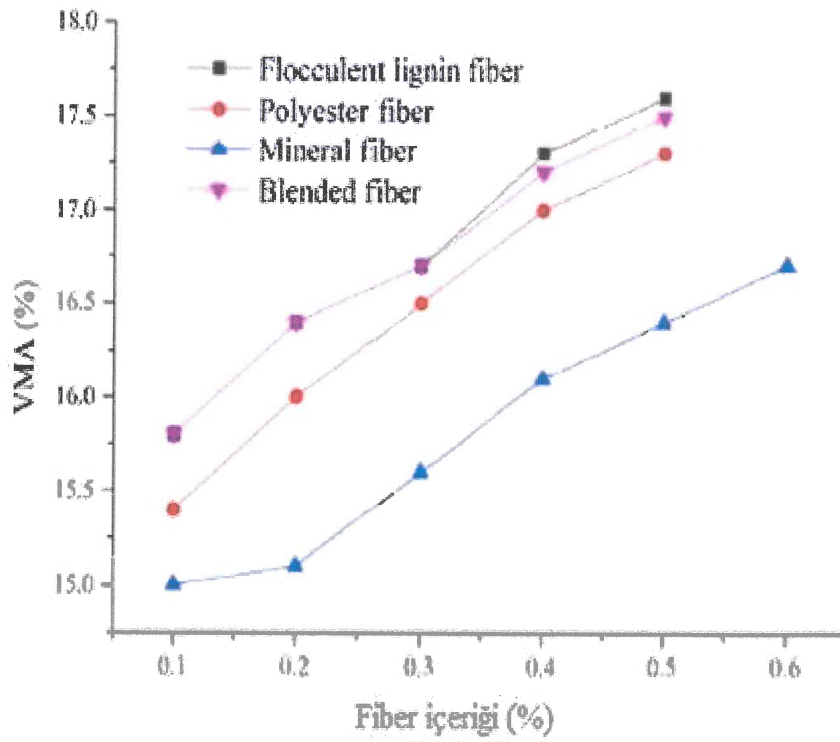
Bu çalışmada, modifiye katkı (% 3 bitüm ağırlığına göre) 135°C sıcaklıkta bitüm ile karıştırılmıştır (Şekil 3.9). Daha sonra bu karışım sıkıştırma sıcaklığını azaltmak için asfalt karışımının tasarımında kullanılmıştır.



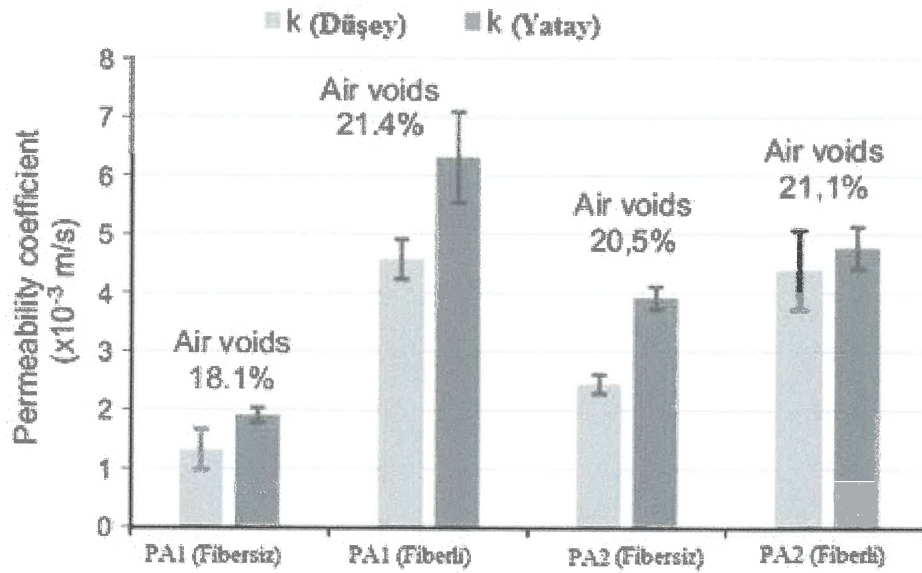
Şekil 3.9. Bitümde kullanılan modifiye katkı

3.1.4. Fiber

Fiber kullanımının tarihçesine bakıldığında, ilk olarak fiberlerin 2000 yıl önce inşa edilmiş olan Çin Seddinde kullanıldığı görülmektedir (Abtahi, Sheikzadeh ve Hejazi 2010). Aslında fiber, asfalt karışımının dinamik modülü (Wu, Ye ve Yue 2007), nem duyarlılığı (Putman ve Amirhanian 2004) tekerlek izi direnci (Chen, Li, Hu, ve Zhang 2004) ve donma - çözülme direncini (Echols 1989) değiştirir. Cellulosic fiber, mineral fiber, sentetik polimer fiber, cam fiber, halı fiber ve geri dönüştürülmüş lastik fiberi dahil olmak üzere asfalt karışımlarında çok çeşitli fiber tipleri kullanılmaktadır. Bunların içinden Cellulosic fiber, asfalt karışımında kullanılan en yaygın katkı maddesidir. Cellulosic fiberin temel amaçlarından biri, depolama ve taşıma sırasında bitümün süzülmesini engellemektir. Genel olarak, fiberlerin karışım içinde uygulanması için iki farklı yöntem vardır; ıslak işlem ve kuru işlem. Islak işlemde, fiber, karışıma eklenmeden önce asfalt ile karıştırılır. Kuru işlemde ise fiber, karışıma bitüm eklenmeden önce agrega ile karıştırılır. Fiberlerin asfaltın hava boşlukları üzerine etkisi yapılan çalışmalara göre, fiberin karışım içine uygulanması, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de gösterildiği gibi asfaltın hava boşluklarını arttırmaktadır (Afonso, Dinis-Almeida ve Sena 2017; Yanping, Haibin, Ping, Guijuan, Huaxin ve Rui 2017).



Şekil 3.10. Dört farklı fiber tipiyle asfalt numunelerinin Vh'sı (Afonso, Dinis-Almeida ve Sena 2017)



Şekil 3.11. Permeabilite katsayısı sonuçları (Yanping, Haibin, Ping, Guijuan, Huaxin ve Rui 2017)

Bu çalışmada, Şekil 3.12’de gösterildiği gibi Cellulosic fiber (karışımın ağırlığına göre % 0.3), poroz asfaltın hava boşluklarını ve performansını geliştirmek için kuru yöntemle kullanılmıştır. Cellulosic fiber, bitüm ile doğal cellulose fiberlerinden yapılmış ve piyasada Viatop Premium adı altında satılmaktadır. Viatop Premium, ağırlık olarak % 90 ARBOCEL ZZ 8/1 ve ağırlık olarak % 10 50/70 dereceli bitüm karışımıdır (Afonso, Dinis-Almeida ve Sena 2017). Çizelge 3. 6’da fiberin teknik özellikleri gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Poroz asfalta kullanılan fiber

Çizelge 3.7. Fiberin teknik özellikleri (Anonymous 3)

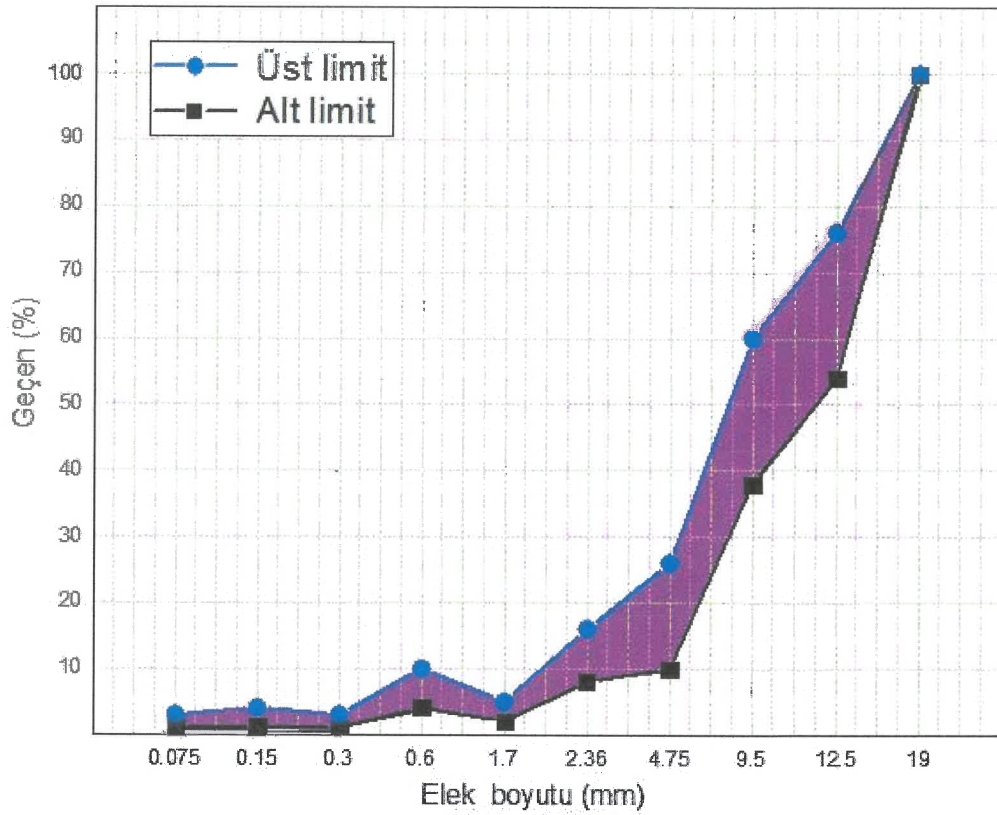
Bileşimi	Granül olarak sıkıştırılmış Cellulosic elyaf (Fiber)
Görünümü	Granül elyaf
Renk	Kahverengi
Pelet çapı	7mm
Yoğunluk	450g/L
Ortalama lif uzunluğu	2mm
Isıl dayanımı	> 250 °C

3.2. Metot

3.2.1. Agrega gradasyonu

Asfalt karışımının tasarımında agrega gradasyonu ve agrega oranı, dikkat edilmesi gereken iki önemli faktördür. Kaplama direnci, agrega gradasyonu ve boyutuna göre değişmektedir. Bu faktörler, özellikle ağır yük trafiğinde kaplamanın dayanıklılığını ve direncini etkilemektedir.

Bu deneysel çalışmada, YRK tasarımının iki temel elementinden (1.poroz asfalt, 2. Akışkan harç) sadece %25-30 hava boşluğu içeriğine sahip poroz asfaltın yüzey kaplaması tasarlanmaktadır. Poroz asfaltın tasarımının ilk aşamasında, Amerika Birleşik Devletlerinde yapılan YRK projesine göre, Şekil 3.13’de gösterildiği gibi yaklaşık % 30’luk hava boşluğu içeriğine sahip poroz asfaltı elde etmek için referans bir agrega gradasyonu kullanılmıştır (Roffe 1989a).



Şekil 3.13. Referans agrega gradasyonunun limiti

Poroz asfalt karışımının tasarımında kullanılan birinci karışım agrega gradasyonunu elde etmek için referans agrega gradasyon limitleri kullanılmıştır. Daha sonra YRK’da kullanılan poroz asfaltın hava boşluklarını elde etmek için üç farklı agrega gradasyonu denenmiştir.

3.2.2. Optimum bitüm içeriği (OBC)

Bitüm, özellikle YRK’da kullanılan poroz asfaltın tasarımında, bitümlü karışımın özelliklerini önemli ölçüde etkileyen malzemedir. Bitüm oranı, hava boşlukların içeriğiyle ters bir ilişkiye sahiptir. Çünkü hava boşluklarının artması bitüm içeriğinin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, bitüm içeriğinin yüksek yüzdesi, bitümün trafik yükü altında akmasına neden olmaktadır. Asfalt karışımında bitüm içeriğinin düşük yüzdesi ise bitüm yetersizliğine neden olmaktadır. Bu çalışmada, yukarıdaki problemleri önlemek için poroz asfalt karışımı, optimum bitüm içeriğiyle tasarlanmıştır. Poroz asfaltın optimum bitüm içeriği, agrega özelliklerine dayanan (3.3)’deki denklemle hesaplanmaktadır (Anderton 2000).

$$OBC = 3.25 (\alpha) \Sigma^{0.2} \quad (3.3)$$

Burada $\alpha = 2.65/G_s$, G_s karışımındaki agregaların toplam özgül ağırlığı

$\Sigma =$ spesifik yüzey alanı = $0.21G + 5.4S + 7.2s + 135f$

$G =$ 4.75 mm elek üzerinde kalan agrega yüzdesi

$S =$ 4.75 mm elekten geçen ve 600 μ m elek üzerinde kalan agrega yüzdesi

$B =$ 600 μ m elekten geçen ve 75 μ m elek üzerinde kalan agrega yüzdesi

$f =$ 75 μ m elekten geçen agrega yüzdesi

$$G_s = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (3.4)$$

burada P_1, P_2, P_n karışımında kullanılan agrega yüzdesi ve G_1, G_2, G_3 agreganın zahiri özgül ağırlığı

3.2.3. Yarı rijid kaplama numunelerin hazırlanması

Agrega karışım gradasyonunun ve optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinden sonra, poroz asfalt karışımı Marshall numunelerin hazırlanmasıyla tasarlanmıştır. Marshall numunelerinde daha fazla hava boşluğu içeriği elde edebilmek için numunenin bir tarafına 4.5 kg ağırlığında Marshall çekici ile 25 darbe yapacak şekilde sıkıştırılmıştır. Ayrıca, modifiye katkı ve fiber poroz asfaltın hava boşluğu içeriğini ve performansını değerlendirmek için asfalt karışımında katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Hazırlanan Marshall numunelerinin, sıcaklıklarını düşürmek için 24 saat boyunca laboratuvar sıcaklığında bekletilmiştir. Daha sonra poroz asfalt numunelerinin hava boşlukları akışkan harcıyla doldurulmuştur. Şekil 3.14’de akışkan harcıyla doldurulmuş poroz asfalt numunelerini gösterilmektedir.



Şekil 3.14. Yarı rijid kaplama numuneleri

Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ danışmanlığında, Mansor NAZARY tarafından yürütülmekte olan yüksek lisans tez çalışmasında yapılan deneylere göre yarı rijit kaplama dizaynında kullanılan poroz asfaltın hava boşluklarını doldurulacak harç, ince agregaya, çimento, akışkanlaştırıcı katkı ve suyun bir kombinasyonudur. Bu tez çalışmasında akışkan harç karışım oranı çimento ve ince agregaya için 0.5 oranında belirlenmiştir. Su çimento oranı ve akışkanlaştırıcı sırasıyla çimento ağırlığına göre 0.70 ve 0.5 oranında kullanılmıştır. Ayrıca, akışkan harç karışımında kullanılan ince agregalar farklı yüzdelerle sahip farklı agregaya boyutlarıyla (%2 (0.6-0.425mm), %64.5 (0.425-0.18mm) ve %33.5 (0.18-0.075mm)) kullanılmıştır (Nazary 2019).

3.2.4. Yarı rijid kaplama performansı

YRK performansını araştırmak için rijitlik ve esneklik özelliklerini belirleyecek farklı deney tipleri uygulanmalıdır. Bu nedenle bu çalışmada, YRK performansını değerlendirmek için Marshall stabilitesi, indirekt çekme dayanımı, basınç dayanımı ve Cantabro gibi çeşitli performans deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmadaki bütün kaplama performans deneyleri hava kürelemede (3 gün, 7 gün ve 28 gün) yapılmış ve sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

3.2.4.1. Marshall stabilite deneyi

Marshall stabilite deneyi, silindirik bitümlü numunenin plastik deformasyona karşı direncini değerlendirmek için yapılmıştır. Numuneler daha boşluklu bir dizayn elde etmek için AASHTO T 245-97 standartlarına göre bir yönde 25 darbeyle dizayn edilmiştir. ASTM D6927-06 standarta göre Marshall numuneleri, 30-40 dakika boyunca 60 °C sıcaklıkta su banyosuna bırakılmıştır. Şekil 3.15’de gösterildiği gibi numunelerin stabilitesini değerlendirmek için dakikada 5mm’lik sabit yük altında Marshall test makinesine yerleştirilmiştir. Numunenin kırılma anındaki maximum yük Marshall stabilite değerini ve numune çapının yük yönündeki değişimi akma değerini vermektedir. Numunelerin su banyosundan çıkarılması ve deneyin tamamlanması arasındaki toplam süre 30 saniyeyi geçmemelidir.



Şekil 3.15. Marshall stabilite deneyi

3.2.4.2. İndirekt çekme dayanım deneyi (ITS)

ITS sıkıştırılmış bitümlü karışımın çekme dayanımı özelliklerini değerlendirmek için kullanılmaktadır. İndirekt çekme dayanımı, ASTM D6931-17'e göre numunelerin çap aksına sabit bir deformasyon hızında (50 mm /dakika) maksimum yük olarak belirlenmektedir.

Bu çalışmada, YRK'nın çekme dayanımını değerlendirmek için, indirekt çekme deneyi oda sıcaklığında 100 mm çapında ve 80 mm kalınlığında olan numunelerin üzerinde yapılmıştır. Numunenin kırıldığı andaki maksimum yük ITS değeri olarak tanımlanmıştır. Numunelerin çekme dayanımı denklem (3.5) ile hesaplanmıştır. Şekil 3.16, Marshall numunesine yüklenen indirekt çekme deneyi gösterilmektedir.

$$St = \frac{2P}{\pi tD} \quad (3.5)$$

Burada, St çekme dayanımı (kpa), P maksimum yük (kN), t numune kalınlığı (m), D numune çapı (m)

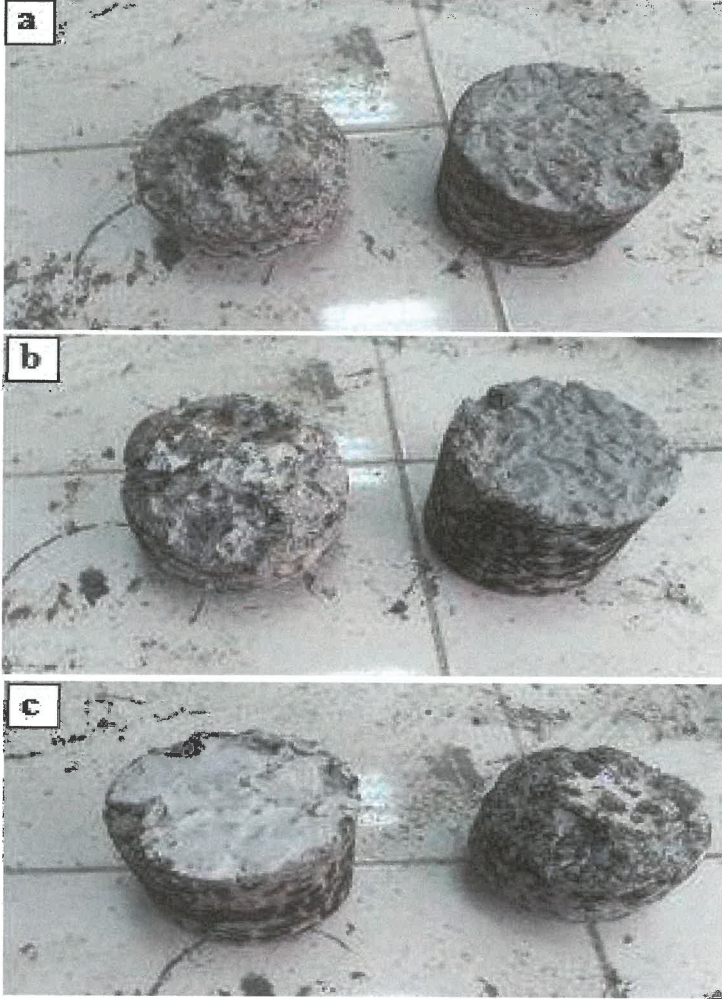


Şekil 3.16. İndirekt çekme deneyi

3.2.4.3. Cantabro deneyi

Cantabro deneyi, numunelerin ağırlık kaybı yüzdesini belirlemek için yapılır. Genellikle, Cantabro deneyi, numunelerin aşınma kaybını belirlemek için açık gradasyonlu asfalt karışımında kullanılmaktadır. Bu deney, farklı kürlenme süresi olan üç grup numuneye yapılmıştır. Laboratuvar sıcaklığında birinci grup, ikinci grup ve üçüncü grup numuneler sırasıyla 3, 7 ve 28 gün bekletilmiştir. Kürlenme süreleri tamamlanan her bir numunenin ağırlığı, Los Angeles makinesine koyulmadan önce kaydedilmiştir (A). Daha sonra numune Los Angeles makinesine (300 devir 30-33 R / dak hızıyla) küre olmadan bırakılmış ve 30-33 R/dak hızla 300 devir olacak şekilde çalıştırılmıştır. Makineden çıkarılan numune ağırlığı kaydedilmiş (B) ve numune ağırlık kaybı yüzdesi denklem (3.6) ile hesaplanmıştır. Şekil 3.17a, b, c'de üç farklı kürlenme süresinde cantabro testinden önceki ve sonraki Marshall numunelerini göstermektedir.

$$\text{Kütle kaybı (\%)} = \frac{A-B}{A} * 100 \quad (3.6)$$



Şekil 3.17. Cantabro deneyi; a) 3 günlük cantabro testinden önceki ve sonraki Marshall numuneleri; b) 7 günlük cantabro testinden önceki ve sonraki Marshall numuneleri; c) 28 günlük cantabro testinden önceki ve sonraki Marshall numuneleri

3.2.4.4. Basınç dayanım deneyi

Basınç dayanım deneyi, genellikle, bir malzemenin kırılmadan dayanabileceği basınç yükü miktarını ölçmek için rijit kaplama malzemelere yapılmaktadır. Bu deney, tez çalışması üzerinde çalışılan kaplama tipi yarı rijit olduğu için gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanım deneyi, ASTM C39'a göre oda sıcaklığında üç farklı kürleme süresinde (3 gün, 7 gün, 28 gün) 100 mm çapında ve 80 mm yüksekliğinde olan YRK numunelerine yapılmıştır. Her YRK numunesi, Şekil 3.18'de gösterildiği gibi, ASTM C617'de belirtilen standart şartlara göre üzeri kalker bileşiğiyle kaplanmıştır. Deney, Şekil 3.19'de gösterildiği gibi YRK'nın silindirik başlıklı numunelerine 1.3 mm / dak sabit hızda aksenal bir yük uygulanarak basınç gerçekleştirilmiştir. Denklem (3.7)'de gösterildiği gibi, numunenin basınç dayanımı, test sırasında elde edilen maksimum yükün numunenin kesit alanına bölünmesiyle hesaplanmıştır.

$$P = \frac{F}{A} \quad (3.7)$$

Burada, P basınç dayanımı, F maksimum aksenal yük ve A numune alanı



Şekil 3.18. Kalker bileşiğiyle kaplanmış Marshall numuneleri



Şekil 3.19. Basınç dayanımı deneyi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Agrega Karışım Oranlarının ve Karışım Gradasyonunun Belirlenmesi

Karışımında kullanılan Agrega gradasyonu ve her bir agreganın boyutun yüzdesi, asfalt karışımının tasarımında önemli bir rol oynamaktadır. Bu faktörler, dayanıklılık, stabilite, yorulma direnci, kayma direnci ve nem hasarı gibi kaplamanın performansını etkilemektedir.

Bu çalışmanın metot bölümünde belirtildiği gibi, optimum agreganın karışım gradasyonunu hesaplamak için YRK projesinde kullanılan referans bir agreganın gradasyonu kullanılmıştır. Çizelge 4.1’de gösterilen agreganın limitleri, daha fazla hava boşluğuna sahip (%25-30) bir poroz asfalt kaplama elde etmek için birinci optimum karışım agreganın gradasyonunu hesaplanmasında kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Açık gradasyonlu asfalt agregası

Elek (mm)	A	B	C	D	E	F	Limit değerleri
19	100	100	100	100	100	100	100
12.5	3	98.7	100	100	100	100	54-76
9.5	0.6	11.7	99.5	100	100	100	38-60
4.75	0.6	0.6	11.2	99.9	100	100	10-22
2.36	0.6	0.6	1	17.3	98.8	100	8-16
1.18	0.6	0.6	0.9	1.9	13.5	100	-
0.6	0.6	0.6	0.9	1.7	2.7	99.2	4-10
0.3	0.6	0.6	0.9	1.7	2.5	17.4	-
0.15	0.5	0.6	0.9	1.7	2.5	4.7	-
0.075	0.5	0.5	0.8	1.6	2.4	4.2	1-3

Çizelge 4.1’deki spesifik agreganın limitlerine göre, karışım dizaynındaki her agreganın gradasyon yüzdesini gösteren optimum agreganın karışım gradasyonu KTS (2013)’de belirlenen metotla A, B, C, D, E, F değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

F No 0.6mm

$$\frac{4 + 10}{2} = 7$$

$$\frac{99.2(F)}{100} = 7 \Rightarrow F = 7.05 \approx 7\%$$

E No 2.36mm

$$\frac{8 + 16}{2} = 12$$

$$\frac{98.8(E)}{100} + 7 = 12 \Rightarrow E = 5\%$$

D No 4.75 mm

$$\frac{10 + 22}{2} = 16$$

$$\frac{99.9 (D)}{100} + 5 + 7 = 16 \Rightarrow D = 4\%$$

C No 9.5 mm

$$\frac{38 + 60}{2} = 49$$

$$\frac{99.5 (C)}{100} + 4 + 5 + 7 = 49 \Rightarrow C = 33\%$$

B No 12.5 mm

$$\frac{54 + 76}{2} = 65$$

$$\frac{98.7 (B)}{100} + 33 + 4 + 5 + 7 = 65 \Rightarrow B = 16\%$$

A No 19 mm

$$A = 100 - 16 - 33 - 4 - 5 - 7 \Rightarrow A = 35\%$$

A, B, C, D, E ve F yüzdeleri belirlenerek optimum agrega karışım formülü Çizelge 4.2'de hesaplanmıştır. Ayrıca tüm laboratuvar deneylerinde, 1.18 ve 0.3mm eleklerin laboratuvarımızda bulunamaması nedeniyle 1.7 ve 0.425 mm elekleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.2. Asfalt karışımındaki agrega yüzdesi

Elek (mm)	%35A + %16B + %33C + %4D + %5E + %7F	Optimum karışım gradasyonu (geçen %)
19	100	100
12.5	0.35(3)+0.16(98.7)+33+4+5+7	65
9.5	0.35(0.6)+0.16(11.7)+0.33(99.5)+4+5+7	51
4.75	0.34(0.6)+0.16(0.6)+0.33(11.2)+0.04(99.9)+5+7	19
2.36	0.35(0.6)+0.16(0.6)+0.33(1)+0.04(17.3)+0.05(98.8)+7	13
1.7	0.35(0.6)+0.16(0.6)+0.33(0.9)+0.04(1.9)+0.05(13.5)+7	8
0.6	0.35(0.6)+0.16(0.6)+0.33(0.9)+0.04(1.7)+0.05(2.7)+0.07(99.2)	7
0.425	0.33(0.6)+0.16(0.6)+0.33(0.9)+0.04(1.7)+0.05(2.5)+0.07(17.4)	2
0.15	0.35(0.5)+0.16(0.6)+0.33(0.9)+0.04(1.7)+0.05(2.5)+0.07(4.7)	1.1
0.075	0.35(0.5)+0.16(0.5)+0.33(0.8)+0.04(1.6)+0.05(2.4)+0.07(4.2)	1

4.2. Optimum Bitüm İçeriğinin Belirlenmesi (OBC)

Optimum bitüm içeriği, her bir agrega tipi, agrega gradasyonu, katkı tipi ve bitüm tipi için karışım en iyi bağlayıcılığı sağlayan bitüm miktarını göstermektedir. Poroz asfaltta OBC'yi belirlemek için kullanılan yöntem, BSK'ya göre daha farklıdır. Çünkü poroz asfaltın OBC'si karışımında kullanılan her agrega boyutunun yüzdesine dayanmaktadır. BSK'daki OBC ise karışımın maksimum stabilitesini, maksimum hacim özgül ağırlığını ve maksimum hava boşluklarını (% 4) beş farklı bitümün yüzdesinde değerlendirilerek hesaplanmaktadır. Dolayısıyla YRK'daki kullanılan poroz asfaltın OBC'si, Çizelge 4.2'deki optimum agrega gradasyonunda belirtilen her agrega yüzdesine göre hesaplanmıştır.

Denklem (3.6)'dan anlaşıldığı gibi, karışımın OBC'sini değerlendirmek için, karışım içindeki toplam agrega zahiri özgül ağırlığı belirlenmelidir. Bu amaçla, çalışmanın bu bölümünde, her agrega boyutunun zahiri özgül ağırlığı ayrı ayrı hesaplanmıştır.

4.2.1. Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı

Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı bölüm 3.1.3'de açıklanan metot kullanılarak kaba agrega her boyutunun zahiri özgül ağırlığı hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3. Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı

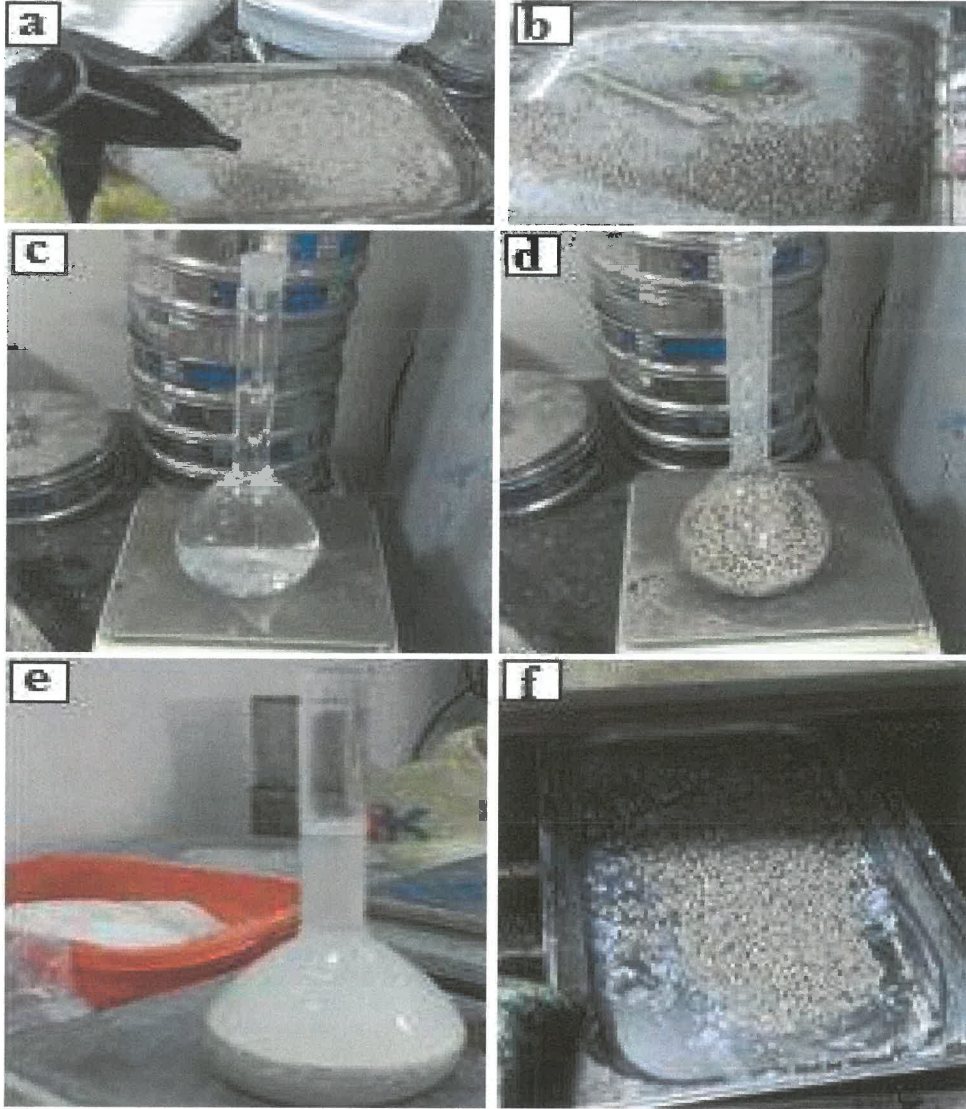
Elek boyutu (mm)	Kuru agreganın ağırlığı (gr)	Doymuş agreganın ağırlığı (gr)	Suda agreganın ağırlığı (gr)	Zahiri Özgül ağırlığı
	W1	W2	W3	$\frac{W1}{W1 - W3}$
19 - 12.5	1973	1983.9	1244.4	2.71
12.5 – 9.5	996	1000.1	624.1	2.678
9.5 – 4.75	995	1000.6	623.8	2.68

4.2.2. İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı

İnce agreganın zahiri özgül ağırlığının belirlenmesi için, agreganın 24 saat suya bırakılmıştır. Daha sonra saç kurutma makinesiyle belli bir miktarda kurutulmuş ve 25 vuruştan hemen sonra Abraham hunisi ile agreganın doymuş ağırlığı A olarak tanımlanmıştır. Çizelge 4.4'te hesaplandığı gibi sudaki agreganın ağırlığı E olarak tanımlanmış ve agreganın kuru ağırlığı, etüvde 24 saat sonra D olarak belirlenmiştir. Şekil 4.1'de ince agreganın özgül ağırlık deneyinin aşamaları gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı

Elek boyutu (mm)	Doymuş ağırlığı	Pyc+su	Pyc+su+ numune	Su içindeki ağırlığı	Kuru ağırlığı	Zahiri özgül ağırlığı
	A (gr)	B (gr)	C (gr)	E = C-B (gr)	D (gr)	D/D-E
4.75-2.36	500	696	998.6	310.39	494.94	2.69
2.36-1.7	500	696	1007.85	311.85	493.83	2.72
1.7-0.6	500	696	1002,6	306.6	492.46	2.64
0.6-0.425	500	696	1003.58	307.58	491.84	2.67
0.425-0.18	500	696	998.6	302.6	491.03	2.61
0.18-0.075	500	696	990	300.33	486.6	2.61



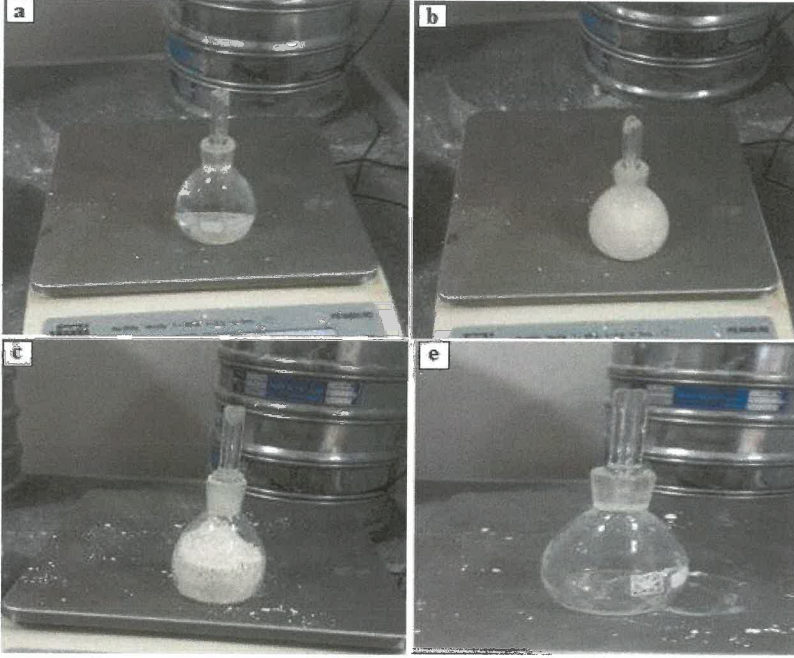
Şekil 4.1. İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı; **a)** suda 24 saat sonra agrega kurutma işlemi; **b)** ince agreganın doymun ağırlığının belirlenmesi; **c)** piknometere artı su ağırlığı; **d)** piknometere artı numune ağırlığı; **e)** piknometere artı numune artı su ağırlığı; **f)** agreganın kuru halı

4.2.3. Filler agreganın zahiri özgül ağırlığı

Filler, 4-5 saat 110 derecelik bir fırında kurutulduktan sonra oda sıcaklığında soğutulup daha sonra test edilmiştir. Fillerin özgül ağırlığı, Çizelge 4.5’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

Çizelge 4.5. Fillerin özgül ağırlığı

Piknometre ağırlığı	W1	34gr
Piknometre + numune ağırlığı	W2	84gr
Piknometre + numune + su ağırlığı	W3	115.62gr
Piknometre + su ağırlığı	W4	83.27 gr
Fillerin zahiri özgül ağırlığı	$\frac{W2 - W1}{(W4 - W1) - (W3 - W2)}$	2.83

**Şekil 4.2.** Fillerin zahiri özgül ağırlığı; a) Piknometere artı su; b) Piknometere artı su artı numune; c) Piknometere artı numune; e) Piknometere

4.2.4. Birinci karışım formülü için optimum bitüm içeriği

Bütün agrega boyutlarının zahiri özgül ağırlığı değerlendirildikten sonra, karışımdaki agregaların toplam zahiri özgül ağırlığı, Çizelge 4.6'da belirtilen her bir agrega boyutunun yüzdesi dikkate alınarak denklem (3.4) ile hesaplanmıştır. Karışımdaki agregaların toplam zahiri özgül ağırlığını hesapladıktan sonra asfalt karışımının optimum bitüm içeriği denklem (3.3) ile belirlenmiştir.

$$OBC = 3.25 (\alpha) \Sigma^{0.2}$$

$$\alpha = 2.65/Gs$$

$$Gs = \frac{100}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \dots + \frac{Pn}{Gn}}$$

$$Gs = \frac{100}{\frac{35}{2.71} + \frac{14}{2.678} + \frac{32}{2.68} + \frac{6}{2.69} + \frac{5}{2.72} + \frac{1}{2.64} + \frac{5}{2.67} + \frac{0.9}{2.61} + \frac{0.1}{2.61} + \frac{1}{2.83}} = 2.69$$

$$\Sigma = 0.21G + 5.4S + 7.2B + 135f$$

$$\Sigma = 0.21(0.81) + 5.4(0.12) + 7.2(0.06) + 135(0.01) = 2.6001$$

$$\alpha = 2.65/2.69 = 0.9851$$

$$OBC = 3.25 (0.9851) (2.6001)^{0.2} = 3.876$$

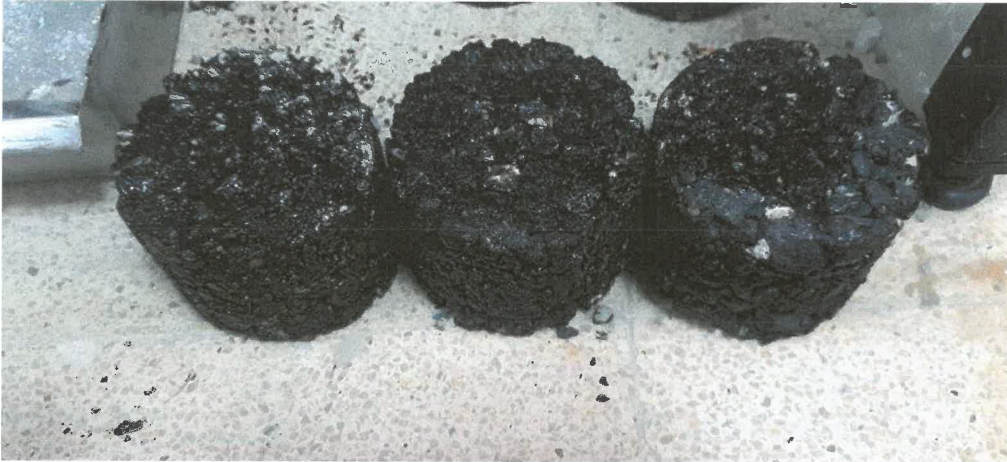
Çizelge 4.6. Agreganın birinci karışım gradasyonu

Elek boyutu (mm)	Optimum karışım gradasyonu (geçen yüzdesi)	Karışımında kullanılan agrega yüzdesi	Marshall numunede kullanılan agrega (gr)	G,S,B,ve F değerleri (%)
19	100			81
12.5	65	35	403	
9.5	51	14	161	
4.75	19	32	368	
2.36	13	6	69	12
1.7	8	5	58	
0.6	7	1	12	
0.425	2	5	58	6
0.18	1.1	0.9	10	
0.075	1	0.1	1	
Filler		1	10	1

Birinci karışım formülü için elde edilen OBC yüzdesi BSK'da kullanılan OBC'ye göre daha düşük bir değer olarak elde edilmiştir (KTŞ 2013). Çünkü poroz asfaltta kullanılan OBC'nin yapısal formülüne göre, OBC'nin ince agregalar ve fillerle doğrudan ilişkisi vardır. Yani karışımda filler ve ince agregaların yüksek oranı daha fazla bitüm oranına neden olmaktadır. Diğer yandan karışımdaki yüksek kaba agrega yüzdesi, düşük absorpsiyon özelliği nedeniyle düşük bitüm içeriğine neden olmuştur.

4.3. Marshall Numuneleriyle Poroz Asfaltın Tasarımı

Birinci Poroz asfalt karışım dizaynı, bölüm 4.1 ve 4.2'de sırasıyla hesaplanan OBC ve her bir agrega boyutunun yüzdesi kullanılarak hazırlanmıştır. Karıştırma işleminden sonra, asfalt karışımı Marshall kalıbına yerleştirilmiş ve numunenin bir tarafına 4.5 kg Marshall çekiciyle 25 vuruş olacak şekilde sıkıştırma işlemi yapılmıştır. BSK numuneler normalde KTŞ (2013)'e göre her iki tarafta 75 vuruş ile sıkıştırılmaktadır. Bu çalışmada numunelerin bir tarafına 25 vuruş uygulamasının tek amacı, yapılmış YRK projelerine göre daha boşluklu bir kaplama elde etmektir (Anderton 2000). Şekil 4.3'de birinci karışım formülüyle tasarlanan Marshall numuneleri gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Birinci karışım formülüyle hazırlanan Marshall numuneleri

Marshall numunelerinin hazırlanmasından sonra, sıkıştırılmış her numune hava boşlukları (V_h) formül (4.1) ve (4.2) kullanılarak Çizelge 4.7'de gösterildiği gibi belirlenmiştir. Aşağıdaki formüllerden anlaşıldığı gibi poroz asfaltın hava boşlukları Marshall numunesinin hacmi artırılarak artmaktadır. Bunun nedeni, numune hacminin artırılması agrega arasındaki boşlukların artmasına neden olmaktadır.

$$VMA = 100 - 100 \frac{Wt}{\left(\frac{\pi}{4} D^2 H\right)(G_{mm})} \quad (4.1)$$

Burada, Wt numunenin kuru ağırlığı, D numune çapı, H numune yüksekliği, G_{mm} maksimum teorik özgül ağırlığı D^2

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_s} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (4.2)$$

Burada, G_{mm} asfalt karışımının maksimum teorik özgül ağırlığı, P_{mm} karışımın toplam ağırlığı (yüzde olarak), P_s toplam karışım ağırlığına göre agrega yüzdesi, P_b toplam karışım ağırlığına göre bitüm yüzdesi, G_s karışımındaki agregaların toplam zahiri özgül ağırlığı, G_b bitümün özgül ağırlığı

Çizelge 4.7. Birinci-optimum karışım formülüyle tasarlanmış poroz asfaltın hava boşluğu içeriği

Numunne No	Bitüm oranı (%)	Gmm	Wt (gr)	Numune yüksekliği (cm)	Numune çapı (cm)	Hacim (cm ³)	Vh (%)
1	3.876	2.53	1173	7.45	10	584.8	20.72
2	3.876	2.53	1170	7.51	10	588.75	21.45
3	3.876	2.53	1176	7.43	10	583.3	20.3
Ortalama değeri							21

Çizelge 4.7’te incelendiğinde, birinci optimum karışım formülüyle tasarlanan poroz asfaltın hava boşluk yüzdesi istenilen hava boşluk yüzdesini sağlayamamıştır. Dolayısıyla, Çizelge 4.8’de gösterildiği gibi asfalt karışımında daha fazla hava boşluğu içeriği elde etmek için ikinci agrega karışım gradasyonu tanımlanmıştır. Daha sonra İkinci karışım formülü için OBC ve numunelerin hava boşlukları daha önce behsedildiği gibi hedeflenmiştir. Şekil 4.4’de ikinci karışım formülüyle tasarlanan Marshall numuneleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.8. Agreganın ikinci karışım gradasyonu

Elek boyutu (mm)	Optimum karışım formülü (geçen yüzdesi)	Karışımında kullanılan agrega yüzdesi	Marshall numunede kullanılan agrega (gr)	G,S,B,ve F değerleri (%)
19	100			86
12.5	61	39	403	
9.5	46	15	161	
4.75	14	32	368	
2.36	9	5	69	10
1.7	5	4	58	
0.6	4	1	12	
0.425	2	2	58	3.2
0.18	1.1	0.9	10	
0.075	0.8	0.3	1	
Filler		0.8	10	0.8

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{39}{2.71} + \frac{15}{2.678} + \frac{32}{2.68} + \frac{5}{2.69} + \frac{4}{2.72} + \frac{1}{2.64} + \frac{2}{2.67} + \frac{0.9}{2.61} + \frac{0.3}{2.61} + \frac{0.8}{2.83}} = 2.695$$

$$OBC = 3.25 (\alpha) \Sigma^{0.2}$$

$$\alpha = 2.65/G_{sb} = 2.65/2.695 = 0.984$$

$$\Sigma = 0.21G + 5.4S + 7.2B + 135f$$

$$\Sigma = 0.21(0.86) + 5.4(0.1) + 7.2(0.032) + 135(0.008)$$

$$\Sigma = 2.031$$

$$OBC = 3.25 (0.984) (2.031)^{0.2} = 3.685$$



Şekil 4.4. İkinci karışım formülüyle hazırlanan Marshall numuneleri

Çizelge 4.9. İkinci-optimum karışım formülüyle tasarlanmış poroz asfaltın hava boşluğu içeriği

Numune No	Bitüm oranı (%)	Gmm	W (gr)	Numune yüksekliği (cm)	Numune çapı (cm)	Hacim (cm ³)	Vh (%)
1	3.685	2.54	1147.4	7.6	10	596.6	24.3
2	3.685	2.54	1155	7.738	10	607.4	25.14
3	3.685	2.54	1138	7.66	10	601.33	25.49
Ortalama değeri							25

Çizelge 4.9’da belirtilen değerlere göre, ikinci karışım formülüyle hazırlanan Marshall numuneleri de istenilen hava boşluk yüzdesini sağlayamamıştır. Bu nedenle Çizelge 4.10’da gösterildiği gibi %30 hava boşluk yüzdesi elde etmek için üçüncü agrega karışımı gradasyonu belirlenmiştir. Üçüncü karışım formülüyle tasarlanan poroz asfaltın OBC’si ve hava boşlukları birinci karışım formülünde kullanılmış yöntemle hesaplanmıştır. Bu aşamadaki kullanılan agrega karışım gradasyonu % 93 kaba agrega içerdiği için, agregaların arasındaki hava boşlukları artırabilmektedir. Şekil 4.5’de üçüncü karışım formülüyle tasarlanan Marshall numuneleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.10. Agreganın üçüncü karışım gradasyonu

Elek boyutu (mm)	Optimum karışım formülü (geçen yüzdesi)	Karışımında kullanılan agrega yüzdesi	Marshall numunede kullanılan agrega (gr)	G,S,B,ve F değerleri (%)
19	100			93
12.5	64	36	414	
9.5	38	26	299	
4.75	7	31	357	
2.36	6	1	11	3
1.7	5	1	12	
0.6	4	1	11	
0.425	3	1	12	3
0.18	2	1	11	
0.075	1	1	12	
Filler		1	11	1

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{36}{2.71} + \frac{26}{2.678} + \frac{31}{2.68} + \frac{1}{2.69} + \frac{1}{2.72} + \frac{1}{2.64} + \frac{1}{2.67} + \frac{1}{2.61} + \frac{1}{2.61} + \frac{1}{2.83}} = 2.690$$

$$OBC = 3.25 (\alpha) \Sigma^{0.2}$$

$$\alpha = 2.65/G_{sb} = 2.65/2.690 = 0.985$$

$$\Sigma = 0.21G + 5.4S + 7.2B + 135f = 0.21(0.93) + 5.4(0.03) + 7.2(0.03) + 135(0.01)$$

$$\Sigma = 1.9233$$

$$OBC = 3.25 (0.985) (1.9233)^{0.2} = OBC = 3.65$$



Şekil 4.5. Üçüncü karışım formülüyle hazırlanan Marshall numuneleri

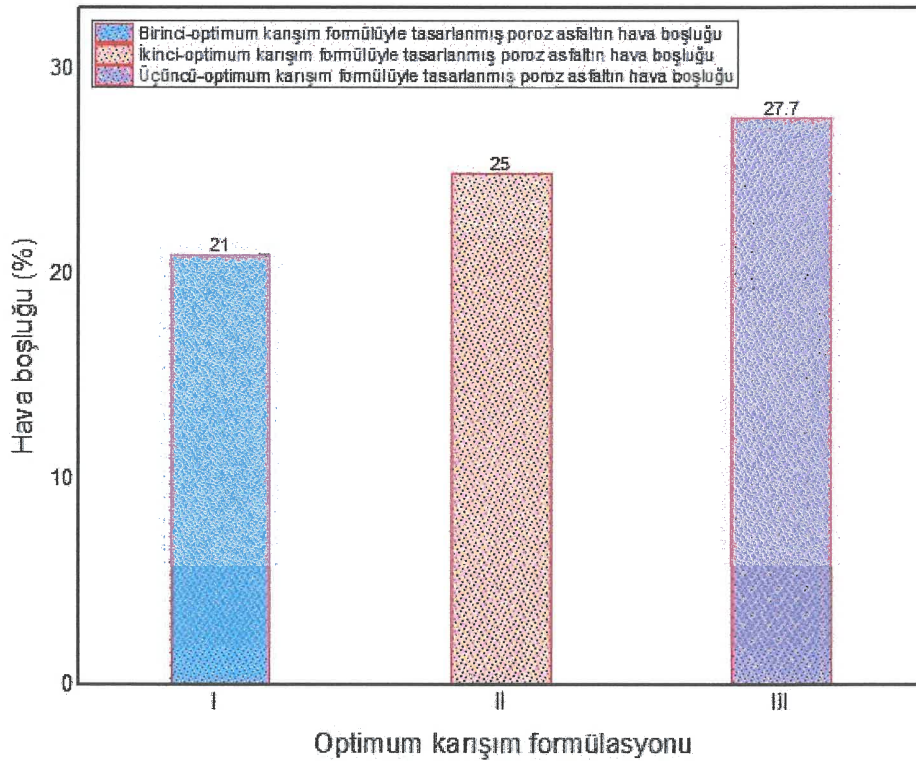
Çizelge 4.11. Üçüncü-optimum karışım formülüyle tasarlanmış poroz asfaltın hava boşluğu içeriği

Numune No	Bitüm oranı (%)	Gmm	Wt (gr)	Numune yüksekliği (cm)	Numune çapı (cm)	Hacim (cm ³)	Vh (%)
1	3.65	2.541	1160	8.0	10	628	27.33
2	3.65	2.541	1162	8.15	10	639.77	28.52
3	3.65	2.541	1165	8.03	10	630.59	27.3
Ortalama değeri							27.7

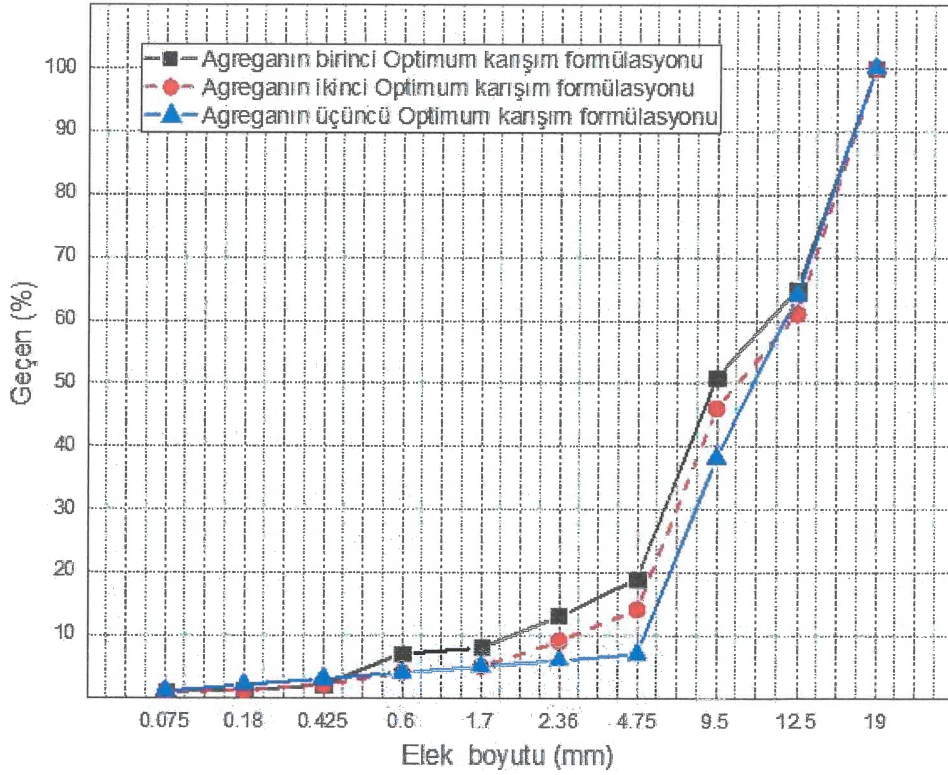
Üçüncü karışım formülüyle tasarlanan poroz asfalt, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de gösterildiği gibi YRK’da kullanılan asfaltın gerekli hava boşluklarını sağlamaktadır. Bu nedenle, birinci ve ikinci karışım formülünün değerlendirilmesinden sonra üçüncü karışım formülü optimum bir karışım olarak seçilmiştir. YRK’daki yapılmış projelere göre, üçüncü karışım formülünden elde edilen hava boşluğu akışkan harç malzemelerin iyi nüfuz etmesini sağlamaktadır (Zeyne 2017). Şekil 4.8’den anlaşıldığı gibi, kaba agregaya üç farklı agregaya karışım gradasyonunda sırasıyla artmış ve OBC değeri sırasıyla azalmıştır. Çünkü kaba agregaya yüzdesinin artması OBC’nin azalmasına neden olmuştur.



Şekil 4.6. % 27.7 boşluklu olan Marshall numunesi



Şekil 4.7. Marshall numunelerinin değişik karışımlarda hava boşluğu yüzdeleri

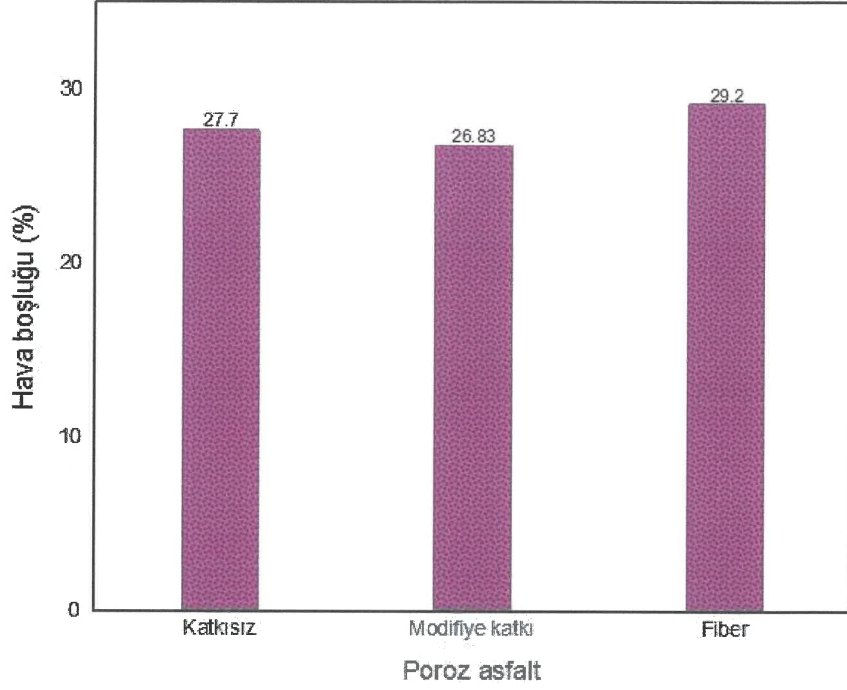


Şekil 4.8. Agrega gradasyonlarının özeti

Ayrıca, optimum karışım formülünün belirlenmesinden sonra, poroz asfaltın karışım dizaynı iki farklı katkıyla (Fiber % 0.3 karışımın ağırlığına göre ve modifiye katkı % 3 bitümün ağırlığına göre) denenmiştir. Çizelge 4.12 ve Şekil 4.9'de gösterildiği gibi, fiberle hazırlanan Marshall numuneleri, modifiye katkı numunelerinden ve katkı maddesi içermeyen numunelerden daha poroz görünmektedir. Çünkü asfalt karışımında fiber kullanılması, poroz asfaltın hava boşluklarını artırmaktadır. Aynı zamanda asfalt karışımında fiber varlığı, karışımın permeabilite katsayısını artırmaktadır (Afonso, Dinis-Almeida ve Sena 2017). Dolayısıyla karışımın permeabilite katsayısının artması kaplamada daha fazla hava boşluklarına sebep olacaktır. Fiberin asfalt karışımının hava boşlukları üzerindeki etkisi yapılmış bir araştırmadan elde edilen sonuçlar, bu çalışmadaki fiber ile asfalt karışımının hava boşlukları arasındaki ilişkiyi onaylamaktadır (Yanping, Haibin, Ping, Guijuan, Huaxin ve Rui 2017). Tam tersi, modifiye katkıyla tasarlanan Marshall numuneleri karışımın sıkıştırma mukavemetini düşürerek daha az hava boşluğuna neden olmaktadır. Düşük sıcaklıklarda (90°C'den düşük) modifiye katkılı bitümün viskozitesi artmakta, yüksek sıcaklıklarda (90°C'den fazla) ise azalmaktadır (Anonymous 2). Bu nedenle, bitümün düşük viskozitesi karışım sıkıştırma mukavemetinin azalmasına neden olmuştur. Sonuç olarak, fiber poroz asfaltın tasarımında karışımın performansına ve hava boşluklarına etkili bir katkı olarak seçilmiştir.

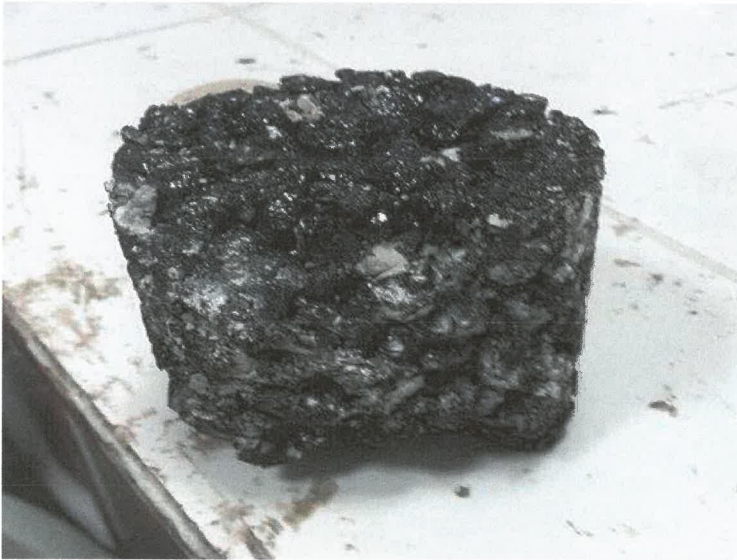
Çizelge 4.12. Farklı katkılarla tasarlanmış poroz asfaltın hava boşlukları

Numune No	Bitüm oranı (%)	Gmm	Wt (gr)	Numune yüksekliği (cm)	Numune çapı (cm)	Hacim (cm ³)	Vh (%)
Katkısız							
1	3.65	2.541	1160	8.0	10	628	27.33
2	3.65	2.541	1162	8.15	10	639.77	28.52
3	3.65	2.541	1165	8.03	10	630.59	27.3
Ortalama değeri							27.7
Modifiye katkı							
1	3.65	2.543	1161	8.01	10	628.8	27.4
2	3.65	2.543	1149	7.833	10	615	26.5
3	3.65	2.543	1121	7.66	10	600.6	26.6
Ortalama değeri							26.83
Fiber							
1	3.65	2.55	1120	7.9	10	620.5	29.2
2	3.65	2.55	1109	7.8	10	612.3	28.97
3	3.65	2.55	1114	7.867	10	617.5	29.3
Ortalama değeri							29.2



Şekil 4.9. Farklı katkılarla tasarlanmış poroz asfaltın hava boşlukları

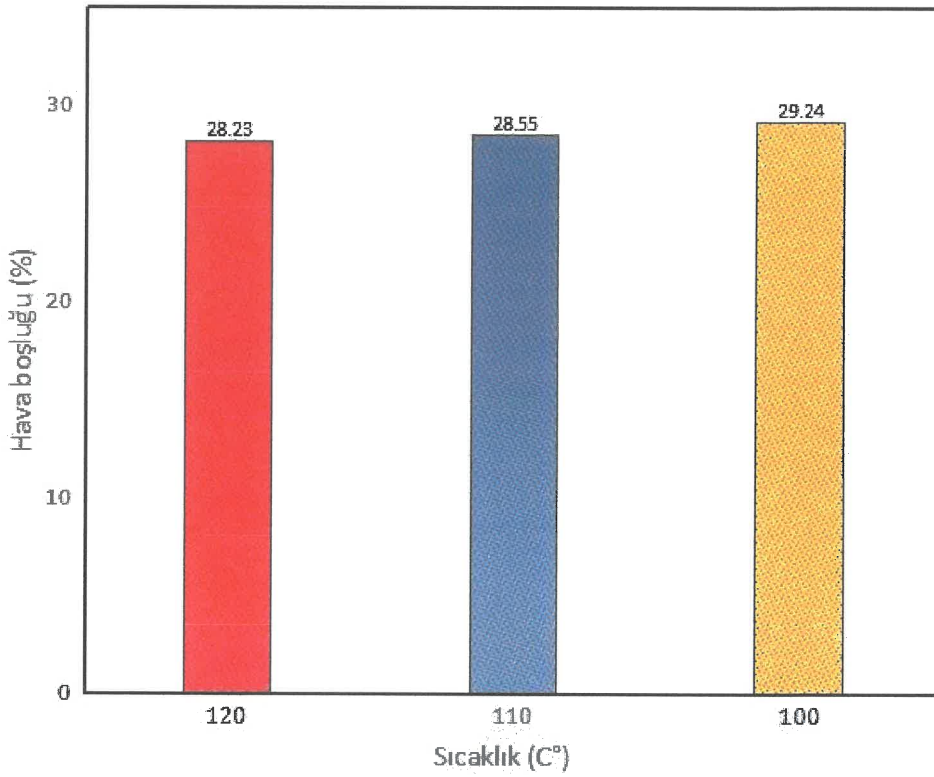
Farklı katkıları ve agrega gradasyonlarıyla çeşitli laboratuvar deneylerin yapılması sonucunda, daha fazla hava boşluğu içeriğinden dolayı fiberli üçüncü karışım formülü optimum karışım olarak seçilmiştir. Üçüncü karışım formülündeki OBC, daha önce belirlendiği gibi 3.65'dir. Şekil 4.10'da gösterildiği gibi OBC değeri 3.65 olan poroz asfaltın agregaları birbirinden kolayca ayrılmıştır. Karışımındaki bitüm içeriğinin yetersiz olması nedeniyle bu değer 4'e yükseltilmiş ve bu değişim karışımındaki mevcut fiber nedeniyle bitüm süzülmesinde bir olumsuzluk yaratmamaktadır.



Şekil 4.10. (3.65) bitüm miktarıyla tasarlanmış Marshall numunesi

Marshall numuneleri, fiberli üçüncü karışım formülü ve OBC (%4) optimum faktörler olarak seçilmesinden sonra üç farklı sıkıştırma sıcaklığında (100°C, 110°C ve 120°C) değerlendirilmiştir. Şekil 4.11 incelendiğinde, poroz asfaltın hava boşluğu en fazla 100°C sıkıştırma sıcaklığında bulunmuş ve sıcaklık arttıkça hava boşlukları azalmıştır. Çünkü 100°C olan sıkıştırma sıcaklığı, karışımın sıkıştırma işlemine karşı daha fazla direnç gösterip asfaltın hava boşluğu içeriğini azaltmıştır.

Yapılan deneysel testlerin sonucunda, YRK'de kullanılan poroz asfaltın dizaynında üçüncü agrega karışım gradasyonu, optimum bitüm içeriği (%4) ve fiber (%0.3 karışım ağırlığına göre) optimum değerler olarak seçilmiştir. YRK'nın performans deneylerinde kullanılan bütün Marshall numuneleri bu optimum değerler ile dizayn edilmiştir. Daha sonra, numuneler daha fazla hava boşluğu içeren bir dizayn elde etmek için 100°C sıcaklığında sıkıştırılmıştır.

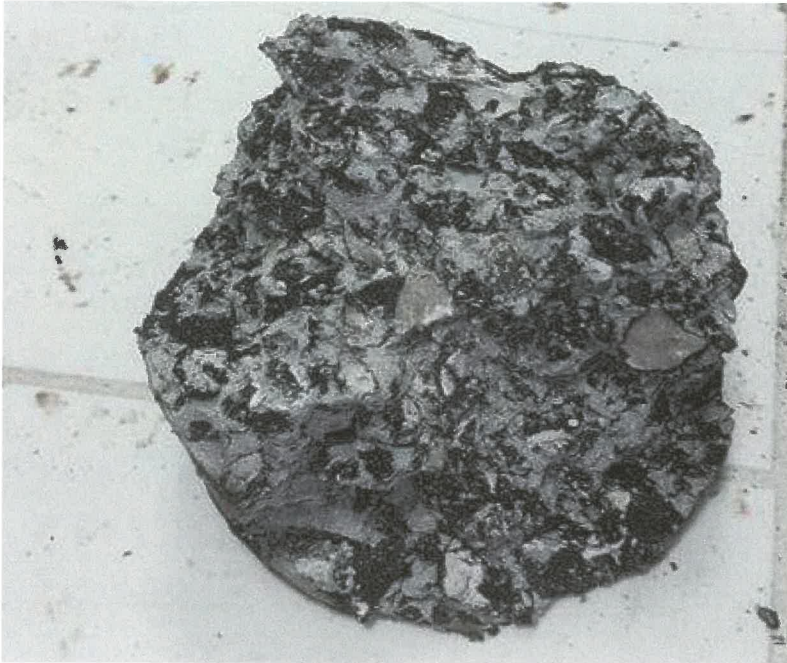


Şekil 4.11. Farklı sıcaklıklarda tasarlanmış poroz asfaltın hava boşlukları

İstenilen poroz asfalt hava boşluklarını elde ettikten sonra, Şekil 4.12’de gösterildiği gibi, poroz asfalt numunelerinin hava boşlukları 24 saat sonra akışkan harçla doldurulmuştur. Çünkü, akışkan harç ile asfaltın hava boşlukları doldurulduğunda poroz asfaltın yüzey sıcaklığı 37°C’den fazla olmamalıdır (Anderton 2000). % 30 hava boşluklu olan poroz asfalt yüzeyinde farklı akışkanlık süresine sahip akışkan harç denenmiştir. Şekil 4.13’de gösterildiği gibi 9 saniye akışkanlık süresine sahip akışkan harç bütün poroz asfaltın hava boşluklarını doldurabilmiştir.



Şekil 4.12. YRK numuneleri



Şekil 4.13. Akışkan harçla tam doldurulmuş YRK numunesi

4.4. Yarı Rijid Kaplama Performansı

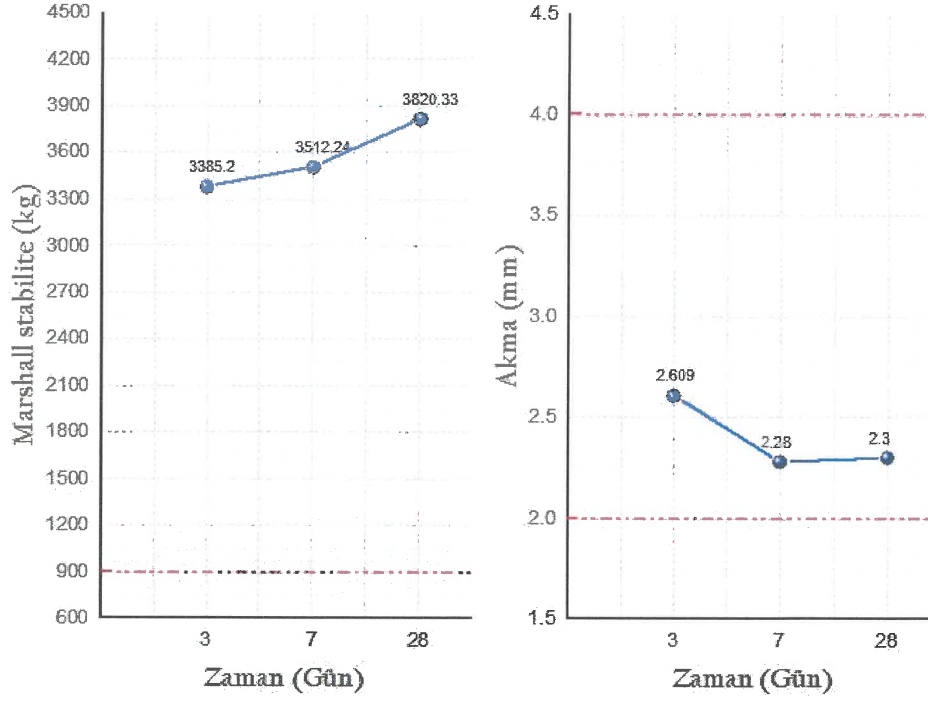
4.4.1. Marshall stabilite deneyi

Çizelge 4.13’de hesaplandığı gibi Marshall deneyi YRK numunelerinin üzerinde üç farklı kütleme süresinde yapılmıştır. Şekil 4.14’den anlaşıldığı gibi, YRK’nın Marshall stabilitesi, kütleme süresi arttıkça artmıştır. Kaplamanın yarı rijitlik özelliği, zaman geçtikçe Marshall stabilitesinin artmasının temel nedeni olabilmektedir. Poroz asfaltın hava boşluklarında kullanılan akışkan harç malzemelerinin maksimum direnci 28gün sonra sağlandığından, 28-günlük YRK numunelerinin daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır. KTSŞ (2013) limit değerlerine göre, esnek kaplamanın aşınma tabakası için yeterli Marshall stabilite değeri 900 kg olarak belirlenmiştir. Bu çalışmadaki tüm numunelerin stabilite değerleri, KTSŞ (2013)’de belirtilen limit değerden daha fazla bulunmuş ve hatta 28-günlük YRK numunelerin stabilitesinin esnek kaplama stabilitesinin 4 katı olduğunu görülmüştür.

Akma değeri, kaplamanın esnekliğini gösteren Marshall numunelerinin çapındaki değişiklikleriyle ölçülmektedir. KTSŞ (2013)’e göre, esnek kaplamanın aşınma tabakası için akma değeri 2 ila 4mm arasındadır. Şekil 4.14’de gösterildiği gibi, numunelerin akma değeri, akışkan harç malzemesinin varlığı nedeniyle 3 gün sonra azalmış ve daha sonra artmıştır. 7 gün sonra akma değerinin artmasının nedeni, poroz asfaltın hava boşluklarında kullanılan akışkan harç malzemelerinin genişmesi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, akışkan harç malzemeleri poroz asfaltın hava boşluklarını doldurmasına ve rijitleştirmesine rağmen, YRK, KTSŞ (2013)’de belirtilen limit değerlerle karşılaştırıldığında yeterli esnekliğe sahiptir.

Çizelge 4.13. Marshall deney sonuçları

Numune	3 Günlük		7 Günlük		28 Günlük	
	Stabilite (kg)	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
1	3276.55	2.44	3349.77	3.01	3818.84	2.311
2	3530.3	2.669	3457.86	1.998	4042.15	1.85
3	3348.7	2.718	3729.1	2.722	3600	2.743
Ortalama	3385.2	2.609	3512.24	2.28	3820.33	2.3



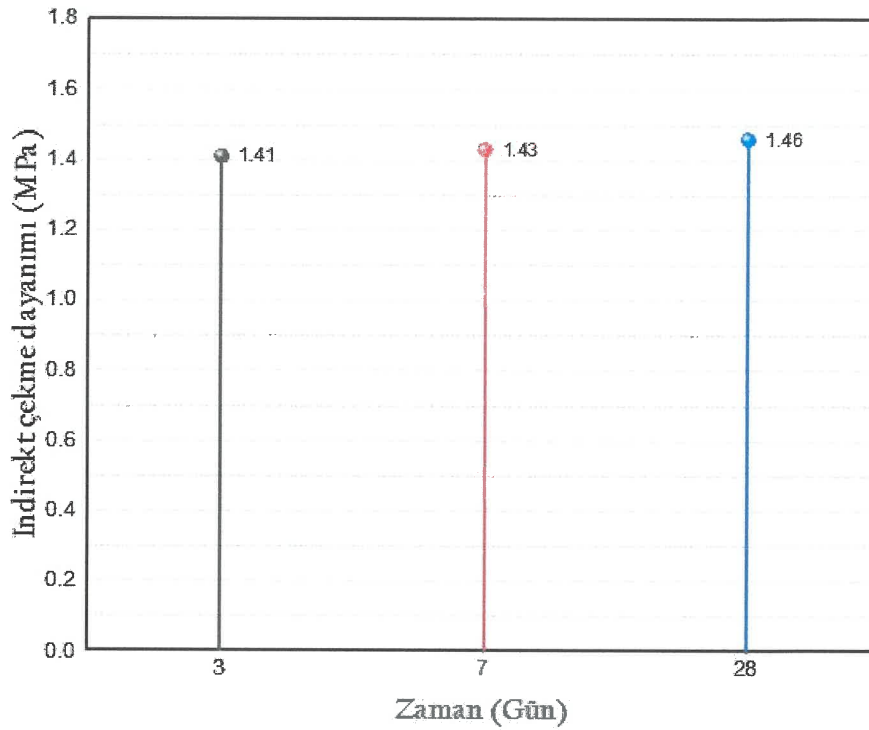
Şekil 4.14. YRK numunelerin Marshall stabilite ve akma değerleri

4.4.2. İndirekt çekme dayanım deneyi (ITS)

Çizelge 4.14’de hesaplandığı gibi, YRK’nın çekme dayanımı, poroz asfaltın hava boşluklarında akışkan harç kullanımı nedeniyle sırasıyla 3, 7 ve 28 gün sonra hafifçe artmıştır. Şekil 4.15 incelendiğinde kürlenme süresinin, YRK’nın çekme dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermektedir. Bir yandan, asfalt iskeleti tarafından YRK’nın çekme dayanımı sağlanmaktadır. Ancak bu tabakanın maksimum dayanımı en geç 24 saat sonra elde edilmektedir. Bu da asfalt tabakasının direncinin zamanla önemli ölçüde değişmediği anlamına gelir. Diğer taraftan, kürlenme süresi akışkan harç malzemelerin özelliklerini etkilemesine rağmen, YRK’nın çekme dayanımı, akışkan harç malzemelerinin düşük esneklik özelliklerinden dolayı zaman geçtikçe daha fazla değişmemiştir. Ayrıca, tüm kürlenme sürelerinde YRK numunelerin çekme dayanımı, BSK üzerinde yapılan araştırmalara göre yeterli görülmektedir (Qasrawi ve Asi 2016; Montero, Crucho, Santos ve Miró 2018). %30 boşluklu olan poroz asfalt üzerindeki indirekt çekme dayanımı belirlemek için yapılan bir araştırmaya göre, poroz asfaltta akışkan harç kullanılmadan indirekt çekme dayanımı 176 kPa olarak belirlenmiştir (Zeyne 2017). Bu tez çalışmasında 28-günlük YRK numunelerinin dayanımı, belirtilen poroz asfaltın çekme dayanımına kıyasla 1282 kPa daha yüksek bulunmuştur.

Çizelge 4.14. Indirekt çekme deney sonuçları

Numune	3 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
	(kN)	(kN)	(kN)
1	18.089	17.43	17.382
2	17.056	17.31	18.687
3	17.907	19.24	19.215
Ortalama	17.684	17.993	18.428
$I.T = 2p/\pi dL$	1.41 MPa	1.43 MPa	1.46 MPa

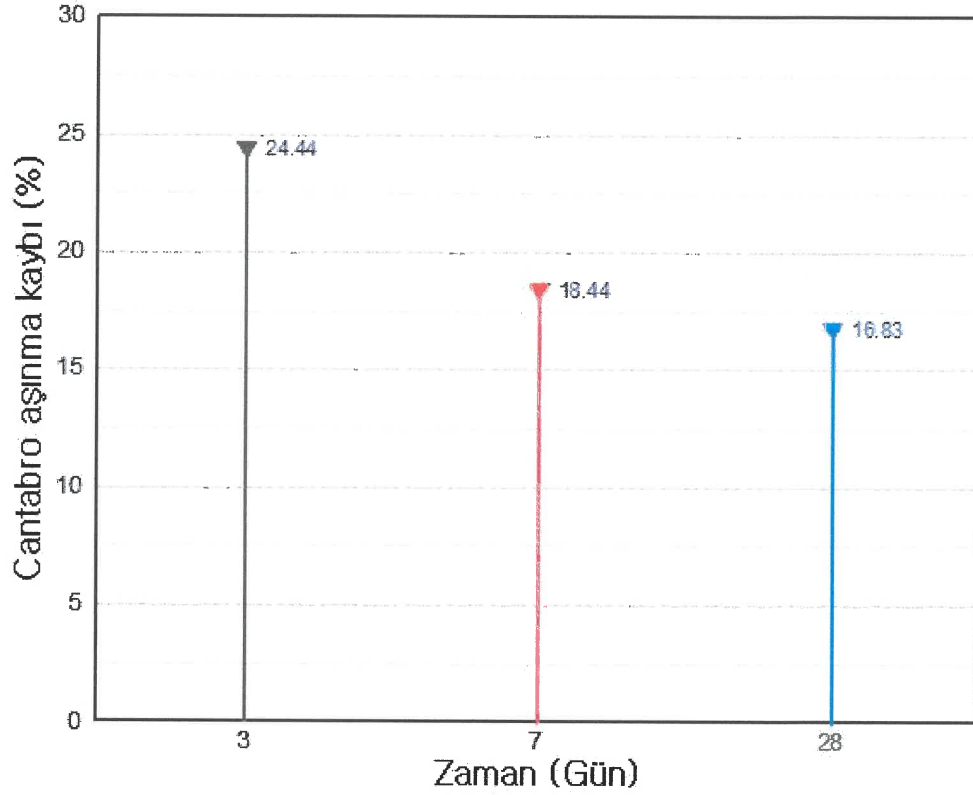
**Şekil 4.15.** YRK numunelerin indirekt çekme dayanımı

4.4.3. Cantabro deneyi

Cantabro deneyi, YRK numunelerinin kütle kaybını belirlemek için üç farklı kürleme süresinde yapılmıştır. Çizelge 4.15’de YRK numunelerinin elde edilen cantabro değerleri gösterilmektedir. Şekil 4.16’de gösterilen, kaplama tasarımında çimentolu malzemelerin mevcut olması nedeniyle YRK numunelerinin kütle kaybı, zaman geçtikçe azalmıştır. Çünkü çimentolu malzemenin direnci 28 gün içinde arttığından, zamanla agrega tanelerinin arasında daha iyi bir aderans sağlanmıştır. BSK’nın kütle kaybı yapılan çeşitli araştırmalara göre (Lin, Guo, Wan ve Wu 2012; Hassan 2005), YRK’nın 28 günlük numuneleri yeterli kütle kaybı değerlerine sahiptir.

Çizelge 4.15. Cantabro deney sonuçları

Numunenin ağırlıkları	3 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
Deneyden önceki ağırlığı (A (gr))	1508.2	1438.6	1477.3
Deneyden sonraki ağırlığı (B (gr))	1139.6	1173.33	1228.7
Cantabro değeri ((A/A-B) %100)	24.44%	18.44%	16.83%

**Şekil 4.16.** YRK numunelerin kütle kaybı yüzdesi

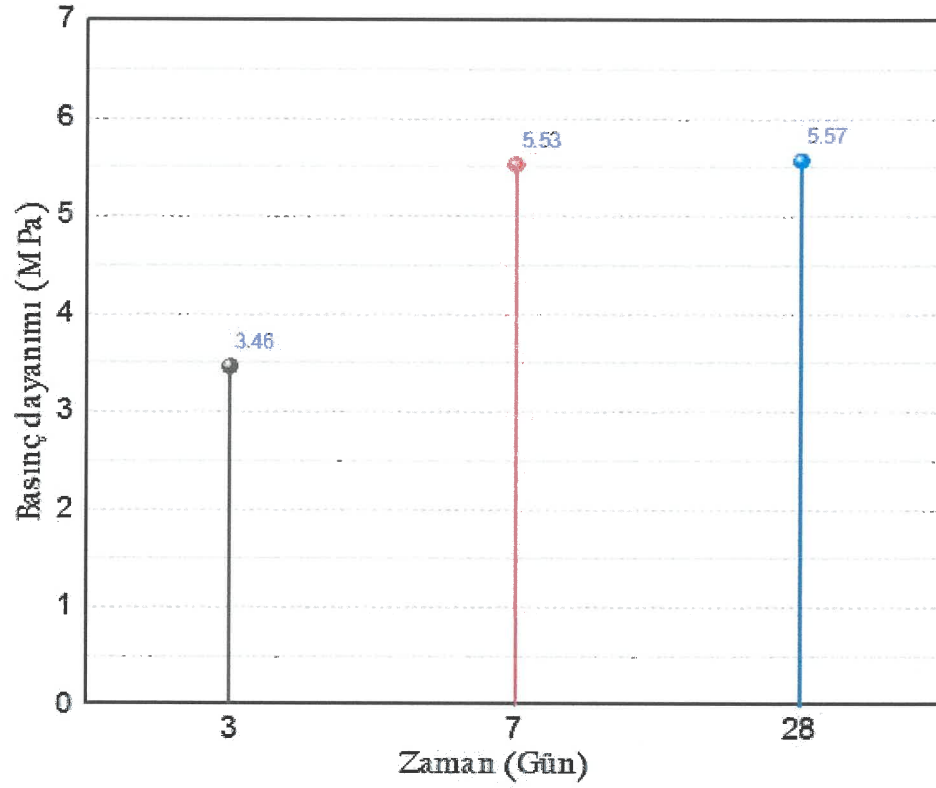
4.4.4. Basınç dayanım deneyi

Çizelge 4.16’da verildiği gibi, YRK’nın basınç dayanımı test sırasında elde edilen maksimum yükün numunenin kesit alanına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Şekil 4.17’de görüldüğü gibi, YRK’nın basınç dayanımı yarı rijitlik özelliğinden dolayı zaman geçtikçe artmıştır. Çimento malzemelerinin maksimum direnci 28 gün sonunda sağlandığından, poroz asfaltın hava boşluklarında akışkan harç malzemelerinin kullanılması, YRK basınç dayanımının 28 güne kadar artmasına neden olmuştur. Numunelerin üç farklı kürleme süresi sonucundaki değerlerinden görüleceği üzere 7 ve 28-günlük numuneler, YRK’nın performansı üzerinde yapılan araştırma laboratuvar test sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, gerekli basınç dayanımını sağlamıştır (Al-Qadi, Weyers, Collins, Glanville ve Dillard 1993). Bu araştırmada belirtilen laboratuvar test sonuçlarına göre, esnek kaplamanın

basınç dayanımı 1.2MPa olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle, 28-günlük YRK basınç dayanımının esnek kaplamadaki basınç dayanımının dört katı olabileceği söylenebilir.

Çizelge 4.16. Basınç dayanım deney sonuçları

Numune	3 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
	(kN)	(kN)	(kN)
1	29.95	41.76	43.85
2	26.4	42.65	45.4
3	25.25	43.45	41.9
Ortalama	27.2	42.62	43.72
$P = F/A$	3.46 MPa	5.53 MPa	5.57 MPa



Şekil 4.17. YRK numunelerin basınç dayanımı

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, %30 hava boşluğu içeriğine sahip poroz asfalt iskeleti tasarlanmış ve YRK'nın performansı değerlendirilmiştir. YRK'nın performansı, Marshall stabilitesi, indirekt çekme dayanımı, basınç dayanımı ve contabro deneyleriyle incelenmiştir. Yapılan deneylere göre aşağıdaki sonuçlar çıkarılmaktadır.

- Asfalt karışımında kullanılan çeşitli agrega gradasyonuna göre poroz asfaltın OBC'si, kaba agrega yüzdesi artıca azalmıştır. Birinci agrega gradasyonuyla hazırlanan karışımın OBC'si, üçüncü agrega gradasyonunda kullanılan OBC'dan daha fazladır. Dolayısıyla, asfalt karışımındaki düşük ince agrega yüzdesi ve düşük filler yüzdesinin, OBC'nin düşük yüzdesine neden olduğu düşünülmektedir.
- Fiberli asfalt karışımı, katkı maddesi olmadan tasarlanan karışıma kıyasla daha fazla hava boşluğu içeriğine sahiptir. Fiber, karışımın permeabilite katsayısını artırdığından dolayı, poroz asfaltta daha fazla hava boşluğuna sebep olmaktadır. Asfalt karışımındaki fiberin etkisi üzerine yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçlar, bu çalışmadaki asfalt karışımın hava boşlukları ile fiber arasındaki ilişkiyi doğrulamaktadır (Yanping, Haibin, Ping, Guijuan, Huaxin ve Rui 2017).
- Asfalt karışımında modifiye katkı kullanımı, karışımın sıkıştırma dayanımını azaltması nedeniyle katkı maddesi içermeyen karışıma göre asfaltın hava boşluklarını azaltmıştır. Çünkü modifiye katkı, karıştırma ve serme işlemleri sırasında asfaltın viskozitesini azaltmaktadır.
- Poroz asfaltın bütün hava boşlukları akışkan harcıyla doldurulduğundan ve daha rijit hale getirdiğinden, kaplamanın akma değeri KTS (2013)'de belirtilen esnek kaplamaların esneklik limitine göre yeterli görülmektedir.
- YRK'nın Marshall stabilitesi, akışkan harç malzemelerinin varlığı nedeniyle sırasıyla üç farklı kürlenme süresinde artmıştır. Akışkan malzemelerinin maksimum direnci 28 günde sağlandığından, 28 günlük YRK numunelerin stabilitesinin, esnek kaplama stabilitesinin 4 katı olduğu belirlenmiştir.
- YRK'nın basınç dayanımı, yarı rijitlik özelliğinden dolayı zaman geçtikçe artmıştır. 28 günlük YRK numunelerinden elde edilen sonuçları, YRK'nın performansı ile ilgili yapılan laboratuvar test sonuçları araştırmasına göre yeterli değeri sağlamıştır (Al-Qadi, Weyers, Collins, Glanville ve Dillard 1993). Bu araştırmada belirtilen esnek kaplamaların basınç dayanımına göre, YRK, esnek kaplamaya kıyasla yaklaşık 4 katı basınç dayanımına sahiptir.
- YRK numunelerin kütle kaybı sırasıyla 3, 7 ve 8 günlük kürlenme sürelerinde azalmıştır. Numunelerin kütle kaybının azalmasının ana nedeni, agrega tanelerinin üzerinde akışkan harç olmasıdır.

Düşük bakım maliyeti, daha uzun ömür ve yakıt ile yağa karşı yüksek direnç, rijit kaplamanın temel avantajlarıdır. İyi sürüş kalitesi, iyi esneklik ve derz bulunmaması ise esnek kaplamanın avantajlarıdır. Yukarıdaki sonuçlardan anlaşılacağı gibi, YRK, yarı rijitliği nedeniyle bu avantajların çoğunu içermektedir. Örneğin, düşük bakım maliyeti ve daha uzun ömür avantajları kaplamanın rijitliğiyle sağlanır. İyi sürüş kalitesi, iyi esneklik ve derz bulunmaması avantajları ise kaplamanın esnekliği ile sağlanmaktadır. Bu

nedenle YRK, trafik yoğunluğunun yüksek olduğu yollarda esnek ve rijit kaplamaların avantajlarının bir kombinasyonu olarak kullanılabilir.

Bu deneysel çalışmada, bütün performans deney numuneleri laboratuvar sıcaklığında kürlemeye tabi tutulmuştur. Dizayn sonucu elde edilen YRK yüksekliği, standart Marshall numunesi yüksekliğinden (yakalşık 65mm) fazla olduğu için (80mm) Marshall stabilite cihazına numune yüksekliği 80mm olarak elle girilmiş ve yükleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Gelecek çalışmalarda, karışım dizaynında çimentolu malzemelerin mevcut olması nedeniyle sıcaklık ve nem faktörlerinin daha detaylı irdelenmesi, fiber dağlamının mikroskopik yöntemlerle incelenmesi önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- ASTM C131-03. Standard Test Method For Resistance To Degradation Of Small-Size Coarse Aggregate By Abrasion and Impact In The Los Angeles Machine, American Society For Testing And Materials.
- ASTM C127-15. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, American Society For Testing And Materials.
- ASTM D6927-06. Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures, American Society For Testing And Materials.
- ASTM D6931-17. Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures, American Society For Testing And Materials.
- ASTM C39. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, American Society For Testing And Materials.
- ASTM C617. Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens, American Society For Testing And Materials.
- ASTM D5. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, American Society For Testing And Materials.
- AASHTO T 245-97. Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixture Using Marshall Apparatus, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Anderton, G. 2000. Engineering Properties of Resin Modified Pavement for Mechanistic Design, ERDC/GL TR-00-2, U.S. Army Corps of Engineers.
- Ahlich, R. and Anderton, G. 1993. Resin Modified Pavement in Airfield Applications, Proceedings of American Society of Civil Engineers Specialty Conference on Airport Pavement Innovations - Theory to Practice, ASCE, New York.
- Al-Qadi, I., Weyer, R., Collin, W., Glanville, J. and Dillard, J. 1993. Concrete Bridge Protection and Rehabilitation, Chemical and Physical Techniques, Corrosion Inhibitors and Polymers, Report No. SHRP-S- 666, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC.
- Ahlich, R. and Anderton, G. 1991. Construction and Evaluation of Resin Modified Pavement, Technical Report GL-91-13, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Anonymous 1 : <https://theconstructor.org/practical-guide/specific-gravity-bitumen-test/2576/> [Son erişim tarihi: 16.07.2019].
- Anonymous 2 : <https://www.sasobit.com> [Son erişim tarihi: 25.05.2019].
- Anonymous 3 : <http://betagrp.com.tr/tas-mastik-asfalt-katki-malzemesi-fiber-elyaf/> [Son erişim tarihi: 12.07.2019].
- Afonso, M., Dinis-Almeida, M. and Sena, C. 2017. FaelStudy of the porous asphalt performance with cellulosic fibres. *Construction and Building Materials*, 135: 104-111.
- Abtahi,S., Sheikhzadeh. M and Hejazi, S. 2010. Fiber-reinforced asphalt-concrete. *Construction and Building Materials*, 24 : 871-877.

- Boundy, R. 1979. Development of a Resin/Cement grouted coated Macadam Surfacing Material. PhD Thesis, University of Nottingham.
- Collop, A. and Ellitt, R. 1999. Assessing the mechanical performance of Densiphalt, 3rd European Symposium of, Performance and Durability of Bituminous Materials and Hydraulic Stabilised Composites.
- Chen, H., Li, N., Hu, C. and Zhang, Z. 2004. Mechanical performance of fibers-reinforced asphalt mixture. *Journal of Changan University*, 24: 1-5.
- Densit a/s. 2000. Densiphalt® Handbook, Aalborg.
- Echols, J. 1989. New mix method for fiber-reinforced asphalt. *Journal & Engineer*, 119: 72-3.
- Hassan, H. 2005. Recycling of municipal solid waste incinerator ash in hot-mix asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 19: 91-98.
- Karayolu Teknik Şartnamesi (2013). KGM Yayını, Ankara.
- Lin, J., Guo, P., Wan, L. And Wu, S. 2012. Laboratory investigation of rejuvenator seal materials on performances of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 37: 31-45.
- Montero, T., Crucho, J., Santos, L. and Miró, R. 2018. Effect of nanomaterials on ageing and moisture damage using the indirect tensile strength test. *Construction and Building Materials*, 168: 31-40.
- Nazary, M. 2019. Yol Üstyapısında Yarı Rijit Kaplama dizaynında kullanılacak Harç tipinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya.
- Putman, B. and Amirkhanian S. 2004. Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures. *Resources Conservation and Recycle*, 42: 265-74.
- Qasrawi, H. and Asi, I. 2016. Effect of bitumen grade on hot asphalt mixes properties prepared using recycled coarse concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 121: 18-24.
- Recardo, J. 2006. Grouted Macadam-material characterisation for pavement design. PhD Thesis, University of Nottingham.
- Roffe, J. 1989a. Salviacim introducing the pavement, Jean Lefebvre Enterprise, Paris, France.
- Roffe, J. 1989b. Salviacim Annex 1, The Paving Process, Jean Lefebvre Enterprise Paris, France.
- Rone, C. 1976. Evaluation of Salviacim, Miscellaneous Paper S-76- 20, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Rone, C. and Anderton, G. 1991. Evaluation of Resin Modified Paving Process, Transportation Research Record 1317, National Research Council, Washington DC.
- Setyawan, A. 2003. Development of Semi-Flexible Heavy-Duty Pavements. PhD Thesis, University of Leeds.

- TS EN 1367-2. Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler bölüm 2: Magnezyum sülfatdeneyi, Türk Standardı.
- Van, M. and Molenaar, A. 2004. Mechanical Characterization of Combi-layer. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, 73: 1-22.
- Wu, S., Ye, Q., Yue. H. 2007. Effects of fibers on the dynamic properties of asphalt mixtures. *Jornal of Wuhan University Technology*, 22: 733-6.
- Yanping, S., Haibin, L., Ping, G., Guijuan, Z., Huaxin, C. and Rui, X. 2017. Effect of Fibers on Mixture Design of Stone Matrix Asphalt. *Jornal of Applied Science*, 7: 299.
- Zhang, W. and Wong, D. 2011. The semi-rigid pavement with higher performances for roads and parking aprons, CAFEO 29, Sustainable Urbanization–Engineering Challenges and Opportunities.
- Zeyne, M. 2017. Laboratory Study On The Mixture Design Of Grouted Macadam. MSc Thesis, Addis Ababa University, Ethiopia.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmad Khaled MASBAH
Khalidmesbah2015@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2017-2019	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans	Afghanistan, Herat Üniversitesi
2011-2015	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Herat

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Saha Mühendisi	ACLS company, Herat
2015	

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makale

1- Kofteci S., Masbah A K., Firat M Z., & Gurcan T. (2019). Prediction of the Asphalt Mixture Performance Prepared with Recycled Fine Aggregate by using Response Surface Analysis. ACTA Physica Polonica, (10.12693/APhysPolA.135.900).