

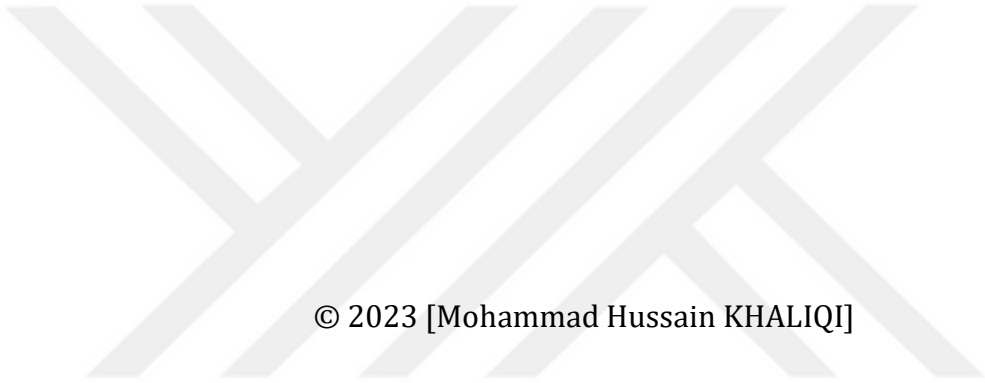
**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARAYOLU ÜSTYAPILARINDA BİNDER TABAKASINDA GERİ
KAZANILMIŞ ASFALT İLE GENÇLEŞTİRİCİ KATKI KULLANIMININ
ETKİSİ**

Mohammad Hussain KHALIQI

**Danışman
Prof. Dr. Mehmet SALTAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2023**



© 2023 [Mohammad Hussain KHALIQI]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	2
1.2. Tezin Organizasyonu.....	3
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1. Geri Dönüştürülmüş Asfalt (RAP).....	4
2.2. Geri Dönüşüm Ajanları/Gençleştirici malzemeler (RA).....	7
2.3. RAP ve Farklı RA'lar İçeren Asfalt Karışımlarla İlgili Literatür Taraması.....	11
3. MATERYAL.....	15
3.1. Agregası.....	15
3.2. Bitüm.....	15
3.3. Geri Dönüştürülmüş Asfalt (RAP).....	16
3.4. Gençleştirici Katkı Malzemesi (RA).....	17
3.5. RA ile Modifiyeli Bitümler.....	18
4. YÖNTEM.....	19
4.1. Penetrasyon Deneyi.....	19
4.2. Yumuşama Noktası Deneyi.....	19
4.3. Penetrasyon İndeksi.....	21
4.4. Özgül Ağırlık Deneyi.....	21
4.5. Düktilite Deneyi.....	22
4.6. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi.....	23
4.7. Superpave Hacimsel Karışım Tasarımı Yöntemi	24
4.8. Nem Hassasiyetinin Belirlenmesi	30
4.9. Hamburg Tekerlek İzi (HWT) Deneyi	32
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	34
5.1. 50/70 Referans Bitüm ve RA ile Modifiyeli Bitümler Üzerine Gerçekleştirilen Bitüm Deneylerinin Sonuçları	34
5.1.1. Penetrasyon deney sonuçları	34
5.1.2. Yumuşama noktası deney sonuçları	34
5.1.3. Penetrasyon indeksi sonuçları.....	35
5.1.4. Düktilite deney sonuçları	36
5.1.5. RV deney sonuçları.....	36
5.2. Optimum Bitüm Miktarının Belirlenmesi	37
5.3. ITS Değerlerinin Belirlenmesi	39
5.4. TSR Değerlerinin Belirlenmesi.....	39
5.5. HWT Deney Sonuçları.....	41
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	44
KAYNAKLAR.....	46
ÖZGEÇMİŞ	55

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARAYOLU ÜSTYAPILARINDA BİNDER TABAKASINDA GERİ KAZANILMIŞ ASFALT İLE GENÇLEŞTİRİCİ KATKI KULLANIMININ ETKİSİ

Mohammad Hussain KHALIQUI

**Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mehmet SALTAN

Bu çalışmada, yüksek miktarda geri dönüştürülmüş asfalt içeren asfalt karışımlarında bir gençleştirici katkı malzemesinin performansı araştırılmaktadır. 50/70 penetrasyon sınıfına sahip bitümün, %2, 4 ve 6 oranlarında gençleştirici katkı malzemesi ile modifikasyonu, sıcaklık kontrollü yüksek devirli karıştırıcı yardımıyla 3000 devir/dk hızda, 155 °C sıcaklıkta ve 45 dakika boyunca sağlanmıştır. Numuneler üzerine penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite ve dönel viskozimetre deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, bitüme ilave edilen gençleştirici katkının miktarının artmasıyla modifiyeli bitümlerin kıvamlılığının azaldığını göstermiştir.

Karayolu Teknik Şartnamesine göre binder tabakası için agrega gradasyonu belirlendikten sonra, Superpave Hacimsel Karışım Tasarımı Yöntemine uygun şekilde 50/70 bitüm kullanılarak hazırlanan asfalt karışımlarına %0, 35, 40 ve 45 oranlarında geri dönüştürülmüş asfalt ilave edilmiştir. Daha sonra gençleştirici katkı malzemesiyle modifiye bitümler kullanılarak %0, 35, 40 ve 45 oranlarında geri dönüştürülmüş asfalt içeren asfalt karışımları hazırlanmıştır. AASHTO T283 standardına göre hazırlanan asfalt karışımlarının indirekt çekme dayanımları ve çekme dayanımı oranları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, asfalt karışımlara ilave edilen geri dönüştürülmüş asfaltın ve gençleştirici katkı malzemesi modifiyeli bitümün miktarının artması ile asfalt karışımlarının yük altında oluşan çekme gerilmelerine karşı direncini yansıtan indirekt çekme dayanımı ve çekme dayanımı oranı değerlerinin arttığı görülmüştür.

Hazırlanan asfalt karışımları arasından, en iyi çekme dayanımı oranı değerlerine sahip olanların yüksek sıcaklık altında neme ve tekerlek izi oluşumuna karşı dirençleri, Hamburg Tekerlek İzi test cihazıyla tespit edilmiştir. Geri dönüştürülmüş asfalt içeren karışımların tekerlek izi derinliğinin azaldığı görülmüştür. Böylece geri dönüştürülmüş asfalt içeren asfalt karışımlarında bu gençleştirici katkı malzemesi ile modifiye bitüm kullanımının olumlu etki meydana getirdiği ve çalışmada kullanılan gençleştirici katkı malzemesinin, geri dönüştürülmüş asfalt ile uyumlu şekilde çalışabildiği tespit edilmiştir. Ek olarak, bu çalışmada kullanılan gençleştirici katkı malzemesi, binder tabakası için Karayolu Teknik Şartnamesinde belirtilen miktardan daha fazla oranda geri

dönüştürülmüş asfalt kullanılabilmesine olanak vermiştir. Elde edilen sonuçlara göre, geri dönüştürülmüş asfalt ve gençleştirici katkı malzemesiyle modifiyeli bitümlerin asfalt karışımlarında kullanımın uygun olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gençleştirici katkı malzemesi, geri dönüştürülmüş asfalt, nem hassasiyeti, tekerlek izi.

2023, 55 sayfa



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

EFFECT OF THE USAGE OF RECYCLED ASPHALT AND REJUVENATOR ADDITIVE IN THE BINDER LAYER ON HIGHWAY PAVEMENTS

Mohammad Hussain KHALIQUI

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

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet SALTAN

In this study, the performance of a rejuvenator additive material in asphalt mixtures containing a high amount of recycled asphalt is investigated. The modification of bitumen with 50/70 penetration with rejuvenator additive at the rates of 2, 4 and 6% was achieved with the help of a temperature controlled high-speed mixer at 3000 rpm, at 155 °C and for 45 minutes. Penetration, softening point, ductility and rotational viscometer tests were performed on the samples. The test results showed that the consistency of the modified bitumens decreased with the increase of the amount of rejuvenator additive added to the bitumen.

After determination of the aggregate gradation for the binder layer according to the Highway Technical Specification, 0, 35, 40 and 45% recycled asphalt was added to the asphalt mixtures prepared using 50/70 bitumen in accordance with the Superpave Volumetric Mixture Design Method. Then, asphalt mixtures containing 0, 35, 40 and 45% recycled asphalt were prepared by using bitumens modified with rejuvenator additive. Indirect tensile strengths and tensile strength ratios of asphalt mixtures prepared according to AASHTO T283 standard were determined. According to the obtained results, it was observed that the indirect tensile strength and tensile strength ratio values, which reflect the resistance of asphalt mixtures against tensile stresses under load, increased with the increase in the amount of recycled asphalt and bitumen modified with rejuvenator additive added to asphalt mixtures.

Among the prepared asphalt mixtures, the resistances of the mixtures with the best tensile strength ratio values against moisture and rutting under high temperature was determined with the Hamburg Wheel Tracking tester. It was seen that, the rutting depths of mixtures containing recycled asphalt reduced. Thus, it has been determined that the use of bitumen modified with this rejuvenator additive in asphalt mixtures containing recycled asphalt has a positive effect and that the rejuvenator additive used in the study can work compatible with recycled asphalt. In addition, the rejuvenator additive used in this study allowed the usage of recycled asphalt at a higher rate than the amount specified in the Highway Technical Specifications for the binder layer. According to the obtained results, it has been determined that recycled asphalt and

bitumens modified with rejuvenator additive are suitable for use in asphalt mixtures.

Keywords: Rejuvenator additive, recycled asphalt, moisture sensitivity, wheel track.

2023, 55 pages



TEŞEKKÜR

Her şeyden önce, sayısız nimetleri ve yüksek lisans tezimi bitirmem için bana inanç, güç, akıl ve sabır bahşettiği için Allah'a şükretmek istiyorum.

Öncelikle, yüksek lisans çalışmalarım boyunca bana rehberlik ve en önemlisi destek sağlayan değerli Danışmanım Prof. Dr. Mehmet SALTAN'a teşekkürlerimi ve sonsuz saygılarımı sunarım. Kendisinin rehberliği ve büyük liderliği altında çalışabildiğim için kendimi son derece şanslı görüyorum. Ayrıca çalışmalarım boyunca destek ve görüşlerini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan sayın hocam Prof. Dr. Serdal TERZİ'ye değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım boyunca pratik bilgi ve tecrübeleriyle bana hep yardımcı olup yol gösteren Arş. Gör. Gizem KAÇAROĞLU, Arş. Gör. Fatih ERGEZER ve doktora öğrencisi Öznur KARADAĞ'a çok teşekkür ediyorum.

Tezimin gerçekleşmesinde 121N060 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Son olarak aileme teşekkür etmeden bu bölüm tamamlanmış sayılmaz. Beni her zaman hayallerimin peşinden gitmem için motive eden sevgili canım aileme sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Mohammad Hussain KHALIQUI
ISPARTA, 2023

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Farklı yerlerde kullanılan RAP miktarları	2
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan RAP malzemesinin temini.....	16
Şekil 3.2. RAP malzemesine uygulanan ekstraksiyon deneyi	17
Şekil 3.3. Gençleştirici katkının görünümü	18
Şekil 4.1. Penetrasyon deneyi.....	20
Şekil 4.2. Yumuşama noktası deneyi	20
Şekil 4.3. Düktilite deneyi	23
Şekil 4.4. Brookfield RV deney cihazı.....	23
Şekil 4.5. SGC cihazının şeması (Kennedy vd., 1994)	24
Şekil 4.6. SGC cihazının çalışma prensibi (Kennedy vd., 1994)	25
Şekil 4.7. Maksimum yoğunluk gradasyonu	26
Şekil 4.8. Superpave agrega gradasyonu sınır değerleri	26
Şekil 4.9. %0, 35, 40 ve 45 RAP içeren karışımlar için agrega gradasyon eğrisi	29
Şekil 4.10. Superpave yöntemiyle numunelerin hazırlanma aşamaları.....	29
Şekil 4.11. Nem hassasiyetinin belirlenmesi için gerçekleştirilen adımlar	31
Şekil 4.12. Kalıcı gerinim ve yük döngüleri arasındaki ilişkinin şeması.....	32
Şekil 4.13. HWT deneyi için uygulanan aşamalar	33
Şekil 5.1. Penetrasyon deney sonuçları	35
Şekil 5.2. Yumuşama noktası deney sonuçları.....	35
Şekil 5.3. Penetrasyon indeksi sonuçları.....	36
Şekil 5.4. Düktilite deney sonuçları.....	37
Şekil 5.5. Referans ve modifiye bitümlerin 135 °C ve 165 °C'deki viskoziteleri.	37
Şekil 5.6. %0, 35, 40 ve 45 RAP içeren karışımlar için optimum bitüm oranları	38
Şekil 5.7. RAP ve RA ile modifiye bitümler kullanılarak hazırlanan asfalt karışımlarının indirekt çekme dayanımları.....	40
Şekil 5.8. Farklı RAP yüzdelere sahip kuru ve ıslak numuneler için TSR sonuçları	40
Şekil 5.9. RAP ve RA ile modifiye bitümler kullanılarak hazırlanan asfalt karışımlarının HWT deney sonuçları.....	42
Şekil 5.10. RAP ve RA ile modifiye bitümler kullanılarak hazırlanan asfalt karışımlarının tekerlek izi derinlikleri	42
Şekil 5.11. HWT numunelerinin deneyden önceki ve sonraki durumu	43

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Asfalt karışımlarında RAP kullanım oranına göre bitüm sınıfının değişimi.....	7
Çizelge 2.2. Fiziksel özelliklerine göre RA sınıflandırması.....	9
Çizelge 2.3. Kimyasal özelliklerine göre RA sınıflandırması.....	9
Çizelge 2.4. NDOT sınıflandırma sistemine göre RA sınıflandırması.....	10
Çizelge 3.1. Kireçtaşı agregalarının özellikleri	15
Çizelge 3.2. Kaba agreganın aşınma kaybı	15
Çizelge 3.3. 50/70 bitümün özellikleri.....	16
Çizelge 3.4. Çalışmada kullanılan RAP malzemesinin agrega gradasyonu	17
Çizelge 3.5. Gençleştirici katkının teknik özellikleri	18
Çizelge 3.6. RA ile modifiyeli bitümlerin deney sonuçları	18
Çizelge 4.1. Superpave VMA gereksinimleri	27
Çizelge 4.2. Superpave VFA gereksinimleri	27
Çizelge 4.3. Trafik hacmine göre belirlenen sıkıştırma sınır değerleri	28
Çizelge 4.4. Binder tabakası için gradasyon sınır değerleri	28
Çizelge 5.1. Yüksek TSR değerlerine sahip karışımlar.....	41

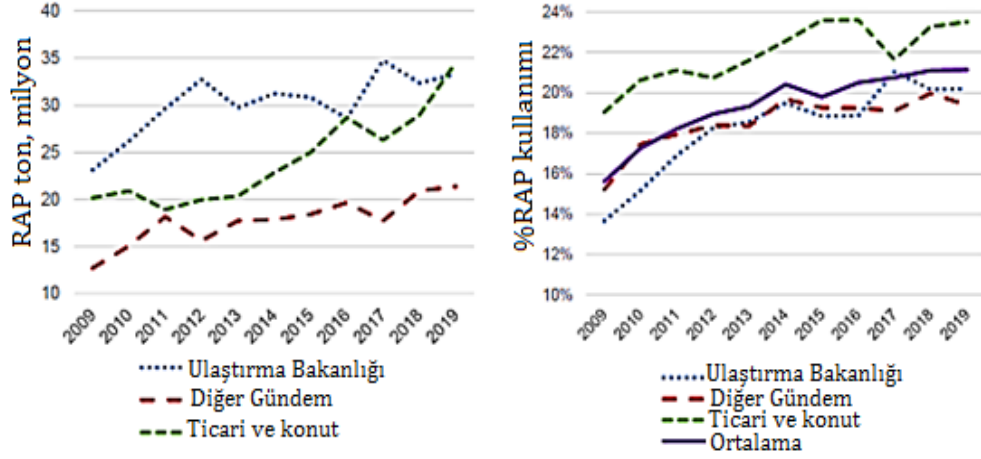
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
CMA	Soğuk karışım asfalt
ESALs	Eşdeğer standart dingil yükü
FHWA	Federal Karayolu İdaresi
HMA	Sıcak karışım asfalt
HWT	Hamburg tekerlek izi
ITS	İndirekt çekme dayanımı
KTŞ	Karayolu Teknik Şartnamesi
NDOT	Nebraska Ulaştırma Bakanlığı
NCHRP	Ulusal Kooperatif Karayolu Araştırma Programı
P _{be}	Etkili asfalt miktarı
PBR	Polibütadien kauçuk
PGHT	Performans sınıfı yüksek sıcaklık
RAP	Geri dönüştürülmüş asfalt
RA	Geri dönüşüm malzemeleri/Gençleştirici malzemeler
RV	Dönel viskozimetre
SOY	Soya fasulyesi yağı
SnF	Ayçiçek yağı
SHRP	Stratejik Karayolu Araştırma Programı
SGC	Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı
SCB	Yarım dairesel eğilme
TSR	Çekme dayanımı oranı
V _a	Hava boşluğu
VFA	Asfalt ile dolu boşluk
VMA	Mineral agregadaki boşluk
WCO	Atık yemeklik yağ
WEO	Atık motor yağı
WEO-CR	Atık motor yağıyla kauçuk kırıntısından oluşan gençleştirici bileşik
WMA	Ilık karışım asfalt

1. GİRİŞ

Asfalt karışımlarında kullanılan bitüm maliyetlerinin 1970 ve 1980 yıllarında artış göstermesinden dolayı geri dönüştürülmüş asfalt (RAP) kullanımı başlamıştır (Newcomb ve Epps, 1981). RAP malzemesini elde etmek amacıyla tambur karışım tesisleri, soğuk frezeleme makineleri, titreşim sıkıştırma silindirleri, soğuk ve sıcak yerinde geri dönüşüm teknikleri ve karışık tasarım yöntemlerini içeren yeni uygulamalardan yararlanılmıştır. Günümüzde, enerji maliyetlerinin artmasından ve atık malzemelerin çevre kirliliğine neden olmasından dolayı sıcak karışım asfaltta RAP kullanımı önem kazanmıştır. Asfalt karışımlarında RAP kullanımı, doğal kaynakların korunmasını, ham petrolden elde edilen bitüm ve enerji kullanımının azalmasını ve asfalt karışımlarının performansının iyileşmesini sağlamaktadır (You vd., 2011; Colbert vd., 2012). Robinette ve Epps (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, %25 RAP kullanımının, emisyon salımını yaklaşık olarak %10 azaltarak ve %20-25 enerji tasarrufu sağlayarak asfalt karışımlarının üretim ve inşaat maliyetlerini azalttığı belirtilmiştir. Buna ilaveten, asfalt karışımlarında ham malzeme yerine RAP kullanımının, toplam maliyeti yaklaşık olarak 2.2 milyar dolar azalttığı açıklanmıştır (Williams vd., 2019).

Amerika Birleşik Devletlerinde (ABD) 2009 yılında 56 milyon ton, 2019 yılında 89.2 milyon ton RAP malzemesinin asfalt karışımlarda kullanıldığı tespit edilmiştir. Şekil 1.1 incelendiği zaman, asfalt karışımlarında RAP malzemesinin kullanımının 2009-2014 yılları arasında artış gösterdiği görülmektedir. ABD’de asfalt karışımlarında %15-20 oranlarında RAP kullanılırken, Hollanda’da %50 oranında, Japonya’da ise %47 oranında kullanılmıştır. Hizmet ömrü sırasında doğal olarak yaşlanmaya maruz kalan RAP içeren asfalt karışımlarının rijitliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden, asfalt karışımlarında RAP kullanımı, asfalt karışımlarının tekerlek izi direncini geliştirse de çatlakların daha hızlı şekilde oluşmasına neden olabilmektedir (Mohajeri, 2015; West ve Copeland, 2015; Tahari vd., 2020).



Şekil 1.1. Farklı yerlerde kullanılan RAP miktarları

1.1. Amaç ve Kapsam

Bu tez çalışmasının amacı, %2, 4 ve 6 oranlarında gençleştirici katkı malzemesiyle (RA) modifiyeli bitüm ile %0, 35, 40 ve 45 oranlarında RAP içeren asfalt karışımlarının optimum bitüm oranlarını, indirekt çekme dayanımlarını (ITS), çekme dayanımı oranlarını (TSR) ve tekerlek izi derinliklerini incelemektir.

Tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışma adımları şu şekilde sıralanabilir:

- 1) 50/70 penetrasyon sınıfına sahip bitümün fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, özgül ağırlık ve dönel viskozimetre deneylerinin gerçekleştirilmesi.
- 2) %2, 4 ve 6 oranlarında RA ile 50/70 bitümün modifikasyonunu gerçekleştirdikten sonra modifiyeli bitümlerin fiziksel özelliklerini tespit etmek amacıyla bitüm deneylerinin uygulanması.
- 3) Karayolu Teknik Şartnamesine (KTŞ, 2013) göre binder tabakası için agrega gradasyonu belirlendikten sonra, Superpave Hacimsel Karışım Tasarımı Yöntemine uygun şekilde 50/70 bitüm ve %2, 4 ve 6 oranlarında RA ile modifiye bitümler kullanılarak %0, 35, 40 ve 45 oranlarında RAP içeren asfalt karışımlarının optimum bitüm oranlarının, ITS ve TSR değerlerinin belirlenmesi.
- 4) AASHTO T283 standardına göre, referans ve farklı oranlarda RA ile modifiyeli bitümler ve RAP katkısı içeren asfalt karışımları arasında en

iyi nem hassasiyeti direncini gösteren asfalt karışımlarını tespit ederek bunlar üzerine Hamburg Tekerlek İzi (HWT) testinin gerçekleştirilmesi.

1.2. Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışması beş başlık altında değerlendirilmiştir.

- 1) “Giriş” bölümünde, çalışma hakkında genel bir bakış açısı sağlanarak çalışmanın hedefleri ele alınmıştır.
- 2) “Kaynak Özetleri” bölümünde, farklı gençleştirici katkı malzemeleri ve RAP içeren asfalt karışımları üzerine gerçekleştirilen önceki çalışmalardan bahsedilmiştir.
- 3) “Materyal” bölümünde, tez çalışmasında kullanılan 50/70 bitümün, gençleştirici katkının ve RAP malzemesinin özellikleri verilmiştir.
- 4) “Yöntem” bölümünde, çalışma kapsamında gerçekleştirilen deney yöntemleri belirtilmiştir.
- 5) “Araştırma Bulguları ve Tartışma” bölümünde, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tüm deneylerin sonuçlarına yer verilmiştir. Elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.
- 6) “Sonuç ve Öneriler” bölümünde, tez çalışmasından elde edilen sonuçlar özet halinde verilmiştir. İlerleyen çalışmalarda yapılması planlananlardan bahsedilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, geri dönüştürülmüş asfalt (RAP) ve geri dönüşüm ajanları/gençleştirici malzemelerin (RA) özelliklerinin yanı sıra, RAP ve farklı gençleştirici malzemeler içeren asfalt karışımlarıyla ilgili gerçekleştirilen literatür taramasına yer verilmiştir.

2.1. Geri Dönüştürülmüş Asfalt (RAP)

Hizmet ömürleri boyunca asfalt karışımlar, farklı hava koşullarına maruz kaldığından atmosferik oksijenle reaksiyonun sonucunda asfalt moleküllerinin kimyasal bileşimlerindeki değişimler ve tiksotropik (streik sertleşme) etkilerle üretilen moleküller, asfalt karışımlarının yaşlanmasına neden olmaktadır (Petersen, 1984). RAP, hizmet ömrünü (10-15 yıl) tamamlamış asfalt karışımının frezelenmesi veya tamamen kaldırılması sonucunda elde edilmektedir (Saffar vd., 2021).

1973 yılında, Arap Petrol Ambargosundan dolayı bitüm fiyatlarının artmasıyla inşaat sektöründe RAP kullanımı önem kazanmasına rağmen, asfalt karışımlarında RAP kullanımının geçmişinin 1915 yılına dayandığı bilinmektedir (Antunes vd., 2019; Sharma vd., 2022). Asfalt karışımlarında RAP kullanımı, bitüm miktarının ve üretim maliyetlerinin azalmasında etkilidir. Bu yüzden, asfalt karışımlarında yaygın şekilde RAP kullanıldığı ifade edilmektedir (Zaumanis ve Mallick, 2015). Dünya çapında bu geri dönüşümü desteklemek amacıyla, “Karayolları için Geri Dönüşüm Malzemeleri (National Cooperative Highway Research Program, 1978)”, “Karayolu Üstyapı Kaplama Malzemelerinin Geri Dönüşümüne Yönelik Yönergeler (Terrel vd., 1980)”, “Kaplama Geri Dönüşümü Yönetici Özeti ve Raporu (Sullivan, 1989)” ve “Eyalet ve Yerel Yönetimler için Kaplama Geri Dönüşüm Yönergeleri: Katılımcının Referans Kitabı (Kandhal ve Mallick, 1997)” raporları yayınlanmıştır.

Asfalt karışımlarında RAP malzemesi, 2009–2014 yılları arasında en yüksek miktarda kullanılmıştır. ABD’de 2009 yılında 56 milyon ton, 2019 yılında 89.2

milyon ton RAP malzemesinin kullanıldığı tespit edilmiştir. Asfalt karışımlarında kullanılan RAP miktarının, 2018 yılında %20.5 iken 2019 yılında %21.1 olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, RAP malzemesinin yaklaşık olarak %97'sinin yeni asfalt karışımlarında kullanımı sağlanırken, %3'ü diğer inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmaktadır (Williams vd., 2019). RAP malzemesinin kullanımı genellikle sıcak karışım asfalt (HMA), ılık karışım asfalt (WMA) ve soğuk karışım asfalt (CMA) üretiminde tercih edilmektedir. RAP kullanımı büyük ölçüde ulusal düzenlemelere bağlı olduğundan ülkeden ülkeye değişiklik göstermektedir (Williams vd., 2019; Tarsi vd., 2020).

Hizmet ömrünü tamamlayan asfalt karışımlarının kazınması sırasında elde edilen RAP malzemesi, fazla miktarda ince agrega parçacıkları içermektedir. Bu ince agrega parçacıklarının geniş yüzey alanları üzerinde de fazla miktarda yaşlanmış bitüm bulunmaktadır. Asfalt karışımlarının hacimsel tasarımında, karışıma ilave edilen RAP malzemesini oluşturan agrega ve bitüm özelliklerinin standartlara göre belirlenmesi ve hesaba katılması gerekmektedir (Copeland, 2011; Sabahfer ve Hossain, 2015; Zaumanis ve Mallick, 2015). Superpave Hacimsel Karışım Tasarımına göre asfalt karışımlarına ilave edilen RAP malzemesinin dikkat edilmesi gereken özellikleri şu şekilde verilmiştir (Kandhal ve Mallick, 1997):

- 50 mm elek boyutundaki RAP %100'ü geçmemeli,
- RAP malzemesinde bulunan zararlı madde miktarı maksimum %2 oranında olmalı,
- Karışım tasarımı sırasında homojen karışım elde etmek amacıyla RAP malzemesi içindeki nem oranı belirlenmeli,
- RAP malzemesini oluşturan bitümün karıştırma sıcaklığına ısıtılması sırasında yaşlanmasından dolayı ısıtma süresi minimum tutulmalı ve karıştırma süresi en fazla bir saat olmalı,
- RAP malzemesinin yüksek miktarda emici malzemeler içermesinden dolayı emilen bitüm miktarı tahmin edilmeli ve agrega özgül ağırlıkları hesaplanmalı,
- Karışım gradasyonunun hesaplanmasında RAP içeren agrega gradasyonu kullanılmamalıdır.

ABD Ulaştırma Bakanlığı tarafından, eyaletlerde HMA tasarımlarının yaklaşık olarak %60'ında RAP malzemesi, %11-20 oranında kullanılırken yaklaşık olarak %23'ünde RAP malzemesi, %21-30 oranında kullanılmaktadır. HMA'ya en yaygın şekilde %15-25 oranında RAP malzemesi ilave edilmektedir (Tavakol ve Hossain, 2016; Kaseer vd., 2019). Asfalt karışımlarında genellikle, %15-30 oranında RAP kullanımı ile karışımların performansında en iyi sonuçlar elde edilmektedir. Asfalt karışımlarında fazla miktarda (ağırlıkça %20 ve üzeri) RAP kullanılması sonucu, karışımın homojen şekilde dağılımının sağlanmamasından dolayı, erken dönemlerde tekerlek izi ve çatlama gibi bozulmalar görülmektedir (Tarsi vd., 2020). Buna, asfalt karışımlarının hizmet ömrü süresince atmosfere maruz kalmasından dolayı yaşlanmasının sebep olduğu belirtilmektedir (Saffar vd., 2021). Asfalt karışımlarına ilave edilen RAP miktarıyla (ağırlıkça %25 ve üzeri) asfalt karışımlarının performansını artırmak için kullanılan bitüm sınıfının değiştirilmesi, RA'ların kullanımı ve bitüm miktarının artırılması gibi farklı tekniklerin uygulandığı araştırmalar yapılmaktadır (Im vd., 2016; Tavakol ve Hossain, 2016; Hansen ve Copeland, 2015; Neto vd., 2022). %35 RAP içeren asfalt karışımlarının istenilen düzeyde performans sağladığı, asfalt karışımlarında %30 RAP kullanımının ise ihtiyaç duyulan enerji gereksinimini %16 ve CO₂ emisyonu miktarını %20 oranlarında azalttığı belirtilmiştir (Hong vd., 2010; Lee vd., 2012). AASHTO M323-13 (2013) ve Asfalt Enstitüsü tarafından, asfalt karışımlarında RAP kullanım oranına göre bitüm sınıfının değişimi üç aşamalı şekilde açıklanmıştır (Çizelge 2.1). Çizelge 2.1 şu şekilde yorumlanmaktadır:

- ✓ HMA'da kullanılan RAP yüzdesi ağırlıkça %15'ten az ise bitüm sınıfının değişmesine gerek yoktur.
- ✓ HMA'da kullanılan RAP yüzdesi ağırlıkça %15-25 aralığında ise bitüm sınıfının daha yumuşak olması önerilir.
- ✓ HMA'da kullanılan RAP yüzdesi ağırlıkça %25'ten fazla ise bitüm sınıfının değerlendirilmesi gerekmektedir (Asphalt Institute, 2014; Sharma vd., 2021).

Kriz vd. (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yukarıda belirtilen ikinci aşamaya dayanarak HMA'da %15-25 oranında RAP kullanımı durumunda

yumuşak bitüm sınıfının kullanılmasına gerek olmadığı ve %25 RAP kullanım oranında geri dönüştürülmüş karışım derecesinde herhangi bir değişimin gözlemlenmediği belirtilmiştir. Carpenter vd. (2009) de asfalt karışımlarında %20 oranında RAP kullanımı durumunda yumuşak bitüm sınıfına gerek olmadığını ve %20 oranına kadar RAP kullanımının, asfalt karışımının performansını ve dayanımını değiştirmediğini belirtmiştir. Fakat Noferini (2016), sıcak karışım asfaltta %20'den fazla RAP kullanılması durumunda bitüm sınıfını değiştirmiştir.

Çizelge 2.1. Asfalt karışımlarında RAP kullanım oranına göre bitüm sınıfının değişimi

Aşama	RAP Miktarı		Tavsiye
	Asfalt Estitüsü	Michigan Asfalt Üstyapı Birliği (2014)	
1	<%15	≤%17	Karışım tasarımında değişikliğe gerek yoktur.
2	%15-25	%18-28	Bitüm sınıfı bir derece daha düşürülmelidir.
3	>%25	>%28	ASTM D4887'deki karışım tablosu kullanılmalıdır.

Avusturalya taslağı olan Taslak Mühendislik Karayolu Notu 13 B-RAP ile Asfalt Karışım Tasarımı, HMA'da kullanılan RAP yüzdesine göre üç seviyede kategorize edilmiştir:

1. Seviye: ≤%10 RAP içeren HMA (14-20 mm ara tabaka)
2. Seviye: %11-25 RAP içeren HMA (20 mm ara tabaka)
3. Seviye: %26-40 RAP içeren HMA (20 mm ara tabaka)

2.2. Geri Dönüşüm Ajanları/Gençleştirici Malzemeler (RA)

Kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip organik bir malzeme olarak tanımlanan geri dönüşüm ajanları (RA), yaşlanmış bitümün fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek için tasarlanmıştır (Asfalt Institute, 2014). RA kullanımının amaçları, yaşlanmış bitümün sertliğini azaltmak, esneklik kazanan bitüm ile hazırlanan karışımın dayanımını ve neme karşı direncini artırmak ve doğal agregalar ile

kullanılmamış bitüm arasındaki uyumu, geri dönüştürülmüş agregalar ile yaşlanmış bitüm arasında da sağlamaktır (Corbett, 1975; Roberts vd., 2003; Martin vd., 2015; Martin vd., 2020). RA'lar fiziksel özelliklerine, reolojik özelliklerine ve kaynağına göre sınıflandırılmaktadır (Lee vd., 2019). 1999 yılında, fiziksel özelliklerine dayalı şekilde, ASTM D4552-10 sınıflandırma sistemine göre sıcak asfalt karışımlarda bu malzemelerin uygunluğu değerlendirilmiş fakat performansları incelenmemiştir. Çizelge 2.2'de görüldüğü gibi, ASTM D4552-10'da, viskozitesine göre tanımlanan yedi farklı RA derecesi (RA 0, RA 1, RA 5, RA 25, RA 75, RA 250 ve RA 500) belirtilmiştir (Fee vd., 2018; Sias vd., 2022).

RA'lar kimyasal özelliklerine göre "petrol bazlı", "organik bazlı" ve "emülsiyon bazlı" olarak sınıflandırılmaktadır. Çizelge 2.3'te de verilen ve her bir sınıfın alt sınıfında yer alan RA'ların, kimyasal yapıları benzer olmasına rağmen farklı kaynaklardan oluştukları için farklı özelliklere sahip oldukları düşünülmektedir (Habbouche vd., 2022).

Nebraska Ulaştırma Bakanlığı (NDOT) sınıflandırma sistemine göre de kaynağının doğasına dayanarak RA'lar beş sınıfa ayrılmaktadır (Çizelge 2.4).

Katar'daki Texas A&M Üniversitesi tarafından RA'lar, mekanizmalarına göre "yumuşatıcılar (parafinik yağ)", "takviye ediciler (aromatik özler)" ve "emülgatörler (bitkisel yağlar, biyo-y yağlar ve tall yağı)" olmak üzere üç grupta sınıflandırılırlar. Yaşlanmış bitümün mikroyapısal ve reolojik değişikliklerini ve RA'ların yaşlanmış bitüm üretiminde etkili olup olmadığını belirlemek için, asfalt karışımlarında Glover-Rowe (G-R) parametresi, karbonil alan büyümesiyle birlikte kullanılmaktadır. Bu sınıflandırma sisteminde gençleştiriciler genellikle indeks şeklinde gösterilmektedir (Haghshenas, 2021).

Çizelge 2.2. Fiziksel özelliklerine göre RA sınıflandırması

Test	ASTM Test Yöntemi	RA1	RA5	RA25	RA75	RA250	RA500
Viskozite (60°C)	D2170-D2171	50-175	176-900	901-4500	4501-12500	12501-37500	37501-60000
Parlama Noktası (°C)	D92	219 (425)	219 (425)	219 (425)	219 (425)	219 (425)	219 (425)
Doymuş Ağırlık (%)	D2007	Max. 30	Max. 30	Max. 30	Max. 30	Max. 30	Max. 30
RTFO veya TFO (163°C) kalıntıları üzerinde yapılan testler: 1) Viskozite Oranı 2) Ağırlık Değişimi (%)	D2872-D1754	Max. 3	Max. 3	Max. 3	Max. 3	Max. 3	Max. 3
		Max. 4	Max. 4	Max. 3	Max. 3	Max. 3	Max. 3

Çizelge 2.3. Kimyasal özelliklerine göre RA sınıflandırması

Kimyasal Özellik	Türleri	Bileşenleri ve Kullanımı
Petrol Bazlı	Parafinik yağlar	Yeniden rafine edilmiş yağlama yağları
	Aromatik yağlar	Ham petrol ürünleri, baskın polar aromatik yağ bileşenleri
	Naftenik yağlar	Hidrokarbonlar
Organik Bazlı	Tall yağı	Kâğıt üretiminin yan ürünleri, yağ asitleri ve reçineler
	Bitkisel yağlar	Gliserit ve yağ asitlerinin karışımı
	Biyolojik bazlı yağlar	Yağ amin türevleri ve biyolojik çözücüler
	Modifiye edilmiş bitkisel yağlar	Temel bitkisel yağ ve kimyasal içeren RA
Emülsiyon Bazlı	Emülsiyon formunda RA (Katyonik, anyonik)	Soğuk yerinde geri dönüştürmede kullanılır.

Çizelge 2.4. NDOT sınıflandırma sistemine göre RA sınıflandırması

Sınıflandırma	Kategori	Örnekler	Açıklama
1. Sınıf	Parafinik yağlar	Atık motor yağı (WEO) Valero VP 165 Storbit	Rafine kullanılmış yağlama yağları
2. Sınıf	Aromatik ekstraktlar	Aromatik yağlar Hidrolen Rejenere Siklojen L Valaro 130A	Polar aromatik yağ bileşenleri ile rafine ham petrol ürünleri
3. Sınıf	Naftenik yağlar	Sonne Warmix RJ Ergon Hyprene	Asfalt değişikliği için tasarlanmış hidrokarbonlar
4. Sınıf	Trigliseritler ve yağ asitleri	Atık bitkisel yağ Atık bitkisel gres Kahverengi gres Oleik asit	Bitkisel yağlardan elde edilir.
5. Sınıf	Amaca yönelik biyo-bazlı ürünler	Kraton Sylvaroad RP10000 Hydrogreen Cargill Anova CA4	Bir kâğıt endüstrisi yan ürünü olan bitkisel yağlardan veya tall yağından elde edilir.

RAP içeren asfalt karışımlarının, tekerlek izi oluşumuna karşı direncinin artmasına rağmen çatlama direncinin azaldığı bilinmektedir. Bu sorunu azaltmak amacıyla asfalt karışımları, daha yumuşak bitüm veya RA ile hazırlanmalıdır (Sharma vd., 2022; Sias vd., 2022). Asfalt karışımlarının performansını iyileştirmek için farklı RA malzemeleri, bir petrol bazlı RA (Reob) ve iki biyo-bazlı RA, kullanılmıştır (Lee vd., 2019; Zhang vd., 2022). Yaşlanmış bitümün özelliklerini iyileştirmek için kullanılan RA'ların seçimi ve bu malzemelerin miktarını belirlemek önemlidir. Yaşlanmış bitümde yüksek miktarda RA kullanımı, asfalt karışımlarının çatlama direncini artırırken tekerlek izine, kalıcı deformasyona ve nem hasarına karşı direncini azaltmaktadır. Aksine yaşlanmış bitümde düşük miktarda RA kullanımı, asfalt karışımının yorulma performansını ve düşük sıcaklıkta çatlama direncini olumsuz şekilde etkilemektedir. Yaşlanmış bitümde, üreticilerin deneyimlerine bağlı olarak, düşük oranlarda (genellikle bitümün ağırlıkça %5'inden az) RA kullanımı tercih edilmektedir (Mercado vd., 2018). Yaşlanmış bitümde kullanılacak RA miktarını belirlemek için genellikle iki yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntem, RA ile modifiyeli bitümün viskozite ve penetrasyon değerlerini dikkate alarak istenilen viskozimetre ve penetrasyon değerlerini karşılayacak uygun oranı belirlemektir. İkinci yöntemde ise performans sınıfı kullanılarak düşük sıcaklıkta çatlama karşı direnci

sağlayacak minimum oran ile yüksek sıcaklıkta tekerlek izi oluşumuna karşı direnci sağlayacak maksimum oran belirlenmektedir (Kaseer vd., 2018). RA oranını belirlemek için Denklem 2.1 kullanılmaktadır (Sias vd., 2022).

$$\text{RA oranı (bitüm ağırlığı cinsinden, \%)} = [\text{PGHT}_{(\text{karışım})} - \text{PGHT}_{(\text{hedef})}] / 1.8 \quad (2.1)$$

Burada, PGHT performans sınıfı yüksek sıcaklık olarak tanımlanmaktadır.

RAP içeren asfalt karışımlarında yüksek performans sağlamak amacıyla tall yağı ve biyo-bazlı yağlar yaygın şekilde kullanılmaktadır. Fakat RAP içeren asfalt karışımlarında kullanılan RA'ların seçiminde, asfalt karışımı ile RA arasında uyum sağlanması gerektiğine dikkat edilmelidir. RA özelliklerini belirlemek için penetrasyon ve viskozite testleri gerçekleştirilmektedir (O'Sullivan, 2011; Martin vd., 2015; Martin vd., 2020). Örneğin Zaumanis vd. (2013) ve Zhao vd. (2018), kaynaklarına göre sınıflandırılan farklı RA'ların (organik karışım, rafine don yağı, parafinik yağ, aromatik ekstrakt, naftenik yağ, WEO ve tall yağı) yaşlanmış bitüm üzerindeki etkisini incelemek için penetrasyon ve dönel viskozimetre deneylerini gerçekleştirmişlerdir.

2.3. RAP ve Farklı RA'lar İçeren Asfalt Karışımlarla İlgili Literatür Taraması

Kodippily vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, iki farklı gençleştirici katkı malzemesinin (malten fraksiyonu, kimyasal gençleştirici madde) ve iki farklı oranda (%15, 30) RAP katkısının asfalt karışımları üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen tekerlek izi deney sonuçları, yüksek oranda RAP içeren karışımların, RAP içermeyen ve %15 oranında RAP içeren karışımlara göre deformasyon direncinin daha yüksek olduğunu göstermiştir. %30 RAP içeren asfalt karışımlarının çatlamaya karşı direncinin düşük olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, RAP içeren asfalt karışımlarına ilave edilen malten fraksiyon gençleştirici katkı malzemesi, kimyasal gençleştirici katkı malzemesine göre daha iyi yorulma performansı göstermiştir.

Daryae vd. (2018), atık polibütadien kauçuk (PBR), gençleştirici katkı malzemesi ve RAP içeren asfalt karışımlarının özelliklerini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, PBR ve gençleştirici katkı içeren bitümler ve %50 oranında RAP ile hazırlanan asfalt karışımları en iyi tekerlek izi direnci performansı göstermiştir.

Mansourkhaki vd. (2019), gençleştirici katkı malzemesiyle modifiyeli bitüm ile hazırlanan asfalt karışımlarının özelliklerini araştırmıştır. Gençleştirici katkı modifiyeli bitüm üzerine gerçekleştirilen geleneksel bitüm deneylerinin (penetrasyon, yumuşama noktası, viskozimetre) sonuçlarına göre, en uygun kullanım oranının %7.5 olduğu belirtilmiştir. %7.5 gençleştirici katkı modifiyeli bitüm ve %30, 50 ve 100 oranlarında RAP içeren asfalt karışımlarının özellikleri incelenmiştir.

Ziari vd. (2019), doğal kaynakların azalması, bitüm fiyatlarının artması ve asfalt karışımlarından yüksek oranda RAP elde edilmesi nedeniyle RAP kullanımının arttığını ifade etmiştir. Yüksek oranlarda RAP içeren asfalt karışımlarında görülen düşük yorulma ve çatlama direncini azaltmak amacıyla gençleştirici katkı malzemelerinin kullanımını incelemiştir. Gençleştirici katkı malzemesi ve RAP ile hazırlanan asfalt karışımlarında ITS'nin arttığı, tekerlek izi performansının iyileştiği ve çatlama performansının düştüğü belirtilmiştir.

Moniri vd. (2019), %25, 50, 75 ve 100 oranlarında RAP ile farklı gençleştirici katkı malzemesi kullanılarak hazırlanan asfalt karışımlarının, neme ve çatlama karşı direncini incelemek amacıyla ITS ve HWT deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Asfalt karışımlarında gençleştirici katkı malzemesinin kullanımı, karışımların rijitliğini azaltırken RAP kullanımı ise karışımların tekerlek izine, nem hasarına ve düşük sıcaklık çatlağına karşı yüksek direnç göstermesine katkı sağlamıştır.

Pradhan ve Sahoo (2020), iki farklı oranda (%30 ve 70) RAP ve Pongamina Pinnata gençleştirici katkı malzemesi içeren asfalt karışımlarının yorulma performansını ve neme karşı direncini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre,

RAP ve RA içeren asfalt karışımlarının yorulma direncinin arttığı, tekerlek izi derinliğinin azaldığı belirtilmiştir.

Taherkhani ve Noorian (2020), %25, 50 ve 75 oranlarında RAP kullanılarak WEO ve atık yemeklik yağ (WCO) olmak üzere iki gençleştirici katkı malzemesiyle hazırlanan asfalt karışımlarının yorulma ve neme karşı direncini belirlemek amacıyla ITS ve HWT deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Asfalt karışımlarına ilave edilen RAP miktarının artmasıyla ITS ve tekerlek izi derinliğinin arttığını gözlemlerken gençleştirici katkı malzemesi kullanımı ile bu değerlerin azaldığını belirtmişlerdir.

Jagad vd. (2021), asfalt karışımlarında %60 RAP ve iki farklı RA'nın (tall yağı ve aromatik ekstrakt) kullanımının uygunluğunu araştırmıştır. Neme karşı direnç ve tekerlek izi performansı açısından, RAP ve %10 tall yağı içeren asfalt karışımlarının, %5 aromatik ekstrakt içeren asfalt karışımlarına göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Mohi Ud Din vd. (2021), geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarının hizmet ömrü sırasında kaybettiği özelliklerini iyileştirmek amacıyla iki farklı gençleştirici katkı malzemesinin (WEO ve WCO) etkilerini incelemişlerdir. Bitüme ilave edilen WEO ve WCO katkı malzemelerinin orta sıcaklık performansını penetrasyon, yumuşama noktası ve duktilite deneylerini gerçekleştirerek; yüksek sıcaklık performansını ise tekerlek izi ve çoklu gerilme sünme deneylerinin sonuçlarıyla değerlendirmişlerdir.

Magar vd. (2022), %10, 20, 25, 50 ve 70 RAP ve Hindistan'ın doğusunda üretilen Madhuca Longifolia yağı (Mahua yağı) içeren asfalt karışımlarının performansını, hacimsel özelliklerini, ITS ve nem hassasiyetini, tekerlek izi derinliğini, yorulma performansını ve düşük sıcaklık çatlama direncini değerlendirmişlerdir. Asfalt karışımlarına ilave edilen RAP oranının artmasıyla karışımların ITS ve esneklik modülü değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir.

Kamal vd. (2022), %40 RAP ile soya fasulyesi yağı (SOY) ve ayçiçek yağı (SnF) içeren asfalt karışımlarının performansını incelemişlerdir. Bitüme ilave edilen gençleştirici katkı malzemesi olarak kullanılan SOY ve SnF'nin en uygun oranları, geleneksel bitüm deneylerinin (penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite) sonuçlarına göre sırasıyla %6 ve %3 olarak belirlenmiştir. SOY ve SnF ile modifiye edilen bitümün penetrasyon değerleri artarken yumuşama noktası değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. İki farklı yağ ile modifiyeli bitümler kullanılarak hazırlanan asfalt karışımlarının tekerlek izi performansı ve düşük sıcaklık çatlama direnci iyileşmiştir.

Eltwati vd. (2022), %100 RAP ve atık motor yağıyla kauçuk kırıntısından oluşan gençleştirici bileşik (WEO-CR) içeren asfalt karışımlarının performansını incelemişlerdir. Tekerlek izi test sonuçlarına göre, asfalt karışımlarının tekerlek izine karşı direncinin iyileştiğini açıklamışlardır.

Pradhan ve Sahoo (2022), %30, 40, 50, 60 ve 70 RAP ile RAP ağırlığınca %5 polanga yağı içeren asfalt karışımlarının özelliklerini incelemek amacıyla ITS, nem hassasiyeti ve tekerlek izi deneylerini gerçekleştirmişlerdir.

Zaumanis vd. (2014), %100 RAP ve altı farklı RA (atık bitkisel yağ, atık bitkisel gres, organik yağ, distile don yağı, aromatik ekstrakt ve WEO) içeren asfalt karışımlarının performansını incelemişlerdir. Yaşlanmış bitüm için en uygun RA oranı, penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozimetre deneylerine göre tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, %100 RAP ve gençleştirici içeren asfalt karışımlarının tekerlek izine ve çatlama karşı direnci önemli derecede artmıştır.

3. MATERYAL

3.1. Agregası

Çalışmada, Isparta Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğünden elde edilen kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Deneysel aşamalarda kullanılan agreganın özelliklerini belirlemek için özgül ağırlık ve su emme (TS EN 1097-6), Los Angeles (ASTM C131) ve Mikro-Deval (TS EN 1097-1) deneyleri gerçekleştirilmiştir. İlgili deney sonuçları Çizelge 3.1-3.2’de görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, tez kapsamında gerçekleştirilecek deneysel çalışmalarda kullanılacak agregaların KTŞ’ye uygun olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3.1. Kireçtaşı agregalarının özellikleri

Deneyler	Elek Çapları (mm)	Kireçtaşı Agregası
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	19.5-4.75	2.72
	4.75-0.075	2.68
	<0.075	2.62
	RAP	2.38
Su emme (%)	12.5-4.75	2.77
	4.75-0.075	0.11
Doygun yüzey özgül ağırlığı (gr/cm ³)	19.5-4.75	2.45
	4.75-0.075	2.636

Çizelge 3.2. Kaba agreganın aşınma kaybı

Deneyler	Elek Çapları (mm)	Aşınma Kaybı (%)	Şartname Sınır Değeri (%)
Los Angeles	10-14	18.1	<27
Mikro-Deval	10-14	9.35	<20

3.2. Bitüm

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde Isparta Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğünden temin edilen 50/70 penetrasyon sınıfına sahip bitüm kullanılmıştır. 50/70 bitümün özelliklerini belirlemek amacıyla bitüm deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yapılmasında dikkate alınan standartlara ve deney sonuçlarına Çizelge 3.3’te yer verilmiştir.

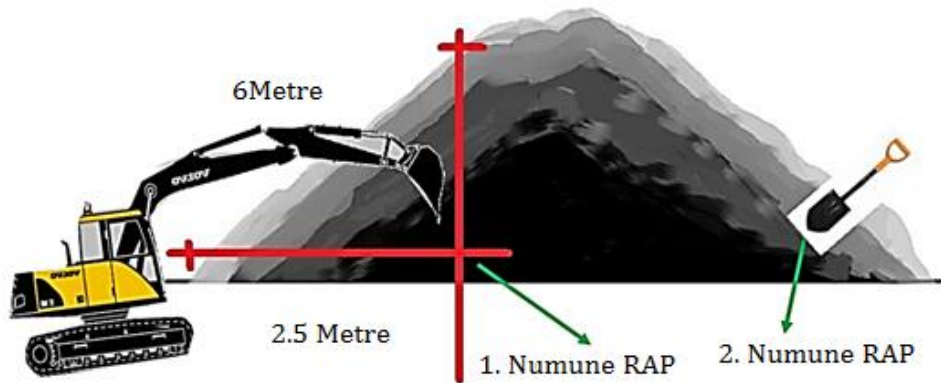
Çizelge 3.3. 50/70 bitümün özellikleri

Deneyler	Standartlar	Deney Sonuçları	
Penetrasyon (0.1 mm)	ASTM D5	51.33	
Yumuşama Noktası (°C)	ASTM D6	52.5	
Düktilite (cm)	ASTM D113	>100	
Viskozimetre (cP)	ASTM D4402	135 °C	165 °C
		437.1	136.9
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	ASTM D70	1.020	

3.3. Geri Dönüştürülmüş Asfalt (RAP)

Doğal kaynakların azalması, çevre kirliliğinin ve asfalt karışım maliyetlerinin artmasından dolayı, hizmet ömrünü tamamlayan asfalt karışımları kazınıp geri dönüştürülerek kullanılmaktadır (Daniel ve Anderson, 2001). KTŞ'de yeni yapılacak bitümlü sıcak karışım imalatında ağırlıkça %25'ten fazla kazınmış asfalt kaplama kullanılmayacağı ifade edilmiştir. Ancak kazınmış asfalt kaplamanın yeni yapılacak bitümlü sıcak karışımlarda kullanım oranının, gençleştirici katkılara bağlı olarak ağırlıkça daha yüksek olabileceği de belirtilmiştir (KTŞ, 2013).

Bu tez çalışmasında, 2002 yılında hizmete açılan Bursa-Karacabey yolunun, km: 6+500-25+000 arasında kalan kısmındaki üstyapı tabakasının, 2013 yılında kazınmasıyla elde edilen RAP malzemesi kullanılmıştır. 2021 yılında bu malzemenin, Şekil 3.1'de görüldüğü gibi yüzey ve derin kısımlarından farklı numuneler alınmıştır.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan RAP malzemesinin temini

Temin edilen RAP malzemesinin özelliklerini belirlemek amacıyla öncelikle RAP malzemesine ekstraksiyon deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. RAP malzemesine uygulanan ekstraksiyon deneyi

Elde edilen sonuca göre, RAP malzemesinin bitüm içeriği (%3.63) ve agrega gradasyonu belirlenmiştir (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. Çalışmada kullanılan RAP malzemesinin agrega gradasyonu

Elek Boyu mm (inç)	Geçen (%)
25 mm (1")	100
19 mm (3/4")	99.20
12.5 mm (1/2")	93.20
9.5 mm (3/8")	85.30
4.75 mm (No.4)	67.00
2 mm (No.10)	42.80
0.425 mm (No.40)	20.70
0.180 mm (No.80)	14.80
0.075 mm (No.200)	11.70
Filler	0

3.4. Gençleştirici Katkı Malzemesi (RA)

Yeniden kullanım katkılarının, yaşlanmış bitümü gerekli standartlara göre iyileştirebilecek uygun bir petrol ürünü katkı olması gerektiği belirtilmektedir (KTŞ, 2013). Çalışmada kullanılan, bitümün viskozitesini azaltan ve sıvı halde bulunan gençleştirici katkı, Şekil 3.3'te ve katkının teknik özellikleri Çizelge 3.5'te görülmektedir. Amin bileşikleri içeren bu RA, yüksek miktarda RAP içeren asfalt karışımlarının özelliklerini iyileştirmek ve performansını artırmak amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 3.3. Gençleştirici katkının görünümü

Çizelge 3.5. Gençleştirici katkının teknik özellikleri

Özellik	RA
Yapısı	Amidoamin kompleks sentezi
20 °C'de Fiziksel Görünüm	Sıvı
Renk	Koyu sarı/Turuncu
Yoğunluk (g/ml)	0.97±0.2
pH	7-8
25 °C'de Viskozite (cPs)	200
Parlama Noktası (°C)	>150

3.5. RA ile Modifiyeli Bitümler

50/70 penetrasyon sınıfına sahip bitümün, %2, 4 ve 6 oranlarında RA ile modifikasyonu sonucu elde edilen modifiye bitümlerin özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. RA ile modifiyeli bitümlerin deney sonuçları

Özellik	Modifiye Bitüm Türü		
	%2 RA	%4 RA	%6 RA
Penetrasyon (0.1 mm)	55	62.33	67
Yumuşama Noktası (°C)	49	46.5	44.9
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	1.004	1.018	1.027
Düktilite (cm)	>100	>100	>100

4. YÖNTEM

Referans ve farklı malzemelerle modifiyeli bitümlerin fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla geleneksel bitüm deneyleri (penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, özgül ağırlık ve dönel viskozimetre) gerçekleştirilmektedir (Geçkil, 2008). Tez çalışmasında kullanılan 50/70 referans bitüm ve farklı oranlarda RA ile modifiye edilen bitümler üzerine de geleneksel bitüm deneyleri gerçekleştirilmiştir.

4.1. Penetrasyon Deneyi

ASTM D5 standardına göre, bitümün kıvamını belirlemek amacıyla, belirli bir yük (100 g) altında, belirli bir zamanda (5 s) ve sıcaklıkta (25 °C) dikey bir mesafede (0.1 mm) iğnenin bitüme batma derinliği belirlenir. Bitümün kıvamını gösteren batma derinliği, penetrasyon değeri olarak ifade edilir. Penetrasyon değerinin düşük olması bitümün sert olduğunu, yüksek olması ise bitümün yumuşak olduğunu göstermektedir (Ye vd., 2021). Bitümün kıvamını belirlemek amacıyla kullanılan penetrasyon deneyinin avantajı, ucuz ve kolay olmasıdır (Adhikari vd., 2013).

Penetrasyon değerini belirlemek için, hazırlanan bitüm akışkan hale gelene kadar etüvde ısıtılır. Akışkan hale gelen bitüm penetrasyon kabının dörtte üçünü dolduracak şekilde dökülür (Şekil 4.1). Bitüm ile doldurulan penetrasyon kabı, oda sıcaklığında 1-1.5 saat bekletildikten sonra 25 °C sıcaklığa sahip su banyosunda 1-1.5 saat bekletilir. Bu süre sonunda bitüm yüzeyinin en az üç noktasından alınan ölçümlerin ortalaması, bitümün penetrasyon değeri olarak kaydedilir.

4.2. Yumuşama Noktası Deneyi

Yumuşama noktası deneyi, 3.5 gr ağırlığa sahip standart iki tane çelik bilye ağırlığı altında, bitümün yarı katı halden sıvı hale geçtiği sıcaklığı belirlemek için kullanılmaktadır (Esfahani, 2020). Yumuşama noktası deneyi, asfalt

kaplamalarda derz, çatlak dolguları ve çatı kaplama malzemeleri gibi kalın film olarak kullanılacak malzemeler için önemlidir (Tia, 2002).



Şekil 4.1. Penetrasyon deneyi

Sıvı haldeki bitüm, plaka ya da cam üzerine gliserin veya vazelin sürülerek yaklaşık 8 mm derinliğe sahip olan yüzüklerin yüzeyine eşit şekilde dökülür. 30-40 dakika oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Soğuduktan sonra bitümün fazlası, sıcak bir spatulayla tıraşlanır ve yüzüklerin yüzeyi düzlenir. Bu işlem bittikten sonra yüzükler deney düzeneğine yerleştirilip üzerine 3.5 gramlık bilyeler konulur ve 600 ml hacimli beherin içindeki 5 °C sıcaklığa sahip suya yerleştirilir. Suyun sıcaklığı dakikada 5 °C olacak şekilde arttıkça bilyeler, yüzüklerin üzerinden düşmeye başlar ve bilyelerin düştüğü andaki sıcaklık otomatik olarak kaydedilir. Sağ ve sol yüzüklerin üzerindeki bilyelerin düşme sıcaklıkları arasındaki fark en fazla 1°C olmalıdır. Aksi durumda deney tekrarlanır.



Şekil 4.2. Yumuşama noktası deneyi

4.3. Penetrasyon İndeksi

Asfalt karışımlarının hizmet ömrü süresince atmosfer koşullara maruz kalmalarından dolayı mekanik özellikleri değişmektedir. Bitümün sıcaklık değişimine karşı hassasiyetini belirlemek amacıyla penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçlarına göre penetrasyon indeksi (PI) değeri hesaplanmaktadır (Denklem 4.1). Yol yapımında kullanılacak bitümün PI değeri -1 ile +1 arasında olmalıdır. PI değerinin yüksek olması bitümün sıcaklığa karşı hassasiyetinin düşük, düşük olması ise sıcaklığa karşı hassasiyetinin yüksek olması anlamına gelmektedir. Yüksek PI değerine sahip bitümler, düşük sıcaklıkta çatlama ve bozulmaya karşı direnç göstermektedir (Moussa, 2020; Singh, 2020).

$$PI = \frac{1952 - 500 \cdot \text{Log}(\text{Pen}_{25^\circ\text{C}}) - 20 \cdot YN}{50 \cdot \text{Log}(\text{Pen}_{25^\circ\text{C}}) - YN - 120} \quad (4.1)$$

Burada;

Pen: 25 °C'deki penetrasyon değeri ve

YN: °C cinsinden yumuşama noktası değeri olarak tanımlanmaktadır.

4.4. Özgül Ağırlık Deneyi

Belirli bir hacimdeki bitüm ağırlığının, aynı sıcaklıktaki suyun ağırlığına oranı bitümün özgül ağırlığı olarak tanımlanmaktadır. Standarda göre özgül ağırlık deneyi 25 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmektedir (Dhayal ve Mathur, 2021; Adesina ve Dahunsi, 2021). Akışkan hale gelmesini sağlamak için bitüm, 1.5-2 saat süresince 110-150 °C sıcaklığa sahip etüve bırakılır. Öncelikle boş piknometre ağırlığı tartılır. Daha sonra piknometre saf su ile ağzına kadar doldurulur, piknometrenin kapağı kapatılarak içindeki havanın dışarı çıkması sağlanır ve su dolu ağırlığı tartılır. Piknometrenin kuruması sağlandıktan sonra yaklaşık olarak dörtte üçü bitümle doldurulur. Bitümle dolan piknometre en az 40 dakika boyunca oda sıcaklığında soğumaya bırakılır ve daha sonra tekrar ağırlığı ölçülür. Bitüm ile dolu piknometrenin üzerine saf su doldurulduktan sonra 30

dakikalığına 25 °C sıcaklığa sahip su banyosuna yerleştirilir. Sürenin sonunda piknometrenin bu haldeki ağırlığı da tartılır. Elde edilen ölçümler kullanılarak bitümün özgül ağırlığı Denklem 4.2'ye göre hesaplanır.

$$\text{Özgül Ağırlık} = \frac{(C-A)}{(B-A)-(D-C)} \quad (4.2)$$

Burada;

A: Boş piknometrenin ağırlığı (kapak dahil),

B: Saf su ile dolu piknometrenin ağırlığı,

C: Yaklaşık dörtte üçü bitümle dolu piknometrenin ağırlığı ve

D: Bitüm ve saf su dolu piknometrenin ağırlığı olarak bilinmektedir.

4.5. Düktilite Deneyi

Düktilite bir malzemenin çekme ve gerilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Bitümün düktilitesi, bir bitüm numunesinin standart olarak (belirli hız ve sıcaklıkta) kopma veya kopma uzunluğuna ulaşmak üzere gerildiği santimetre cinsinden uzama miktarıdır. Genellikle bu uzama miktarı 5 ile 100 cm arasındadır (Bada vd., 2022). Bitümün düktilite değerinin yüksek olması, yük altında meydana gelen sapmaların ve çatlama olasılığının azalması, asfalt ömrünün artması anlamına gelmektedir. Bitümün düşük düktilite değerine sahip olması ise sert ve soğuk iklimli bölgelerde kullanımının uygun olduğunu göstermektedir (Tia, 2002).

Bitüm, akışkan hale gelmesi için etüve bırakıldıktan sonra kalıpların bitümle dolacak kısımlarına vazelin veya gliserin düzgün şekilde sürülür. Kalıplar hazırlandıktan sonra ısıtılan bitüm, düzgün ve kalıptan bir miktar taşacak şekilde dökülür ve 40 dakika boyunca oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Sürenin sonunda kalıplar 25 °C sıcaklığa sahip su banyosuna 30 dakikalığına yerleştirilir. Su banyosundan çıkarılan kalıplardaki bitümün fazlası, sıcak spatula yardımıyla kazınır ve kalıplar düktilite cihazına yerleştirilir (Şekil 4.3). Deney sonucunda bitümün uzama miktarı belirlenir.



Şekil 4.3. Düktilite deneyi

4.6. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

RV deneyi, ASTM D4402 standardına göre yüksek sıcaklıkta bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Sabit bir sıcaklıkta bitümle dolu haznenin içine daldırılan milin dönme hızını korumak için gerekli olan tork değeri ölçülür. Ölçülen tork değeri, viskozite değerine dönüştürülerek otomatik olarak kaydedilir (Taheri vd., 2022). ASTM standardına göre bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını belirlemek için 135 °C ve 165 °C sıcaklıklarında viskozimetre değerlerinin ölçülmesi önerilir. Superpave şartnamesinde bitümün karıştırma sıcaklığı için 0.17 ± 0.02 Pa.s, sıkıştırma sıcaklığı için ise 0.28 ± 0.02 Pa.s değerlerinin baz alınması gerektiği belirtilmiştir (Kasanagh vd., 2020). 150 °C sıcaklığa sahip etüvde bekletilen bitüm, haznenin içine yaklaşık olarak 9.5 gr ağırlığında olacak şekilde doldurulur ve deney cihazına yerleştirilerek belirli bir hızda deney gerçekleştirilir. Deney sonuçları otomatik olarak deney cihazının ekranında görülür (Şekil 4.4).

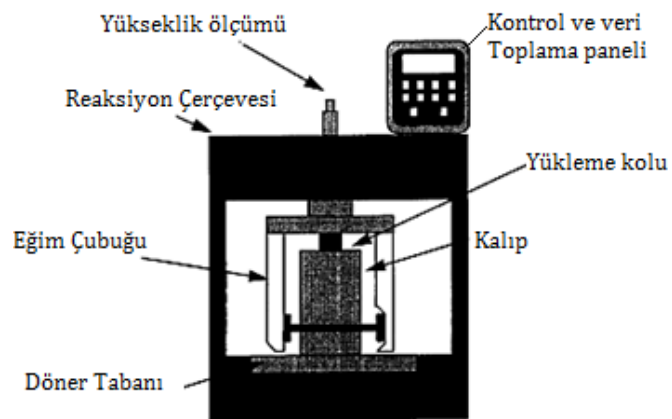


Şekil 4.4. Brookfield RV deney cihazı

4.7. Superpave Hacimsel Karışım Tasarımı Yöntemi

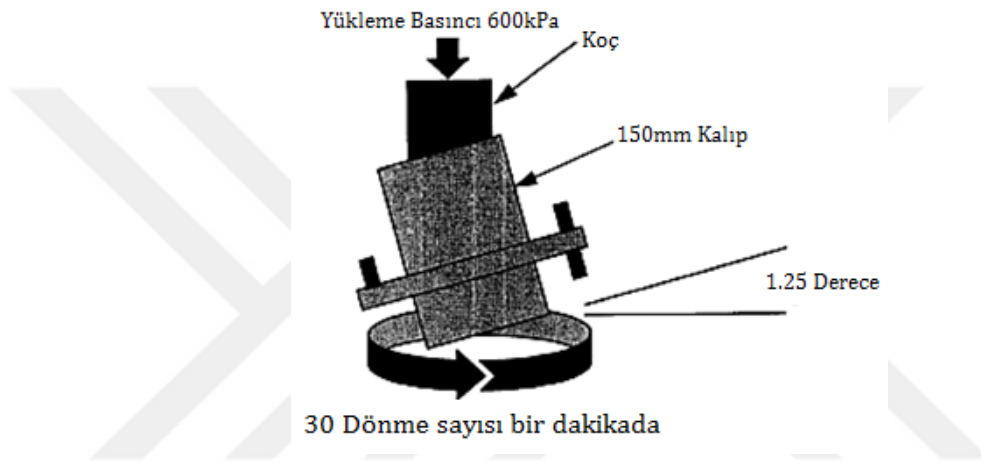
1987 ve 1992 yılları arasında ABD Stratejik Karayolu Araştırma Programının (SHRP) bir ürünü olan “Üstün Performanslı Asfalt Kaplamalar (Superpave)” üstyapıda oluşan tekerlek izi, yorulma çatlakları ve termal çatlama gibi bozulmaları azaltmak için geliştirilmiştir. Asfalt karışım tasarımı ve üstyapı performans analiz süreçlerini azaltarak asfalt karışımı üretilirken kullanılacak mineral agregaların ve bitümün fiziksel özelliklerini (mineral agregadaki boşluk (VMA), mineral agreganın özgül ağırlığı, bitümün performans sınıfı vb.) belirleyen bu yöntemin birçok alanda kullanımı artmıştır. Bu özellikler HMA'nın stabilite, geçirgenlik, dayanıklılık, yorulma, sünme ve nem hasarına karşı direnç dahil olmak üzere birçok özelliğini etkilemektedir (Devulapalli vd., 2019; Tutu vd., 2022). Superpave yöntemiyle HMA'nın performansını iyileştirmek, trafik ve iklim koşullarını dikkate almak, şartnameye uygun bitüm ve agrega seçimini sağlamak ve hacimsel özelliklerin sağlanması için karışım tasarımında sınır değerleri dikkate almak amaçlanmaktadır (Nouman vd., 2022; Zumrawi vd., 2016). Marshall ve Hveem yöntemlerine göre, Superpave yöntemiyle hazırlanan asfalt karışımlarının agrega gradasyonu belirlenirken gradasyonun uygun şekilde derecelendirilmesine, agreganın maksimum ve minimum boyutunun ve agregaların tane dağılımının belirli aralıkta olmasına dikkat edilmektedir.

Superpave Hacimsel Karışım Tasarımı yönteminde kullanılan cihaz, Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı (SGC) olarak bilinmektedir (Şekil 4.5).



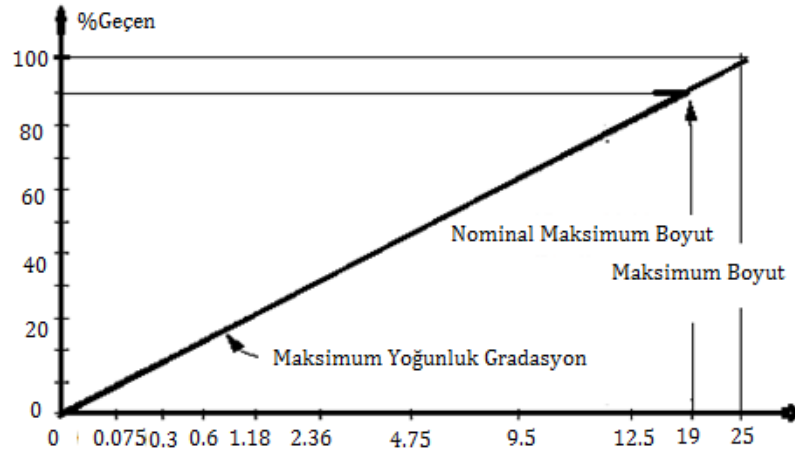
Şekil 4.5. SGC cihazının şeması (Kennedy vd., 1994)

SGC tabanı, sıkıştırma periyodunda 30 dönme yaparken aynı zamanda 3000 kPa kayma gerilimi ile 600 ± 18 kPa'lık sabit bir dikey gerilim uygulamaktadır. SGC deney aletinde 150 mm (~6 in) veya 100 mm (~4 in) olmak üzere iki çeşit kalıp kullanılır ve karışım tasarımı sırasında kalıbın iç kısmı 1.16° ve dış kısmı $1.25\pm 0.02^\circ$ olmak üzere iki dönme açısıyla hareket eder (Şekil 4.6). 150 mm çapa sahip kalıp kullanılarak hazırlanan numuneler ile HWT ve Yarım Dairesel Eğilme (SCB) testleri gerçekleştirilirken 100 mm çap ile hazırlanan numuneler ile optimum bitüm, ITS ve TSR değerleri tespit edilir (Wang vd., 2019; Guha ve Assaf, 2020).



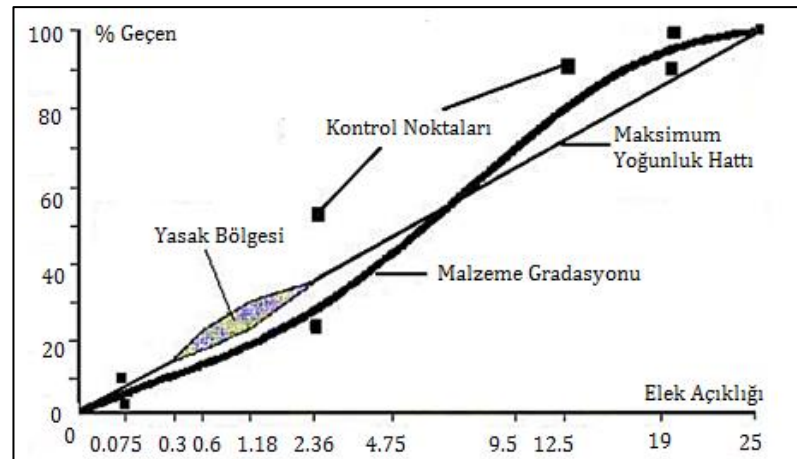
Şekil 4.6. SGC cihazının çalışma prensibi (Kennedy vd., 1994)

Superpave Hacimsel Karışım Tasarımı yönteminde, agrega gradasyonu için ABD Federal Karayolu İdaresi (FHWA) tarafından hazırlanan 0.45 üstel kuvvet grafiği kullanılmaktadır. Bu grafiğin y eksenini aritmetik ölçekte % cinsinden geçen agrega miktarını, x eksenini ise elek boyutunun 0.45'inci dereceden üstel kuvvetini göstermektedir. Bu grafiğin en önemli bileşeni "maksimum yoğunluk gradasyonu"dur. Maksimum yoğunluk gradasyonu, agrega parçacıklarının mümkün olan en yoğun düzenlemede oldukları gradasyon olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemde, maksimum ve nominal maksimum agrega boyutu kavramları geliştirilmiştir. Maksimum agrega boyutu, karışım için kullanılacak eleklerin maksimum boyutu olarak tanımlanırken, nominal maksimum agrega boyutu maksimum boyut ile kontrol noktaları arasında kalan bir elek boyutu olarak ifade edilmektedir (Şekil 4.7) (Taha vd., 2022; Tunç, 2004).



Şekil 4.7. Maksimum yoğunluk gradasyonu

Agrega gradasyonunu belirlemek amacıyla kullanılan 0.45'inci dereceden üstel kuvvet eğrisinde "kontrol noktaları" ve "yasaklanmış bölge" kavramları yer almaktadır (Şekil 4.8). Kontrol noktaları, gradasyon eğrisinin geçmek zorunda olduğu sınırları belirlemektedir. Yasaklanmış bölge ise ara boyut (maksimum boyutuna bağlı olarak 4.75 veya 2.36 mm) ve 0.3 mm boyut arasında bir bölge oluşturur ve agrega gradasyonunun bu alandan geçmemesi gerekir (Öztürk ve Çubuk, 2004).



Şekil 4.8. Superpave agrega gradasyonu sınır değerleri

Sıkıştırılmış üstyapı karışımlarının hacimsel özellikleri, hava boşluğu (V_a), VMA, asfalt ile dolu boşluk (VFA) ve etkili asfalt miktarı (P_{be}) karışımın üstyapı hizmet performansını etkiler (Wang vd., 2019). V_a , sıkıştırılmış asfalt karışımında bitümlle kaplanmış agrega parçacıkları arasındaki küçük hava ceplerin toplam

hacmidir. Asfalt karışımının yüksek hava boşluğuna sahip olması sonucu karışıma kolay şekilde su girişi gerçekleşir (Tran vd., 2012; Yu vd., 2014). VMA, mineral agregalar arasındaki boşluğu ifade etmektedir. %4 tasarım hava boşluğu değeri dikkate alınarak Superpave Hacimsel Karışım Tasarımında VMA için belirtilen minimum değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Asfalt karışımlarının VMA değerinin, belirtilen sınır değerden daha düşük olması karışımın dayanımını; daha yüksek olması ise karışımın stabilitesini olumsuz şekilde etkiler (Christensen ve Donald, 2006).

VFA, sıkıştırılmış asfalt karışımında agrega parçacıkları arasındaki boşluk yüzdesi olarak tanımlanır. Asfalt karışımlarının VFA değerinin düşük olması karışımın düşük stabiliteye; yüksek olması ise tekerlek izi oluşumuna neden olmaktadır (Xiao, 2009). %4 tasarım hava boşluğu kriterine göre VFA’nın kabul edilebilir aralığı trafik seviyesine göre belirlenir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.1. Superpave VMA gereksinimleri

Superpave VMA Gereksinimleri	
Nominal Maksimum Agregaya Boyutu	Minimum VMA (%)
9.5 mm	15
12.5 mm	14
19 mm	13
25 mm	12
37.5 mm	11

Çizelge 4.2. Superpave VFA gereksinimleri

Superpave VFA Gereksinimleri	
Tasarım Eşdeğer Standart Dingil Yüğü (ESALs) (Milyon)	Tasarım VFA (%)
<0.3	70 - 80
0.3<x<3	65 - 78
3<x<10	65 - 75
10<x<30	65 - 75
≥30	65 - 75

Tez çalışmasında Superpave Hacimsel Karışım Tasarımı yöntemine göre binder tabakası için agrega gradasyonunun belirlenmesinde, nominal maksimum tane boyutu 19 mm olan agrega gradasyonu seçilmiştir. SGC ile hazırlanan karışımlar,

trafik hacmi göz önüne alınarak üç sıkıştırma sınır değerine ($N_{başlangıç}$, $N_{tasarım}$, $N_{maksimum}$) göre üretilmektedir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. Trafik hacmine göre belirlenen sıkıştırma sınır değerleri

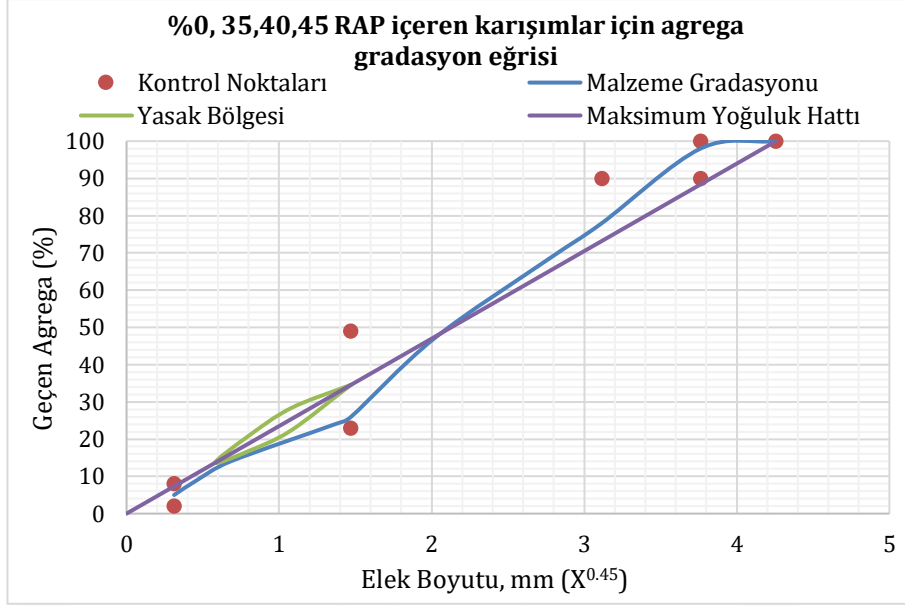
Trafik Hacmine göre Sıkıştırma Parametreleri			
Tasarım ESALs (Milyon)	Sıkıştırma Parametreleri		
	$N_{başlangıç}$	$N_{tasarım}$	$N_{maksimum}$
<0.3	6	50	75
0.3<x<3	7	75	115
3<x<10	8	100	160
≥30	9	125	205

Binder tabakasının hizmet vereceği Isparta ilinin 20 yıllık trafik miktarının, $30 \cdot 10^6$ ESALs'dan daha fazla olduğu tahmin edildiğinden $N_{tasarım}$ değeri 125 olarak alınmıştır. Asfalt karışımlarının optimum bitüm hesabı yapılırken VMA ve VFA için şartname sınır değerleri dikkate alınmıştır. KTŞ'de binder tabakası için verilen gradasyon sınır değerleri Çizelge 4.4'te görülmektedir.

Çizelge 4.4. Binder tabakası için gradasyon sınır değerleri

Elek Boyu mm (İnç/No.)	Sınır Değerler	Kullanılan Karışım Gradasyonu
25 mm (1")	100	100
19 mm (3/4")	80-100	98
12.5 mm (1/2")	58-80	78
9.5 mm (3/8")	48-70	68
4.75 mm (No.4)	30-52	47
2 mm (No.10)	20-40	24
0.425 mm (No.40)	8-22	14
0.180 mm (No.80)	5-14	9
0.075 mm (No.200)	5-7	5
Filler	0	0

Belirtilen sınır değerlerine göre hazırlanan %0, 35, 40 ve 45 oranlarında RAP içeren asfalt karışımlarının binder tabakasına uygun agrega gradasyon eğrisi Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. %0, 35, 40 ve 45 RAP içeren karışımlar için agrega gradasyon eğrisi

Hazırlanan agrega gradasyonları, bitüm ve SGC kalıpları uygun sıcaklığa sahip etüve bırakılır. Öncelikle %0, 35, 40 ve 45 oranlarında RAP içeren asfalt karışımlarının optimum bitüm oranlarını belirlemek için farklı oranlarda 50/70 bitüm ilave edilerek agregaların tamamen bitüm ile kaplanması sağlanır. Daha sonra hazırlanan asfalt karışımı SGC kalıbına yerleştirilir ve $N_{tasarım}$ yoğurma sayısına (125) göre sıkıştırılır (Şekil 4.10). Sıkıştırma işleminden sonra elde edilen V_a , VMA, VFA ve özgül ağırlık değerleri, şartname sınır değerlerine göre kontrol edilir.



Şekil 4.10. Superpave yöntemiyle numunelerin hazırlanma aşamaları

4.8. Nem Hassasiyetinin Belirlenmesi

Asfalt karışımlarında meydana gelen dayanım kaybının, suya karşı direnç azalmasının, yorulma hasarının ve kalıcı deformasyonların görülmesinin sebebi, karışımların neme karşı direnç gösterememesidir. Asfalt karışımlarının nem hassasiyetine karşı direncini artırmak için karışımı oluşturan malzemelerin seçimine (agregaların gözenekli, pürüzlü ve temiz olmaması gibi) ve karışımı oluşturan malzemelerin güçlü şekilde bağlanmasına dikkat edilmelidir (Dave vd., 2018). AASHTO T283 standardına göre asfalt karışımlarının nem hassasiyetine karşı direncini belirlemek için, öncelikle %4 hava boşluğu kriteri dikkate alınarak belirlenen optimum bitüm oranlarına göre ıslak ve kuru ITS değerleri tespit edilir. Bu amaçla hazırlanan numuneler, 72 saat boyunca 40±1 °C sıcaklığa sahip etüve bırakılır. Sürenin sonunda numunelerin ağırlık ve üç farklı noktadan yükseklik ölçümleri alınır. Kuru ITS için hazırlanan asfalt numuneleri, ıslak ITS için hazırlanan asfalt numunelerinin şartlandırılma süresi boyunca 25±1 °C sıcaklığa sahip etüve bırakılır. Şartlandırılacak numuneler öncelikle 25±1 °C sıcaklığa sahip su banyosunda 24 saat bekletilir. 24 saat sonra su banyosundan alınan numunelere, doyumluk oranları %55-80 arasında olana kadar vakum uygulanır. İşlemden sonra numuneler streç filmle sarılır ve 16 saatliğine -18±3 °C sıcaklığa sahip dondurucuya bırakılır. 16 saat sonunda asfalt numuneleri, 60±1 °C sıcaklığa sahip su banyosunda 24±1 saat boyunca bekletilir. Son olarak numuneler, 25±1 °C sıcaklığa sahip su banyosuna 2 saatliğine alınır ve 25 °C sıcaklığa geldiklerinde hem kuru hem de ıslak numunelerin şartlandırılmış ve şartlandırılmamış ITS değerleri belirlenir. Asfalt numunelerinin nem hassasiyetini belirlemek için gerçekleştirilen adımlar Şekil 4.11’de verilmiştir.

Şartlandırılmış ve şartlandırılmamış asfalt numunelerinin ITS değerleri Denklem 4.3 ile hesaplanmaktadır.

$$ITS = \frac{2 \cdot 10^3 P}{\pi D T} \quad (4.3)$$

Burada;

ITS: İndirekt çekme dayanımı (kPa)

P: Uygulanan yük (N)

D: Numunenin çapı (mm)

T: Numunenin kalınlığı (mm) olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.11. Nem hassasiyetinin belirlenmesi için gerçekleştirilen adımlar

Şartlandırılmış asfalt numunelerinin ITS değerlerinin, şartlandırılmamış asfalt numunelerinin ITS değerlerine oranı, nem hassasiyetine karşı direncin ölçütü olan TSR'yi vermektedir. TSR, Denklem 4.4'e göre hesaplanmaktadır.

$$TSR = \frac{ITS_{\text{Islak}}}{ITS_{\text{Kuru}}} \times 100 \quad (4.4)$$

Burada;

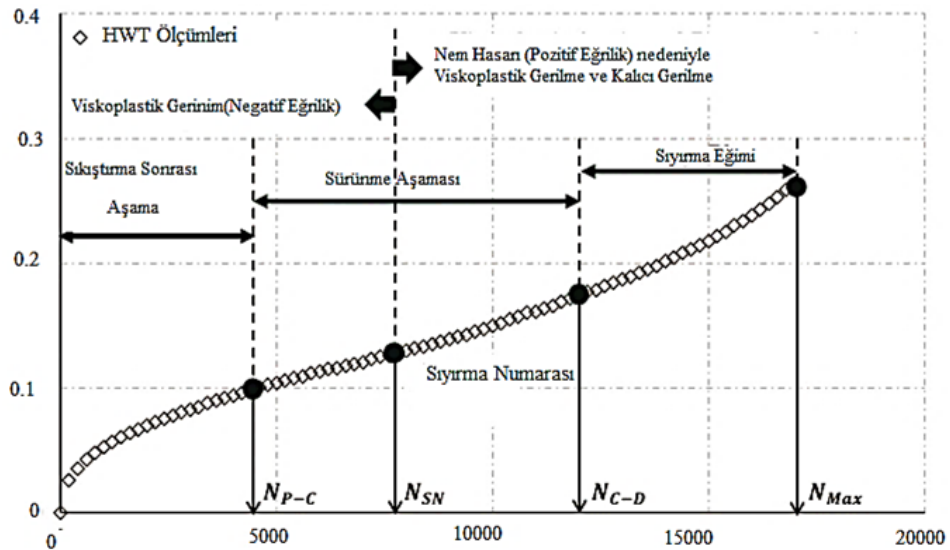
TSR: Çekme dayanımı oranı (%)

ITS_{Islak}: Şartlandırılmış asfalt numunelerinin indirekt çekme dayanımı (kPa)

ITS_{Kuru}: Şartlandırılmamış asfalt numunelerinin indirekt çekme dayanımı (kPa) olarak tanımlanmaktadır.

4.9. Hamburg Tekerlek İzi (HWT) Deneyi

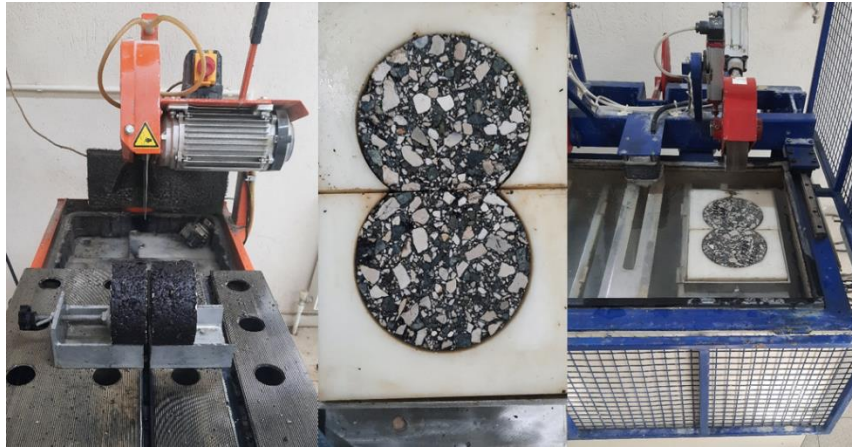
Asfalt karışımlarının suya karşı hassasiyetini belirlemek için en yaygın şekilde kullanılan yöntemlerden biri HWT deneyidir. Asfalt karışımlarının suya karşı direncini belirlemede, kalıcı gerinim ve yük döngüleri arasındaki ilişkinin şemasından (Şekil 4.12) da görülebileceği üzere, “sıkıştırma sonrası aşama”, “sürünme aşaması” ve “sıyırma eğimi” şeklinde üç parametreye dikkat edilmelidir (Zhang vd., 2022). Sıkıştırma sonrası aşama, asfalt karışımının 30 dakika suyun içinde bekletilmesinden sonra tekerleğin asfalt karışımının üzerindeki birkaç döngüsüyle başlar; genellikle 1000 ile 5000 yükleme döngüsü içinde gerçekleşmektedir (Williams vd., 2019; Zhang vd., 2022). Sürünme aşaması, sıkıştırma sonrası aşama bittikten sonra, genellikle 5000 yük döngüsüyle başlayarak muhtemelen 10000 yük döngüsüne kadar devam eden aşamadır. Asfalt karışımına uygulanan yük döngüsünün artmasıyla tekerlek izi derinliğinin artması beklenmektedir. Karışımı oluşturan agregalar ve bitüm arasında oluşan bağlar suyun etkisiyle ve artan yük döngüleriyle asfalt karışımlarında soyulma ve kırılma gibi bozulmalar meydana getirir (Moon vd., 2022). Sıyırma eğimi, asfalt karışımına uygulanan yük döngüsünün artmasıyla meydana gelir. Asfalt karışımlarında oluşan tekerlek izi derinliği ve sıyırma bükülme noktası, asfalt karışımlarının neme karşı direncini belirlemede kullanılan en yaygın parametreler olarak bilinmektedir (Zhao vd., 2022).



Şekil 4.12. Kalıcı gerinim ve yük döngüleri arasındaki ilişkinin şeması

25 °C ile 70 °C test sıcaklıkları arasında gerçekleştirilen HWT deneyi, plak ve silindirik olmak üzere iki farklı kalıp kullanılarak kuru ve ıslak şekilde uygulanabilir. HWT plak kalıbının genişliği 260 mm, uzunluğu 320 mm ve yüksekliği 40 mm (10.2 in*12.6 in*1.6 in)'dir. Bu kalıplara uygun şekilde %7±1 hava boşluğuna sahip asfalt karışımları hazırlanır. Hazırlanan asfalt karışımlarına 47 mm genişliğinde bir çelik tekerlek vasıtasıyla 703±4.5 N'luk (158±1 lb.) bir kuvvet uygulanır. Daha sonra çelik tekerlek, asfalt karışımlarının üzerinde 0.305±0.02 m/s (50±2 devir/dk) hızla ileri geri hareket eder. Deney sonunda, çelik tekerleklerin tekrarlı yüklemesinden oluşan tekerlek izi derinlikleri ölçülür (Lee vd., 2019; AASHTO T324-19).

Tez çalışmasında, SGC kullanılarak AASHTO T324-19 standardına uygun şekilde 150 mm çapa sahip asfalt numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler Süleyman Demirel Üniversitesi Ulaştırma Laboratuvarında bulunan HWT cihazının kalıplarına uygun şekilde kesilmiştir. Kesilen numuneler cihazın kalıplarına yerleştirildikten sonra sıcaklığı 50 °C olan suda en az 30 dakika bekletilmiştir. Daha sonra belirlenen döngü sayısına göre deney başlatılmıştır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. HWT deneyi için uygulanan aşamalar

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tez çalışmasında öncelikle 50/70 bitüm üzerine bitüm deneyleri gerçekleştirilmiş ve referans bitüm ile %0, 35, 40 ve 45 oranlarında RAP içeren asfalt karışımlarının optimum bitüm oranları, kuru ve ıslak ITS ve TSR değerleri belirlenmiştir. Daha sonra RAP içeren asfalt karışımlarının özelliklerini iyileştirmek için %2, 4 ve 6 oranlarında RA ile modifiyeli bitümlerin özellikleri incelenmiş ve bu bitümler ile belirtilen oranlardaki RAP kullanılarak hazırlanan asfalt karışımlarının kuru ve ıslak ITS ve TSR'leri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en iyi TSR'ye sahip asfalt karışımları üzerine HWT testi uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar, bu bölümde detaylı şekilde verilmiştir.

5.1. 50/70 Referans Bitüm ve RA ile Modifiyeli Bitümler Üzerine Gerçekleştirilen Bitüm Deneylerinin Sonuçları

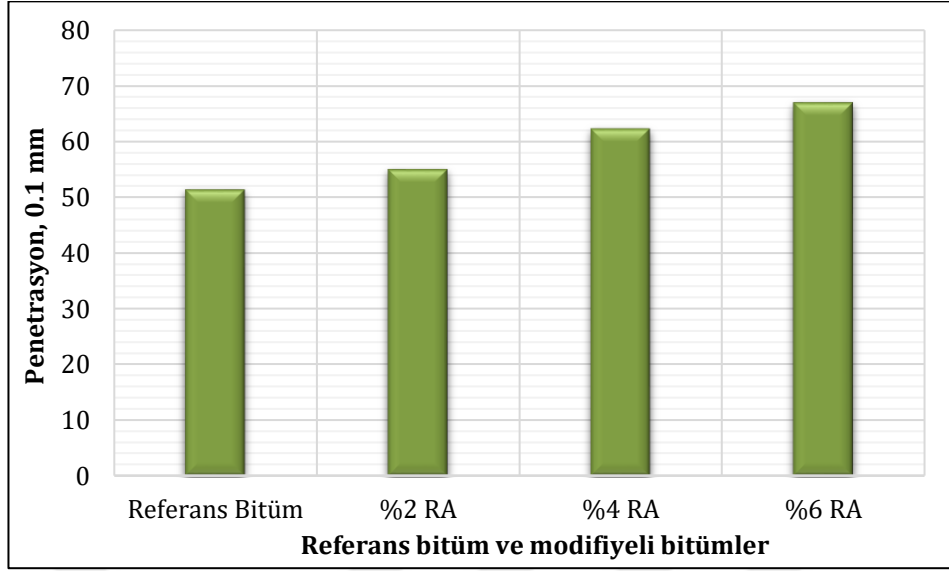
Bu başlık altında, 50/70 referans bitüm ile %2, 4 ve 6 oranlarında RA kullanılarak modifiye edilmiş bitümler üzerine gerçekleştirilen bitüm deneylerinin (penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, RV ve özgül ağırlık) sonuçları verilmiştir.

5.1.1. Penetrasyon deney sonuçları

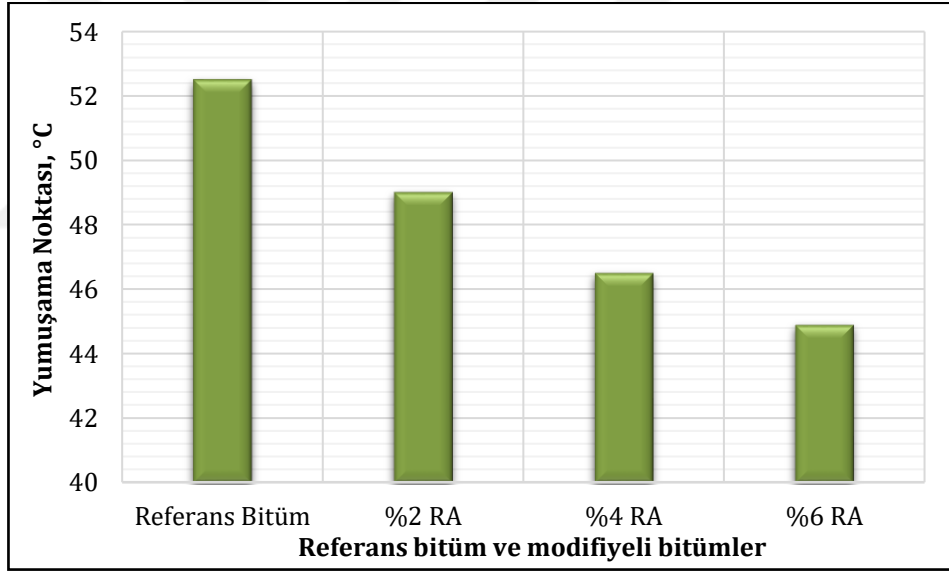
50/70 referans bitüme ilave edilen RA miktarının artmasıyla modifiyeli bitümlerin penetrasyon değerlerinin arttığı görülmüştür (Şekil 5.1). Penetrasyon değerinin artması, modifikasyonun bitümü yumuşattığı anlamına gelmektedir.

5.1.2. Yumuşama noktası deney sonuçları

50/70 referans bitüme ilave edilen RA miktarı arttıkça modifiyeli bitümlerin yumuşama noktası değerlerinin azaldığı görülmektedir (Şekil 5.2). Modifiyeli bitümlerin penetrasyon değerleri artarken yumuşama noktası değerlerinin azalması, deneyler arasında tutarlılık olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.1. Penetrasyon deney sonuçları

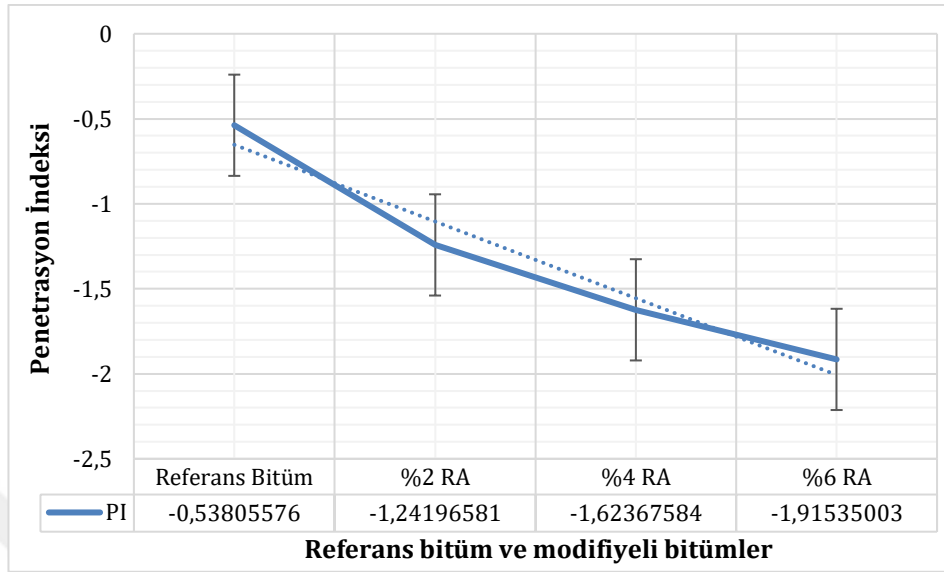


Şekil 5.2. Yumuşama noktası deney sonuçları

5.1.3. Penetrasyon indeksi sonuçları

%2, 4 ve 6 oranlarında RA ile modifiyeli bitümün sıcaklık hassasiyetini belirlemek amacıyla, modifiyeli bitümlerin yumuşama noktası ve penetrasyon değerleri kullanılarak penetrasyon indeksleri hesaplanmıştır (Şekil 5.3). 50/70 bitüme ilave edilen katkı miktarının artmasıyla penetrasyon indeksi değerlerinin

azaldığı görülmektedir. Elde edilen sonuca göre, modifiyeli bitümlerin sıcaklığa karşı hassasiyetinin arttığı tespit edilmiştir.



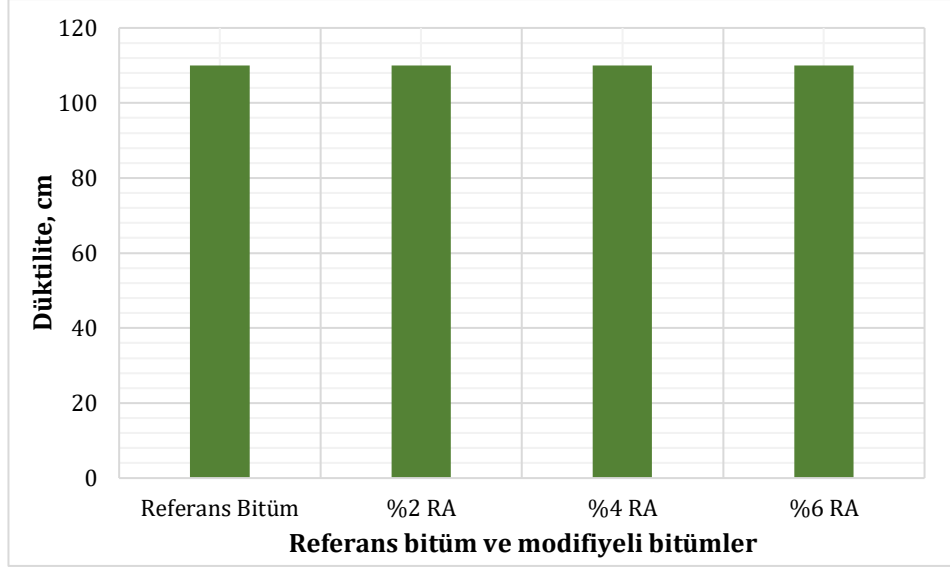
Şekil 5.3. Penetrasyon indeksi sonuçları

5.1.4. Düktilite deney sonuçları

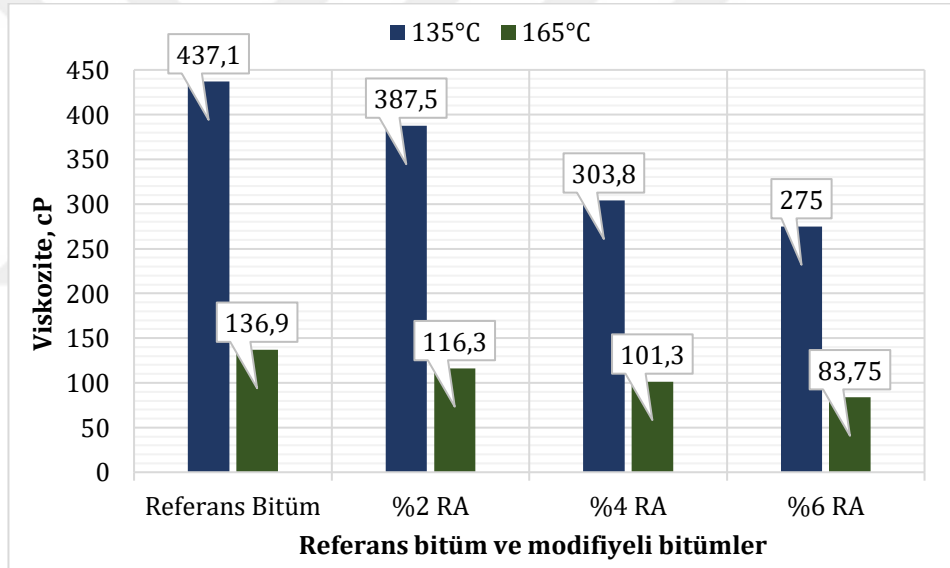
50/70 bitüm ve farklı oranlarda (%2, 4 ve 6) RA ile modifiye bitümler üzerine gerçekleştirilen düktilite deneyinin sonuçları Şekil 5.4'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tüm numunelerin şartname sınır değerini (>100 cm) sağladığı görülmektedir.

5.1.5. RV deney sonuçları

Brookfield viskozimetre cihazı kullanılarak ASTM D4402 standardına uygun şekilde 50/70 bitümün ve modifiyeli bitümlerin 135 °C ve 165 °C sıcaklıklarında viskozite değerleri belirlenmiştir. Referans bitüme göre RA modifiyeli bitümlerin viskozitesi, yani akmaya karşı direnci azalmıştır (Şekil 5.5).



Şekil 5.4. Düktilite deney sonuçları

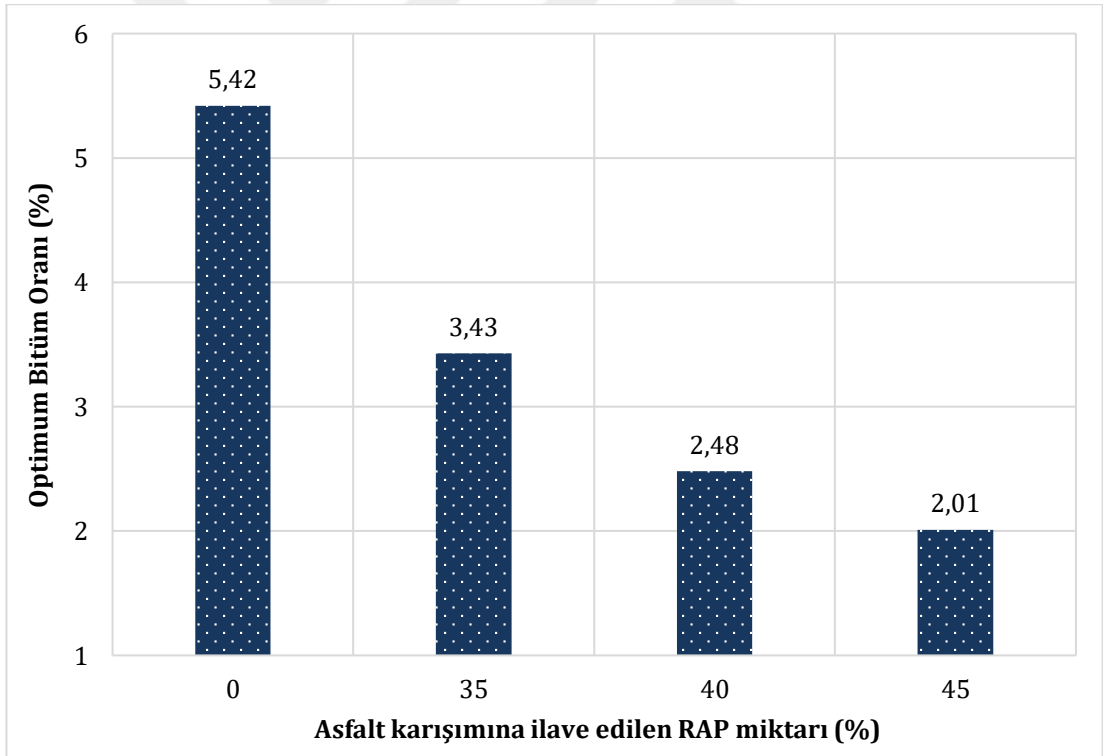


Şekil 5.5. Referans ve modifiye bitümlerin 135 °C ve 165 °C'deki viskoziteleri

5.2. Optimum Bitüm Miktarının Belirlenmesi

KTŞ'ye (2013) göre belirlenen binder tabakasına uygun agrega gradasyonları, bitüm ve yoğurmalı sıkıştırıcının kalıpları 150 °C sıcaklığa sahip etüve bırakılmıştır. Öncelikle %0 oranında RAP içeren asfalt karışımının optimum bitüm oranını belirlemek için %4.5, 5, 5.5 ve 6 oranlarında 50/70 bitüm ilave edilerek agregaların tamamen bitüm ile kaplanması sağlanmıştır. %35 RAP içeren asfalt karışımlarının optimum bitüm oranının belirlenmesinde %3, 3.5, 4,

4.5 oranlarında bitüm kullanılırken %40 ve 45 RAP içeren asfalt karışımlarının her ikisi için de optimum bitüm oranlarının belirlenmesinde %1.5, 2, 2.5 ve 3 oranlarında bitüm kullanılmıştır. Daha sonra hazırlanan asfalt karışımları SGC kalıbına yerleştirilmiş ve $N_{\text{tasarım}}$ yoğurma sayısına (125) göre sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işleminden sonra elde edilen V_a , VMA, VFA ve özgül ağırlık değerleri, şartname sınır değerlerine göre kontrol edilmiştir. Çalışmada kullanılan RAP malzemesinin içerdiği bitüm ve agrega miktarı, karışım tasarımında dikkate alınmıştır. %0, 35, 40 ve 45 RAP içeren ve 50/70 bitüm kullanılarak hazırlanan asfalt karışımları için optimum bitüm oranları sırasıyla, %5.42, %3.43, %2.48 ve %2.01 olarak bulunmuştur (Şekil 5.6). RA'nın, sadece asfalt karışımlarının mekanik özellikleri üzerine olan etkisi incelendiğinden, RA için optimum bitüm oranlarının belirlenmesine ihtiyaç duyulmamış ve %35, 40 ve 45 oranlarında RAP içeren karışımlar için bulunan optimum değerler kullanılmıştır.



Şekil 5.6. %0, 35, 40 ve 45 RAP içeren karışımlar için optimum bitüm oranları

Grafik incelendiğinde, karışımlardaki RAP miktarı arttıkça optimum bitüm miktarının azaldığı görülmektedir. RAP içeriğindeki bitüm de (bu çalışmada

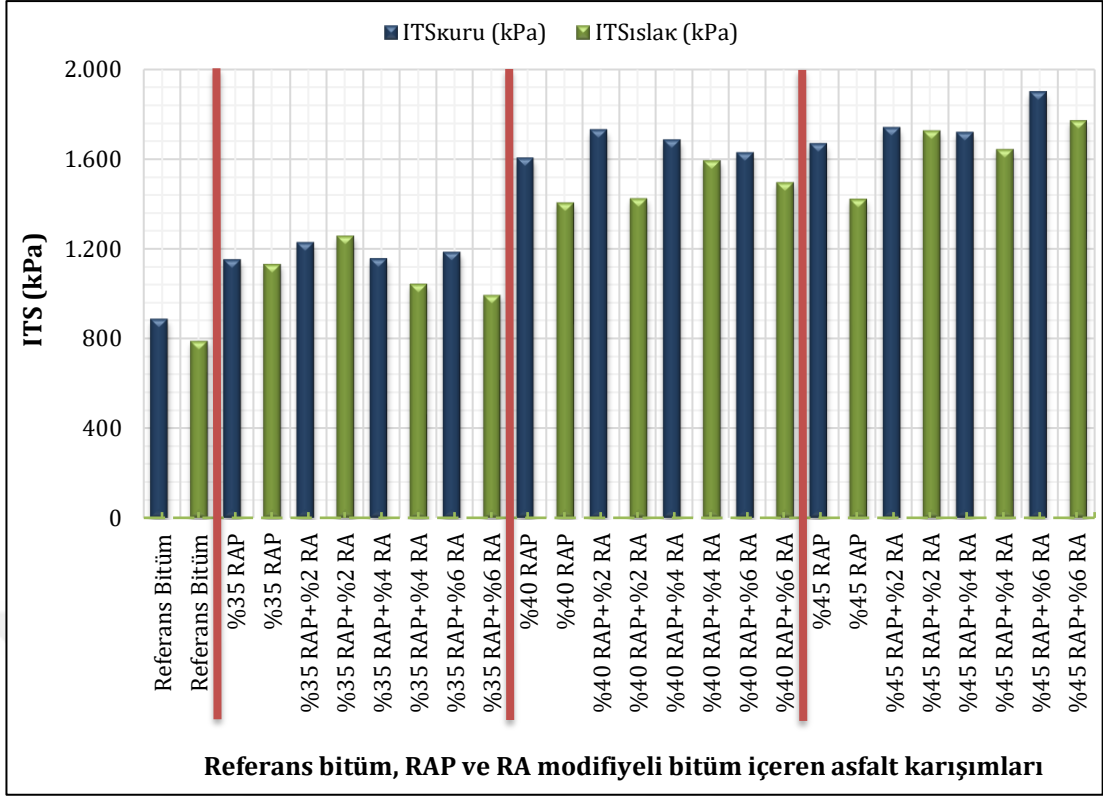
kullanılan RAP malzemesinin bitüm içeriği %3,36'dır) karışımlara dahil olduğundan bu, beklenen bir sonuçtur.

5.3. ITS Değerlerinin Belirlenmesi

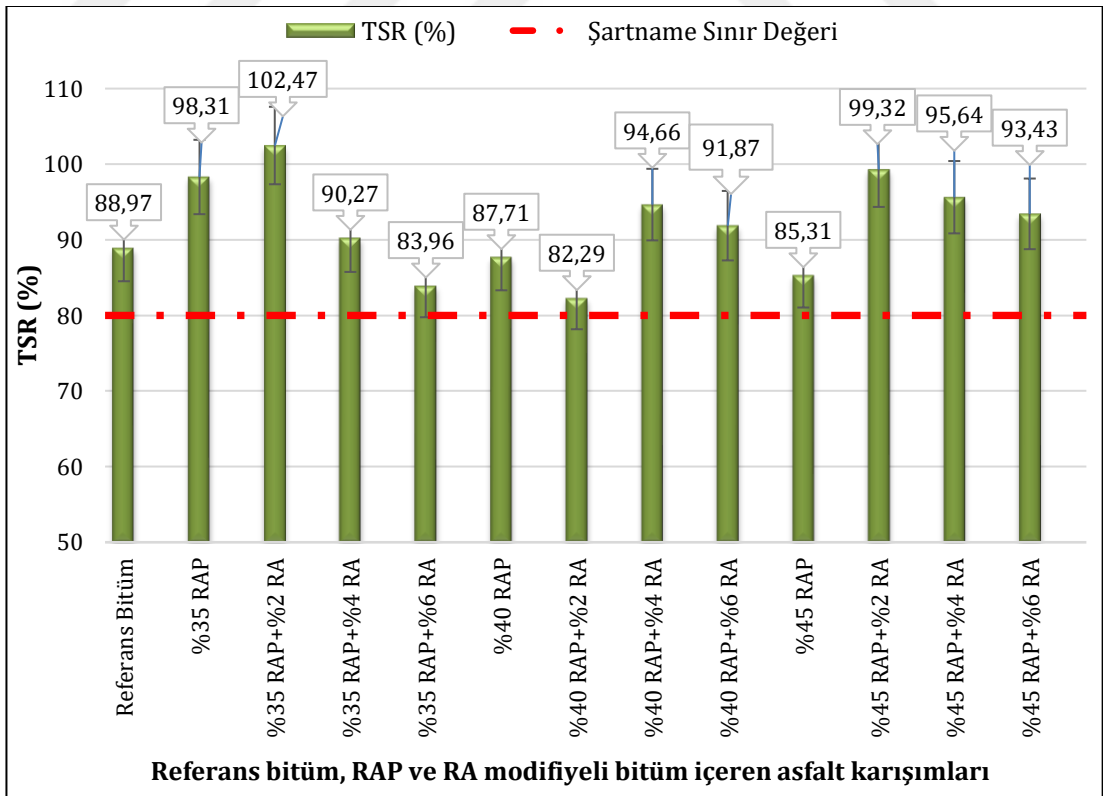
AASHTO T283 standardına göre öncelikle 50/70 bitüm ve %0, 35, 40 ve 45 oranlarında RAP içeren asfalt karışımları üzerine ITS testi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında farklı oranlarda RAP içeren asfalt karışımlarının özelliklerini iyileştirmek amacıyla %2, 4 ve 6 oranlarında RA ile modifiyeli bitümler kullanılarak asfalt karışımları hazırlanmıştır ve hazırlanan bu karışımlar da ITS testine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, RAP kullanımının referansa göre ITS değerlerini artırdığı görülmüştür. Ayrıca RA ile modifiyeli bitüm kullanımı da farklı oranlarda RAP içeren asfalt karışımlarının kuru ve ıslak ITS değerlerini genellikle artırmıştır (Şekil 5.7). %45 oranında RAP ve %6 oranında RA ile modifiye edilmiş bitüm kullanılarak hazırlanan asfalt karışımları, en yüksek kuru ve ıslak dayanım değerlerine sahiptir.

5.4. TSR Değerlerinin Belirlenmesi

Asfalt karışımlarının neme karşı hassasiyetini incelemek amacıyla TSR değerleri belirlenmiştir. Farklı oranlarda RAP ve RA ile modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan asfalt karışımlarının TSR değerlerinin, şartname sınır değeri olan %80'in üzerinde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.8). %35 oranında RAP ve %2 RA ile modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan asfalt karışımlarının $ITS_{ıslak}$ değerinin, ITS_{kuru} değerinden büyük olmasından dolayı TSR değeri %102.47 olarak belirlenmiştir. Asfalt karışımlarının TSR değerinin %100'e yakın olması, nem hassasiyetine karşı direncin arttığı anlamına gelmektedir.



Şekil 5.7. RAP ve RA ile modifiye bitümler kullanılarak hazırlanan asfalt karışımlarının indirekt çekme dayanımları



Şekil 5.8. Farklı RAP yüzdelere sahip kuru ve ıslak numuneler için TSR sonuçları

5.5. HWT Deney Sonuçları

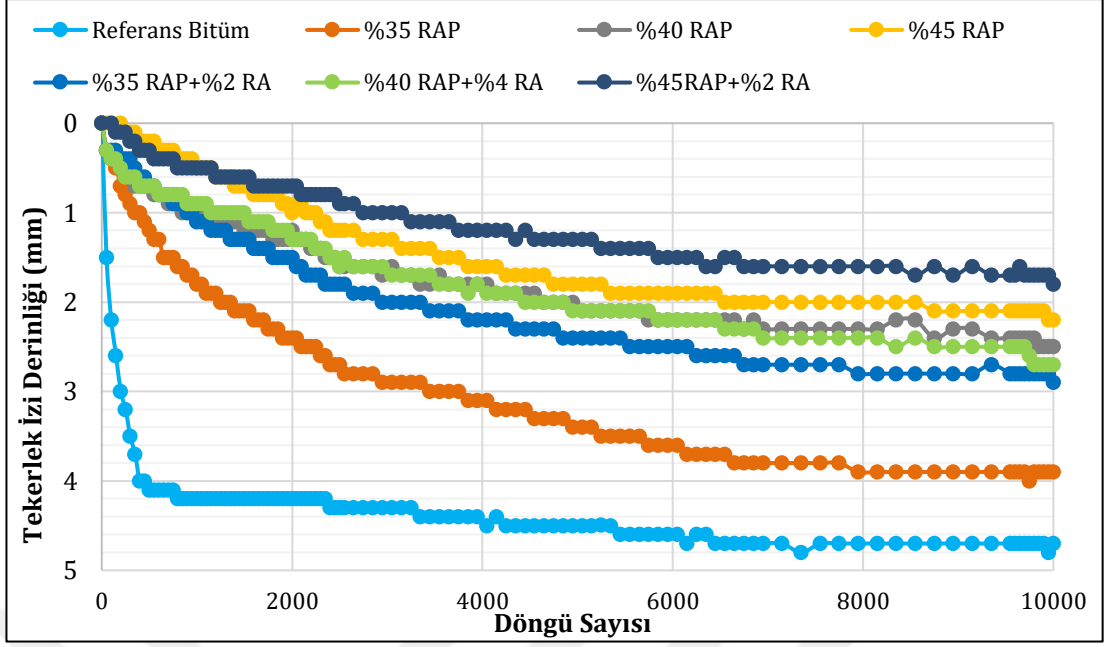
Çalışma kapsamında, tekerlek izi direnci bakımından, sadece RAP kullanımı ve RAP ile birlikte bir RA kullanımı arasındaki farkı ortaya koyabilmek için RAP ile birlikte kullanımı sonucu en yüksek TSR değerlerini veren modifiye bitüm oranları ile hazırlanan asfalt karışımları üzerine HWT deneyi gerçekleştirilmiştir (Çizelge 5.1).

SGC kullanılarak 150 mm çapa sahip silindirik numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler HWT kalıplarına uygun şekilde kesilmiş ve daha sonra test cihazına yerleştirilmiştir. 50 °C sıcaklığa sahip suda asfalt numunesi en az 30 dakika bekletildikten sonra 10000 döngü tekerlek geçişi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.9’da verilmiştir.

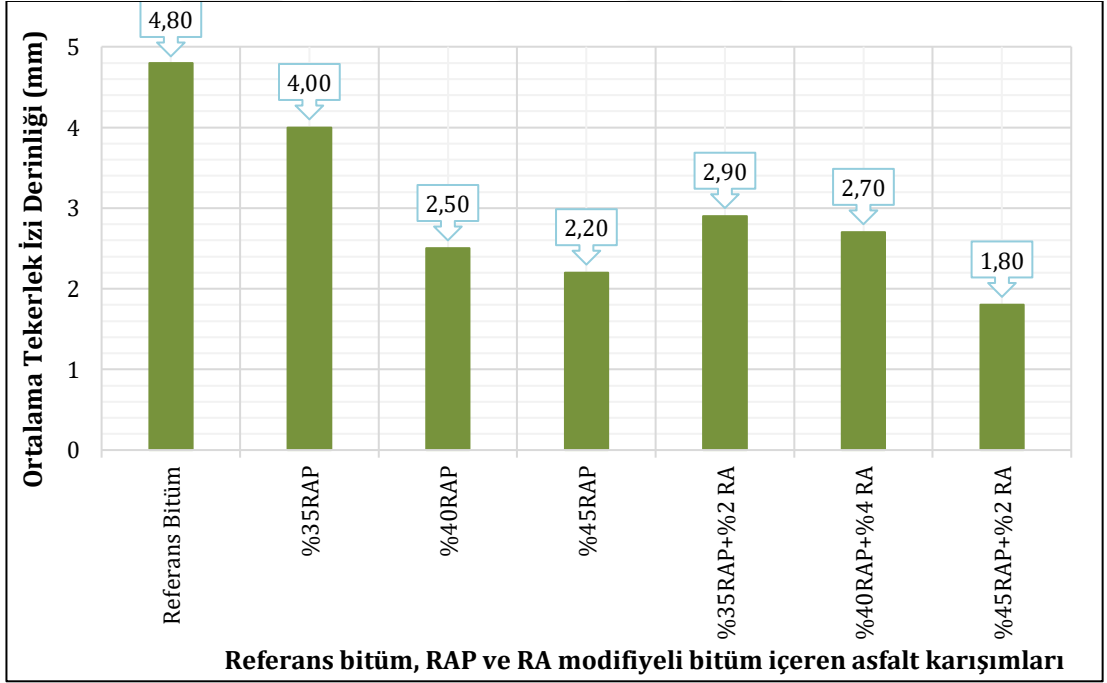
Çizelge 5.1. Yüksek TSR değerlerine sahip karışımlar

Numune Adı	TSR (%)
%0 RAP	88.97
%35 RAP	98.31
%40 RAP	87.71
%45 RAP	85.31
%35 RAP-%2 RA	102.47
%40 RAP-%4 RA	94.66
%45 RAP-%2 RA	99.32

RAP içeren asfalt karışımlarında, asfalt karışımlarına eklenen RAP miktarı arttıkça karışımların tekerlek izi direncinin arttığı bilinmektedir (Al-Saffar vd., 2021; Moniri vd., 2021; Loria vd., 2011; Ziari vd., 2019). Elde edilen sonuçlara göre de 50/70 bitümlle hazırlanan binder tabakasının ve %35, 40 ve 45 RAP içeren asfalt karışımlarının tekerlek izi derinlikleri sırasıyla 4.80 mm, 4 mm, 2.50 mm ve 2.20 mm olarak ölçülmüştür. %35 RAP ve %2 RA, %40 RAP ve %4 RA, %45 RAP ve %2 RA karışım kombinasyonları ile hazırlanan asfalt karışımlarının tekerlek izi derinlikleri sırasıyla 2.90 mm, 2.70 mm ve 1.80 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 5.10).



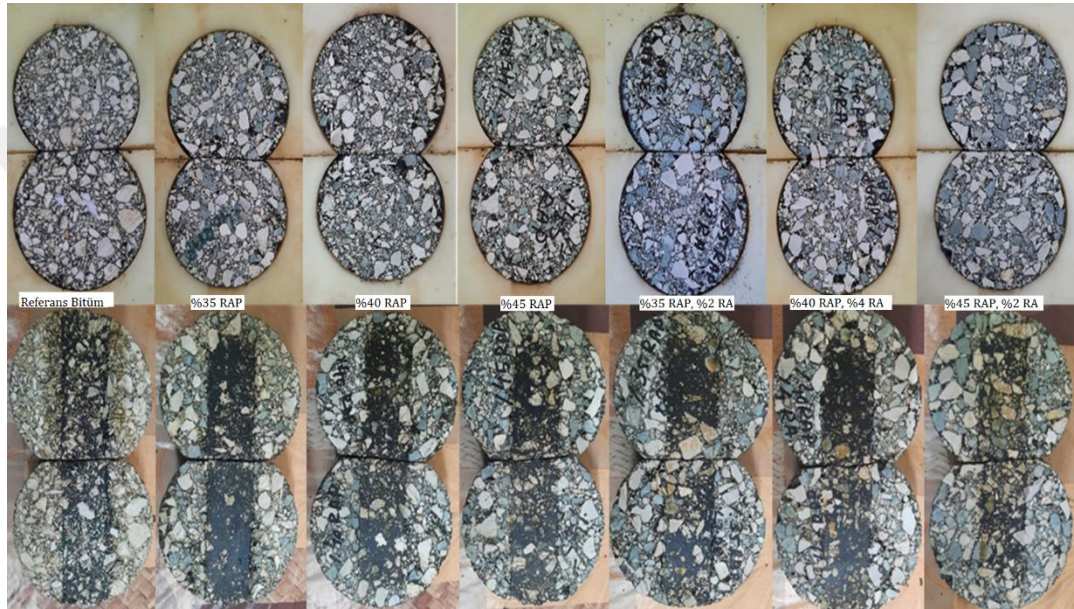
Şekil 5.9. RAP ve RA ile modifiye bitümler kullanılarak hazırlanan asfalt karışımlarının HWT deney sonuçları



Şekil 5.10. RAP ve RA ile modifiye bitümler kullanılarak hazırlanan asfalt karışımlarının tekerlek izi derinlikleri

Sonuçlar, RAP içeren asfalt karışımları hazırlanırken farklı oranlarda RA ile modifiyeli bitüm kullanıldığı zaman, asfalt karışımlarının tekerlek izi derinliğinin azaldığını göstermiştir (Şekil 5.11). Böylece RAP içeren asfalt karışımlarında bir RA ile modifiye bitüm kullanımının olumlu etki meydana getirebileceği ve

çalışmada kullanılan RA'nın, RAP ile uyumlu şekilde çalışabildiği tespit edilmiştir. Ek olarak, önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, KTŞ'de yeni yapılacak bitümlü sıcak karışım imalatında ağırlıkça %25'ten fazla kazınmış asfalt kaplama kullanılmayacağı; ancak kazınmış asfalt kaplamanın yeni yapılacak bitümlü sıcak karışımlarda kullanım oranının, gençleştirici katkılara bağlı olarak ağırlıkça daha yüksek olabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada kullanılan RA, binder tabakasında KTŞ'de belirtilen miktardan daha fazla oranda RAP kullanılabilmesine olanak vermiştir.



Şekil 5.11. HWT numunelerinin deneyden önceki ve sonraki durumu

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında %0, 35, 40 ve 45 oranlarında RAP içeren asfalt karışımlarının özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan %2, 4 ve 6 oranlarında RA ile modifiye bitümün etkisi incelenmiştir. Öncelikle 50/70 bitüm ve RA ile modifiye bitümler üzerine bitüm deneyleri (penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, RV ve özgül ağırlık) gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin sonuçlarına göre, 50/70 bitüme ilave edilen RA oranının artmasıyla modifiye bitümlerin penetrasyon değerlerinin arttığı, yumuşama noktası değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, RA kullanımının bitümü yumuşattığını göstermektedir. Düktilite deneyinde modifiye bitümlerin şartname sınır değerini (>100 cm) sağladığı görülmüştür. RV deney sonucuna göre ise 50/70 bitüme ilave edilen RA, bitümün viskozitesini azaltmıştır.

KTŞ'ye göre binder tabakasına uygun şekilde hazırlanan agrega gradasyonları kullanılarak Superpave Hacimsel Karışım Tasarımı yöntemine uygun asfalt karışımları hazırlanmıştır. Öncelikle %0, 35, 40 ve 45 RAP içeren ve 50/70 bitüm kullanılarak hazırlanan asfalt karışımları için optimum bitüm oranları sırasıyla, %5.42, %3.43, %2.48 ve %2.01 olarak bulunmuştur.

RAP içeren asfalt karışımlarının özelliklerini iyileştirmek amacıyla %2, 4 ve 6 oranlarında RA ile modifiye bitümler kullanılmıştır. Asfalt karışımlarına ilave edilen RAP ve modifikasyonda kullanılan RA oranının artmasıyla asfalt karışımlarının kuru ve ıslak ITS ve TSR değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Tekerlek izi direnci bakımından, sadece RAP kullanımı ve RAP ile birlikte RA kullanımı arasındaki farkı ortaya koyabilmek için RAP ile birlikte kullanımı sonucu en yüksek TSR değerlerini veren modifiye bitüm oranları ile hazırlanan asfalt karışımları üzerine HWT deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, RAP içeren asfalt karışımlarında RA modifiyeli bitüm kullanımı, asfalt karışımlarının tekerlek izi derinliğini azaltmıştır. RAP içeren asfalt karışımlarının kuru ve ıslak dayanımlarında, nem hasarına karşı direncinde ve tekerlek izi derinliğinde RA modifiyeli bitümlerin etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan RA, binder tabakasında KTŞ'de belirtilen miktardan daha fazla oranda RAP kullanılabilmesine olanak vermiştir.

Bu çalışmada, RAP içeren karışımların mekanik özellikleri üzerine RA ile modifiyeli bitümlerin etkisi incelenmiştir. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında bu gençleştirici malzemenin, doğrudan asfalt karışımlarına ilave edilmesiyle aynı deneyler gerçekleştirilerek karışımlar arasında performans karşılaştırması yapılabilir. Ek olarak, kullanılan katkı malzemesinin piyasa maliyetine göre bir ekonomik analiz gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR

- AASHTO M323-13, (2013). Standard specification for Superpave volumetric mix design. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T283, (2003). Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington DC.
- AASHTO T 324-19, 2019. Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures, American Association of State Highway and Transportation Officials, US.
- Adesina, P.A., & Dahunsi, B.I. (2021). Blended waste utilization in road construction: physical characteristics of bitumen modified with waste cooking oil and high-density polyethylene. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14(1), 98–104.
- Adhikari, T.N. (2013). Quality and Durability of Rubberized Asphalt Cement and Warm Rubberized Asphalt Cement. Queen's University, Department of Chemistry, M.Sc. Thesis, 127p, Kingston Ontario, Canada.
- Al-Saffar, Z.H., Yaacob, H., Satar, M.K.I.M., Saleem, M.K., Lai, J.C., & Putra Jaya, R. (2021). A review on rejuvenating materials used with reclaimed hot mix asphalt. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 48(3), 233-249.
- Antunes, V., Freire, A.C., & Neves, J. (2019). A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling. *Construction and Building Materials*, 211, 453–469.
- Asphalt Institute, 2014. MS-2 Asphalt Mix Design Methods. Asphalt Institute, Lexington.
- ASTM C 131- 03, 2000. Standart Test Method for Resistance to Degradation of Small – Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in The Los Angeles Machine. Vol 04.02, US.
- ASTM D4402, 2000. Standard Test Method for Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using the. ASTM, United States.
- ASTM D4552-10, 2010. Standard Practice for Classifying Hot-Mix Recycling Agents. ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D4552-20, 2020a. Standard Practice for Classifying Emulsified HotMix Recycling Agents. ASTM, West Conshohocken.
- ASTM D4887, 2016b. Standard Practice for Preparation of Viscosity Blends for Hot Recycled Asphalt Materials. ASTM, West Conshohocken.

- Bada, K.K., Osuji, L.C., & Onojake, M.C. (2022). Thermophysical Characterization of the Bulk Parameters Analysis of Plain Bitumen Seepages Deposit at Agbabu Area of Ondo State South Western Nigeria with their Corelation Matrix Properties. 5(1), 1–10.
- Carpenter, S.H., Roberts, G., Ozer, H., Al-Qadi, I.L., & Aurangzeb, Q. (2009). Determination of Usable Residual. FHWA-ICT. REPORT No: 09, 031P.
- Christensen, J. Donald, W. (2006). Volumetric Requirements for Superpave Mix Design. NCHRP Report No:567, 56P.
- Colbert, B.W., Asce, A.M., & You, Z. (2012). Properties of Modified Asphalt Binders Blended with Electronic Waste Powders. Journal of Materials in Civil Engineering, 24(10), 1261–1267.
- Copeland, A., (2011). Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures. FHWA-HRT. Raport No:11, 021s.
- Corbett, L.W. (1975). Reaction Variables in the Air Blowing of Asphalt. Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development, 14(2), 181–187.
- Daniel, R.M., & Anderson, R.M. (2001). Recommended Use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method. NCHRP Report No:452, 60P.
- Daryae, D., Ameri, M., & Mansourkhaki, A. (2018). Evaluation of fatigue behavior of high reclaimed asphalt binder mixes modified with rejuvenator and softer bitumen. Construction and Building Materials, 191, 702–712.
- Dave, E., Daniel, J.S., Carlo, C.D., Veeraragavan, R.K., Kottay, N.M., & Mallick, R.B. (2018). Moisture Susceptibility Testing for Hot Mix Asphalt Pavements in New England. NETCR Raport No:109, 164s.
- Devulapalli, L., Kothandaraman, S., & Sarang, G. (2019). A review on the mechanisms involved in reclaimed asphalt pavement. International Journal of Pavement Research and Technology, 12(2), 185–196.
- Dhayal, K., & Mathur, D. (2021). A Study of Bitumen by Marshall Stability Test. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science Dergisi, 12(2), 963–969.
- Eltwati, A., Enieb, M., Ahmeed, S., Al-Saffar, Z., & Mohamed, A. (2022). Effects of waste engine oil and crumb rubber rejuvenator on the performance of 100% RAP binder. Journal Of Innovative Transportation Dergisi, 5(4), 8–15.

- Esfahani, M.A. (2020). Influence of herbal and mineral fillers on physical and rheological properties of bitumen. *Australian Journal of Civil Engineering*, 19(1), 1–11.
- Fee, F., Buchanan, S., Cooper III, S., Mohammad, L., Ozer, H., Al-Qadi, I., Zhou, F., Bennert, T., Haddock, J., & Aschenbrener, T. (2018). Innovations in Asphalt Mixture Design Procedures. TRB E-C Rapor No:237, 95.
- Geçkil, T., Ahmedzade, P., & Alataş, T. (2008). Asfalt betonunda siyah karbonun filler olarak kullanımı. *Teknik Dergi/Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*, 19(4), 4493–4507.
- Guha, A.H., & Assaf, G.J. (2020). Effect of Portland cement as a filler in hot-mix asphalt in hot regions. *Journal of Building Engineering*, 28(10), 1-7.
- Habbouche, J., Boz, I., Underwood, B.S., Castorena, C., Gulzar, S., Fried, A., & Preciado, J. (2022). Review From Multiple Perspectives for the State of the Practice on the Use of Recycled Asphalt Materials and Recycling Agents in Asphalt Concrete Surface Mixtures. *Transportation Research Record*, 2676(4), 407–420.
- Haghshenas, H., Boz, I., Underwood, B.S., Castorena, C., Gulzar, S., Fried, A., & Preciado, J. (2021). Review From Multiple Perspectives for the State of the Practice on the Use of Recycled Asphalt Materials and Recycling Agents in Asphalt. *Transportation Research Record*, Vol. 2676(4) 407–420.
- Hansen, K.R., Copeland, A. (2015). Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2014, 2015. NAPA Report No: Information Series 138 (5th edition), 28p.
- Hong, F., Chen, D.H., & Mikhail, M.M. (2010). Long-term performance evaluation of recycled asphalt pavement results from Texas. *Transportation Research Record*, 2180, 58–66.
- Jagad, G.P., Behl, A., & Dave, S.M. (2021). Performance characteristics of asphalt mixes containing high percentage of RAP material. *Papers from the International Airfield and Highway Pavements*, 6(1), 186–196.
- Kamal, K., Hamdi, A.S.A., & Zahran, S.Z. (2022). Rheological Characterization of Asphalt Binders Containing Rejuvenated Reclaimed Asphalt Pavement. *Saudi Journal of Civil Engineering*, 5(7), 173–183.
- Kandhal, P.S., & Mallick, R.B. (1997). Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments. FHWA Rapor No: SA-97, 301s.
- Kasanagh, S.H., Ahmedzade, P., & Günay, T. (2020). Etilen Vinil Asetat (EVA) Polimer Modifiyeli Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin Araştırılması. *Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi*, 3(1), 1–20.

- Kaseer, F., Martin, A.E., & Mercado, A.E. (2019). Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States. *Construction and Building Materials*, 211, 974–987.
- Kaseer, F., Menapace, I., Cucalon, L.C., Masad, E., & Martin, A.E. (2018). Application of Low Field Nuclear Magnetic Resonance to Evaluate Asphalt Binder Viscosity in Recycled Mixes,” *Construction and Building Materials* 170, 725–736.
- Kennedy, T.W., Cominsky, R.J., Huber, G.A., & Anderson, M. (1994). The superpave mix design manual for new construction and overlays. Strategic Highway Research Program, 184p, Washington, DC.
- KGM. (2013). Karayolu Teknik Şartnamesi. KGM, 431, Türkiye.
- Kodippily, S., Holleran, G., & Henning, T.F.P. (2016). Improving recycled asphalt mix performance through rejuvenation. *Transportation Research Record*, 2575, 150–159.
- Kriz, P., Grant, D.L., Veloza, B.A., Gale, M.J., Blahey, A.G., Brownie, J.H., Shirts, R.D., & Maccarrone, S. (2014). Blending and diffusion of reclaimed asphalt pavement and virgin asphalt binders. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, 83(1), 225–270.
- Lee, H.D., Shannon, C., Lee, W., Williams, C., & Tang, S. (2012). Development of Quality Standards for Inclusion of High Recycled Asphalt Pavement Content in Asphalt Mixtures. IHRB Report No: TR-624, 55p.
- Lee, N., Chou, C.-P., & Chen, K.-Y. (2012). Benefits in Energy Savings and CO2 Reduction by Using Reclaimed Asphalt Pavement. Washington, DC: Transportation Research Board 91st Annual Meeting.
- Lee, S.H., Tam, A.B., Kim, J., & Park, D.W. (2019). Evaluation of rejuvenators based on the healing and mechanistic performance of recycled asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 220, 628–636.
- Loria, L., Hajj, E.Y., Sebaaly, P.E., Barton, M., Kass, S., & Liske, T. (2011). Performance evaluation of asphalt mixtures with high recycled asphalt pavement content. *Transportation Research Record*, 2208(1), 72-81.
- Mansourkhaki, A., Ameri, M., & Daryaei, D. (2019). Application of different modifiers for improvement of chemical characterization and physical-rheological parameters of reclaimed asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 203, 83–94.
- Martin, A.E., Kaseer, F., Mercado, E.A. Bajaj, L. G., Cucalon, F., Yin, A., Chowdhury, J., Epps, C., Glover, E.Y., Hajj, N., Morian, J.S., Daniel, M., Oshone, R., Rastegar,

- C.R., and King, G. (2020). Evaluating the Effects of Recycling Agents on Asphalt Mixtures with High RAS and RAP Binder Ratios. NCHRP Report NO: 927.
- Martin, M.E., Zhou, F., Arambula, E., Park, E.S., Chowdhury, A., Kaseer, F., Carvajal, J., Hajj, E., Danie, J., & Glover, C. (2015). The Effects of Recycling Agents on Asphalt Mixtures with High RAS and RAP Binder Ratios. NCHRP Report No: 9-58, 184p.
- Mercado, E.A., Kaseer, F., Cucalon, L.G., Martin, A.E., & Martin, A.E., & Epps, J. (2018). Practical tools for optimizing recycled materials content and recycling agent dosage for improved short- and long-term performance of rejuvenated binder blends and mixtures. Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions, 87(3), 513–555.
- Mohajeri, M. (2015). Hot Mix Asphalt Recycling Practices And Principles. Delft University of Technology, Civil Engineering and Geosciences, M.Sc. Thesis, 356p, Iran.
- Mohi Ud Din, I., Bhat, F.S., & Mir, M.S. (2021). A study investigating the impact of waste cooking oil and waste engine oil on the performance properties of RAP binders. Road Materials and Pavement Design, 31(10), 1-16.
- Moniri, A., Ziari, H., Bahri, P., & Saghafi, Y. (2019). The effect of rejuvenators on the aging resistance of recycled asphalt mixtures. Construction and Building Materials, 224, 89–98.
- Moniri, A., Ziari, H., Aliha, M.R.M., & Saghafi, Y. (2021). Laboratory study of the effect of oil-based recycling agents on high RAP asphalt mixtures. International Journal of Pavement Engineering, 22(11), 1423-1434.
- Moon, B., Lee, D.H., Ledtje, P., & Williams, C. (2022). Evaluating effect of rejuvenators on high RAP mixtures through laboratory performance tests and construction of field test sections. Construction and Building Materials, 340(12), 1-11.
- Moussa, G., Abdel-Raheem, A., & Abdel-Wahed, T. (2020). Investigating the Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures Modified With High-Density Polyethylene. JES. Journal of Engineering Sciences, 48(5), 765–782.
- Neto, O.D.M., Silva, I.M., Lucena, L.C.D.C., Lucena, L.D.L., Mendonça, A.M.G.D., & Lima, R.K.B. (2022). Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid. Construction and Building Materials, 18(3), 128-728.
- Newcomb, D.E., & Epps, J.A. (1981). Asphalt Recycling Technology: Literature Review and Research Plan. AFESC Report No: ESL-TR-81-42, 176P.
- Noferini, L. (2016). Performances and Durability of Asphalt Mixtures Made With Reclaimed Asphalt Pavement, University of Bologna, Department of Civil,

Chemical, Materials and Environmental Engineering, PhD.Thesis, 283p, Italy.

- Nouman, M., Maqbool, Z., Ali, S., & Saleem, A. (2022). Performance Evaluation of Wearing Course Asphalt Mixes Based on Resilient Modulus, Indirect Tensile Strength and Marshall Stability. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15(1), 63–72.
- O’Sullivan, K.A. (2011). Rejuvenation of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Hot Mix Asphalt Recycling with High RAP Content. Worcester University, Worcester Polytechnic Institute, M.Sc. Thesis, 51p, England, UK.
- Öztürk, E.A., & Çubuk, M.K. (2004). Karayolu esnek üstyapı tasarımında yeni bir yöntem. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(2), 175–184.
- Petersen, J.C. (1984). Chemical Composition of Asphalt As Related To Asphalt Durability. *Transportation Research Record*, 13–30.
- Pradhan, S.K., & Sahoo, U.C. (2020). Effectiveness of Pongamia pinnata oil as rejuvenator for higher utilization of reclaimed asphalt (RAP) material. *Innovative Infrastructure Solutions*, 92(5), 1–14.
- Pradhan, S.K., & Sahoo, U.C. (2022). Influence of softer binder and rejuvenator on bituminous mixtures containing reclaimed asphalt pavement (RAP) material. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 11(1), 46–59.
- Roberts, F.L., Mohammad, L.N., & Wang, L.B. (2003). History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States. *Journal of Perspectives in Civil Engineering*, 14(8), 291–305.
- Robinette, C., & Epps, J. (2010). Energy, emissions, material conservation, and prices associated with construction, rehabilitation, and material alternatives for flexible pavement. *Transportation Research Record*, 2179, 10–22.
- Sabahfer, N., & Hossain, M. (2015). Effect of fractionation of reclaimed asphalt pavement on properties of Superpave mixtures with reclaimed asphalt pavement. *Advances in Civil Engineering Materials*, 4(1), 47–60.
- Saffar, Z.H., Yaacob, H., Katman, H.Y., Satar, M.K.I.M., Bilema, M., Jaya, R.P., Eltwati, A.S., & Radeef, H.R. (2021). A review on the durability of recycled asphalt mixtures embraced with rejuvenators. *Sustainability (Switzerland)*, 13(16).
- Sharma, A., Naga, G.R.R., Kumar, P., & Rai, P. (2022). Mix design, development, production and policies of recycled hot mix asphalt. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 9(5), 765–794.

- Sharma, A., Ransinchung, G.D., Kumar, P., & Kumar, D.S.N.V.A. (2021). Design Mixture of RAP-HMA Pavements. *Materials Science and Engineering*, 1075(1), 1-13.
- Sias, J.E., Dave, E.V., Zhang, R. (2022). Use of Recycling Agents in Asphalt Concrete Mixtures. In *Use of Recycling Agents in Asphalt Concrete Mixtures*.
- Singh, D., Magar, S., Xiao, F., & Showkat, B. (2022). Applications of reclaimed asphalt pavement in India – A review. *Journal of Cleaner Production*, 335(7), 130-221.
- Sullivan, J. (1989). *Pavement Recycling Executive Summary and Report*, FHWA-SA Rapor No 96-060, 124p.
- Taha, B.A., Taha, B.A., Taei, A.A.L., & Abdullah, S.S. (2022). Effect of Lime Stone & Cement on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt (HMA). *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ)*, 27(2), 39–48.
- Taheri, A., Rahi, M., Hajikarimi, P., Rasouli, B., Yousefi, Y., & Khodaii, A. (2022). Investigation on the Effect of Ethylene Bis (Stearamide) and Polyphosphoric Acid Modification of Bitumen for Paving Applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(8), 1–10.
- Taherkhani, H., & Noorian, F. (2020). Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP). *Road Materials and Pavement Design*, 21(5), 1238–1257.
- Tarsi, G., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2020). The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures. *Materials*, 13(18), 1-26.
- Tavakol, M., & Hossain, M. (2016). *Minimum Virgin Binder Limits in Recycled Superpave (Sr) Mixes in Kansas*. Department of Civil Engineering, College of Engineering. K-TRAN Report No: KSU-13-5, 120p.
- Terrel, R.L., Epps, J.A., Little, D.N., & Holmgreen, R.J. (1980). *Guidelines for Recycling Pavement Materials*. NCHRP Report No: 1-17 FY 77, 147p.
- Tia, M. (2002). *Bituminous Materials and Mixtures*. In *The Civil Engineering Handbook (1493–1530)*, University of Florida, CRC Press LLC, 36p, Florida.
- Tran, N.H., Taylor, A., & Willis, R. (2012). *Effect of Rejuvenator on Performance Properties of HMA Mixtures with High RAP and RAS Contents*. NCAT Report No: 12-05, 75p.
- TS EN 1097-1, 2002. *Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler – Bölüm 1: Aşınmaya Karşı Direncin Tayini (mikro-deval)*. TSE, Bakanlıklar/Ankara.

- TS EN 1097-6, 2013. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler – Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun ve Su Emme Oranının Tayini. TSE, Necatibey Caddesi No.112 Bakanlıklar/Ankara.
- Tunç A., 2004. Esnek Kaplama Malzemeleri Elkitabı. Asil Yayın Dağıtım LTD. ŞTİ, 352s, Ankara.
- Tutu, K.A., Ntramah, S., & Tuffour, Y.A. (2022). Superpave performance graded asphalt binder selection for asphalt mixture design in Ghana. *Scientific African*, 17(8), 1-14.
- Wang, W., Cheng, Y., Zhou, P., Tan, G., Wang, H., & Liu, H. (2019). Performance evaluation of styrene butadiene styrene modified stonemastic asphalt with basalt fiber using different compaction methods. *Polymers*, 11(6), 1-18.
- Wang, X., Shen, S., Huang, H., & Zhang, Z. (2019). Towards smart compaction: Particle movement characteristics from laboratory to the field. *Construction and Building Materials*, 218, 323–332.
- West, R.C., & Copeland, A. (2015). High RAP Asphalt Pavements: Japan Practice-Lessons Learned. NAPA Report No: IS-139, 62P.
- Williams, B.A., Willis, J.R., & Shacat, J. (2019). Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2019. NAPA Report No: 138 (9th edition), 151p.
- Xiao, Y. (2009). Florida State University Libraries Evaluation of Engineering Properties of Hot Mix Asphalt Concrete for the Mechanistic Empirical Pavement Design. Florida State University, Department of Civil & Environmental Engineering, PhD. Thesis, 201p, United States.
- Ye, Z., Ren, W., Yang, H., Miao, Y., Sun, F., & Wang, L. (2021). An improved asphalt penetration test method. *Materials*, 14(1), 1–12.
- You, Z., Beale, J.M, Fini, E., Goh, S.W., & Colbert, B. (2011). Evaluation of Low-Temperature Binder Properties of Warm-Mix Asphalt, Extracted and Recovered RAP and RAS, and Bioasphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11), 1569–1574.
- Zaumanis, M., Mallick, R., & Frank, R. (2013). Evaluation of rejuvenator's effectiveness with conventional mix testing for 100% reclaimed Asphalt pavement mixtures. *Transportation Research Record*, 2370, 17–25.
- Zaumanis, M., Mallick, R.B., Poulikakos, L., & Frank, R. (2014). Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Computers and Chemical Engineering*, 71, 538–550.

- Zaumanis, M., & Mallick, R.B. (2015). Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: State of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(1), 39–55.
- Zaumanis, M., Yu, X., Santos, S.D, & Poulikakos, L.D. (2014). Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders. *Fuel*, 135, 162–171.
- Zhang, Y., Ling, M., Kaseer, F., Arambula, E., Lytton, R.L., & Martin, A.E. (2022). Prediction and evaluation of rutting and moisture susceptibility in rejuvenated asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 333(11), 129980.
- Zhao, M., Shen, F., & Ding, Q. (2018). Micromechanism of the dispersion behavior of polymer-modified rejuvenators in aged asphalt material. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(9), 1-16.
- Zhao, Z., Xu, L., Du, Z., & Xiao, F. (2022). Moisture resistance of stone matrix asphalt at lab simulated high temperature and continuous rainfall condition. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(6), 1–12.
- Ziari, H., Moniri, A., & Norouzi, N. (2019). The effect of nanoclay as bitumen modifier on rutting performance of asphalt mixtures containing high content of rejuvenated reclaimed asphalt pavement. *Petroleum Science and Technology*, 37(17), 1946-1951.
- Zumrawi, M.M.E., & Edrees, S.A.A. (2016). Comparison of Marshall and Superpave Asphalt Design Methods for Sudan Pavement Mixes. *International Journal of Scientific and Technical Advancements*, 2(1), 29–35.