



**ATIK PVC İLE MODİFİYE EDİLMİŞ
SICAK KARIŞIM ASFALTIN
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Gaye AYDOĞDU

Eskişehir 2025

**ATIK PVC İLE MODİFİYE EDİLMİŞ SICAK KARIŞIM ASFALTIN
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

Gaye AYDOĞDU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bekir Tuna KAYAALP

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Temmuz 2025

Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 23ADP145 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Gaye AYDOĞDU'nun ATIK PVC İLE MODİFİYE EDİLMİŞ SICAK KARIŞIM ASFALTIN PERFORMANSININ İNCELENMESİ başlıklı çalışması 07/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Bekir Tuna KAYAALP

Üye

: Doç. Dr. Burak IŞIKDAĞ

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Salih Serkan
ARTAGAN

Prof. Dr. Harun BÖCÜK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

07/07/2025

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Gaye AYDOğDU, ATIK PVC İLE MODİFİYE EDİLMİş SICAĞ KARIşIM ASFALTIN PERFORMANSININ İNCELENMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımda incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Dr. Öğr. Üyesi Bekir Tuna KAYAALP

ÖZET

ATIK PVC İLE MODİFİYE EDİLMİŞ SICAK KARIŞIM ASFALTIN PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Gaye AYDOĞDU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Temmuz 2025

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bekir Tuna KAYAALP

Bu çalışma, atık polivinil klorür (PVC) ile modifiye edilmiş sıcak karışım asfaltın (HMA) performansı üzerindeki etkilerini incelemektedir. Mevcut literatür, genellikle PVC'nin farklı bitüm türleri üzerindeki etkisini reolojik iyileştirmeler açısından ele almakta, mekanik performansa dair değerlendirmelere ise sınırlı şekilde yer vermektedir. Ayrıca, PVC ile modifiye edilmiş asfaltın uzun vadeli davranışı büyük ölçüde araştırılmamış olup, kırılma özellikleri konusunda önemli bir bilgi eksikliği bulunmaktadır. Bu araştırma, PVC katkısının asfalt karışımlarının viskoelastik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini; özellikle tekerlek izi direnci, rijitlik ve kırılma davranışı açısından değerlendirmeyi amaçlamaktadır. PVC ile modifiye edilmiş asfalt karışımlarının mekanik tepkisini değerlendirmek için statik ve dinamik sünme testleri, dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) testleri ve yarı dairesel eğilme (SCB) kırılma testleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda çekme rijitliği, sünme rijitliği, elastik modül, sünme rijitlik modülü, kırılma enerjisi, kırılma tokluğu ve esneklik indeksi gibi parametreler elde edilmiştir. %1 PVC modifikasyonu tekerlek izi direnci ve elastik modülde sınırlı iyileşmeler sağlarken, daha yüksek PVC dozajları rijitliği ve kırılma enerjisi artırılmış; ancak yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direncine anlamlı bir katkı sağlamamıştır. Genel olarak, PVC modifikasyonu sıcak karışım asfalt performansında kayda değer bir iyileşme sunmamakta; ancak ara sıcaklıklar için özel uygulamalarda %1 PVC en etkili dozaj olarak öne çıkmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Atık PVC, Sıcak karışım asfalt, Statik sünme, Dinamik sünme, Kırılma enerjisi.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF HOT MIX ASPHALT MODIFIED WITH WASTE PVC

Gaye AYDOĞDU

Department of Civil Engineering

Programme in Transportation

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, July 2025

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Bekir Tuna KAYAALP

This study investigates the impact of waste polyvinyl chloride (PVC) modification on the performance of hot mix asphalt (HMA). Existing literature primarily focuses on the influence of PVC on different types of bitumen from the perspective of rheological improvements rather than mechanical performance. Moreover, the long-term behavior of PVC-modified asphalt remains largely unexplored, with a significant gap in understanding its fracture properties. This research aims to assess the effects of PVC on the viscoelastic and mechanical properties of asphalt mixtures, particularly in terms of rutting resistance, stiffness, and fracture behavior. To evaluate the mechanical response of PVC-modified asphalt mixtures, static and dynamic creep tests, indirect tensile stiffness modulus (ITSM) tests, and semi-circular bending (SCB) fracture tests were conducted. The experiments yielded results for tensile stiffness, creep stiffness, resilient modulus, creep stiffness modulus, fracture energy, fracture toughness, and flexibility index. While 1% PVC modification provided moderate improvements in rutting resistance and resilient modulus, higher PVC dosages generally increased stiffness and brittleness without significantly enhancing high-temperature rutting resistance. Overall, PVC modification does not offer substantial performance benefits in HMA, except for specific applications at intermediate temperatures, where 1% PVC appears to be the most effective dosage.

Keywords: Waste PVC, HMA, Static creep, Dynamic creep, Fracture energy.

TEŞEKKÜR

Tez sürecimin her aşamasında bana rehberlik eden, bilgi, deneyimleri ve sabrıyla yolumu aydınlatan değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Bekir Tuna KAYAALP'e teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma sürecinde bana her zaman yardımcı olan, fikirleriyle çalışmama katkı sağlayan değerli Araştırma Görevlisi Kader YILDIRIM'a teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan, bana güç veren sevgili annem Behiye AYDOĞDU ve sevgili babam Ahmet AYDOĞDU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, her zaman yanımda olan, sevgisi ve anlayışı ile bana moral veren sevgilim Erdem GÜRER'e teşekkür ederim.

Gaye AYDOĞDU

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Gaye AYDOĞDU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	XII
ŞEKİLLER DİZİNİ	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVI
1. GİRİŞ	1
1.1. Polimerler	1
1.2. Plastikler	2
1.2.1. Termoset plastikler	2
1.2.1.1. Üretim süreci	2
1.2.1.2. Fiziksel ve mekanik özellikler	3
1.2.1.3. Kullanım alanları	4
1.2.1.4. Avantajlar ve dezavantajlar	5
1.2.2. Termoplastikler	5
1.2.2.1. Üretim süreci	5
1.2.2.2. Kullanım alanları	6
1.2.2.3. Avantajlar ve dezavantajlar	7
1.2.2.4. Termoplastiklerin yaygın kullanılan çeşitleri	7
1.3. PVC	8
1.3.1. PVC üretimi	9
1.3.2. Plastikleştiriciler	10

1.4. Atık Bertarafı Yöntemleri.....	10
1.4.1. Depolama alanları.....	10
1.4.2. Geri dönüşüm	10
1.4.3. Piroлиз	11
1.4.4. Sıvılaştırma	11
1.4.5. Yol yapımı ve katran	11
1.4.6. Beton üretimi	12
1.5. İnşaat Sektöründe Atık PVC.....	13
1.6. Karayolu Üstyapısı	17
1.6.1. Kaplama türleri	17
1.6.1.1. Rijit kaplamalar	18
1.6.1.2. Yarı rijit kaplamalar	19
1.6.1.3. Esnek kaplamalar	20
2. MATERYAL.....	24
2.1. Agregas.....	24
2.2. Bitüm ve Modifiye Bitüm.....	24
3. METOD.....	27
3.1. Agregas Deneyleri	27
3.1.1. Elek analizi deneyi	27
3.1.2. İri agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi.....	28
3.1.3. İnce agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi.....	29
3.1.4. Filler agrega özgül ağırlık deneyi.....	31
3.1.5. Los Angeles (aşınma) deneyi	32
3.1.6. Agregas metilen mavisi deneyi.....	34
3.1.7. Donma-çözülme deneyi.....	35
3.2. Bitüm Deneyleri.....	37
3.2.1. Bitüm özgül ağırlık deneyi.....	37
3.2.2. Yumuşama noktası deneyi.....	38
3.2.3. Penetrasyon deneyi	40
3.2.4. Dönel viskozite deneyi.....	41
3.2.5. Düktilite deneyi.....	41
3.2.6. Dönel ince film ısıtma kaybı (RTFOT) deneyi.....	42

3.3. Karışım Deneyleri.....	44
3.3.1. Marshall karışım tasarımı ve akma ve stabilite deneyi	44
3.3.2. Neme karşı hassasiyet ve indirekt çekme dayanımı testleri	49
3.3.3. İndirekt çekme rijitlik modülü testi	53
3.3.4. Statik sünme testi	54
3.3.5. Dinamik sünme testi	55
3.3.6. Yarı dairesel eğilme (SCB) testi	57
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	61
4.1. Agrega Deneylerine Ait Sonuçlar	61
4.1.1. Agrega gradasyonu	61
4.1.2. İri agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları.....	61
4.1.3. İnce agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları.....	62
4.1.4. Filler agrega özgül ağırlık deneyi sonuçları.....	62
4.1.5. Los Angeles (aşınma kaybı) deneyi sonuçları	62
4.1.6. Metilen mavisi deneyi sonuçları	62
4.1.7. Donma-çözülme deneyi sonuçları.....	62
4.2. Bitüm Deneylerine Ait Sonuçlar	63
4.2.1. Özgül ağırlık deneyi sonuçları.....	63
4.2.2. Yumuşama noktası deneyi sonuçları.....	63
4.2.3. Penetrasyon deneyi sonuçları	63
4.2.4. Viskozite deneyi sonuçları	64
4.2.5. Düktilite noktası deneyi sonuçları.....	64
4.2.6. Dönel ince film ısıtma kaybı deneyi (RTFOT) sonuçları.....	64
4.3. Karışım Deneylerine Ait Sonuçlar	64
4.3.1. Marshall tasarımına göre optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi	64
4.3.2. Marshall akma ve stabilite testi sonuçları.....	67
4.3.3. Neme karşı hassasiyet ve indirekt çekme dayanımı testi sonuçları.....	67
4.3.4. İndirekt çekme rijitlik modülü testi (ITSM) sonuçları.....	68
4.3.5. Statik sünme deneyi sonuçları	69
4.3.6. Dinamik sünme testi sonuçları	74
4.3.7. Yarı dairesel eğilme (SCB) testi sonuçları	79
4.3.7.1. Kırılma enerjisi	80

4.3.7.2. <i>Kırılma tokluğu</i>	81
4.3.7.3. <i>Esneklik indeksi</i>	82
5. SONUÇLAR	85
KAYNAKÇA	87
ÖZGEÇMİŞ	



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1. Plastik atıkların sektörel dağılımı	13
Tablo 1.2. Kaplama tabakalarının karşılaştırılması	23
Tablo 2.1. Çalışmada kullanılan atık PVC'nin özellikleri.....	26
Tablo 3.1. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı aralıkları.....	45
Tablo 3.2. Yoğurma sayısı, asfaltla dolu boşluk oranı ve hava boşluğu oranları.....	46
Tablo 4.1. İri agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları.....	61
Tablo 4.2. İnce agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları.....	62
Tablo 4.3. Filler agrega özgül ağırlık deneyi sonuçları.....	62
Tablo 4.4. Los Angeles aşınma kaybı deneyi sonuçları.....	62
Tablo 4.5. Saf ve atık PVC katkılı bağlayıcılar için özgül ağırlık değerleri	63
Tablo 4.6. Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri.....	63
Tablo 4.7. Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların penetrasyon deneyi sonuçları	63
Tablo 4.8. Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcının viskozite deneyi sonuçları	64
Tablo 4.9. Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcının RTFOT deneyi sonuçları	64
Tablo 4.10. Saf bitüm için sadeleştirilmiş tasarım değerleri	65
Tablo 4.11. % 1 Atık PVC katkılı bitüm için sadeleştirilmiş tasarım değerleri	65
Tablo 4.12. % 3 Atık PVC katkılı bitüm için sadeleştirilmiş tasarım değerleri	66
Tablo 4.13. % 5 Atık PVC katkılı bitüm için sadeleştirilmiş tasarım değerleri	66
Tablo 4.14. Optimum bitüm içerikleri	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Tipik karayolu enkesiti	17
Şekil 1.2. Kaplama türleri; esnek kaplama ve rijit kaplama	18
Şekil 1.3. Rijit kaplama tabakaları	19
Şekil 1.4. Yarı rijit yol kaplama uygulaması	20
Şekil 2.1. Çalışmada kullanılan granülometriye uygun agrega örneği.....	24
Şekil 2.2. Çalışmada kullanılan atık PVC örneği.....	25
Şekil 3.1. İri agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi; a) Suya doymun kuru yüzey ağırlığı, b) Sudaki ağırlık, c) Kuru ağırlık	29
Şekil 3.2. İnce agrega özgül ağırlık ve su emme deneyinde; a) Piknometre+su, b) Piknometre+su+numune.....	30
Şekil 3.3. Filler agrega özgül ağırlık deneyi aşamaları.....	32
Şekil 3.4. Los Angeles aşınma deneyi aşamaları	33
Şekil 3.5. Agrega metilen mavisi deneyi aşamaları	35
Şekil 3.6. Donma-çözülme deneyi aşamaları.....	36
Şekil 3.7. Piknometre deneyi	38
Şekil 3.8. Yumuşama noktası deneyi aşamaları.....	39
Şekil 3.9. Brookfield dönel viskozimetre cihazı	41
Şekil 3.10. RTFOT deneyi aşamaları	43
Şekil 3.11. Saf ve modifiye bitümler için sıcaklık-viskozite ilişkisi.....	45
Şekil 3.12. Yoğurma sayısı-boşluk oranı ilişkisi.....	47
Şekil 3.13. Boşluk oranına göre yoğurma sayısı belirleme numune seti.....	47
Şekil 3.14. Marshall tasarımına göre karışım hazırlama	48
Şekil 3.15. Marshall akma ve stabilite deneyine göre; kırım, tartım ve ölçme işlemleri.....	49
Şekil 3.16. Numunelerin gevşek karışım yöntemiyle üretilmesi ve koşullandırılacak numunelerin belirlenmesi.....	51
Şekil 3.17. Neme karşı hassasiyet deneyi aşamaları	52

Şekil 3.18. ITSM deney cihazı.....	54
Şekil 3.19. Zhou'nun üç aşamalı modeli	55
Şekil 3.20. Statik ve dinamik sünme deneyi test düzeneği	57
Şekil 3.21. SCB numunelerinin elde edilişi.....	58
Şekil 3.22. SCB test düzeneği.....	59
Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan kalker agregası elek analizi sonuçları.....	61
Şekil 4.2. Saf ve modifiye bitüm için Marshall tasarımına ait; a) Hava boşluğu, b) Bitümle dolu boşluk oranı, c) Pratik özgül ağırlık, d) Stabilite grafikleri.....	66
Şekil 4.3. OBI'ye göre üretilen numunelerin akma ve stabilite değerleri	67
Şekil 4.4. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numunelerin ITS değerleri.....	68
Şekil 4.5. Saf ve modifiye edilmiş numunelerin ITSM testi sonuçları.....	69
Şekil 4.6. Saf bağlayıcı karışım için uygulanan statik sünme testine ait; a) Birikimli deformasyon-zaman, b) Sünme rijitliği-zaman ve c) Sünme rijitliği-zaman grafiğinin yakınlştırılmış grafikleri.....	69
Şekil 4.7. % 1 PVC katkı karışım için uygulanan statik sünme testine ait; a) Birikimli deformasyon-zaman, b) Sünme rijitliği-zaman ve c) Sünme rijitliği-zaman grafiğinin yakınlştırılmış grafikleri	70
Şekil 4.8. % 3 PVC katkı karışım için uygulanan statik sünme testine ait; a) Birikimli deformasyon-zaman, b) Sünme rijitliği-zaman ve c) Sünme rijitliği-zaman grafiğinin yakınlştırılmış grafikleri	71
Şekil 4.9. % 5 PVC katkı karışım için uygulanan statik sünme testine ait; a) Birikimli deformasyon-zaman, b) Sünme rijitliği-zaman ve c) Sünme rijitliği-zaman grafiğinin yakınlştırılmış grafikleri	72
Şekil 4.10. Statik sünme testine ait saf, %1, %3 ve %5 PVC katkı karışımların; a) Birikimli deformasyon-zaman, b) Sünme rijitliği-zaman, c) Sünme rijitliği-zaman grafiğinin yakınlştırılış grafiklerinin karşılaştırılmış grafikleri.....	73
Şekil 4.11. Saf bağlayıcı karışım için uygulanan dinamik sünme testine ait; a) Birikimli deformasyon-vuruş sayısı, b) Elastik gerinim-vuruş sayısı, c) Rezilyans modülü-vuruş sayısı, d) Sünme rijitliği-vuruş sayısı, e) Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiğinin yakınlştırılmış grafikleri	74
Şekil 4.12. % 1 PVC katkı karışım için uygulanan dinamik sünme testine ait; a) Birikimli deformasyon-vuruş sayısı, b) Elastik gerinim-vuruş sayısı, c) Rezilyans modülü-vuruş sayısı, d) Sünme rijitliği-vuruş sayısı, e) Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiğinin yakınlştırılmış grafikleri	75

Şekil 4.13. % 3 PVC katkılı karışımlar için uygulanan dinamik sünme testine ait; a) Birikimli deformasyon-vuruş sayısı, b) Elastik gerinim-vuruş sayısı, c) Rezilyans modülü-vuruş sayısı, d) Sünme rijitliği-vuruş sayısı, e) Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiğinin yakınlaştırılmış grafikleri.....	76
Şekil 4.14. % 5 PVC katkılı karışım için uygulanan dinamik sünme testine ait; a) Birikimli deformasyon-vuruş sayısı, b) Elastik gerinim-vuruş sayısı, c) Rezilyans modülü-vuruş sayısı, d) Sünme rijitliği vuruş sayısı, e) Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiğinin yakınlaştırılmış grafikleri.....	77
Şekil 4.15. Dinamik sünme testine ait saf, %1, %3 ve %5 PVC katkılı karışımların; a) Birikimli deformasyon-vuruş sayısı, b) Elastik gerinim-vuruş sayısı, c) Rezilyans modülü-vuruş sayısı, d) Sünme rijitliği-vuruş sayısı, e) Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiğinin yakınlaştırılmış grafiklerinin karşılaştırılmış grafikleri.....	78
Şekil 4.16. Geçerli çatlama bölgesi kontrolü	79
Şekil 4.17. Saf bağlayıcılı karışımların SCB testine ait; a) Yük-deplasman, b) Kırılma enerjisi grafikleri	80
Şekil 4.18. % 1 PVC katkılı karışımların SCB testine ait; a) Yük-deplasman, b) Kırılma enerjisi grafikleri	80
Şekil 4.19. % 3 PVC katkılı karışımların SCB testine ait; a) Yük-deplasman, b) Kırılma enerjisi grafikleri	80
Şekil 4.20. % 5 PVC katkılı karışımların SCB testine ait; a) Yük-deplasman, b) Kırılma enerjisi grafikleri	80
Şekil 4.21. Tüm karışım tipleri için kırılma enerjisi değerleri.....	81
Şekil 4.22. Tüm karışım tipleri için karışım tokluğu değerleri.....	82
Şekil 4.23. Tüm karışım tipleri için esneklik indeksi değerleri	84
Şekil 4.24. Tüm karışım tipleri için kritik yer değiştirme değerleri.....	84

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ABS	: Akrilonitril-Bütadien-Stiren
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu)
BS	: British Standards (İngiliz Standartları)
CD	: Critical Displacement (Kritik Yer değiştirme)
CMA	: Cold Mix Asphalt (Soğuk Karışım Asfalt)
DKY	: Doygun Kuru Yüzey
DSR	: Dynamic Shear Rheometer (Dinamik Kesme Reometresi)
EAF	: Electric Arc Furnace (Elektrik Ark Ocağı)
FI	: Flexibility Index (Esneklik İndeksi)
FN	: Flow Number (Akış Numarası)
FTR	: Freeze-Thaw Resistance (Donma-Çözülme Direnci)
HDPE	: High Density Polyethylene (Yüksek yoğunluklu Polietilen)
HMA	: Hot Mix Asphalt (Sıcak Karışım Asfalt)
I-FIT	: Illinois Flexibility Index Test (Illinois Esneklik İndeksi Testi)
ITS	: Indirect Tensile Strength (Dolaylı Çekme Dayanımı)
ITSM	: Indirect Tensile Stiffness Modulus (Dolaylı Çekme Rijitlik Modülü)
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
LA	: Los Angeles
LDPE	: Low Density Polyethylene (Düşük Yoğunluklu Polietilen)
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer (Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatör)
MB	: Methylene Blue (Metilen Mavisi)
MK	: Kuru Agrega Ağırlığı
MSSD	: Doygun Kuru Yüzey Ağırlığı
MS	: Sudaki Ağırlık

OBI	: Optimum Bitüm İçeriği
PA	: Polyamide (Poliamid)
PC	: Polycarbonate (Polikarbonat)
PE	: Polyethylene (Polietilen)
PET	: Polyethylene Terephthalate (Polietilen Tereftalat)
PP	: Polypropylene (Polipropilen)
PS	: Polystyrene (Polistren)
PVC	: Polyvinyl Chloride (Polivinil Klorür)
PÖA	: Pratik Özgöl Ağırlık
RAP	: Reclaimed Asphalt Pavement (Geri Dönüştürölmüş Asfalt Kaplama)
RLA	: Repeated Load Axial (Eksenel Tekrarlanan Yök)
RTFOT	: Rolling Thin-Film Oven Test (Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Testi)
SCB	: Semi-Circular Bending (Yarı Dairesel Eğilme)
Tg	: Camlı Geçiş Sıcaklığı
TS	: Turkish Standarts (Türk Standartları)
TSR	: Tensile Strength Ratio (ÇekmeDayanımı Oranı)
UTM	: Universal Testing Machine (Evrensel Test Makinesi)
V	: Hava Boşluğu
VFA	: Voids Filled with Asphalt (Asfaltla Dolu Boşluk Oranı)
VMA	: Voids in Mineral Aggregate (Agregayla Dolu Boşluk Oranı)

1. GİRİŞ

1.1. Polimerler

Polimerler, monomer adı verilen daha küçük moleküllerin belirli bir düzen içerisinde birleşmesiyle oluşan moleküler zincirlerdir. Moleküler zincirlerin uzunluğu ve bu zincirlerin çapraz bağlanma yoğunluğu bir polimerin sertlik, esneklik ve dayanıklılık gibi temel mekanik özelliklerini belirleyen faktörlerdir. 1920’lerde Hermann Staudinger’in keşfiyle birlikte bu çeşitlilik, polimerlerin modern bilim ve teknolojinin temel unsurlarından biri olmasına olanak sağlamıştır [1-3].

Polimerler, kimyasal yapıları sebebiyle doğal ve sentetik olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Doğal polimerler, canlı organizmalar tarafından sentezlenen ve biyolojik süreçlerin temelini oluşturan makromoleküllerdir. Örneğin selüloz, bitkilerde bulunan ve kağıt ile tekstil üretiminde kullanılan bir polisakkarittir. Kolajen ise insan ve hayvan dokularında bağ dokularını oluşturan bir proteindir. Bu tür polimerler, biyolojik olarak parçalanabilir ve yenilenebilir özellikleri barındırır. Biyolojik uyum ve çevresel sürdürülebilirlik sağlarlar. Doğal kauçuk gibi elastik özellik gösteren bazı doğal polimerler, inşaat endüstrisinde de kullanılmaktadır [1, 4-5].

Sentetik polimerler ise laboratuvar ortamında kimyasal reaksiyonlarla üretilen yapay malzemelerdir. Sentetik polimerlerin özellikleri, moleküler yapılarına, zincir uzunluklarına, çapraz bağlanma yoğunluğuna ve kristalinlik derecelerine bağlıdır. Örneğin moleküler zincir uzunluğu, polimerin mekanik dayanımı, esnekliği ve viskozitesi üzerinde doğrudan etkililik; kristalinlik derecesi, polimerin sertlik, şeffaflık ve termal özelliklerini belirlemektedir [6-7].

Günümüzde sentetik polimerler hemen her endüstride ve yaşam alanında kullanılmaktadır. Moleküllerindeki bağ türlerine ve düzenlerine bağlı olarak mekanik dayanımı, sertliği, şeffaflığı ve viskozite özellikleri çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Örneğin polietilen asitlere karşı yüksek direnç gösterirken, PVC kimyasal stabilite sağlar. Böylelikle farklı endüstrilerde geniş uygulama alanları olabilmektedir. Bunun yanı sıra büyük ölçekte üretim için uygun maliyetlidir [8-9].

Sentetik polimerler, plastiklerin yapı taşlarını oluşturan malzemelerdir. Her plastik bir polimer olsa da, her polimer plastik değildir. Plastikler, polimerlerin fiziksel olarak işlenip şekillendirilmesi ile elde edilen malzemelerdir. Plastiklerin sahip olduğu özellikler, polimerlerin monomer birimlerinin düzenine, zincir uzunluğuna ve çapraz bağlanma yoğunluğuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu özellikler, plastiklerin

farklı endüstriyel uygulama alanlarında nasıl kullanılacağını doğrudan etkilemektedir [7, 10-11].

1.2. Plastikler

Plastikler, genellikle sentetik polimerlerden oluşan, şekil verilebilen, hafif, dayanıklı ve çok yönlü kullanım alanına sahip malzemelerdir. Yunanca "Plasticos" kelimesinden türemiştir ve "şekil verebilme" anlamına gelmektedir. 1860 yılında icat edilen plastik, 1920’de endüstriyel boyutta üretilmeye başlanmıştır ve 1940’larda genişlemiştir [12-13].

Plastik malzemelerin sınıflandırılmasında birçok yol vardır ve bu durum, malzemeler arasındaki benzerlikleri ve farklılıkları anlamayı kolaylaştırmaktadır. İki ana sınıflandırma, termoset malzemeler ve termoplastik malzemeler şeklindedir. Termoset plastikler ya da termosetler, kalıcı bir şekil alarak sertleşir. Genellikle ısı veya UV ışığı altında hızlı bir şekilde gerçekleşen bu sertleşme, polimerin geri dönüşümsüz bir çapraz bağ yapması ile sağlanmaktadır. Termoplastikler ise, ısı altında sertleşmez veya kuruyamaz. Isıtıldıklarında, akışkan bir hale gelir ve kullanışlı nesneler haline getirilebilir. Soğutulduğunda ise, termoplastik sertleşir ve şekillerini korur. Termoplastikler, ısı ile tekrar tekrar yumuşatılabilir ve şekillendirilebilirler [14-15].

1.2.1. Termoset plastikler

Termoset plastikler, endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılan, belirli kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip polimerlerdir. Termoset plastiklerin kökeni, 20. yüzyılın başlarına uzanmaktadır. Bakelit tarihteki ilk termoset malzeme olarak kabul edilir. 1907 yılında Leo Baekeland tarafından geliştirilen bakelit, fenol formaldehit reçineleri ile üretilmiştir. Elektrik yalıtımında ve mutfak eşyalarında yaygın olarak kullanılmıştır. Bakelit’in keşfi, polimer biliminin ve malzeme mühendisliğinin gelişiminde önemli bir katkı sağlamıştır. 1920’lere gelindiğinde ise termoset plastiklerin ilk çeşitleri ortaya çıkmaya başlamıştır. 1940’lar ve 1950’lerde savaş döneminin gereksinimleri termoset plastiklerin gelişimini hızlandırmıştır. 1960’lar ve 1970’ler de ise termoset plastikler endüstriyel kullanımda yaygınlık kazanmıştır [15-17].

1.2.1.1. Üretim süreci

Termoset plastiklerin üretimi, ham madde hazırlama, şekillendirme ve sertleştirme olmak üzere üç ana aşamadan oluşmaktadır [18].

Ham Madde Hazırlama:

Termoset plastikler, genellikle iki ana bileşen olan reçineler ve sertleştiricilerden oluşmaktadır. Reçineler, monomerlerin polimerizasyonu ile elde edilirken, sertleştiriciler, reçinelerin kimyasal olarak birleşerek sertleşmesini sağlamaktadır.

- Epoksi Reçineleri: Genellikle bisfenol A ve epiklorohidrin kullanılarak üretilmektedir. Polimerizasyon işlemi, genellikle 100-200°C aralığında gerçekleştirilmektedir.
- Poliester Reçineleri: Genellikle dimer yağ asitleri ile gliserin veya glikol kullanılarak üretilmektedir. Bu reçinelerin polimerizasyon sıcaklıkları, 150-200°C arasında değişmektedir.
- Fenol Formaldehit: Yüksek sıcaklık ve basınç altında polimerize edilir. Bu malzeme, 180-200°C aralığında işlenmektedir [18].

Şekillendirme:

Şekillendirme işlemi, termoset plastiklerin belirli bir forma sokulmasını sağlamaktadır. Şekillendirme yöntemleri şunlardır:

- Sıcak Presleme: Reçine karışımı, ısıtılmış bir kalıba yerleştirilir. Genellikle 150-180°C sıcaklıkta ve 10-50 ton basınç altında gerçekleştirilir. Bu yöntem, büyük parçaların üretiminde kullanılmaktadır.
- Soğuk Presleme: Daha düşük sıcaklıklarla yapılan bir işlemdir, genellikle 20-80°C aralığında gerçekleştirilmektedir. Genellikle daha az enerji tüketimi gerektirir.
- Enjeksiyon Kalıplama: Reçine, eritilerek kalıba enjekte edilir. Bu işlem, 120-180°C sıcaklıkta yapılır ve karmaşık parçaların hızlı bir şekilde üretilmesine olanak tanımaktadır.
- Dökme: Reçine karışımı kalıba dökülür ve daha sonra sertleştirilir. Bu yöntem genellikle daha büyük ve düz parçalar için kullanılmaktadır [19-20].

Sertleştirme:

Sertleştirme süreci, şekillendirilmiş malzemenin şeklinin kalıcı hale gelmesini sağlamaktadır. Sertleştirme işlemi, genellikle 150-200°C sıcaklıkta ve 30-120 dakika süreyle yapılmaktadır. Sertleşme, polimer zincirleri arasında kovalent bağlar oluşumunu sağlar ve bu şekilde malzemenin yapısı güçlendirilir [19-20].

1.2.1.2. Fiziksel ve mekanik özellikler

Termoset plastiklerin fiziksel ve mekanik özellikleri, kullanılan reçine ve sertleştirici türüne bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak, termoset plastikler 120-

180°C aralığında deformasyona uğramamaktadırlar. Bu sayede otomotiv ve havacılık gibi yüksek sıcaklık uygulamalarını içeren alanlarda kullanılabilmektedirler. Asitler, alkaliler ve çeşitli kimyasallara karşı yüksek direnç gösterebilirler bu da kimya endüstrisinde kullanımına geniş bir olanak sağlamaktadır. Yüksek çekme ve basınç dayanıklılığı sunarlar. Çekme dayanıklılığı 50-100 MPa aralığındadır. Böylelikle mühendislik uygulamalarında geniş yer almaktadırlar. Termoset plastikler, nemi minimumda tutarak uzun ömürlü ve dayanıklı hale gelirler. Su emme oranları genellikle %1'in altındadır [21-22].

1.2.1.3. Kullanım alanları

Termoset plastikler geniş uygulama alanına sahiptir.

- Otomotiv Endüstrisi: Termoset plastikler, araç içi bileşenlerin üretiminde, kaplamalarda ve dış parçaların yapımında kullanılmaktadır. Otomobil parçalarında, genellikle yüksek sıcaklık ve dayanıklılık gereksinimlerini karşılamak amacıyla tercih edilmektedir.
- Elektrik ve Elektronik: Elektrik yalıtımı, devre kartları ve diğer elektronik bileşenlerde termoset plastikler tercih edilmektedir. Bu malzemeler, yüksek sıcaklık ve nem dayanıklılığı sunar. Elektrik yalıtımı için kullanılan termoset plastiklerin dielektrik dayanımı genellikle 10-20 kV/mm aralığındadır.
- İnşaat: Su geçirmezlik, dayanıklılık ve uzun ömürlülük gibi özellikleri nedeniyle yapı malzemeleri ve yalıtım uygulamalarında kullanılmaktadır. Termoset plastiklerin kullanım ömrü, 20-30 yıl arasında değişmektedir.
- Havacılık ve Uzay: Termoset plastikler, uçak ve uzay araçlarının bileşenlerinde, yüksek performans ve güvenlik standartlarını karşılamak için tercih edilmektedir. Bu uygulamalarda, malzemelerin hafifliği ve dayanıklılığı ön plandadır.
- Tüketim Ürünleri: Mutfak eşyaları, mobilyalar ve çeşitli tüketim ürünlerinde estetik ve dayanıklılık sağlamak amacıyla termoset plastikler kullanılmaktadır [15, 19, 23-24].

Avantajlar ve dezavantajlar:

Termoset plastiklerin avantajları ve dezavantajları, kullanım alanlarına bağlı olarak değişmekle birlikte genel olarak aşağıda verilmiştir.

Avantajlar:

- Dayanıklılık: Termoset plastikler, yüksek sıcaklık ve kimyasal dayanıklılığa sahiptir.
- Yüksek mekanik performans: Sert yapıları sayesinde yüksek yük taşıma kapasitesine sahiptirler. Çekme dayanıklılığı, genellikle 50-150 MPa aralığında değişmektedir.
- Hafiflik: Genellikle hafif malzemelerdir, bu da özellikle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde avantaj sağlamaktadır. Yoğunlukları genellikle 1.0-1.5 g/cm³ arasındadır.
- Uzun Ömürlülük: Termoset plastikler, UV ışınlarına ve kimyasal etkilere karşı dayanıklıdır, bu da onları uzun ömürlü hale getirmektedir [25-26].

Dezavantajlar

- Yeniden işlenememe: Termoset plastikler, bir kez şekillendirildikten sonra tekrar eritilemezler, bu da geri dönüşüm süreçlerini zorlaştırmaktadır.
- Maliyet: Bazı termoset plastik türleri, üretim süreçlerinin karmaşıklığı nedeniyle maliyetli olabilmektedir.
- Sertleşme süresi: Sertleşme süreçleri, üretim sürelerini uzatabilmektedir [26-27].

1.2.2. Termoplastikler

Termoplastikler, ısıtıldıklarında yumuşayıp, şekil alabilen soğuduklarında ise tekrar sertleşen polimer malzemelerdir. Termoplastiklerin kimyasal yapısı ısıtıldığında değişmez sadece fiziksel bir değişim meydana gelir. Moleküller arasındaki bağlar zayıflar, bu da polimerin akışkan hale gelmesini ve şekil alabilmesini sağlar. Soğuduğunda ise polimer eski haline döner. Termoplastiklerin tarihçesi, 19. yüzyılın sonlarına kadar uzanır. İlk termoplastikler 1920'ler ve 1930'larda polietilen ve polipropilen gibi basit polimerlerin keşfiyle ortaya çıkmıştır. Termoplastiklerin endüstriyel üretimi, özellikle II. Dünya Savaşı sonrası hızlanmıştır. Savaş sırasında geliştirilen plastikler, sonrasında ticari ürünlerin üretimi için de büyük fırsatlar yaratmıştır. Polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi polimerler, 1940'larda büyük çapta üretime geçerek birçok endüstriye girmiştir. Özellikle otomotiv parçaları, ambalajlar, inşaat malzemeleri ve elektronik malzemeler, termoplastiklerin avantajlarından yararlanılarak daha dayanıklı ve hafif olarak üretilmeye başlanmıştır.

1.2.2.1. Üretim süreci

Termoplastiklerin üretim süreci, polimerizasyon ve işleme-şekil verme aşamalarını içermektedir.

Polimerizasyon:

Monomer adı verilen küçük moleküllerin kimyasal reaksiyonlar ile daha büyük moleküllere (polimerlere) dönüşmesi işlemidir. Termoplastiklerin üretiminde kullanılan yaygın polimerizasyon türleri şunlardır;

- Zincir Polimerizasyonu: Monomerlerin bir araya gelerek uzun zincirler oluşturduğu polimerizasyon türüdür. Bu yöntem, termoplastiklerin büyük bir kısmı için kullanılır.
- Polikondenzasyon: Farklı monomerler bir araya gelerek su ya da başka küçük moleküller atarak polimer oluştururlar. Bu yöntem, özellikle bazı yüksek performanslı termoplastiklerin üretiminde kullanılmaktadır.

İşleme- şekil verme:

- Enjeksiyon Kalıplama: Termoplastiklerin eritilerek kalıplara enjeksiyon yoluyla yerleştirildiği bir üretim yöntemidir. Plastik şişeler, otomobil parçaları, ev eşyaları gibi birçok üründe bu yöntem kullanılmaktadır.
- Ekstrüzyon: Polimerlerin ısıtılıp bir kalıp aracılığıyla şekillendirilmesi işlemidir. Film, boru, kablo gibi ürünlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Şişirme Kalıplama: Polimerlerin eritilip bir kalıptan dışarıya şişirilmesiyle yapılan bir yöntemdir. Özellikle plastik şişe üretiminde kullanılmaktadır.
- Termoformlama: Termoplastik malzemenin ısıtılması ve ardından bir kalıp aracılığıyla şekillendirilmesiyle yapılır. Gıda ambalajları, tıbbi cihazlar gibi ürünlerde kullanılmaktadır [30-31].

1.2.2.2. Kullanım alanları

Termoplastikler, geniş bir kullanım alanına sahiptir:

- Otomotiv endüstrisi: Termoplastikler, otomobil iç ve dış parçalarında, özellikle hafiflik ve dayanıklılık gereksinimi olan uygulamalarda kullanılmaktadır. Otomobil panelleri, iç mekân bileşenleri ve yalıtım malzemeleri bunlara örnektir.
- Ambalaj sektörü: Plastik torbalar, şişeler, filmler, gıda kapları gibi ürünler termoplastiklerden üretilmektedir. Bu alandaki en büyük avantajları, düşük maliyetleri ve şekil alabilme yetenekleridir.
- Elektrik ve elektronik: Kablolar, telefon muhafazaları ve çeşitli elektrikli cihaz bileşenleri termoplastiklerden yapılmaktadır.
- Medikal sektör: Tek kullanımlık tıbbi ürünler, şırıngalar, sterilite ve dayanıklılık

gereksinimlerini karşılamak için termoplastiklerden yapılmaktadır.

- İnşaat: PVC borular, pencere çerçeveleri ve zemin kaplamaları gibi malzemeler termoplastiklerden üretilmektedir.

1.2.2.3. Avantajlar ve dezavantajlar

Avantajlar:

- Yeniden işlenebilirlik: Termoplastikler ısıtıldıklarında tekrar işlenebilir. Bu özellik, geri dönüşümü ve atık yönetimini kolaylaştırmaktadır.
- Esneklik ve çeşitlilik: Termoplastikler, farklı fiziksel özellikler ve dayanıklılıklara sahip geniş bir malzeme yelpazesi sunmaktadır.
- Düşük üretim maliyetleri: İşlenebilirlikleri ve şekil alabilme özellikleri sayesinde üretim süreçleri daha hızlı ve düşük maliyetlidir.
- Kimyasal ve aşınma direnci: Termoplastikler, çoğu asidik ve bazik ortama karşı dayanıklıdır ve uzun ömürlüdür.
- Hafiflik: Termoplastikler, genellikle hafif olup, bu özellikleri otomotiv ve taşıma sektöründe büyük avantaj sağlamaktadır [32].

Dezavantajlar:

- Isı Dayanıklılığı: Termoplastikler, yüksek sıcaklıklarda performans kaybı yaşayabilmektedir. Bu, yüksek ısılara maruz kalan uygulamalarda sınırlayıcı olabilmektedir.
- Mekanik Dayanıklılık: Bazı termoplastikler, özellikle düşük yoğunluklu polimerler, mekanik dayanıklılık açısından sınırlamalara sahiptir.
- Çevresel Etkiler: Termoplastikler çoğunlukla petrol türevli kaynaklardan elde edilir, bu da çevresel kaygıları artırabilir. Geri dönüşüm olanağı olsa da, kullanım ömrü sonunda çevreye zarar verebilmektedir [33].

1.2.2.4. Termoplastiklerin yaygın kullanılan çeşitleri

Termoplastikler, farklı özelliklere sahip pek çok çeşide sahiptir. Bu çeşitler, kullanım amacına ve istenen özelliklere göre şekillenmektedir. Başlıca termoplastik türleri şunlardır:

Polikarbonat (PC): Polikarbonatlar (PC) yüksek şeffaflık, yüksek darbe direnci ve ısıya dayanıklılık sunan bir malzemedir. Mekanik, termal, elektriksel, işlenebilirlik, optik, tokluk, alev geciktiricilik ve yüksek darbe dayanımı gibi önemli özelliklere sahiptir. Polikarbonatlar düşük maliyet ve hassas bir işleme sunar. Polikarbonatlar, fosgen ve bisfenol A'nın polikondenzasyon reaksiyonuyla elde edilir Güvenlik camları, gözlük

camları ve telefon ekranları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Polikarbonat (PC), havacılık, uzay bilimi, otomotiv sektörü gibi birçok endüstriyel uygulama alanında en çok kullanılan amorf bir termoplastik polimerdir [30, 34-35].

Naylon (PA): Yüksek mekanik dayanıklılığa, esnekliğe ve aşınma direncine sahip olan bu malzeme, otomotiv ve tekstil endüstrisinde kullanılmaktadır. Poliamidler iyi mekanik özelliklere, sürtünme direncine ve iyi yangın davranışına sahiptir [36-37].

Polietilen (PE):

Düşük Yoğunluklu Polietilen (LDPE): Esnek ve hafif malzemelerdir. Plastik torbalar, ambalajlar ve kaplar gibi ürünlerde kullanılır.

Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE): Daha sert, dayanıklı ve kimyasal direnci yüksek bir malzemedir. Borular, depo tankları gibi ürünlerde kullanılır.

Polipropilen (PP): Hafif, kimyasala ve ısıya karşı dayanıklı ve esnek bir malzemedir. Otomotiv, gıda ambalajı ve medikal ürünlerde yaygın olarak kullanılır.

Polistiren (PS): Sert, kırılğan ve düşük maliyetli bir termoplastiktir. Gıda kapları, tek kullanımlık tabaklar ve oyuncaklar gibi ürünlerde kullanılır.

Akrilonitril-bütadien-stiren (ABS): Yüksek darbe direncine sahip, dayanıklı bir malzemedir. Otomobil parçaları, oyuncaklar ve elektronik cihaz muhafazaları gibi ürünlerde kullanılır [38].

Polietilen Tereftalat (PET): PET, son yirmi yılda kullanımındaki hızlı artış nedeniyle en önemli mühendislik polimerlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Özellikle sıvı kaplarının (şişeler) üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek çekme ve darbe mukavemeti, kimyasal dayanıklılığı, şeffaflık, işlenebilirlik, renk alma kapasitesi ve yeterli termal kararlılığı gibi özellikleri ile dikkat çekmektedir [38-39].

Polivinil Klorür (PVC): Esnek ya da sert formda üretilen bir malzemedir. İnşaat sektörü (borular, pencere çerçeveleri) ve elektrik kabloları gibi alanlarda kullanılır.

1.3. PVC

Polivinil klorür (PVC), ilk olarak 1835 yılında Henri Regnault tarafından vinil klorürün keşfiyle ortaya çıkmış ancak 20. yüzyıla kadar üretim zorlukları ve teknolojik sınırlar nedeniyle ticari bir malzeme olarak geliştirilmemiştir. 20. yüzyılın başlarında Fritz Klatte tarafından PVC'nin polimerizasyon sürecinin geliştirilmesiyle birlikte bu malzemenin endüstriyel potansiyeli ortaya çıkmıştır ancak erken dönemlerde PVC'nin kırılğanlığı, kararsızlığı ve üretim zorlukları nedeniyle kullanım alanı sınırlı kalmıştır. 1930'larda ise BF Goodrich şirketinin kimyageri Waldo Semon, PVC'yi plastikleştirerek

esnek ve dayanıklı bir malzeme haline getirmiş ve bu süreç, PVC'nin ticari anlamda yaygınlaşmasını sağlamıştır. Elektrik kablo yalıtımı, zemin kaplamaları ve boru üretimi gibi alanlarda kendine sağlam bir yer edinen PVC, İkinci Dünya Savaşı sırasında stratejik bir malzeme olarak inşaat ve savunma sektörlerinde yoğun bir şekilde kullanılmıştır. Günümüzde PVC, yıllık yaklaşık 60 milyon tonluk üretim hacmi ile küresel olarak en çok kullanılan ikinci plastik malzeme konumundadır [39-41].

PVC'nin ekonomik önemi yalnızca düşük üretim maliyetleriyle değil, aynı zamanda üstün özellikleriyle belirlenmektedir. Yüksek kimyasal direnç, uygun mekanik özellikler, su ve hava koşullarına dayanıklılık, iyi yapışma özelliği, yüksek darbe dayanımı, esneklik, parlaklık gibi çok sayıda işlevsel özellik göstermektedirler. Avrupa Birliği'nde üretilen PVC'nin yaklaşık %70'i, inşaat sektöründe pencere profilleri, borular ve çatı membranları gibi alanlarda tüketilmektedir. Ayrıca, ambalaj endüstrisinde gıda ambalajı, tıbbi alanda blisterler ve tekstil sektöründe suni deri üretiminde önemli bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Gıda ambalajlarında kullanılan PVC, iyi oksijen bariyeri özellikleri sayesinde ürünlerin raf ömrünü uzatırken, hijyenik güvenliği sağlaması nedeniyle zemin ve duvar kaplamalarında da tercih edilmektedir. Büyük çadırlar, brandalar, otomotiv ve mobilya endüstrisinde kullanılan kaplanmış kumaşların üretiminde de PVC önemli bir rol oynamaktadır [42-43].

1.3.1. PVC üretimi

PVC üretimi, beş ana adımdan oluşur:

- Etilen ve klor gazı üretimi: Etilen gazı, petrol veya doğal gazdan saflaştırılarak ve klor gazı, deniz tuzundan yüksek enerjili elektrolizle sentezlenerek vinil üretimi için temel malzemeler oluşturulur.
- Hammadde üretimi: Etilen diklorür, klor ve etilenden klorinasyon veya oksiklorinasyon yoluyla kloretilen monomerlerine dönüştürülür.
- Polimerizasyon: Kloretilen molekülleri birleştirilerek genellikle beyaz bir toz olan polivinil klorür elde edilir.
- Formülasyon: Saf haliyle PVC sert ve kırılganlığı nedeniyle pek kullanışlı değildir ayrıca ultraviyole ışığa maruz kaldığında zamanla kendi kendini ayırıştırır. PVC'nin kullanılabilir ürünlere dönüştürülebilmesi için stabilizatörler, plastikleştiriciler, renklendiriciler gibi kimyasallarla karıştırılarak istenilen özelliklere sahip hale getirilir.
- Kalıplama: Formüle edilmiş plastik, şişe, yer karosu veya boru gibi nihai ürünü

retmek için kalıplanır [44].

1.3.2. Plastikleştiriciler

Polivinil klorürün (PVC), esneklik sağlamak, dayanıklılığı ve kullanım alanı genişletmek gibi amaçlarla plastikleştiriciler yardımıyla özellikleri iyileştirilebilmektedir. Plastikleştirme, PVC'nin amorf yapısındaki moleküller arasındaki hareketliliği artırarak sertliğini ve camsı geçiş sıcaklığını (T_g) düşürmektedir. Plastikleştiricilerin PVC'ye etkisi, tarihsel olarak üç temel teori ile açıklanmaktadır: jel teorisi, kayganlık teorisi ve serbest hacim teorisi. Jel teorisi, polimer moleküllerinin gevşek bağlarla birbirine bağlı olduğu ve plastikleştiricilerin bu bağlar arasındaki hareketliliği artırarak polimer yapısını esnekleştirdiğini ne sürmektedir. Kayganlık teorisi ise plastikleştiricilerin, polimer zincirlerinin birbirleri üzerinde kolayca kaymasını sağlayarak hareket kabiliyetini arttırdığını savunmaktadır. Serbest hacim teorisine göre, plastikleştiriciler polimerin iç yapısında moleküller arası boşluk oluşturarak camsı geçiş sıcaklığını düşürmektedir. Plastikleştirici-PVC etkileşimlerinin gücü, polimerin polar karbon-klor bağlarının plastikleştiricinin polar gruplarıyla oluşturduğu elektrostatik kuvvetler sayesinde sağlanmaktadır. Bu etkileşimler, polimerin amorf bölgelerinin çözünmesini sağlarken, kristal bölgelerdeki çapraz bağlar sayesinde PVC'nin dayanıklılığı korunmaktadır [45-47].

1.4. Atık Bertarafı Yöntemleri

1.4.1. Depolama alanları

Depolama, plastik atık dönüşümünün en ilkel tekniğidir. Depolama alanları çok miktarda p içerir ve bir dizi sorunu beraberinde getirmektedir. Sürdürülebilir bir geri dönüşüm yöntemi değildir. Plastik atığı depolama alanlarında bertaraf etmek, arazi sıkıntısına neden olabilir ve atık yönetimi kuruluşlarının operasyonlarını engelleyebilmektedir. Ek olarak, plastik atıklar su kütleleriyle karşılaştığında onları kirletmektedir. Bu nedenle insan sağlığı ve evre için endişeler yaratmaktadır. Depolama alanlarının uzun zamandır toprağı kirlettiği bilinmektedir [48-52].

1.4.2. Geri dönüşüm

Plastik geri dönüşümü, atık plastiklerin yeniden işlenerek kullanılabilir ürünlere dnşrldğ, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir süreçtir. Mekanik geri dönüşüm, maliyet uygunluğu nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Süreç, atıkların kesici ekipmanlarla parçalanmasıyla başlar ardından kirleticiler, siklon ayırıcılarla

temizlenir. Öğütme, polimerleri ayrıştırır ve homojen malzemeye dönüşümü sağlar. Yıkanan plastik, ekstrüzyonla eritilip pelet haline getirilir ve soğutularak granül forma ulaşır. Bu granüller, market poşetleri, panjur ve ev eşyalarının üretiminde değerlendirilir ancak geri dönüşümde kütle kaybı ve yüksek enerji tüketimi gibi zorluklar bulunur. Geri dönüştürülmüş ürünlerin dayanıklılığı, orijinal malzemelere kıyasla genellikle daha düşük olmaktadır [53-56].

1.4.3. Piroliz

Atık malzemelerin pirolizi, evsel ve endüstriyel atıkların özellikle yüksek sıcaklık gibi ağır işleme koşullarına tabi tutarak yakıtla dönüştürme yöntemidir. Atık malzemelerin pirolizi sırasında plastik malzeme, hidrokarbon karışımından oluşan bir yakıtla dönüştürülür. Atık malzeme pirolizinin çıktıları, kullanılan hammaddenin türüne ve miktarına ve kullanılan reaktöre göre değişmektedir. Bunlar, gaz ve sıvı hidrokarbonlar ve kömür olmak üzere üç ayrı sınıfa ayrılabilir. En sık elde edilen sıvı ürünler parafin (oktan, heptan ve bütan), olefinler, izoparafinler, propan ve aromatikleridir. Bu gazlı ürünler (metan, bütan, etan ve propan) elektrik üretmek için kullanılabilir [57-59].

1.4.4. Sıvılaştırma

Hidrotermal sıvılaştırma, atık plastiklerin biyokütle ile birlikte sıvı ürünlere dönüştürüldüğü bir yöntemdir. Biyokütle ile birlikte sıvılaştırma, ürünlerde bileşenlerin daha homojen dağılımını sağlar ve yüksek karbon içeriği sayesinde yakıt performansını iyileştirmektedir. Süreç, depolimerizasyon, ayrışma ve rekombinasyon aşamalarını içermektedir. Biyokütlerdeki proteinler, karbonhidratlar ve amino asitler, yüksek sıcaklık ve basınç altında, çözücü ve katalizör varlığında küçük moleküllere ayrışır. Bu moleküller, rekombinasyonla biyo-yag gibi ürünleri oluşturur. Polimerizasyonun yoğunluğu biyo-yag, kömür veya kok oluşumunu belirler; polimerizasyon olmaması ise biyogaz üretimine yol açar. Plastik kullanımı, kok oluşumunu azaltarak hem atık geri dönüşümüne katkı sağlar hem de ürün kalitesini arttırmaktadır ancak, sıvılaştırma yüksek su ve enerji tüketimi gerektiren bir süreçtir, bu da temel sınırlılıklarından biri olarak kabul edilmektedir [60-63].

1.4.5. Yol yapımı ve katran

Katran, organik bir bileşiktir ve plastik atıklar ile diğer maddelerin (örneğin ağır metaller) gazlaştırma veya piroliz süreçlerinde önemli miktarda üretilmektedir. Katranın yoğunlaşabilir organik bileşenleri, cüruf oluşumu ve katalizör tıkanıklığı gibi sorunlara

yol aarak gaz üretim tesislerinde istenmeyen bir bileşen haline gelmektedir. Ancak, katran farklı sektörlerde değerli bir malzemedir; bitki ve insan hastalıklarının tedavisinde, kaplama endüstrisinde ve özellikle yol yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bitüm bazlı yollar, katran katmanlarının sıkıştırılmasıyla dayanıklı yapılar oluşturur. Son yıllarda, bitümde atık plastik kullanımı giderek yaygınlaşmıştır. Bu yöntem, biyolojik olarak parçalanmayan plastik atıkların bertarafını sağlarken, plastikte güçlendirilmiş yolların geleneksel bitüm yollarına kıyasla üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir. Yaklaşık bir ton atık plastik, bir kilometrelik yol yapımında kullanılarak çöp atımı ve emisyon sorunlarına çözüm sunmaktadır. Bu yaklaşım, kilometre başına yaklaşık 40.000 ABD doları tasarruf sağlar ve Hindistan, Hollanda, Birleşik Krallık, Malezya ve Gana gibi ülkelerde yol yapımında atık plastik kullanımı sıklıkla görülmektedir. Atık plastik, bitümün erime noktasını yükseltir, esnekliği artırır, neme karşı dayanımını ve ultraviyole direncini iyileştirir. Ayrıca, plastikte modifiye edilen yollar, daha ağır yükleri uzun süre taşıyabilir. Plastik ve bitüm arasındaki çekim kuvvetlerinin zamanla artması, bitümün sertleşme etkisini güçlendirir; oksitleyici ve bağlayıcı maddeler bu bağı daha da iyileştirir. Böylece atık plastik kullanımını hem çevresel hem de ekonomik faydalar sağlamaktadır [64-69].

1.4.6. Beton retimi

Beton, yapı sektörünün temel malzemelerinden biri olup endüstriyel gelişimin önemli bir bileşenidir. Son araştırmalarda, doğal agregalara alternatif olarak atık plastiğin beton üretiminde kullanımına yer verilmektedir. Geri dönüştürölmüş plastik agregalar, ses yalıtımı, termal izolasyon ve hafif beton uygulamalarında malzeme özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahiptir. Gu ve Özbakkaloğlu, atık plastiğin hafif beton üretiminde tercih edilebilir olduğunu belirtmiştir. Plastiğin düşük termal iletkenliği ve gözenekli yapısı, atık plastik içeren kompozitlerin termal iletkenliğinin geleneksel betonlara kıyasla beş kat daha düşük olmasını sağlamaktadır. Hidrofobik özelliklerinden dolayı artan plastik içeriği, termal iletkenliği azaltır ve karışımında boşluk oluşumuna yol açmaktadır. Ayrıca, gözenekli yapısı sayesinde atık plastik, betonda ses emici bir malzeme olarak kullanılabilmektedir. Atık plastik kullanımı, doğal kaynak bağımlılığını ve üretim maliyetlerini azaltma potansiyeline sahiptir. Ancak, yüksek oranda plastik kullanımı, mukavemet kaybı nedeniyle önerilmemektedir; genellikle %10-15’lik bir değiştirme oranı, kabul edilebilir mekanik özellikler sağlamaktadır. Plastik agregaların artan hava içeriği ve düşük bağlanma kapasitesi, mukavemet azalmasının temel

nedenlerindendir. Bu nedenle, atık plastiğin betondaki uzun vadeli performansı, çevresel etkileri ve hizmet ömrü üzerine daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir [70-78].

1.5. İnşaat Sektöründe Atık PVC

Kentleşme, ekonomik kalkınma ve artan nüfus, plastik kullanımını büyük ölçüde arttırmıştır. Dünya çapındaki plastik üretimi, 1950'den bu yana %8,4 oranında artmıştır. Plastik üretimi 2018 yılında 0,36 milyar tona ulaşmıştır ve 2025 yılında 0,50 milyar tonu aşması beklenmektedir. Petrol bazlı plastiklerin biyolojik olarak parçalanmayan doğası, atık akışında bol miktarda bulunmaları nedeniyle çevre için tehdit oluşturmaktadır. Küresel ekonomi ve kalkınmadaki hızlı büyüme, bu malzemelere olan arayışı ve bağımlılığı da arttırmış, bunun sonucunda insan ve hayvan sağlığı için tehlike oluşturan çöplüklerde birikmiş, yeraltı suyunun kirlenmesi gibi çevre kirliliği sorunları ve sanitasyon zorlukları ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla, bu atık malzemeleri işlemenin etkili ve sürdürülebilir bir yolu olarak bu zorlukları ortadan kaldırmak önem kazanmıştır. Atık genellikle esas olarak insan faaliyetleri sırasında üretilen ve hem çevre hem de insanlar için kötü sonuçlara neden olan işe yaramaz yan ürünler istenmeyen maddeler olarak beyan edilebilir. Tüm bu gelişmeler plastik atıkların geri dönüşümünü veya bertarafına ihtiyacı doğurmuştur [79-81]. Geri dönüşüm, yeni hammaddelere olan talebi düşürmek ve çöplüklerdeki atıkları azaltmak için umut vadeden bir seçenektir [48]. Tablo 1.1'de plastik atıkların kaynağı ve sektörel dağılımı verilmiştir.

Tablo 1.1. Plastik atıkların sektörel dağılımı [82]

Endüstriyel Sektör	Tüketilen Plastik Miktarı (Metrik Ton)	Tüketilen Plastiğin Yüzdesi (%)	Oluşan Atık Plastik Miktarı (Metrik Ton)	Kullanılan Plastik Türleri
Ambalajlama	146	35,9	141	Polietilen
Bina ve İnşaat	65	16	13	Polikarbonat, naylon, polietilen
Diğer Sektörler	59	11,5	42	Polikarbonat, naylon, polietilen
Tekstil	47	14,5	38	Polyester
Tüketici ve Kurumsal Ürünler	42	10,3	37	Polietilen
Ulaşım	27	6,6	17	Asetat
Elektrik/Elektronik	18	4,4	13	PVC, melamin formaldehit
Endüstriyel Makineler	3	0,7	1	Polikarbonat

Ural ve arkadaşları, atık PVC elyaflarının, çimentolu kil zeminlerin sınırsız sıkıştırma dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneylerde, atık PVC elyafları çimentolu kil karışımına farklı oranlarda (%5, %10 ve %15) eklenmiştir. Sonuçlar, atık PVC elyaflarının eklenmesinin toprak karışımının maksimum kuru birim ağırlığını azalttığını, ancak su içeriğini artırdığını göstermiştir. Ayrıca, sıkıştırma dayanımı testleri, atık PVC elyafları içeren örneklerin, saf kil örneklerine kıyasla daha yüksek sıkıştırma dayanımı gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, toprak stabilizasyonunda atık PVC elyaflarının potansiyel kullanımını ve çevresel olumlu etkilerini vurgulamaktadır [83].

Ceran ve ekibi, atık PVC'nin ince agregalar yerine kullanılarak beton özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deneylerde, atık PVC, beton karışımına %0, %30, %35, %40 ve %45 oranlarında dahil edilmiştir. Sonuçlar, atık PVC'nin betonun mekanik, termal ve elektriksel özellikleri üzerinde olumsuz etkiler yarattığını ancak ısı iletkenliği azalttığını ve elektriksel direnci artırdığını göstermiştir. PVC içeriği arttıkça, betonun basınç ve çekme dayanımları azalırken, su emilimi de düşmüştür. Bu bulgular, atık PVC'nin beton uygulamalarında bazı avantajlar sunabilse de, mekanik dayanım açısından sınırlamalar getirdiğini göstermektedir [84].

Manjunatha ve diğerleri, endüstriyel bazlı PVC atık tozu, M60 sınıfı kendiliğinden yerleşen betonun üretiminde kısmi olarak çimentonun yerine %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında kullanmıştır. Sonuçlar, %5-10 oranında PVC atık tozunun çimento yerine kullanıldığında, betonun dayanım ve dayanıklılığını tehlikeye atmadan etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Çalışma, PVC atık tozunun kendiliğinden yerleşen betonlarda çevreye faydalı olduğunu ve beton üretim maliyetlerini artırmadan performansından ödün vermeksizin kullanılabileceğini vurgulamaktadır [85].

Manjunatha ve ekibi, PVC atık tozu ve öğütülmüş granüle konulmuş blast-fırın cürufu kullanılarak hazırlanan yeşil betonun mühendislik özellikleri ve çevresel etkileri incelenmiştir. %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 PVC atık tozu içeren beton karışımları, konvansiyonel betonla karşılaştırılmıştır. Deneysel araştırmalar, PVC atık tozu ve öğütülmüş granüle konulmuş blast-fırın cürufunun betondaki yapısal performansı ve dayanıklılığı artırırken, çevresel etkileri önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Taze beton özellikleri açısından, PVC atık tozu içeriği arttıkça işlenebilirlikte bir azalma gözlemlenmiştir. Mekanik test sonuçları, PVC atık tozu ve öğütülmüş granüle konulmuş blast-fırın cürufunun betondaki uzun vadeli performansı iyileştirdiğini ve betonun bağlanma özelliklerini güçlendirdiğini, ayrıca yoğunluğunu artırdığını göstermektedir [86].

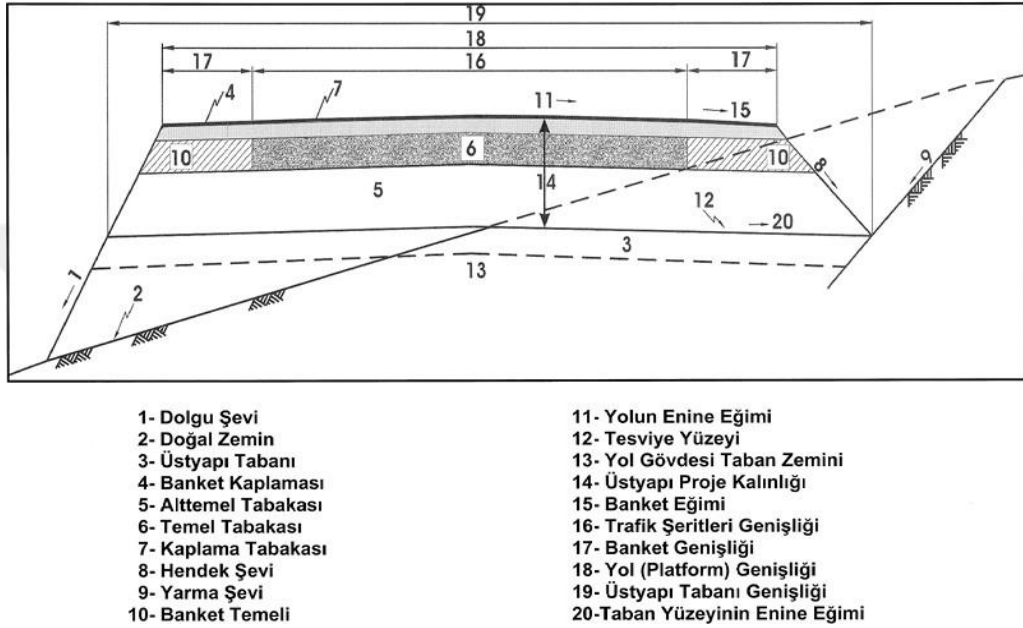
Binhussain ve

arkadaşları deneylerde, atık PVC'yi %30, %40 ve %50 oranlarında kullanmış ve bu oranların ahşap kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Sonuçlar, atık PVC oranı arttıkça kompozitlerin yoğunluğunun arttığını, su emilim oranlarının ise azaldığını göstermektedir. Ayrıca, artan PVC içeriği ile materyalin sertliği ve dayanıklılığının iyileştiği, ancak esneklik ve darbe direncinin azaldığı gözlemlenmiştir [87].

Görkem ve diğerleri, %0.5, %1, %1.5 oranlarında atık polivinil klorür (PVC) ve kireç hidrat ile, bitümlü karışımların su kaynaklı bozulmalara karşı dirence etkisini incelemiştir. Çalışma, Marshall Akma ve Stabilitate Testi kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, kireç hidratın %1-1.5 oranında eklenmesiyle ezilme dayanımının %7-8 oranında arttığı tespit edilmiştir. Kireç hidrat, bitüm-agrega aderansını güçlendirmiş, böylece su geçirgenliğini azaltmıştır. Atık PVC, karışımın esnekliğini artırarak çatlama ve soyulma gibi su kaynaklı hasarları önemli ölçüde engellemiştir. Bu bulgular, atık PVC'nin geri dönüşümünün yol kaplamalarının mekanik performansını ve çevresel sürdürülebilirliği iyileştirmede etkili olduğunu ortaya koymaktadır [88]. Arabani ve diğerleri araştırmasında, atık PVC tozu eklemenin bitüm özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan deneylerde, PVC tozunun asfaltın sıcaklık hassasiyetini ve tekerlek izi direncini artırdığı gözlemlenmiştir. PVC eklemenin bitümde yumuşama noktasını artırdığı, penetrasyon derecesini ise azalttığı belirlenmiştir. Marshall testleri, atık PVC tozu içeren karışımların statik performansını iyileştirerek, bu karışımların kalıcı deformasyona karşı daha dirençli olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle, RLA testleri %5 PVC tozu içeren karışımların tekerlek izine karşı çok daha dirençli olduğunu göstermiştir [89]. Köfteci ve arkadaşları, farklı türde atık plastiklerin bitüm modifikasyonu üzerindeki etkilerini incelemiştir. PVC pencere, jaluziler ve kablolar gibi atıkların bitüme eklenmesiyle penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktasının arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek sertleşme, atık jaluzilerle sağlanırken, atık PVC pencere ve kablo bazlı katkıların daha iyi performans sergilediği bulunmuştur. DSR testleri sonucunda, %3 ve %5 atık pencere bazlı katkıların bitümün yüksek sıcaklık performansını iyileştirdiği gösterilmiştir [90]. Ziari ve arkadaşlarının araştırmasında, EAF (Electric Arc Furnace) tozu ve atık PVC'nin asfalt bağlayıcılarının rutting ve yorulma direncine olan etkisi incelenmiştir. PVC tozu eklenmesiyle asfaltın penetrasyon derecesi %25 azalırken, yumuşama noktası %22 artmıştır. Atık PVC içeren asfalt karışımları, nem direncini artırmış ve daha iyi rutting performansı göstermiştir. Dinamik sürünme ve ITS test sonuçları, %5 PVC içeren karışımların, rutting ve yorulma

performansını artırdığını ortaya koymuştur [91]. Murana ve arkadaşları, PVC ile modifiye edilmiş bitümlü asfalt karışımlarının mukavemet özelliklerini incelemiştir. Yapılan Marshall testleri ve diğer analizler, %2-10 arası PVC eklemenin asfaltın statik dayanımını artırdığını göstermiştir. PVC içeriği arttıkça, bitümün viskozitesinde bir artış sağlanmış, dolayısıyla asfalt karışımının rutting direnci ve dayanıklılığı artmıştır [92]. Cruz ve ekibi, PVC atığının asfalt karışımlarında ince agreganın bir kısmına, kuru agrega ağırlığına göre %0,5, %1,0 ve %1,5 olmak üzere üç oranda ikame edilmesinin performans üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Blister PVC atığının asfaltın sıcaklık hassasiyetini düşürdüğü ve rutting direncini artırdığı gözlemlenmiştir. Yapılan testler, bu modifikasyonun asfalt karışımının uzun ömürlü ve dayanıklı olmasına yardımcı olduğunu göstermektedir [93]. Salman'ın çalışmasında, %2.5 ile %15 arasında değişen PVC içeriğiyle yapılan modifikasyonların bitüm özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. PVC eklenmesiyle penetrasyon değeri belirgin bir şekilde azalmış ve yumuşama noktası artmıştır. Özellikle %15 PVC eklenmesiyle bitümün sertliğinin arttığı ve süneklik değerinin azaldığı bulunmuştur. Ayrıca, PVC içeren bitümlerin sıcaklık duyarlılığı artmış ve flaş noktası ile yangın noktası düşmüştür [94]. Rahman'ın çalışmasında, atık polietilen ve atık PVC'nin sıcak asfalt karışımlarına eklenmesinin etkileri araştırılmıştır. PVC içeren karışımların viskozitesinin arttığı ve Marshall stabilitesinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, %7.5 polietilen ve %10 PVC içeren karışımların, sıcak iklim bölgelerinde asfalt yollar için daha uygun olduğu belirlenmiştir [95]. Bu çalışmada, atık PVC borularının asfalt bağlayıcıları olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Atık PVC'nin eklenmesiyle, sıcak iklim bölgelerinde asfalt karışımlarının stabilitesinin arttığı ve kalıcı deformasyona karşı dirençli hale geldiği bulunmuştur. PVC modifikasyonu, asfaltın rutting direncini artırmış ve asfaltın sıcaklık hassasiyetini iyileştirmiştir [96]. Behl ve arkadaşları, atık PVC'nin yol asfaltlamada kullanımını değerlendirmiştir. Yapılan testler, %3 ve %5 PVC eklemenin asfalt karışımlarının rutting direncini artırdığı, kararlılığını yükselttiği ve nem duyarlılığını azalttığı göstermektedir. PVC içeren karışımlar, daha iyi sıcaklık dayanıklılığı ve daha yüksek viskoelastik özellikler sergileyerek, sürdürülebilir asfaltlama çözümleri sunmaktadır, 64. Al-Shawabkeh ve ekibi araştırmasında, geri dönüştürülmüş PVC'nin asfalt karışımlarındaki performansı incelenmiştir. %12.5 rPVC içeren karışımların, geleneksel asfalt karışımlarına göre daha yüksek sıcaklık dayanıklılığı ve rutting direnci gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca, rPVC'nin asfaltın viskoelastik özelliklerini iyileştirerek asfaltın performansını artırdığı ve uzun ömürlü asfalt yollar için daha uygun olduğu tespit

edilmiştir [97]. Shatin'in çalışmasında, geri dönüştürülmüş polimerlerin asfalt karışımlarına eklenmesinin sıkıştırma dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan testler, modifiye edilmiş asfalt karışımlarının sıkıştırma dayanımının arttığını ve düşük sıcaklık koşullarında bile yüksek performans gösterdiğini ortaya koymuştur. PVC içeriği arttıkça, asfaltın basınç dayanımı ve kalıcı deformasyona karşı direnci belirgin şekilde iyileşmiştir [98].



Şekil 1.1. Tipik karayolu enkesiti [99]

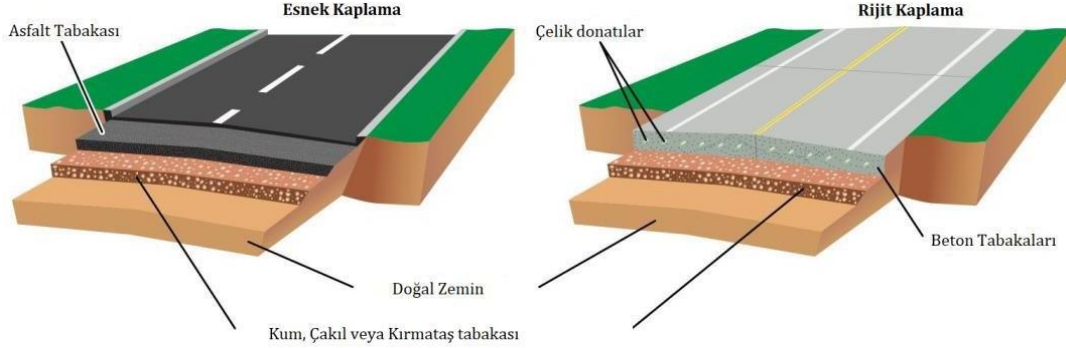
1.6. Karayolu Üstyapısı

Trafik yüklerini karşılayan ve bu yüklerin alt tabakalara iletilmesini sağlayan yapıdır. Üst yapı; temel, alt temel ve kaplama olmak üzere üç tabakadan oluşmaktadır. Alt temel tabakası tesviye yüzeyi üzerine, belirlenmiş bir granülometriyle serilerek inşa edilen tabakadır. Kaplamadan gelen yüklerin taban üzerine yayılmasını sağlar ve su ve don etkilerine karşı tampon görevi görür. Temel tabakası ise alttemel ve kaplama tabakası arasındaki tabakadır. Görevi alttemel tabakası ile birlikte yükleri tabana iletmektir. Bu tabakaların kalınlığı, yolun projelendirilmesi esnasında, trafiğin miktarı, taban zemininin taşıma gücü ve iklim koşulları gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir [99]. Şekil 1.1'de tipik bir karayolu enkesiti verilmiştir.

1.6.1. Kaplama türleri

Yol kaplaması, temel tabakası üzerine yerleştirilmiş, trafiğin doğrudan etki ettiği, bitümlü karışımlar, beton vb. malzemeler ile inşa edilen yapılardır. Kaplama tabakasının esas işlevi, taşıt yoluna uygulanan trafik yüklerini desteklemek ve bunları alt zemine

dağıtmaktır. Kaplamalar, yapımında kullanılan malzemenin özelliklerine göre genel olarak üç sınıfa ayrılmaktadır [100]. Şekil 1.2’de kaplama türleri verilmiştir.



Şekil 1.2. Kaplama türleri; esnek kaplama ve rijit kaplama [101]

1.6.1.1. Rijit kaplamalar

Rijit kaplamalar diğer bir deyişle beton yollar, dünyada yaygın olarak kullanılan bir kaplama tabakası türüdür. Eğilme direncinin yüksek olduğu beton kaplamalar, Portland çimentosunun kullanıldığı beton plakalar ile üzerine gelen trafikten kaynaklı yükleri diğer tabakalara iletmektedir. Ayrıca beton kaplama ile tesviye tabakası arasında şişme, büzülme ve don gibi olayları azaltmak için kaplama altı tabakası inşa edilmektedir [102].

Rijit kaplamalar, Portland çimentolu malzemelerden oluşmaktadır, bu da yükü kaplamanın daha geniş bir alana aktarılmasını sağlamaktadır. Bu özelliğinden dolayı rijit kaplamalarda, esnek kaplamalara göre daha düşük basınç gerilmeleri ve daha düşük deformasyon oluşumu meydana gelmektedir [103].

Kaplamada kullanılan beton malzemenin rijit olması sayesinde, oldukça fazla yüke maruz kalan yüzey tabakasına gelen trafik yükleri karşılanarak bozulmalar engellenmektedir. Böylelikle bitümlü kaplamaların aksine beton kaplamaların mekanik ve fiziksel özelliklerinde tekerlek izi oluşmaz. Betonun kaplamadaki davranışı, beton tabakalarının özelliklerine ilave olarak kaplamanın altında bulunan malzemelerin özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Beton yollar projelendirilirken, betonun davranışını etkileyen, zemin yüzeyi, temel ve alttemel malzemesi, agrega, çimento ve betonarme malzemelerin fiziksel özellikleri dikkate alınmalıdır [104].



Şekil 1.3. Rijit kaplama tabakaları

Rijit kaplamaların yapım maliyetleri, özellikle yüksek seviyede yüzey düzgünlüğü gerekiyorsa, genellikle asfalt kaplamalardan daha pahalıdır. Bununla birlikte, asfalt kaplamalarda yapısal veya işlevsel sıkıntılara yol açabilen yüksek kayma gerilmeleri veya yakıt dökülmesine maruz kalan alanlar için daha uygun bir kaplama türüdür [105]. Şekil 1.3'te rijit kaplama tabakaları verilmiştir.

1.6.1.2. Yarı rijit kaplamalar

Yarı rijit kaplamalar asfalt ve beton kaplama sistemlerinin birleştirilmesiyle oluşturulan hibrit bir üstyapı çeşididir. Bu kaplama türü, asfaltın esnekliğini ve betonun rijitliğini bir araya getirerek her iki malzemenin de avantajlarından faydalanmaktadır. Yarı rijit kaplama, özellikle orta düzeyde trafik yoğunluğu olan yollar, otoyol geçiş istasyonları, tünel girişleri, şehir içi yollar ve ağır yük taşıyan alanlarda tercih edilmektedir [106].

Yarı rijit kaplamanın temel bileşeni, %25-30 arasında hava boşluğuna sahip gözenekli asfalt betonu (poroz asfalt) olup, bu asfalt iskeletinin boşlukları çimento harcıyla doldurulmaktadır. İlk olarak 1960'lı yılların başında Fransa'da geliştirilen bu kaplama türü, 1990'lardan sonra Avrupa, Amerika Birleşik Devletleri, Afrika ve Asya gibi bölgelerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yarı rijit kaplama, asfaltın hızlı üretim ve düşük maliyet avantajlarını, betonun uzun ömürlülük ve dayanıklılık özellikleriyle birleştirmektedir [107-108].

Yarı rijit kaplama sisteminin tasarımı, asfalt harmanlama tesisinde üretilen poroz asfalt karışımının, finişer makinesiyle yola serilmesiyle başlamaktadır. Karışım, çelik tekerlekli silindirlerle sıkıştırılır ve ardından üzerine çimento harcı dökülerek plaka yardımıyla sıkıştırılmaktadır. Fazla çimento harcı kazındıktan sonra, yüzeyin mekanik olarak düzeltilmesiyle pürüzlü bir doku elde edilmektedir. Bu işlem, kayma direncini artırarak yolun güvenliğini sağlamaktadır. Yarı rijit kaplamaların, zemin iyileştirmesi gerektiren durumlarda tercih edilmesinin nedeni, rijit alt tabakaların taşıma kapasitesini artırmasıdır. Asfalt üst tabakasının esnek yapısı, zeminle uyum sağlayarak yoldaki yükleri

daha geniş bir alana dağıtırken, çimentolu alt tabaka yük taşıma kapasitesini güçlendirir. Bu hibrit yapı, zorlu iklim koşulları ve ağır trafik yükleri altında bile yüksek performans sergileyen bir çözüm sunar [107].

Yarı rijit kaplamaların, asfalt ve beton kaplamaların ortak avantajlarını birleştirmesi, bakım maliyetlerini azaltırken yol ömrünü uzatır. Bu kaplama türü, düşük bakım gereksinimi, yüksek aşınma direnci ve uzun ömürlülüğü ile dikkat çekmektedir. Yarı rijit kaplamalar, çeşitli coğrafyalarda farklı isimlerle anılmakta olup, uygulama alanları sürekli olarak genişlemektedir. Yüksek dayanıklılık ve taşıma kapasitesi gerektiren projelerde, esnek ve rijit kaplamaların performansını bir araya getiren bu kaplama türü, sürdürülebilir yol altyapılarının inşasında önemli bir rol oynamaktadır [109]. Şekil 1.4'te yarı rijit yol kaplama uygulaması verilmiştir.



Şekil 1.4. Yarı rijit yol kaplama uygulaması [110]

1.6.1.3. Esnek kaplamalar

Esnek kaplamalar, modern yol ve otoyol inşaatlarında en sık tercih edilen yapı türüdür ve trafik yükleri altında esneyebilme özelliği ile uzun ömürlü bir altyapı sunmaktadır. Bu kaplamalar, asfalt betonu yüzey katmanları, bağlanmamış granüler tabakalar (temel ve alttemel) ve doğal zemin katmanlarından oluşur. Asfalt betonu ile inşa edilen yüzey ve bağlayıcı tabakalar, trafik yüklerinden kaynaklanan yüksek kesme ve eğilme gerilmelerine maruz kalır ve bu durum tekerlek izi ile çatlama gibi deformasyonlara neden olabilir. Bu nedenle, bu tabakaların malzeme seçimi ve kalınlığı, yolun dayanıklılığı için kritik öneme sahiptir. Temel tabakası, sıkıştırılmış agregalar veya

ıslak karışım malzemelerden oluşur ve yükleri alttemel tabakasına aktarır. Alttemel tabakası ise granüler malzemelerden yapılmış olup, genellikle sadece düşey gerilmelere maruz kalır ve yüklerin zemine dağıtımında önemli bir rol oynar [111-112].

Doğal zemin, tüm yapının temelini oluşturur ve uygun şekilde sıkıştırılması gerekir. Zayıf zeminlerde, kireç veya çimento gibi katkı maddeleri ile zemin iyileştirilmesi yapılabilir. Esnek kaplamaların tasarımı, mekanistik-ampirik yöntemlere dayanır ve katmanlı elastik model, gerilim ve deformasyonların hesaplanmasında kullanılır. Araştırmalar, düşük kaliteli zeminlerde geosentetik malzemelerin kullanımının kaplama kalınlığını azaltarak maliyetleri ve çevresel etkileri düşürebileceğini göstermektedir. Ayrıca, geri dönüştürülmüş asfalt kaplama ve atık plastikler gibi malzemeler, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu malzemeler, uygun mekanik özelliklere sahip olduğunda geleneksel malzemelere alternatif olabilir, ancak kalite kontrolü ve uzun vadeli performansları konusunda çalışmalar devam etmektedir. Esnek kaplamalar, yükleri etkili bir şekilde dağıtarak kalıcı deformasyonları önler ve modern yol altyapısının temelini oluşturur [113-114].

Soğuk Karışım Asfalt:

0-40 °C aralığında üretilen ve uygulanan bir asfalt karışımıdır. Isıtma gerektirmediği için enerji tüketimini ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu özellik, CMA'yı çevre dostu bir seçenek haline getirmektedir. Özellikle küçük ölçekli onarım projelerinde, çukur tamirlerinde ve sıcak karışım tesislerine erişimin sınırlı olduğu uzak bölgelerde tercih edilmesini sağlamaktadır. Üretim sürecinde, agrega ile bağlayıcı ortam sıcaklığında karıştırılmaktadır, bu sayede enerjiden tasarruf edilerek maliyet düşürülmektedir [115-117].

Soğuk karışım asfaltların soğuk ve yağışlı havalarda uygulanabilirliği, Sıcak karışım asfaltların kullanılmadığı durumlarda önemli bir avantaj sağlamaktadır. Hafif ve orta yoğunluklu trafik bölgelerinde kaplama, temel ve alt temel katmanları için kullanılabilen ve uzak bölgelerde ekonomik ulaşım sorunlarının olduğu alanlarda avantaj sağlamaktadır. Ancak, soğuk karışım asfaltın performansı sıcak karışım asfalta kıyasla daha düşüktür; boşluk içeriği daha yüksektir ve nem duyarlılığı daha fazladır. Bu dezavantajlar, özellikle ağır trafik yükleri altındaki performansını etkilemektedir [116, 118-120].

Soğuk karışım asfalt üretimi dört farklı yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemler; sahada greyder ile karıştırma ve serme, merkezi tesislerde sabit plantlerde üretim ve sahaya taşıma, pugmill veya döner karıştırıcılarla agrega ve bağlayıcının

karıştırılması, ve taşınabilir ekipmanlarla sahada mobil plant karıştırması olarak sıralanmaktadır [117, 121-122].

Ilık Karışım Asfalt:

Ilık Karışım Asfalt, 100-140 °C’de üretilmekte ve yerleştirilmektedir. Ilık karışım asfaltlar, kimyasal katkı maddeleri, organik katkı maddeleri veya köpükleme teknikleri kullanılarak bağlayıcı viskozitesinin düşürülmesiyle üretilmektedir böylelikle karışım daha düşük sıcaklıklarda işlenebilir ve sıkıştırılabilir olmasını sağlamaktadır. Bu özellik, enerji tüketimini %20-75 oranında azaltır ve CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde düşürmektedir. Böylelikle çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Araştırmalar, Ilık karışım asfaltının sıcak karışım asfalta kıyasla %15-70 daha az emisyon ürettiğini göstermektedir. Ilık karışım asfalt, yol inşaatında giderek daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [123-125].

Ilık karışımın avantajları arasında düşük üretim sıcaklığı, enerji tasarrufu, düşük emisyonlar, daha güvenli çalışma koşulları ve daha uzun taşıma mesafesi yer alır. 2017 yılında, ABD’de asfalt karışımlarının %39’u ılık karışımlardan oluşmaktaydı, bu da teknolojinin yaygın kabulünü göstermektedir. Ilık karışım asfaltlar sıcak karışım asfaltlara kıyasla sıkıştırma, yaşlanma direnci ve düşük sıcaklık performansı açısından eşdeğer veya daha iyi mekanik özellikler sunmaktadır. Ancak ağır trafik altında dayanıklılık sorunları ve düşük sıcaklıklar nedeniyle su hasarına karşı hassasiyet gibi bazı sınırlamaları vardır. Günümüzde RAP gibi geri dönüştürülmüş katkı maddeleri ile bu dezavantajlar giderilmeye çalışılmaktadır [124-127].

Sıcak Karışım Asfalt:

Sıcak Karışım Asfalt (HMA), %95 agrega ve %5 asfalt çimentosundan oluşan bir karışımdır ve 150-180 °C sıcaklıklarda üretilmektedir. Sıcak karışım asfalt, yüksek trafik yoğunluğuna sahip yollar, otoyollar ve havaalanları için tercih edilmektedir, çünkü dayanıklılık, stabilite ve ağır yüklere karşı direnç sağlamaktadır. Üretim süreci, agregaların nemini gidermek için kurutulmasını, asfalt bağlayıcının ısıtılmasını ve ardından sabit veya mobil plantlerde karıştırılmasını içerir. Bu süreç, düzgün ve sağlam bir yüzey elde edilmesini sağlamaktadır ancak yüksek enerji tüketimi ve emisyonlar çevresel dezavantajlar yaratmaktadır. Araştırmalar, sıcak karışım asfalt üretiminin ton başına 28.8 kg CO₂ emisyonuna yol açtığını göstermektedir, bu da çevresel etkileri artırmaktadır [128-130].

Sıcak karışım asfaltın performansı, işlenebilirlik, yorgunluk direnci, stabilite, dayanıklılık, su hasarına, tekerlek izi oluşumuna ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı

direnç gibi faktörlere bağlıdır. Agrega özellikleri (yassılık, gradasyon, yüzey pürüzlülüğü) ve bağlayıcı tipi, bu özellikler üzerine doğrudan etki etmektedir. Sıcak karışım asfalt, polimer modifiye bağlayıcılar gibi katkı maddeleriyle özelleştirilebilmekte, bu da esnekliği ve dayanıklılığı arttırmaktadır. Sıcak karışım asfalt, dünya genelinde döşenmiş yolların %90'ından fazlasında kullanılan bir malzemedir ve güvenilir bir seçenek olarak kabul edilmektedir. Ancak, yüksek üretim sıcaklıkları nedeniyle enerji tüketimi yüksektir, bu da çevresel sorunlara yol açmaktadır.

Sıcak karışım asfalt üretimi, sabit veya mobil plantlerde gerçekleştirilmektedir. Süreç, agregaların ısıtılması, bağlayıcının viskozitesinin düşürülmesi ve karışımın finişer ile serilip sıkıştırılması adımlarını içermektedir. HMA, yüksek trafik yoğunluğuna sahip yolların inşaatında, otoyollarda ve havaalanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımıyla sürdürülebilir inşaat uygulamalarına katkıda bulunmaktadır [128, 131-132].

Esnek kaplama, rijit kaplama ve yarı rijit kaplamaların karşılaştırılması Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.2. *Kaplama tabakalarının karşılaştırılması [133]*

Özellikler	Esnek Kaplama	Rijit Kaplama	Yarı-rijit Kaplama
Tekerlek izine karşı direnç	Zayıf	İyi	İyi
Kayma direnci	İyi	Zayıf	İyi
Petrol ürünlerine karşı direnç	Zayıf	İyi	İyi
Nem hasarına karşı direnç	Zayıf	İyi	İyi
Bakım onarım	Kolay	Zor	Kolay
Servis ömrü	Düşük	Daha yüksek	Yüksek
Eğilme mukavemeti özellikleri	Düşük	Yüksek	Yüksek
Genleşme derzi	Gerekli değil	Gerekli (Sürekli rijit kaplamalar hariç)	Gerekli değil
Yapım ve trafiğe açılması	Saatler içinde	0.5-3 ay	24 saat içinde
İnşaat ve bakım maliyetleri	Düşük	Yüksek	Düşük

2. MATERİYAL

2.1. Agregas

Çalışma kapsamında Eskişehir bölgesinden temin edilen kalker agregası kullanılmıştır. Kullanılan agregalar geleneksel agrega deneyleri ile kontrol edilerek, fiziksel özellikleri belirlendikten sonra, agrega gradasyonu için Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTŞ) Aşınma tabakası Tip-1 olarak tanımlanan agrega dağılımı sınırlarının içinde olacak şekilde seçilmiştir. Şartnamedeki elek aralıklarının kullanılabilmesi için elek analizi ASTM C136 standardına göre üretilmiş elek seti ile yapılmıştır. Kaba agreganın özgül ağırlığı ASTM C127, ince ve filler agreganın özgül ağırlıkları ASTM C128 standartlarına göre belirlenmiştir. Agreganın yük altında aşınma direnci, Los Angeles aşınma direnci testi olarak da bilinen ASTM C535 standardına göre yapılmıştır. Donma-çözülme direnci kimyasal yöntemle ($MgSO_4$) ASTM C88 standardına göre gerçekleştirilmiştir [134-138]. Bu çalışmada kullanılan agrega gradasyonunu temsilen hazırlanmış agrega örneği Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Çalışmada kullanılan graniölometriye uygun agrega örneği

2.2. Bitüm ve Modifiye Bitüm

Bitüm, ham petrolün damıtılmasıyla elde edilen, genellikle oda sıcaklığında viskoz veya katı halde bulunan, uçucu olmayan bir hidrokarbon karışımıdır. Kimyasal olarak tolüen ve karbon disülfür (CS_2) gibi çözücülerde tamamen çözünebilen bitüm, ısıya maruz kaldığında yumuşar ve akışkan hale gelir. Yüksek adezyon ve kohezyon kapasitesine sahiptir. Yapışkan ve su geçirmez özellik gösterir [139].

Ticari kullanım açısından bitüm, çatı kaplama, kaplama karışımları ve endüstriyel ürünlerde yaygın bir şekilde kullanılan ekonomik bir termoplastik malzemedir. Asfalt betonunda düşük hacimlerde yer almasına rağmen, karışıma mukavemet ve viskoelastik özellikler kazandırarak önemli bir işlev görür [140].

Doğal ve pirojenik olarak oluşabilen bitüm, hem doğal kaynaklı hem de sentetik yollarla elde edilebilir. Uygulama alanlarına göre katı, yarı katı, sıvı veya gaz halinde bulunabilir. Bu özellikleri sayesinde bitüm, hem yol malzemesi olarak hem de endüstriyel kullanımlarda vazgeçilmez bir malzeme olarak öne çıkar [141].

Bu çalışmada baz bitüm olarak TÜPRAŞ rafinerisinden sağlanmış 50/70 penetrasyon sınıflı bitüm kullanılmıştır. Bitüm modifikasyonunda kullanılan PVC pencere imalatı esnasında ortaya çıkan pvc talaşının öğütülmesi yöntemiyle elde edilmiştir. Öğütülmüş PVC elenerek, 0.250 mm elekten geçen ve 0.063 mm elek üzerinde kalan dane çapındaki granül malzeme bitüm modifikasyonunda kullanılmıştır. Kullanılan PVC talaşı ve öğütülmüş PVC tozuna ait görsel ve fiziksel özellikler sırasıyla Şekil 2.2’de ve Tablo 2.1’de verilmiştir. PVC katkısının bitüm modifikasyonunda kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalarda modifikasyon sıcaklığı genellikle 160-190°C aralığında, karıştırma hızının ise 1000-2000 devir/dakika aralığında tercih edilmiştir. Çalışma kapsamında bitüm, elektrikli ısıtıcı üstüne yerleştirilmiş, sıcaklığı sürekli olarak 175-180°C’de tutulan bir beher içinde 1500 devir/dakika hızda dönen bir yüksek kesme hızlı karıştırıcı yordamıyla ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında 90 dakika süresince karıştırılarak modifiye edilmiştir.



Şekil 2.2. Çalışmada kullanılan atık PVC örneği

Tablo 2.1. Çalışmada kullanılan atık PVC'nin özellikleri

Özellik	Değer
Görünüm	İnce-Beyaz toz
Kimyasal bileşim	C_2H_3Cl
Nem ve uçuculuk (%)	<%0,4
Yoğunluk (gr/cm ³)	0,5
Plastifiyan emilimi (%)	>85
Ksalinasyon kalıntısı (%)	<%0.04
0,250 mm toz kalıntısı (%)	<1
0,063 mm toz kalıntısı (%)	>95
Vinil klorid kalıntısı (ppm)	<1
Beyazlık (%)	>74

3. METOD

3.1. Agregada Deneyleri

Agregaların karayolu üst yapısında kullanılabilmesi için fiziksel ve kimyasal özelliklerini tayin etmek amacıyla, seçilen numuneler ile özelliklerinin belirlenmesi ve boyutlarına göre sınıflara ayrılması gerekmektedir. Bu amaçla çalışmada kullanılan agrega özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılacak agrega bir takım testlere tabi tutulmuştur. İlgili deneyler aşağıda verilmiştir.

- Elek Analizi (Dane Dağılımı) Deneyi
- Kaba Agregada Özgöl Ağırlık ve Su Emme Deneyi
- İnce Agregada Özgöl Ağırlık ve Su Emme Deneyi
- Filler Agregada Özgöl Ağırlığı Deneyi
- Los Angeles (Aşınma Kaybı) Deneyi
- Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) Deneyi
- Metilen Mavisini Deneyi

3.1.1. Elek analizi deneyi

Agregada numunesinin, dane boyutu dağılımını belirlemek amacıyla, standart eleklerin kullanıldığı bir yöntemdir. Bu deneyde, eleklerden geçen agreganın toplam agrega miktarına oranı yüzde cinsinden hesaplanarak, agreganın boyut dağılımı analiz edilmektedir. Elek analizi, Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ 2013) limit Tip-1 esaslarına göre gerçekleştirilmekte olup, özellikle sıcak karışım asfalt deneylerinde kullanılması gereken uygun agrega boyutlarının ayrıştırılması ve standartlara uygun gradasyonun elde edilmesi amacıyla uygulanır.

Kullanılan Deney Aletleri:

- Elekler: TS1227'ye uygun elek serisi.
- Teraziler: En az 0.01 hassasiyete sahip bir terazi.
- Etüv: Deney araç ve gereçlerine uygun, 110 ± 1 °C'ye ayarlanabilen etüv.

Deneyin Yapılışı:

Agregada numunesinin dane boyutu dağılımını belirlemek için öncelikle numune homojen bir hale gelene kadar karıştırılır. Homojenleştirilen numune, 110 ± 5 °C sıcaklığa ayarlanmış bir etüvde 24 saat boyunca kurutulur, ardından oda sıcaklığına getirilerek tartılır. Elekler, açıklık büyüklüğüne göre en küçüğünden en büyüğüne doğru sıralanır ve elek sarsma makinesine yerleştirilir. Numune, en üstteki eleğin içine konularak eleme işlemine başlanır. Eleme işlemi her elek için yaklaşık 2 dakika sürer.

Elekten geçen malzeme miktarı, elek üzerinde kalan malzeme miktarının %1'inden az olduğunda eleminin yeterli olduğu kabul edilir. Eleme işlemi tamamlandıktan sonra, her elekte kalan malzeme 0,1 gram hassasiyetinde bir terazi ile tartılır. Elek sarsma makinesi yerine, eleme işlemi elle de yapılabilir ve süreç benzer şekilde uygulanır. Bu yöntemle agrega numunesinin boyut dağılımı doğru ve standartlara uygun şekilde belirlenir.

Deney Sonuçlarının Hesaplanması:

$$P_s = W_s/W_i \times 100 (\%) \quad (2.1)$$

P_s = Herhangi bir deney için elek üstünde kalan yüzde cinsinden malzeme oranı

W_s = Herhangi bir elek için elek üzerinde kalan malzemenin gram cinsinden miktarı

W_i = Deney numunesi miktarının gram cinsinden miktarı

3.1.2. İri agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi

4.75 mm üzerinde kalan iri agregaların hacimsel özgül ağırlığını, yüzey kuru suya doymuş özgül ağırlığını, zahiri özgül ağırlığını ve su emme miktarını belirlemek için kullanılır. Özgül ağırlık agreganın birim hacimdeki ağırlığının, aynı hacimde ve 25°C'deki suyun ağırlığına oranını ifade eder. Üç çeşit özgül ağırlık türü vardır.

Zahiri özgül ağırlık (SG_a): Agreganın belirli sıcaklıkta geçirimsiz boşluklarını içeren birim hacminin yoğunluğudur.

Hacim özgül ağırlık (SG_b): Agreganın belirli bir sıcaklıkta geçirgen olan ve olmayan boşluklarını içeren birim hacminin yoğunluğudur.

Yüzey kuru suya doymuş özgül ağırlık: Agreganın belirli bir sıcaklıkta doymuş yüzey kuru agreganın geçirgen olan ve olmayan boşluklarını içeren birim hacminin havadaki ağırlığının yoğunluğudur.

Kullanılan Deney Aletleri:

Terazi: 0.1 gram hassasiyete sahip, su içinde ölçüm yapabilen terazi.

Kafes örgülü sepet: 4.75 mm boyutundan daha küçük göz açıklığına sahip paslanmaz sepet.

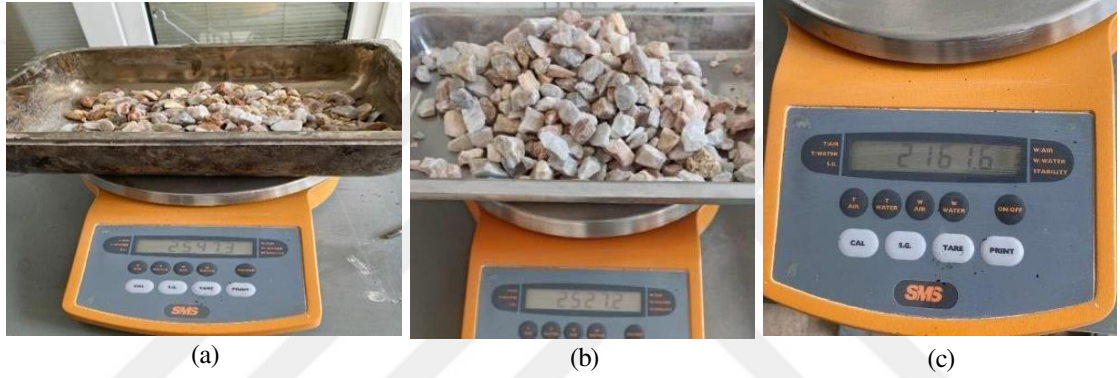
Kova: Tel sepet ile tartım yapılabilmesi için, yeterli büyüklükte bir kova.

Kurutma bezleri: Su emmek için kullanılmak üzere bez, havlu veya havlu peçete.

Özgül ağırlık sehpa: Kova, terazi ve kafes örgülü sepeti bir araya getirebilen, yüksekliği ayarlanabilir sehpa.

Deneyin Yapılışı:

Belirlenmiş gradasyona paralel, 2 kg agrega numunesi alınır ve yıkanır. Numuneler 24 saat su içerisinde bekletilir. 24 saatin ardından sudan çıkarılan numuneler kurutma bezi ile yüzey kuru, suya doymun hale getirilir. Bu halde tartım yapılarak M_{SSD} (Agreganın suya doymun yüzey kuru ağırlığı) elde edilir. Daha sonra bu numuneler tel sepet yardımı ile agrega numunelerini 5 cm geçecek şekilde su dolu kova içerisine daldırılır. Agregada daneleri arasında hava boşluğu kalmaması için sepet birkaç defa sarsılabilir. Böylece M_s (Agreganın sudaki ağırlığı) bulunur. Numuneler su içerisinde çıkarılır 110 °C’de etüvde kurutulur. Oda sıcaklığında değişmez ağırlığa ulaştığında ise tartılarak M_k (Kuru agrega ağırlığı) bulunur. Deneyin yapılışı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. İri agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi; a) Suya doymun kuru yüzey ağırlığı, b) Sudaki ağırlık, c) Kuru ağırlık

Deney Sonuçlarının Hesaplanması:

$$SE = \frac{M_{SSD} - M_k}{M_k} \times 100 \quad (3.2)$$

M_k : Agreganın kuru ağırlığı (gr)

M_{SSD} : Agreganın suya doymun yüzey kuru ağırlığı (gr)

M_s : Agreganın sudaki ağırlığı (gr)

3.1.3. İnce agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi

Bu deney 4.75 mm ile 0.075 mm elekler arasında kalan ince agregaların özgül ağırlık ve su emme oranını belirlemek amacıyla yapılmaktadır.

Kullanılan Deney Aletleri:

Piknometre: 500 veya 1000 ml kapasiteli piknometre

Terazi: 0.1 gram hassasiyete sahip, su içinde ölçüm yapabilen terazi.

Numune tepsi: Geniş ve sığ bir tepsi.

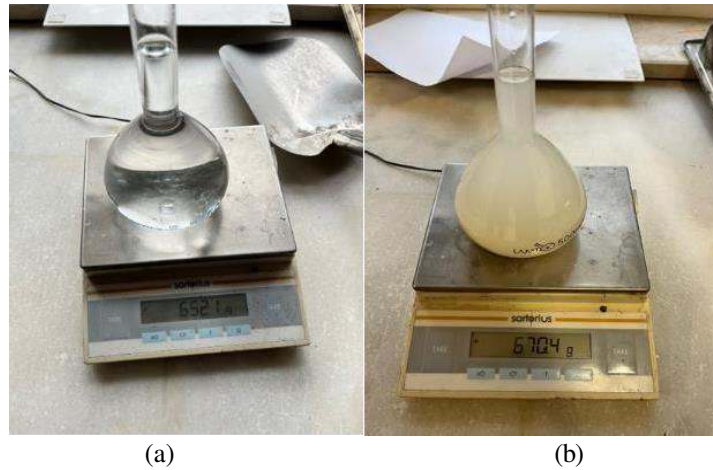
Metal koni kalıp: 40 ± 3 mm üst iç çapa, 90 ± 3 mm alt iç çapa ve 75 mm yüksekliğe sahip olan kesik koni biçimindeki metal kalıp.

Metal sıkıştırıcı: Sıkıştırma amacıyla kullanılmak üzere dairesel kesitli çubuk.

Sıcak hava kaynağı: Numuneyi kurutmak amacıyla kullanılmak üzere gerekli ısıyı sağlayabilecek ısı kaynağı.

Deneyin Yapılışı:

Belirlenmiş gradasyona paralel 0.075 mm – 4.75 mm aralığındaki ince agregadan oluşan 1 kg numune alınır. Numune 24 saat su içerisinde bekletilir. Sudan çıkarılan numuneler sıcak hava kaynağı yardımı ile yüzey kuru, suya doymun hale getirilir. Yüzey kuru, suya doymun hal koni metodu ile belirlenir. Koni içerisine, numuneler 3 tabaka halinde, her tabaka metal sıkıştırıcı yardımıyla 25 vuruş ile sıkıştırılır. Sıkışan numuneler, koninin ters çevrilmesiyle tepsi üzerine konulur. İnce kesitli mala yardımıyla, yığılan agrega ikiye bölünür. Eğer numune hala kendini tutuyor ve dağılmıyorsa kurutma işlemine devam edilir. Bu işlem numune kendini bırakana kadar devam eder. Bu şekilde yüzey kuru, suya doymun hal elde edilir. Bu numunenin tartılmasıyla M_{SSD} (Agreganın suya doymun yüzey kuru ağırlığı) elde edilir. Yüzey kuru, suya doymun numuneden 500 gr alınır. Piknometreye yerleştirilir, bu haldeyken piknometre tartılır. Numune üzerine piknometre çizgisine kadar su eklenir. Piknometre içerisinde boşluk kalmaması amacıyla, piknometre el ile ileri geri sarsılır. Numunenin yerleşmesi sağlanır. Su çizgi altında kaldıysa çizgiye kadar su ilave edilir ve tartılır. Bu işlemden sonra numuneler piknometre içerisinden çıkarılarak 110°C 'ye ayarlanmış etüve yerleştirilerek kurutulur. Oda sıcaklığında değişmez ağırlığa ulaştığında kuru agrega ağırlığı bulunur. Deneyin yapılış aşamaları Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. İnce agrega özgül ağırlık ve su emme deneyinde; a) Piknometre + su, b) Piknometre + su + numune

Deney Sonuçlarının Hesaplanması:

$$SE = \frac{(C-A)-E}{E} \quad (3.3)$$

A= Piknometre ağırlığı (gr)

B= Piknometre + su ağırlığı (gr)

C= Piknometre + yüzey kuru suya doymun numune ağırlığı (gr)

D= Piknometre + yüzey kuru suya doymun numune + su ağırlığı (gr) E= Kuru numune ağırlığı (gr)

3.1.4. Filler agregata özgül ağırlık deneyi

0.075 mm elekten geçen filler agregaların özgül ağırlığını belirlemek amacıyla kullanılır.

Kullanılan Deney Aletleri:

Piknometre: 500 ml veya 1000 ml kapasiteli piknometre

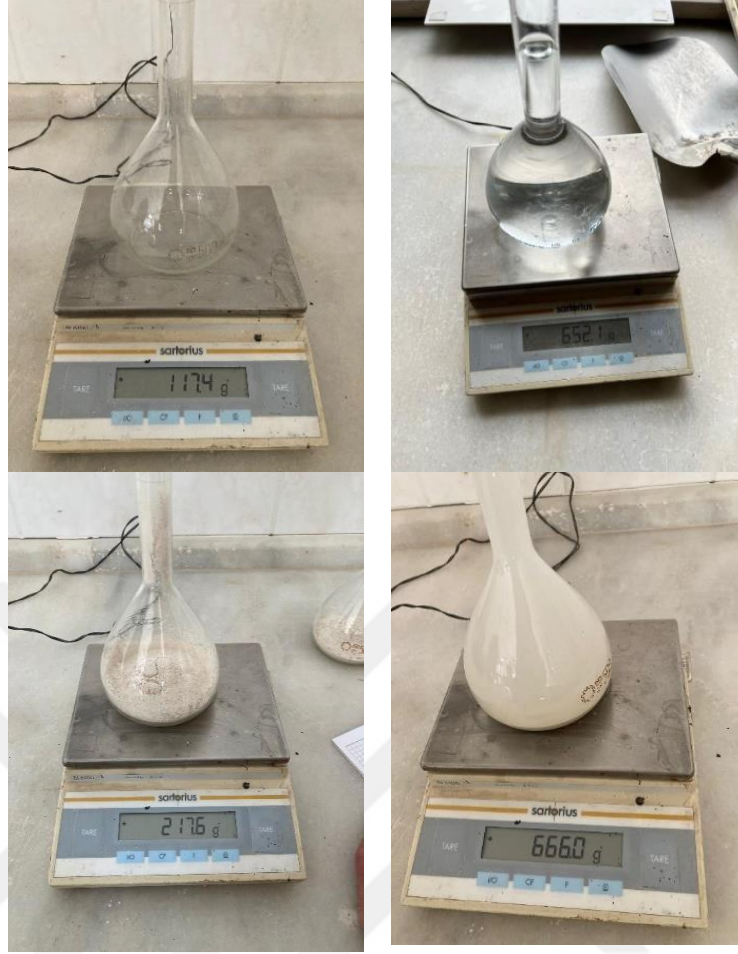
Terazi: 0.1 gram hassasiyete sahip, su içinde ölçüm yapabilen terazi.

Vakum pompası: Ortam basıncını 3.0 ± 0.3 kPa'ya düşürebilen vakum pompası.

Su banyosu: Sıcaklığı ayarlanabilir su banyosu.

Deneyin Yapılışı:

Belirlenmiş gradasyona paralel olarak 0.075 mm'lik elekten geçen agregadan 100 gram alınır. Değişmez ağırlık sağlanana kadar 110°C 'lik etüve yerleştirilir. Piknometre, kapağıyla birlikte tartıldıktan sonra, numuneler piknometre içerisine konularak tekrar tartılır. Sonrasında piknometre çizgisine kadar su eklenir. El ile sarsılarak numuneler arası boşluk azaltılır. Vakum pompası kullanılarak, hava boşluğu kalmayacak şekilde, kabarcıklar kaybolana kadar vakumlanır. Su çizginin aşağısında kaldıysa su ilavesi yapılır ve tekrar tartılır. Deneyin aşamaları Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Filler agregata özgül ağırlık deneyi aşamaları

Deney Sonuçlarının Hesaplanması:

$$SGa = \frac{E}{(B-A)+(D-C)} \quad (3.4)$$

A= Piknometre ağırlığı (gr)

B= Piknometre + su ağırlığı (gr)

C= Piknometre + yüzey kuru suya doymuş numune ağırlığı (gr)

D= Piknometre + yüzey kuru suya doymuş numune + su ağırlığı (gr) E= Kuru numune ağırlığı (gr)

3.1.5. Los Angeles (aşınma) deneyi

Los Angeles deneyi doğal veya yapay agregaların aşınmaya karşı gösterdiği direnci belirlemek amacıyla yapılan bir deneydir. Deney hem kaba hem de ince agregalar için tasarlanmıştır ancak genellikle kaba agregalar için tercih edilir. Aşınma kaybı değeri % cinsinden hesaplanır.

Kullanılan Deney Aletleri:

Los Angeles aşınma kaybı deney makinesi: İçi boş çelik bir tamburdan oluşan, 71.1 ± 0.5 cm iç çapında, 12 mm et kalınlığında, eni 50.8 ± 0.5 mm iç uzunluğunda, her iki tarafı kapalı ve dakikada 30 – 35 dönüş yapabilme yeteneğine sahip aşındırma aletidir.

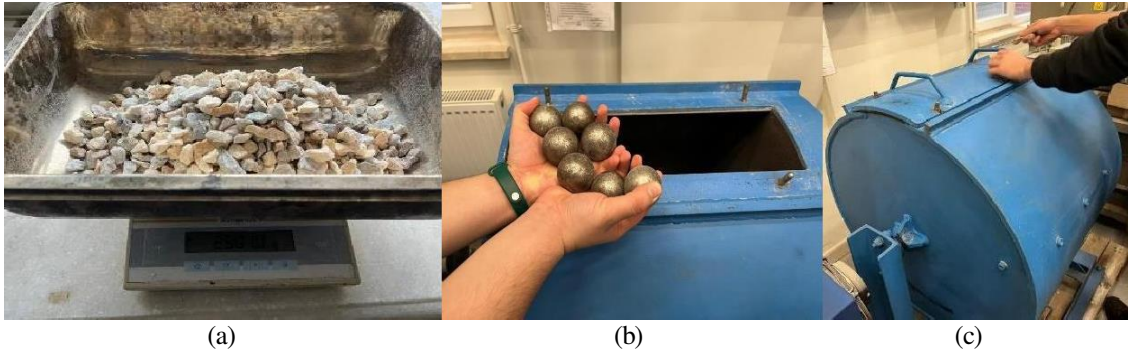
Aşındırma bilyeleri: Çapı 4.5 – 4.9 cm, ağırlığı 390-450 gr olan dökme demir veya çelik bilyeler.

Tepsi: Deneyden sonra malzemeleri ve bilyeleri toplamak için gerekli tepsidir. Elek: 1.6 mm açıklığına sahip elek.

Terazi: 0.1 gram hassasiyete sahip, su içinde ölçüm yapabilen terazi.

Deneyin Yapılışı:

Deney numuneleri bilyelerle birlikte tambura atılır. Hızı dakikada 30 – 35 devir olacak şekilde 100 devir yaptırılır. Devir tamamlandıktan sonra numuneler dışarı alınarak tepsiye dökülür ve 1.6 mm'lik elekten elenir. Elek üstünde kalan agrega tartılır. Elek üstünde kalan ve elekten geçen agregalar ve bilyeler tekrar tambura konur. A, B, C, D tipi numunelerde 100 devire ek olarak 400 devir, E, F, G tipi numunelerde ise 100 devire ek 900 devir daha yaptırılır. Tambur açılarak numuneler tepsiye alınır ve tekrar 1.6 mm'lik elekten elenir. Elek üstü numune miktarı tartılarak tespit edilir. Deney aşamaları Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Los Angeles aşınma deneyi aşamaları

Deney Sonuçlarının Hesaplanması:

$$LA1 = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 (\%), LA2 = \frac{W_1 - W_3}{W_1} \times 100 (\%) \quad (3.5)$$

W_1 : Numunenin etüvde kurutulduktan sonraki ağırlığı (gr)

W_2 : Numunenin 100 devir sonunda elek üstünde kalan miktarı (gr)

W_3 : Numunenin 500 veya 1000 devir sonunda elek üstünde kalan miktarı (gr)

LA_1 : 100 dönüş sonunda Los Angeles aşınma oranı (%)

LA₂ : 500 veya 1000 dönüş sonunda Los Angeles aşınma oranı (%)

3.1.6. Agregada metilen mavisi deneyi

Metilen mavisi deneyi, agregada karışı içerisindeki kil ve silt miktarını belirlemek amacıyla yapılır.

Kullanılan Deney Aletleri:

Karıştırıcı: 400 – 600 devir/dakikaya ayarlanabilen, yüksek hızlı karıştırıcı.

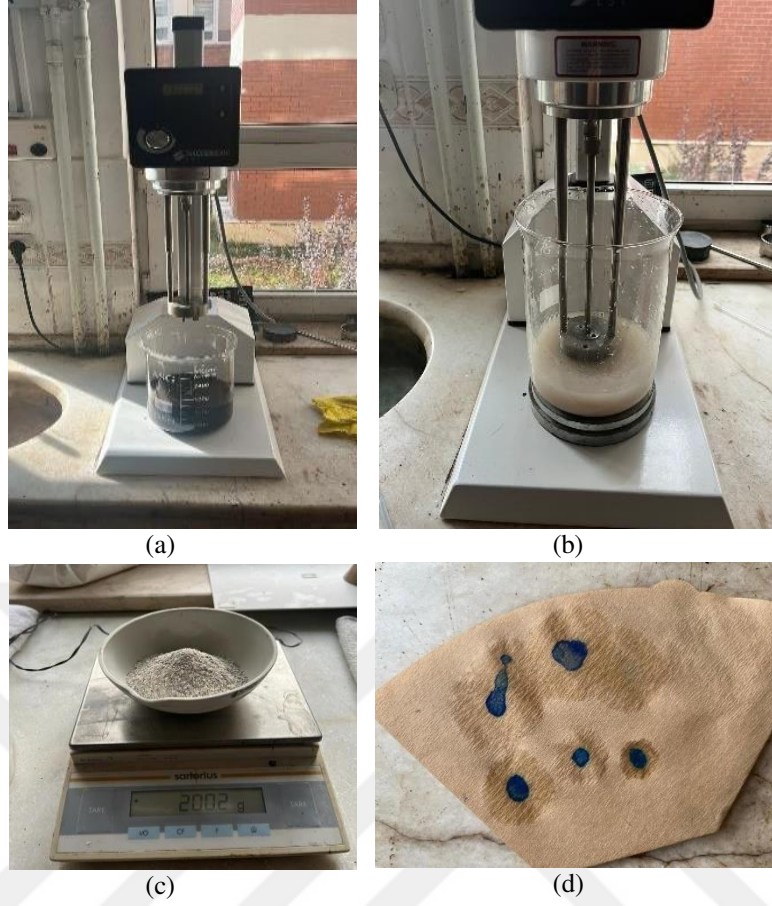
Cam beher: 1000 ml kapasiteli cam veya plastik beher

Terazi: 0.1 gram hassasiyete sahip, su içinde ölçüm yapabilen terazi.

Filtre kağıdı: Kalınlığı 0.2 mm olan, 95gr/m² alan ağırlığına sahip filtre kağıdı. Cam baget: 20 – 30 cm uzunluğunda, 8 mm çapında ucu yuvarlatılmış cam çubuk. Elek: 2 mm göz açıklığına sahip elek.

Deneyin Yapılışı

1000 gr saf suya 10 gr metilen mavisi tozu eklenerek çözelti hazırlanır. 600 devir/dakika hızda 45 dakika karıştırılır. Çözelti 24 saat bekletilir. Çözelti 28 gün içerisinde kullanılmalıdır. 2 mm'lik elekten geçen 200 gram agregada hazırlanır. Daha sonra 500 gram saf su içerisine 200 gram agregada 600 devir/dakika hızda 45 dakika karıştırılır. Agregada su karışımına 5 ml metilen mavisi çözeltisi eklenir. 400 devir/dakika hızda 1 dakika karıştırılır. Cam baget karışıma daldırılır ve filtre kağıdına 1 damla damlatılır. Filtre kağıdına her 5 ml metilen mavisi çözeltisi eklenmesi ile damlatma işlemi tekrarlanır. Deneyin aşamaları Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Agrega metilen mavisi deneyi aşamaları

Deney sonuçlarının hesaplanması:

$$MB = \frac{V_1}{M_1} \times 10 \quad (3.6)$$

MB: Metilen mavisi miktarı (gr/gr)

V₁: Enjekte edilen toplam metilen mavisi miktarı (ml)

M₁: Agrega miktarı (gr)

3.1.7. Donma-çözülme deneyi

Laboratuvar ortamında Sodyum Sülfat (Na₂SO₄) veya magnezyum sülfat (MgSO₄) çözeltileri kullanılarak agregaların tekrarlı donma çözülme etkilerine maruz kaldığında nasıl davrandığını belirlemek amacıyla uygulanır.

Kullanılan Deney Aletleri:

Düşük sıcaklık kabini: Yeterli düşük sıcaklıkları homojen halde sağlayabilen kabin.

Metal kutular: 2000 ml kapasiteli paslanmaz, kapaklı metal kaplar. Terazisi: 0.1 gram

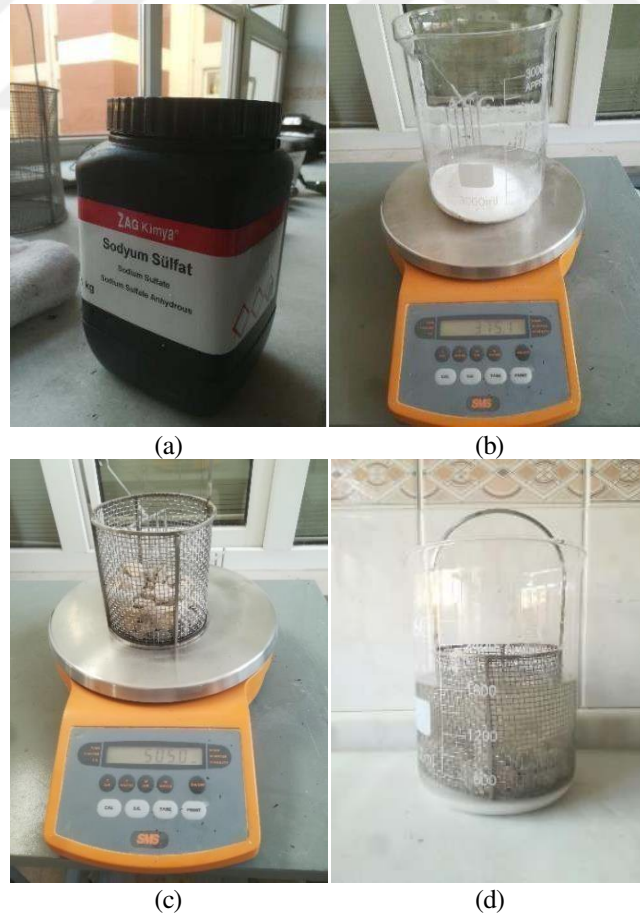
hassasiyete sahip, su içinde ölçüm yapabilen terazi. Elek: 31.5 mm – 2 mm arasında göz açıklığına sahip elekler.

Etüv: Deney araç ve gereçlerine uygun, 110 ± 1 °C'ye ayarlanabilen etüv.

Tel sepet: Agregada numunelerini çözelti içinde tutmak için kullanılan tel sepet. Çözelti kovası: Numune hacminin 5 katı hacimde kova.

Deneyin Yapılışı:

Kimyasal donma- çözülme deneyi için öncelikle 1 litre suya 250 gr Na_2SO_4 tuzu veya 350 gr MgSO_4 tuzu eklenerek bir çözelti hazırlanır. Daha sonra agrega dane dağılımını temsil eden 2 adet deney numunesi hazırlanır ve çözelti kovasına yerleştirilir. Numuneler, yaklaşık 17 saat boyunca çözelti kovasındaki çözelti içerisinde bekletilir. Süre tamamlandığında, numuneler çözeltiden çıkarılır ve 110 °C'deki etüvde iki saat kurutulur. Ardından, yaklaşık 5 saat oda sıcaklığında bekletilir ve bu işlem beş kez tekrarlanır. Son döngü tamamlandıktan sonra numuneler yıkanır ve 110 °C'de değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar etüvde tekrar kurutulur. Son olarak, tartım işlemi gerçekleştirilir. Deney aşamaları Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Donma-çözülme deneyi aşamaları

Deney Sonuçlarının Hesaplanması:

$$FTR = \frac{W_i - W_s}{W_i} \times 100 \quad (3.7)$$

FTR : Donma-çözülme kaybı (%)

W_i : Başlangıçtaki numune miktarı (gr)

W_s : Deney sonundaki numune miktarı (gr)

3.2. Bitüm Deneyleri

Bitümün karayolu çalışmalarında kullanılabilmesi için fiziksel ve kimyasal özelliklerini tayin etmek ve şartname sınırlarına göre uygunluğuna bakmak amacıyla değerlendirilmesi gerekir. Bu yüzden çeşitli deneyler uygulanır.

Bu çalışma kapsamında uygulanan bitüm deneyleri aşağıda verilmiştir:

- Bitümün özgül ağırlık deneyi
- Yumuşama noktası deneyi
- Penetrasyon deneyi
- Bitümün viskozite deneyi
- Düktilite deneyi
- Dönel ince film ısıtma kaybı deneyi (RTFOT)

3.2.1. Bitüm özgül ağırlık deneyi

Bitümün özgül ağırlığını belirlemek amacıyla yapılır.

Kullanılan Deney Aletleri:

Piknometre: 500 ml hacminde cam piknometre

Su banyosu: ± 0.5 °C duyarlılıkla ayarlanabilen, sıcaklık ölçebilen su banyosu

Terazi: 0.1 mg hassasiyetle tartım yapabilen terazi.

Deneyin Yapılışı:

Piknometre tartılarak başlanır. Piknometre çizgisine kadar su ile doldurulur, ağzı kapatılarak tartılır. Piknometre içine bitüm konularak ısıtılır. Bu işlem sırasında bitümün buharlaşmaması istenir. Üzerine damıtılmış su eklenir. Ağzı kapatılan piknometre $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 'de 30 dakika bekletilir. Piknometre dışı tamamen kurutularak tartım yapılır. Deneyin yapılışı Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Piknometre deneyi

Deney Sonuçlarının Hesaplanması:

$$SGb = \frac{E}{(B-A)/(D-C)} \quad (3.8)$$

SG_b : Bitüm özgül ağırlığı (gr/cm^3)

A : Piknometre ağırlığı (gr)

B : Piknometre + su ağırlığı (gr)

C : Piknometre + bitüm ağırlığı (gr)

D : Piknometre + bitüm + su ağırlığı (gr)

E : Sade bitüm ağırlığı (gr)

3.2.2. Yumuşama noktası deneyi

Bitümün hangi sıcaklıkta akmaya başlayacağını, sıcaklık karşısındaki davranışlarını belirlemek amacıyla yapılan deneydir

Kullanılan Deney Aletleri:

Isıtıcı: Su ısıtıcısı

Su: Distile su.

Halkalar: İki adet pirinç halka.

Bilyeler: 9.5 ± 0.05 mm çaplı iki adet çelik bilye

Çelik sehpa: Numune dökülürken halkaları sabit tutabilmek için gerekli sehpa

Bilye kılavuzlama aparatı: Bilyelerin sabit durmasını sağlamak için aparat.

Halka ve termometre düzeneği: Termometre ve iki adet halkayı koyabilmek için sabit düzene.

Beher: 600 veya 800 ml'lik cam beher.

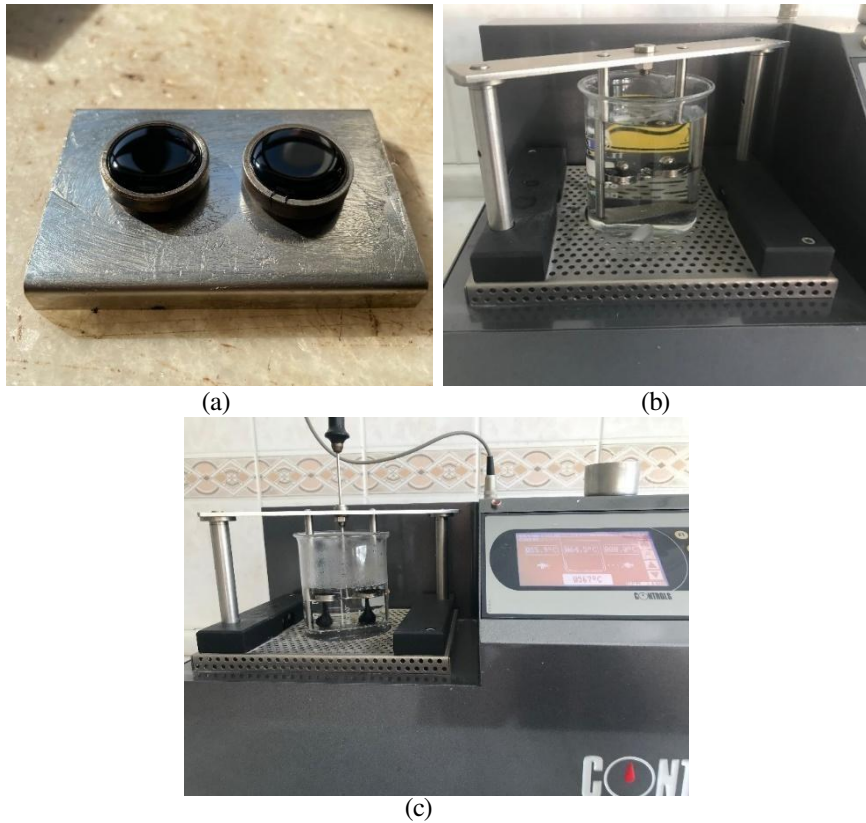
Karıştırıcı (balık): Beher içinde homojen sıcaklık sağlamak için beherin dibine yerleştirilen, dönen bir miktarlı çubuk.

Termometre: Uygun aralıkta derecelendirilmiş cıvalı termometre.

Deneyin Yapılışı:

Deneyde kullanılacak bitüm, yumuşama noktasının $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'yi geçmeyecek şekilde etüvde ısıtılır. Çelik sehpanın yüzeyine, bitümün kimyasal yapısını bozmayacak şekilde ince bir vazelin tabakası sürülür. Bitüm, halkalar içine dikkatlice dökülür ve halkalar oda sıcaklığında 30 dakika boyunca bekletilir. Başlangıç sıcaklığı $5 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan bir cam beherin içine su eklenir ve bu beher, karıştırıcı beherin içine yerleştirilir. Bitümle dolu halkalar üzerine bilye sabitleme aparatı takılır ve üzerine bilyeler yerleştirilir. Bu düzene, termometre ile birlikte karıştırıcı beherin içine yerleştirilir ve beher, ısıtıcı üzerine konur. Su sıcaklığı, ısıtıcı tarafından dakikada $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ artacak şekilde ayarlanır.

Halkalardaki bitüm, beherin alt kısmına değdiği anda, bu sıcaklık değeri termometre ile kaydedilir. Deney aşamaları Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Yumuşama noktası deneyi aşamaları

Deney Sonuçlarının Hesaplanması:

Okunan değerlerin ortalaması alınarak yumuşama noktası bulunur.

3.2.3. Penetrasyon deneyi

Standart uçlu iğnenin, 25 °C sıcaklıkta, belirli zaman diliminde ve belirli yük altında, düşey yönde bağlayıcıya batma miktarı tespit edilerek bağlayıcının sertliğinin ve kıvamlılığının belirlenmesi için gerçekleştirilen bir deneydir.

Kullanılan Deney Aletleri:

- Penetrasyon cihazı: Penetrasyon değerinin belirlemek için standart uçlu iğne ve batma miktarını tespit edebilecek donanımına sahip, kalibre kontrollü yapılmış bir cihaz.
- Standart uçlu iğne: Silindirik ve paslanmaz çelikten imal edilmiş, boyu 51 mm çapı ise 1-1,02 mm olan bir iğne.
- Numune kabı: Derinliği 35mm, iç çapı ise 55-70 mm arasında kalacak şekilde cam veya metalden imal edilmiş silindirik bir kap.
- Taşıma kabı: Numune kabının konulduğu, minimum 90 cm iç çapa ve 55 mm yüksekliğe sahip olan metal veya camdan üretilmiş taşıma kabı.
- Su banyosu: Sıcaklığı 25°C'ye ayarlanabilen, delikli sehpa ya sahip su banyosu.

Deneyin Yapılışı:

Numune, yumuşama noktası sıcaklığı 90 °C'yi geçmeyecek şekilde ısıtıldıktan sonra penetrasyon kaplarına dökülerek iki adet numune hazırlanır. Numuneler, oda sıcaklığında 1 ila 1.5 saat kadar soğumaya bırakılır. Bu sürenin sonunda, numuneler 25 °C'deki su banyosuna yerleştirilerek yaklaşık 90 dakika bekletilir. Su banyosunda bekleyen numune, taşıma kabına konarak penetrasyon cihazına yerleştirilir. Temizlenmiş bir penetrasyon iğnesi, numunenin yüzeyine batmayacak şekilde cihazın içine yerleştirilir. İğnenin doğru şekilde yerleştiğinden emin olduktan sonra, vida sıkılır ve iğnenin 100 gramlık bir yük alması sağlanır. Ardından, numune 5 saniye boyunca serbest düşmeye bırakılır ve bu süre sonunda penetrasyon değeri kaydedilir. Bir numune için, iğne numuneye, kenarları arasında yaklaşık 1 cm uzunluğunda eşkenar bir üçgen oluşturacak şekilde batırılır ve üç ayrı okuma yapılır. Her okuma için iğne temizlenerek kullanılmalıdır.

Deney Sonuçlarının Hesaplanması:

Ölçümlerin aritmetik ortalaması alınır. Milimetrenin onda biri cinsinden değer alınır.

3.2.4. Dönel viskozite deneyi

Bitümün kullanılacağı asfalt betonu kaplamalarının performansına etki eden önemli özelliklerinden biri kıvam özelliğidir. Bu deney, bitümün farklı sıcaklıklarda akmaya karşı olan direncini yani viskozitesini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Viskozite değeri, sıcaklık ile ters orantılıdır. Viskozite birimi olarak pascal saniyedir (Pa.s). Dönel viskozimetre deneyinde, Brookfield termosel viskozimetre cihazı kullanılmaktadır.

Kullanılan Deney Aletleri:

Brookfield dönel viskozimetre cihazı: Brookfield viskozimetreleri için genellikle 27 No.lu başlık ve 20 devir/dakika hız tercih edilmektedir. Bu çalışmada da bu başlık ve dönüş hızı değerleri kullanılarak deney gerçekleştirilmiştir.

Deneyin Yapılışı:

Deney aletine bitüm numunesi aktarılır. Deney sırasında kullanılan mil (spindle) aparatı, bitüm numunesinin içine doğru aşağı yönde hareket ettirilir ve yoğunluk ölçümü için cihaz yardımıyla döndürme gerçekleştirilir. Kullanılan mil deney aletini standardize edilen kayma hızında döndürebilmek amacıyla gereken tork ölçülerek, bitüm numunesinin viskozitesine çevrilir. Viskozitenin Pa.s (paskal saniye) biriminde çıkan değer ekran üzerinde sonuçlanmaktadır, 142. Deneyde kullanılan Brookfield dönel viskozimetre cihazı Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9. Brookfield dönel viskozimetre cihazı

3.2.5. Düktilite deneyi

Bitümün yavaş etkiyen yükler altında cm cinsinden uzama miktarının belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır.

Kullanılan Deney Aletleri:

- Düktilite cihazı: Standart kalıpta hazırlanan deney numunesini her iki ucundan dakikada 5 cm hızla çekebilen deney cihazı.

- Su banyosu: Sıcaklığı 25°C'ye ayarlanabilen, numune kabını suyun yüzeyinden en az 10 cm derinlikte tutabilecek delikli sehpa donanımına sahip olan su banyosu.

- Kalıp: Standartlara uygun olan 3 adet düktilite kalıbı.

Deneyin Yapılışı:

Bitüm, yumuşama noktası sıcaklığı 90 °C'yi geçmeyecek şekilde ısıtılır ve düktilite kaplarına dökülerek üç adet numune hazırlanır. Hazırlanan numuneler, yaklaşık 25 °C'deki su banyosunda 30 dakika boyunca bekletilir. Su banyosundan çıkarılan numunelerin, kalıplardan taşan kısımları varsa, maket bıçağı gibi kesici bir aletle temizlenir. Ardından, numuneler tekrar 25 ± 0.5 °C sıcaklığındaki su banyosuna yerleştirilir ve yaklaşık 1.5 saat bekletilir. Bu süre sonunda, numunelerle birlikte kalıplar, delikli düktilite cihazına yerleştirilir. Cihazda numuneler, dakikada 5 cm hızla çekilerek kopana kadar bu işlem devam ettirilir. Düktilite cihazı üzerindeki cetvel ile kopma anındaki uzama miktarı ölçülür ve bu değer santimetre cinsinden kaydedilir.

Deney Sonuçlarının Hesaplanması:

Üç adet numune değerinin aritmetik ortalaması alınarak düktilite değeri belirlenir.

3.2.6. Dönel ince film ısıtma kaybı (RTFOT) deneyi

Bitümlü sıcak karışımının oluşturulması ve yapımı aşamasında bitümün yaşlanmasını anlayabilmek için RTFOT deneyi test edilmektedir. Dönel ince film ısıtma kaybı deneyi, yarı katı bitüm veya modifiye edilmiş bitüm numunelerini dönel tablaya yerleştirerek, ısı ve havanın malzeme üzerindeki sonuçlarını test etmek amacıyla dizayn edilmiştir.

Kullanılan Deney Aletleri:

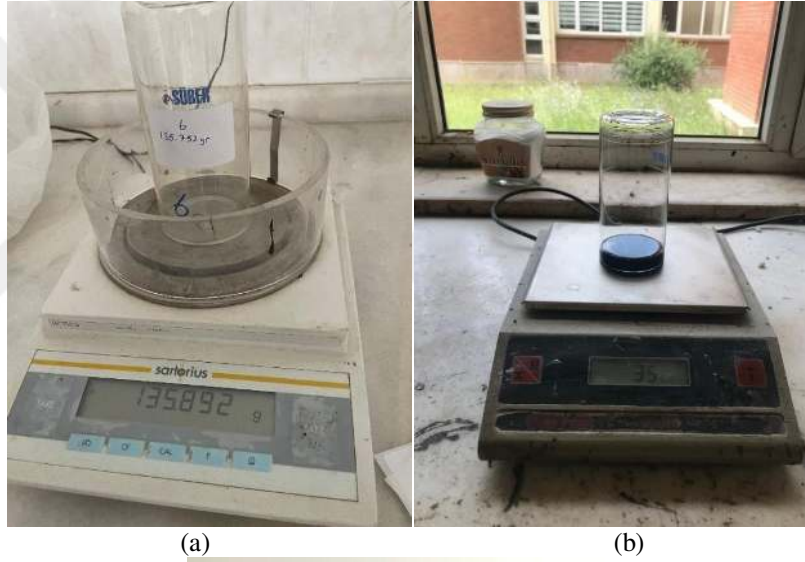
- RTFOT Cihazı (Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Cihazı): Bitüm numunelerinin ısıtıldığı ve döndürüldüğü ana cihazdır. Cihazda, döner tabla üzerinde ince bir film halinde yayılan bitüm, belirli bir sıcaklıkta ısıtılır ve oksidasyona uğratılır. Cihazda sıcaklık genellikle 163 °C'ye ayarlanır ve numuneler dakikada 15 devir hızla döner.

- Hassas Terazî: Cam kapların ve bitüm numunelerinin ağırlıklarını ölçmek için 0,1 mg hassasiyetli terazî.

- Cam Kaplar (Deney Kapları): Bitüm numunelerinin yerleştirildiği, ısıya dayanıklı cam kaplar kullanılır. Bu kaplar, RTFOT cihazında bitümün ısıtılması ve oksidasyona uğraması sırasında numuneyi tutmak için gereklidir.

Deneyin Yapılışı:

Öncelikle, ısıya dayanıklı cam kapların ağırlıkları hassas bir terazi ile ölçülür. Bu cam kaplar, dönel ince film ısıtma kaybı (RTFOT) cihazı için uygun özelliklere sahip kaplardır. Ardından, her bir cam deney kapına 35 gram bitüm eklenir ve bu kaplar, cihazdaki dönel tabla üzerine yerleştirilir. RTFOT cihazı başlatıldıktan sonra, numuneler dakikada 15 devir hızla dönerek 85 dakika boyunca deney sürecine tabi tutulur. Bu süre boyunca, cihazdaki sıcaklık 163 °C olarak ayarlanır. Deney süresi tamamlandığında, numuneler cihazdan çıkarılır ve deney sonrası ağırlıkları tekrar hassas teraziyle ölçülür. Bu deney, bitümlü sıcak karışımların üretim aşamalarında meydana gelen ısı ve Oksidasyon koşullarını taklit ederek numunelere benzer koşullar uygular. RTFOT deneyi aşamaları Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. RTFOT deneyi aşamaları

Deney Sonuçlarının Hesaplanması:

$$\text{Bitüm ısıtma kaybı} = (W1 - W2) / W1 \times 100 \quad (3.9)$$

W1= İlk numune ağırlığı (gr)

W2= Deney sonrası numune ağırlığı (gr)

3.3. Karışım Deneyleri

Karayolu üstyapısında temel ve alt temel üzerinde yer alan asfalt betonu kaplamasının performansını ve yük altında oluşabilecek deformasyonların sonuçlarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen deneylerdir.

3.3.1. Marshall karışım tasarımı ve akma ve stabilite deneyi

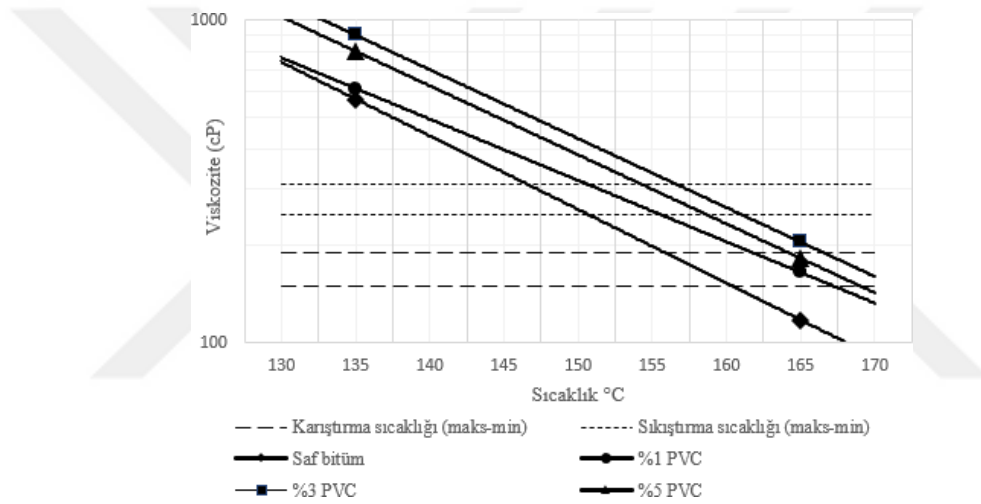
Bitümlü sıcak karışımlar, belirlenen gradasyondaki agregayla, deneysel çalışmalarla belirlenmiş bir orandaki bitümün yine belirlenen sıcaklıkta asfalt plentinde karıştırılmasıyla üretilirler. Marshall tasarım yöntemi 1939 yılında Mississippi Eyaleti Otoyol Departmanında görev alan Bruce Marshall tarafından bilim dünyasına kazandırılmıştır [143]. Bu yöntem, belirli granülometriye sahip agregalardan meydana gelen asfalt betonu karışımlarında optimum bitüm oranını belirlemek, asfalt betonu karışımlarının dayanımı ve numune özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak, ayrıca yüksek durabiliteye sahip bir üstyapı modeli oluşturmak amacıyla uzun yıllardır kullanılmaktadır.

Bu yöntem bir dizi işlem adımlarından oluşmaktadır. Bu adımlar; karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesi, karışım numunelerinin hazırlanması, geometrik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, akma ve stabilite değerlerinin tespit edilmesi ve optimum bitüm içeriğinin tespit edilmesidir.

Bu tespitin yapılabilmesi için seçilen agrega gradasyonuna göre hazırlanmış 1150 gr'lık agrega ve %3.5-6.5 aralığında, %0.5 artışla 7 farklı oranda bitüm içeriği kullanılarak, her bir oran için en az 3 numune olacak şekilde toplam 21 adet numune üretilir. 24 saat uygun koşullarda soğutulup, dinlendirilen numunelerin fiziksel özellikleri belirlenir. Daha sonra 30-40 dakika 60°C sıcak su banyosunda kürlenir ve ardından Marshall stabilite ve akma cihazında 50 mm/dakika hızla yüklemeye tabi tutulurlar. Bu deney sonucunda her bir karışım numunesi için Marshall akma ve stabilite değerleri elde edilir.

KTŞ'de sıcak karışım asfaltlarda yeterli düzeyde agrega-bitüm aderansı sağlanabilmesi, serim ve sıkıştırma işlemlerinin optimum enerjiyle yeterli düzeyde yapılabilmesi için karıştırma ve sıkıştırma esnasında bitüm viskozitesinin sırasıyla

170±30 cP ve 280±30 cP değerlerinde olması gerektiği belirtilmiştir [144]. Dönel viskozite deneyi yordamıyla saf ve modifiye bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının tespit edilebilmesi için bitümlerin 135°C ve 165°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri tespit edilmiş ve elde edilen değerler ile yarı logaritmik bir sıcaklık-viskozite grafiği oluşturulmuştur. Bitümün viskozitesinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi logaritmik eksenle doğrusal kabul edildiğinden bahsedilen değerler kullanılarak doğrusal bir denklem elde edilmiş ve bu denkleme bağlı olarak da ihtiyaç duyulan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları aralıkları tespit edilmiştir. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı aralıkları Şekil 3.11’de ve Tablo 3.1.’de Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı aralıkları verilmiştir.



Şekil 3.11. Saf ve modifiye bitümler için sıcaklık-viskozite ilişkisi

Tablo 3.1. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı aralıkları

	Karıştırma sıcaklığı aralıkları °C (min-maks)	Sıkıştırma sıcaklığı aralıkları °C (min-maks)
Saf bitüm	156-160	147-151
%1 PVC	164-167	151-155
%3 PVC	167-171	157-161
%5 PVC	164-168	154-158

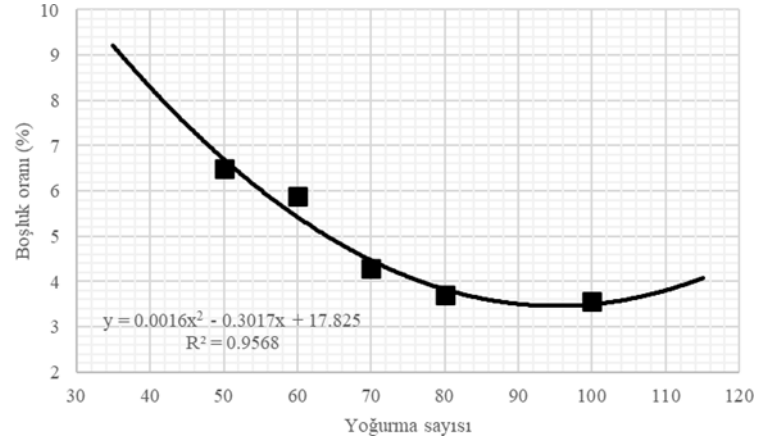
Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları için uygun aralıklar belirlendikten sonra uygun gradasyonda hazırlanmış 1150 gramlık agreg ve bağlayıcı karıştırma sıcaklığının üst bandına kadar ısıtılmıştır. Agregalar için ısıtma süresi 24 saat olup bağlayıcı için ise yaşlanmayı engellemek adına 3 saat ile sınırlandırılmıştır. Marshall tarafından önerilen bu tasarım yönteminde sıkıştırma işlemi için tokmak kullanılmaktadır. Ancak çalışmanın

yürütüldüğü laboratuvarında yoğurmalı kompaktör (Gyratory Compactor) bulunmaktadır. Marshall tasarımında numunelerin tamamı eşit sayıda darbe ile sıkıştırılmakta ve hava boşluğu değerleri bitüm içeriğinin değişmesiyle birlikte değişmektedir. Bu prensipten hareketle tasarım için üretilen numuneler eşit yoğurma sayısında sıkıştırılmak istenmiştir. Ancak darbe sayısı ile yoğurma sayısı arasında standardize edilmiş bir dönüşüm katsayısı henüz yoktur [145-148]. Bu amaçla yapılmış çalışmalarda ise tavsiye edilen yoğurma sayısı 30 ile 120 arasında değişmektedir, [149-152]. Sıkıştırılmış karışımın hava boşluğunun tasarımı temel bir parametre olması ve bu değerlerin birbirlerinden uzak olması sebebiyle literatürde yer alan bir değer referans alınması mümkün olmamıştır. Bu sebeple yoğurma sayısı çalışmada kullanılan karışıma göre ayrıca tespit edilmiştir.

Sıkıştırma metodunun doğası gereği bu sayı agrega yüzey pürüzlülüğü, gradasyon tipi, sıcaklık ve dolayısı ile sıcaklığa bağlı olarak viskozite değeri, döküm esnasında oluşan segregasyon başta olmak üzere birçok parametreden etkilenmektedir. Çalışma kapsamında uygulanacak optimum yoğurma sayısının tespit edilebilmesi için yoğurma sayısı, asfaltla dolu boşluk (VFA) ve hava boşlukları (V) oranları arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmak üzere bir numune seti hazırlanmıştır. Yoğun gradasyonlu sıcak karışım asfalt karışımlarda OBİ çoğunlukla %5 civarındadır. Dolayısı ile bütün karışımlarda kullanılabilecek ortak bir yoğurma sayısı belirleyebilmek adına numuneler, 1150 gr'lık agrega ve %5 bitüm oranı için farklı yoğurma sayıları ile sıkıştırılmıştır. Yoğurma sayısı ve boşluk oranı ilişkisi tablosu ve grafiği sırasıyla Tablo 3.2 ve Şekil 3.12'de verilmiştir. Numuneler ise Şekil 3.13'te verilmiştir. Marshall tasarımı karıştırma aşamaları da Şekil 3.14'te verilmiştir. Tablodaki verilere göre bir ampirik denklem elde edilmiş ve Marshall tasarımı için %4 boşluk oranı, neme karşı hassasiyet deneyi için %7 boşluk oranını sağlayan yoğurma sayıları sırasıyla 80 ve 45 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.2. Yoğurma sayısı, asfaltla dolu boşluk oranı ve hava boşluğu oranları

Numune No.	Bitüm Oranı (%)	Hacim (%)			VMA (%)	VFA (%)	Yoğurma Sayısı
		Bitüm	Agrega	V _a			
1	5,0	11,06	82,62	6,32	17,38	63,62	50
2	5,0	11,11	82,24	6,66	17,76	62,53	
3	5,0	11,18	83,19	5,63	16,81	66,50	60
4	5,0	11,19	82,68	6,14	17,32	64,58	
5	5,0	11,38	84,26	4,37	15,74	72,25	70
6	5,0	11,43	84,35	4,22	15,65	73,01	
7	5,0	11,43	84,62	3,95	15,38	74,32	80
8	5,0	11,71	84,85	3,44	15,15	77,32	
9	5,0	11,47	84,76	3,78	15,24	75,22	100
10	5,0	11,61	85,06	3,33	14,94	77,72	



Şekil 3.12. Yoğurma sayısı-boşluk oranı ilişkisi



Şekil 3.13. Boşluk oranına göre yoğurma sayısı belirleme numune seti

Sıkıştırılan numuneler 24 saat oda sıcaklığında dinlendirilmiştir. Dinlendirilen numunelerin yükseklikleri bir kumpas yardımıyla 120° aralıklarla üç farklı yerden ölçülüp ortalamaları alınarak belirlenmiştir. Numunelerin fiziksel özellikleri ise arşimet prensibiyle belirlenmiştir. Pratik özgül ağırlık ve boşluk oranlarının belirlenmesi için havada, suda ve doymun kuru yüzey ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra 60 °C’lik su banyosunda 30-40 dakika bekletilerek şartlandırılmış ardından da Marshall akma ve stabilite test cihazında 51 mm/dk hızla yüklenerek kırılmıştır. Numunelerin kırılma öncesi taşıyabildiği maksimum yük stabilite ezilme esnasında şekil değiştirme miktarı ise akma değeri olarak belirlenmiştir. Stabilite değeri numune yüksekliğine bağlı olan düzeltme katsayısıyla çarpılarak düzeltilmiş stabilite değeri elde edilir. Şekil 3.15’te Marshall tasarımına göre ölçüm, tartım ve kırım işlemleri verilmiştir.



Şekil 3.14. Marshall tasarımına göre karışım hazırlama

Elde edilen bütün veriler tabloya işlenir. Her bitüm oranı için, pratik özgül ağırlık (PÖA), bitümle dolu boşluk oranı (VFA) , boşluk oranı ve stabilite değerlerinin ortalamaları bulunur. Bu ortalama değerler kullanılarak Marshall tablosu sadeleştirilir. Sadeleştirilen verilerden bitüm oranı-VFA, bitüm oranı-boşluk oranı, bitüm oranı-PÖA ve bitüm oranı-stabilite grafikleri elde edilir. KTS’de aşınma Tip-1 asfalt betonu için hava boşluğu oranının %3-5 aralığında, bitümle dolu boşluk oranının %65-75 aralığında stabilite değerinin en az 900 kgf ve akma değerinin 2-4 mm aralığında olması gerektiği belirtilmektedir. Tasarım parametreleri şartnamede verilmiş aralıkların ortalama değerleri olarak kabul edilmiştir. Dolayısı ile %4 boşluk oranı ve %70 bitümle dolu boşluk oranına göre tasarım yapılmıştır. Pratik özgül ağırlık (PÖA) ve stabilite değerleri için ise elde edilen grafiklerden maksimum değerler belirlenmiştir. Tasarım yönteminde bu dört farklı

değerin ortalaması OBİ olarak kabul edilmektedir. Saf ve modifiye edilmiş üç bitüm tipi için OBİ değerleri ayrı ayrı belirlenmiştir.



Şekil 3.15. Marshall akma ve stabilite deneyine göre; kırım, tartım ve ölçme işlemleri

3.3.2. Neme karşı hassasiyet ve indirekt çekme dayanımı testleri

Nem kaynaklı hasarlar bitümlü kaplamalarda mekanik özelliklerdeki bozulmanın en önemli nedenlerinden biridir. Nem varlığıyla birlikte bağlayıcı ile agrega arasında yapışma bozuklukları veya asfalt bağlayıcı içinde kohezyon bozukluklarına neden olabilir [153]. Nem hasarının laboratuvar ortamında test edilebilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Nem dayanımı testlerinde kür koşullarında küçük değişiklikler olmakla birlikte genellikle şartnameler, normal numune ile suya doymun ve/veya donma-çözülme döngüsüne maruz kalmış numunelerin dolaylı çekme dayanımlarının karşılaştırılmasına dayanmaktadır [154]. Bu test yöntemlerinden en yaygınlarından biri Modifiye Lottman deneyidir. Modifiye Lottman deneyi de, bitümlü

sıcak karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı dirençlerinin saptanması amacıyla yapılır. Çalışma kapsamında ASTM D4867 deney prosedürü izlenmiştir [155].

Deneyde her bir optimum bitüm içeriği için 6 adet agrega-bitüm karışımı hazırlanmıştır. Karışımlar uygun karıştırma sıcaklığında karıştırılmış ve kısa dönem yaşlanma için 2 saat gevşek formda sıkıştırma sıcaklığında etüvde kürlenmiş ve ardından ± 1 hava boşluğunda sıkıştırılmıştır. 24 saat dinlendirilen numunelerin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Numuneler ortalama hava boşluğu miktarları birbirine en yakın olacak şekilde iki gruba ayrılmıştır. Gruplardan birisi koşullandırılmamak üzere 20 ± 5 °C’de dinlenmeye bırakılmıştır. İkinci gruptaki numuneler ise saf su dolu desikatöre, üzerinde en az 20 mm su seviyesi olacak şekilde yerleştirilerek 70 kPa vakumla kısmi olarak (%55-80) suya doymun hale getirilmiştir. Numuneler donma-çözölme etkisini tespit edebilmek amacıyla 15 saat boyunca -18 °C’de dondurulmuş, sonrasında 24 saat boyunca 60 °C suda çözölürölümüştür. Bu işlemin ardından koşullandırılmamış numunelerle birlikte 25 °C’deki suda 1 saat dinlendirilerek numune sıcaklıkları eşitlenmiş ve dolaylı çekme deneyine hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de neme karşı hassasiyet ve indirekt çekme dayanımı testi aşamaları verilmiştir.



Şekil 3.16. Numunelerin gevşek karışım yöntemiyle üretilmesi ve koşullandırılacak numunelerin belirlenmesi



Şekil 3.17. Neme karşı hassasiyet deneyi aşamaları

Marshall akma ve stabilite cihazına uyarlanmış dolaylı çekme test başlığı kullanılarak 50mm/dk hızla yüklenen numunelerin taşıyabildiği maksimum yük tespit edilmiştir. Aşağıda verilen bağıntı kullanılarak dolaylı çekme dayanımı (ITS) hesaplanır. KTS’de dolaylı çekme dayanımı için olması gereken minimum değer 5 kg/cm² (490 kPa) ayrıca koşullandırılmış numunelerin ITS değerlerinin ortalamalarının, koşullandırılmamış numunelerin ortalama değerlerine oranının en az 80% olması

gerektiği belirtilmiştir (TSR). Bu koşula ait bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$St = 2000 \cdot P \cdot \pi \cdot t \cdot D$$

S_t : Çekme gerilmesi (kPa)

P : Maksimum yük (N)

T : Numune yüksekliği (mm)

D : Numune çapı (mm)

$$TSR = Stm/Stm \quad (3.10)$$

TSR: Çekme gerilmesi oranı

S_{tm} : Koşullandırılmış numunelerin ITS değeri ortalaması

S_{tm} : Koşullandırılmamış numunelerin ITS değeri ortalaması

3.3.3. İndirekt çekme rijitlik modülü testi

İndirekt çekme rijitlik modülü (İÇRM) deneyi, asfalt karışımlarının düşük deformasyonlar altındaki rijitlik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan dinamik bir deneydir. Bu deney, genellikle BS EN 12697-26 C standardına uygun olarak gerçekleştirilir ve numunenin elastik davranışını karakterize etmek için kullanılır. Deneyde silindirik asfalt numunesi, yatay doğrultuda uygulanan kısa süreli ve tekrarlı yükler altında test edilir. Uygulanan bu yüklemeler, numune üzerinde dolaylı çekme gerilmeleri oluşturur. Bu gerilmeler altındaki deformasyonlar, yüksek hassasiyetli LVDT'ler (Doğrusal değişken diferansiyel transformatör) aracılığıyla ölçülür. ITSM test cihazı Şekil 3.18'de verilmiştir. Ölçülen yatay deformasyon değerlerinden hareketle rijitlik modülü (S_m) hesaplanır.

$$S_m = \frac{F(1+\nu)}{z \cdot h} \quad (3.11)$$

Burada;

F : Uygulanan maksimum yük,

ν : Poisson oranı (0.35 kabul edilmiştir),

z : Yatay deformasyon,

h : Numune yüksekliğidir.



Şekil 3.18. ITSM deney cihazı

3.3.4. Statik sünme testi

PVC ile modifiye edilmiş bitüm ile hazırlanan asfalt karışımlarının kalıcı deformasyon özelliklerini değerlendirmek amacıyla statik sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu test için özel bir standart veya ekipman bulunmadığından, statik yükleme için dinamik sünme deney cihazı kullanılmıştır. Silindirik numunelere, Universal Test Cihazı (UTM) kullanılarak sabit eksenel basınç uygulanmıştır. Bu test, genellikle yüksek sıcaklıklarda, tekerlek izi oluşumu (kalıcı deformasyon) davranışını anlamak amacıyla gerçekleştirilir.

Bu çalışmada, ön yükleme sürecinden sonra, numunelere 50°C sıcaklıkta, 500 kPa eksenel basınç altında 60 dakika boyunca yük uygulanmıştır. Eksenel deformasyon, birbirine paralel yerleştirilmiş iki LVDT ile sürekli olarak ölçülmüştür. Kaydedilen gerilme ve birim deformasyon verilerinden, sünme rijitliği (J) Denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır. Her karışım ve sıcaklık seviyesi için üç numune test edilmiştir.

$$J = \frac{\varepsilon}{\sigma} \quad (3.12)$$

ε : Belirli bir andaki birikimli birim deformasyonu,

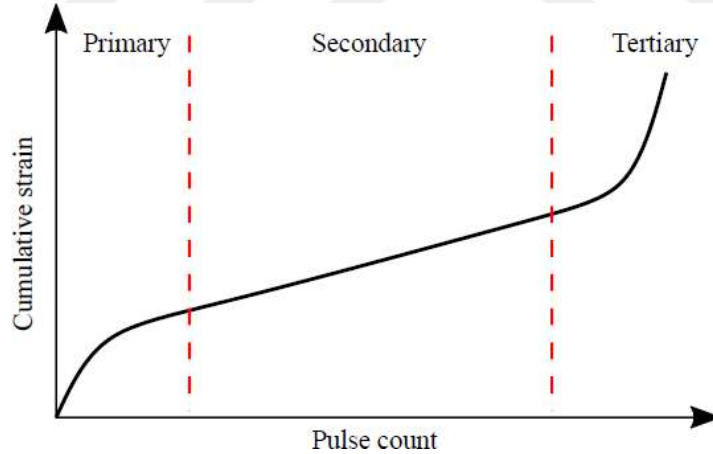
σ : Sabit dikey gerilme.

3.3.5. Dinamik sünme testi

Dinamik sünme testi, asfalt karışımlarının kalıcı deformasyon potansiyelini değerlendirmek için yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu test, asfalt numunesine sürekli, çevrimsel (sine) veya çevrimsel olmayan (haversine) olarak uygulanan dinamik yükler altında, malzemenin deformasyon davranışını ölçer ve bunun sonucunda asfaltın kalıcı deformasyona karşı dayanıklılığı hakkında bilgi verir [156].

Dinamik sünme testi, 1970'lerde Monismith ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir ve günümüzde asfalt karışımlarının performansını test etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu test, genellikle asfaltın yüksek hızlı ve değişken yük koşullarında nasıl performans sergileyeceğini değerlendirmek için kullanılır [157].

Bu çalışmada EN 12697-25 standardı izlenmiştir. Bu çalışmada, 500 ms yüklü ve 1500 ms dinlenme ile 500 kPa'lık eksenel sıkıştırma gerilimi, önerilen örneklere 500 ms yük ve 1500 ms dinlenme uygulanmıştır. Testler, 30 ve 50 ° C'lik iki farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Deneyin sonlandırma koşulu, maksimum darbe sayısı (40.000) veya maksimum (10^5 $\mu\epsilon$) gerinim olarak tanımlanmıştır. Her bir karışım ve her sıcaklık için üç örnek test edilmiştir.



Şekil 3.19. Zhou'nun üç aşamalı modeli, 158

Deney öncesinde numuneler 24 saat boyunca iklimlendirme kabiniinde belirlenen sıcaklığa ulaşmaları için bekletilmiştir. Sonrasında yükleme plakaları arasına yerleştirilen numuneye 10 dakika süren bir ön yükleme işlemi uygulanmıştır (100 kPa). Bu ön yükleme işlemi, numune yüzeyinin tam olarak yükleme plakasına temas etmesini sağlar. Bu işlem, test sırasında elde edilecek verilerin doğruluğunu artırır. Ön yükleme işlemi tamamlandıktan sonra 500 ms yükleme (pulse width) ve 1500 ms dinlenme (rest) olacak şekilde 500 kPa'lık haversin yükleme yapılmıştır. Deney sonunda vuruş sayısı,

yükleme gerilmesi ve birikimli gerinim değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak vuruş sayısı-birikimli gerinim (ϵ), vuruş sayısı-sünme modülü (E_c) ve vuruş sayısı-esneklik modülü (E_r) sonuçları elde edilmiştir. Esneklik modülü, numunenin elastik deformasyonlara karşı direncini, sünme modülü ise kalıcı deformasyona karşı direnç gösterme kapasitesini temsil eder. Bu modüller, asfalt karışımlarının uzun dönemdeki davranışını ve dayanıklılığını tahmin etmek için kullanılır. Daha önce belirtildiği gibi, numunenin boyutları (yükseklik ve çap), ön yükleme gerilimi, deviatör gerilimi, gerilim uygulama sıklığı ve temas gerilimi dahil olmak üzere giriş verileri entegre bir yazılım aracılığıyla kontrol edilir. Numunenin deformasyonu, yükleme (pulse width) sırasında gerilim uygulanmasıyla artmaya başlar ve yükleme tamamlandığında en yüksek noktaya tırmanır. Dinlenme periyodu sırasında, elastik deformasyon olarak bilinen deformasyonun önemli bir kısmı kaybolur ve kalan deformasyon kalıcı deformasyon olarak kabul edilir [156].

Şekil 3.19’da gösterildiği gibi, Yükleme altındaki numune, önemli boyutsal deformasyonların gözlemlendiği üç aşamalı bir deformasyon sürecinden geçmektedir. İlk aşamada, karışım içerisindeki hacim ve boyut değişikliklerine bağlı olarak şekil değiştirmeler meydana gelirken; üçüncü aşamada ise, karışımındaki kayma deformasyonları sonucu belirgin yapısal bozulmalar gözlemlenmektedir. Bu bağlamda, akış sayısı (FN), karışımında hacimsel değişim olmaksızın kayma deformasyonlarının başladığı döngü sayısı olarak tanımlanmakta ve bu değer, asfalt karışımının tekerlek izi oluşumuna karşı gösterdiği direncin bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Dinamik sünme diyagramında üçüncü fazın başladığı döngü sayısı olarak tanımlanan FN, uygulanan yük tekrarları ile tekerlek izi potansiyeli arasındaki doğrusal ilişkiyi ortaya koymaktadır. Literatürdeki birçok çalışmada, laboratuvar ortamında elde edilen FN değerleri ile sahada ölçülen tekerlek izi derinliklerinin benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Deney süresince tekrarlanan yük uygulamaları ile oluşan şekil değiştirmeler, başlangıçta numunedeki hava boşluklarının sıkışmasıyla hızlı bir şekilde artış göstermekte; devamında ise konsolide olmuş numunelerde daha lineer bir biçimde ilerlemekte ve nihayetinde numune bütünlüğünün kaybına yol açmaktadır [159-160].

Deneyden elde edilen veriler kullanılarak birikimli deformasyon (ϵ), sünme rijitliği (S_{creep}), resilyans modülü ($S_{resilient}$) ve aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanır.

$$\epsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$$

$$S_{creep} = \frac{\sigma}{\epsilon_i}$$

$$S_{resilient} = \frac{\sigma}{\epsilon_i} \quad (3.13)$$



Şekil 3.20. Statik ve dinamik sünme deneyi test düzeneği

3.3.6. Yarı dairesel eğilme (SCB) testi

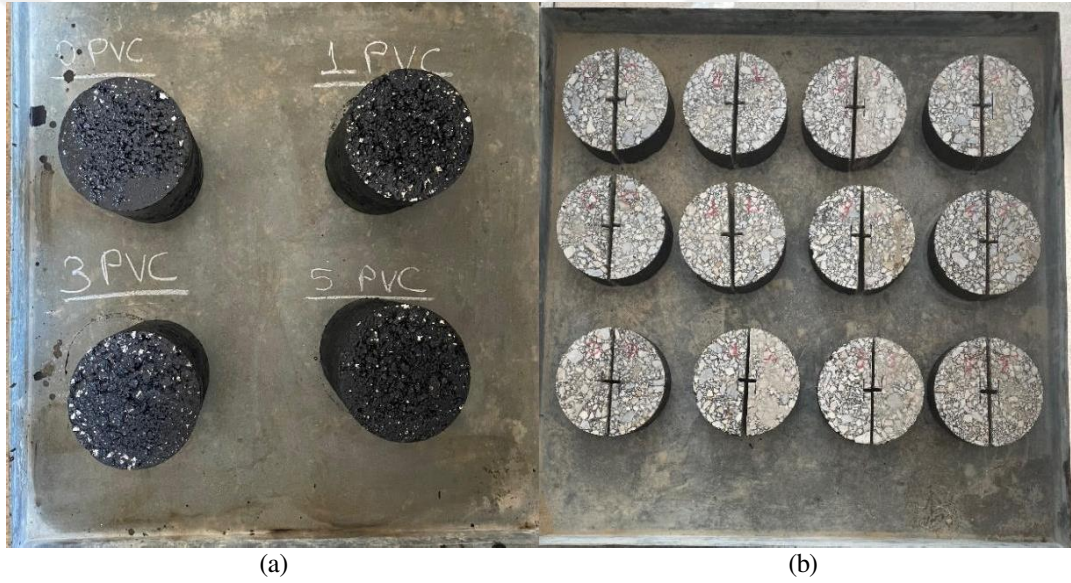
Asfalt kaplamalarda, yorgunluk ve düşük sıcaklığa bağlı çatlama, asfalt malzemelerinin dayanıklılığını, performansını ve ömrünü önemli şekilde etkileyen faktörlerdir. Asfalt malzemesinin düşük çatlama dayanımı, kaplamanın hizmet ömrünü kısaltarak erken bozulmalara neden olur. Çatlama, genellikle asfalt yüzeyinde uzunlamasına ve enine çatlaklar şeklinde görülür, bu da yol güvenliğini tehlikeye atar. Ayrıca, çatlaklardan sızan su, alt zemin ve temel malzemelerinin zayıflamasına yol açabilir. Uzun süreli ve tekrarlayan trafik yükleri çevresel koşulların da etkisi ile asfalt kaplamalarda çatlama ve yorgunluk hasarlarının hızla gelişmesine neden olur. İlk olarak Chong ve Kurrup tarafından tasarlanan bir deney yöntemidir [161-163].

Yarı dairesel eğme (SCB) testi, laboratuvar ortamında numune üretimin kolay olması ve sahadan alınan numunelerin de test edilebilmesine olanak verdiği için asfalt karışımlarının çatlama direncinin değerlendirilmesinde son yıllarda popüler olarak kullanılmaya başlamıştır [164].

Bu araştırmada BS EN 12697-44:2010 standardında önerildiği üzere, sınır etkilerini en aza indirmek ve daha büyük, daha temsili bir malzeme hacmini yakalamak amacıyla 150 mm çaplı ve 50 mm kalınlıkta numuneler kullanılmıştır; böylece daha kesin ve güvenilir sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir. BS EN 12697-44:2010 standardına göre,

kırılma enerjisi ve kırılma tokluğu değerleri elde edilebilir. Bu çalışmada numuneler 25 °C altında yarı dairesel eğilme deneyi uygulanmıştır [165]. SCB numuneleri ve SCB test düzeneği Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de verilmiştir.

SCB deneyi sonunda bir yük-deplasman grafiği elde edilir. Bu yük-deplasman grafiği kullanılarak kırılma enerjisi ve numune geometrisine bağlı olarak kırılma tokluğu tespit edilir. Ancak kırılma tokluğu asfalt karışımların çatlama davranışlarını ifade etmek için tek başına yeterli değildir [166]. Özer ve arkadaşları, kırılma davranışını fiziksel bir anlamlılıkla ifade edebilmek için esneklik indeksi (Flexibility index-FI) parametresini geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımda yük-deplasman grafiği kullanılarak, FI ve kritik deplasman (Critical displacement-CD) değerleri elde edilmektedir.



Şekil 3.21. SCB numunelerinin elde edilişi



Şekil 3.22. SCB test düzeneği

Kırılma Enerjisi:

Kırılma enerjisi, malzemenin tam başarısızlığa uğramadan önce emdiği toplam enerjiyi temsil eder ve çatlama direncine dair bir gösterge sağlar. Daha yüksek değerler, daha iyi tokluk ve çatlak ilerlemesine karşı direnç anlamına gelir.

Kırılma enerjisi, malzemenin kırılmadan önce emdiği toplam enerjiyi gösterir.

$$G_f = W_f / A \quad (3.14)$$

W_f : Yük-deplasman eğrisinin altındaki alan (J),

A : Kırılma yüzey alanı (m^2)

Hesaplama, SCB testindeki yük-deplasman eğrisinden yapılır.

Kırılma Tokluğu:

Kırılma tokluğu, malzemenin yük altında çatlak ilerlemesine karşı direncini ölçen kritik bir parametredir. Daha yüksek değerler, uzun vadeli dayanıklılık için önemli olan çatlama direncini iyileştirir.

$$K_{Ic} = \frac{P.S}{B.W^{2/3}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3.15)$$

P: Tepe yükü (N),

S: Mesafe uzunluğu (mm),

B: Kalınlık (mm),

W: Genişlik (mm),

a: Çentik derinliği (mm),

$f(\frac{a}{w})$: Geometrik fonksiyon

SCB testinde, bu değer yük ve geometriye bağlı olarak hesaplanır.

Esneklik İndeksi: Esneklik indeksi (FI), Illinois Esneklik İndeksi Testi (I-FIT) kullanılarak belirlenir ve asfalt numunelerinin çatlama direncine dair bilgi sağlar.

Daha yüksek FI değerleri,

daha fazla esneklik ve kırılma kırılmaya karşı iyileştirilmiş direnç anlamına gelirken, daha düşük değerler daha kırılma bir tepkiyi gösterir.

$$FI = Gf / |m|$$

Gf : Kırılma enerjisi,

$|m|$: Tepe sonrası eğimin mutlak değeri (kN/mm).

Hesaplama, SCB testindeki eğri analizine dayanır.

Kritik Deplasman:

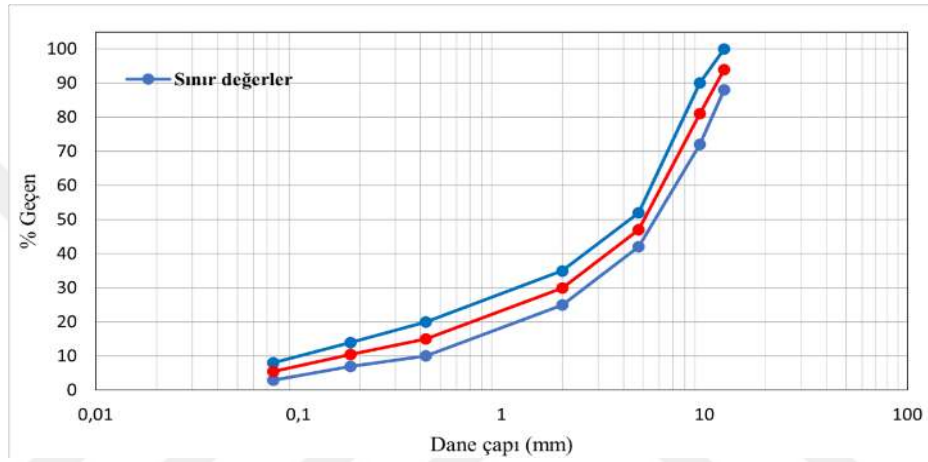
Kritik deplasman, yük-deplasman eğrisinde tepe sonrası eğim ile deplasman ekseninin kesişim değeri olarak tanımlanır ve malzemenin süneklik ile kırılmaya karşı direncini gösterir. Daha yüksek değerler, daha iyi tokluk ve deformasyon kapasitesi anlamına gelir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Agregâ Deneýlerine Ait Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında yerel bir taş ocağından temin edilen kalker agregası üzerinde performans özelliklerini belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Agregâ, Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTS) Aşınma Tip-1 olarak tanımlanan agregâ dağılımı sınırları içinde olacak şekilde seçilmiştir. Maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12.5 mm olarak seçilmiştir.

4.1.1. Agregâ gradasyonu



Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan kalker agregası elek analizi sonuçları

Çalışmada kullanılan kalker agregası üzerinde yapılan elek analizi sonucunda Tip-1'e göre belirlenen gradasyon eğrisi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

4.1.2. İri agregâ özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları

Kalker agregası için TS EN 1097-6 standartına göre yapılan, boyutları 19, 12,5, 9,5 ve 4,75 mm olan iri agregâlar üzerinde uygulanan deney sonuçları Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. İri agregâ özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları

İri agregâ	Numune 1 (gr)	Numune 2 (gr)	Ortalama (gr)
Kuru Ağırlık (M_k)	1998,7	1999,4	1999,05
DKY Ağırlığı (w_1)	2003,3	2009,2	2006,25
Sudaki Ağırlığı (w_2)	1231,1	1272,1	1251,6
Hacim Özgül Ağırlığı	2,603	2,749	2,676
Zahiri Özgül Ağırlığı	2,588	2,713	2,651
DKY Hacim Özgül Ağırlığı	2,594	2,723	2,659
Su Emme Yüzdesi	%2,3	%4,9	3,6

4.1.3. İnce agregâ özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları

Bu deney TS EN 1097-6 standartına göre yapılmıştır. 4,75 mm elek altında ve 0,075 mm elek üzerinde kalan ince agregalar üzerinde uygulanan deney sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. İnce agregâ özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları

İnce Agregâ	Numune 1 (gr)	Numune 2 (gr)	Ortalama (gr)
İnce agregâ özgül ağırlığı	2,778	3,486	3,132

4.1.4. Filler agregâ özgül ağırlık deneyi sonuçları

Bu deney TS EN 1097-7 standartına göre yapılmıştır. 0,075 mm açıklığa sahip eleğin altında kalan agregalar üzerinde uygulanan deney sonuçları Tablo 4.3’te verilmiştir.

Tablo 4.3. Filler agregâ özgül ağırlık deneyi sonuçları

Filler	Numune 1 (gr)	Numune 2 (gr)	Ortalama (gr)
Filler agregâ özgül ağırlığı	2,605	2,616	2,611

4.1.5. Los Angeles (aşınma kaybı) deneyi sonuçları

Los Angeles Deneyi TS EN 1097-2 standartına göre gerçekleştirilmiştir. Los Angeles aşınma deneyi sonuçları Tablo 4.4’te verilmiştir.

Tablo 4.4. Los Angeles aşınma kaybı deneyi sonuçları

Los Angeles Deneyi	Numune
Numunenin etüvde kuruduktan sonraki ağırlığı (gr)	5000
Numunenin 100 devir sonunda elek üstü miktarı (gr)	4821
Numunenin 400 devir sonunda elek üstü miktarı (gr)	4259
Numunenin 100 devir sonunda elek üstü miktarı (gr)	3,58
Numunenin 100 devir sonunda elek üstü miktarı (gr)	14,82

4.1.6. Metilen mavisi deneyi sonuçları

Metilen mavisi deneyi TS EN 933-9 standartına göre yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre MB (Metilen mavisi miktarı) değeri 1,5 ml/g olarak bulunmuştur.

4.1.7. Donma-çözülme deneyi sonuçları

Donma-çözülme deneyi TS EN 1367-1,2 standartına göre yapılmıştır. Deney sonucuna göre FTR (Donma-çözülme kaybı) %2,34 olarak bulunmuştur.

4.2. Bitüm Deneylerine Ait Sonuçlar

4.2.1. Özgül ağırlık deneyi sonuçları

Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların özgül ağırlık deney sonuçları Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Saf ve atık PVC katkılı bağlayıcılar için özgül ağırlık değerleri

	Bitüm özgül ağırlığı (gr)
Saf	1,035
%1 PVC	1,001
%3 PVC	0,921
%5 PVC	0,976

Tablo 4.5'e göre özgül ağırlık değerleri incelendiğinde saf bitüme eklenen atık PVC miktarı arttıkça bağlayıcıların özgül ağırlık değerleri azalmakla beraber %5 katkılı bağlayıcının özgül ağırlık değeri artmıştır.

4.2.2. Yumuşama noktası deneyi sonuçları

Saf ve atık PVC ile modifiye edilmiş bağlayıcılara ait yumuşama noktası değerleri Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Saf ve bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri

	Yumuşama noktası (°C)		
	Sağ okuma	Sol okuma	Ortalama
Saf	50,1	50,2	50,15
%1 PVC	54,8	57,0	55,90
%3 PVC	66,3	65,2	65,75
%5 PVC	63	66,1	64,55

Saf bağlayıcıya atık PVC ilave edilmesiyle bağlayıcıların yumuşama noktasının arttığı Tablo 4.6'ya bakılarak görülmektedir. Atık PVCnin saf bitümün kıvamını arttırdığı yani bitümü sertleştirdiği sonucuna varılmaktadır.

4.2.3. Penetrasyon deneyi sonuçları

Saf ve atık PVC ile modifiye edilmiş bağlayıcılara ait penetrasyon değerleri Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların penetrasyon deneyi sonuçları

	Penetrasyon (dmm)
Saf	57
%1 PVC	37
%3 PVC	27
%5 PVC	29

Tablo 4.7’de görüldüğü üzere katkı miktarı arttıkça bağlayıcının penetrasyon değerleri azalmıştır.

4.2.4. Viskozite deneyi sonuçları

Saf ve atık PVC ile modifiye edilmiş bağlayıcılara ait viskozite değerleri Tablo 4.8’te verilmiştir.

Tablo 4.8. Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcının viskozite deneyi sonuçları

	Viskozite (Pa.s)	
	135 °C	165 °C
Saf	570	117,5
%1 PVC	615	165
%3 PVC	900	205
%5 PVC	802,5	182,5

4.2.5. Düktilite noktası deneyi sonuçları

Saf ve atık PVC ile modifiye edilmiş bağlayıcıların uzama miktarının ölçüldüğü düktilite deneyinin sonucunda düktilite değeri 100’den küçük olarak bulunmuştur. Saf ve modifiyeli bağlayıcılar için şartname limiti olan 100 cm değerini sağladığı yani atık PVCnin bağlayıcının kohezyonuna negatif bir etki yapmadığı görülmektedir.

4.2.6. Dönel ince film ısıtma kaybı deneyi (RTFOT) sonuçları

RTFOT deneyi ile saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılara, deney sonrası elde edilen kalıntıyla penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite deneyleri uygulanırken ek olarak kütle kayıpları tespit edilmiştir. RTFOT deneyine ait verilen Tablo 4.9’da verilmiştir.

Tablo 4.9. Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcının RTFOT deneyi sonuçları, 167, 168, 169

Deney	Standart	Sonuçlar			
		Saf	%1PVC	%3 PVC	%5 PVC
Kütle kaybı (%)	ASTM D2872	0,48	0,52	0,49	0,40
Penetrasyon (25°C’de, 0,1 mm)	ASTM D5	49	24	30	23
Kalıcı penetrasyon oranı (%)	-	86	65	94	69
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	53,30	61,0	64,9	62,2
Yumuşama nok. değişimi (°C)	-	6,2	5,1	-0,9	-3,4

4.3. Karışım Deneylerine Ait Sonuçlar

4.3.1. Marshall tasarımına göre optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi

Marshall tasarımı bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan agregaya en uygun bitüm içeriğinin (OBİ) belirlenebilmesi amacıyla yapılmıştır. Saf ve %1-3-5 atık PVC içeren bağlayıcı %0.5’lik artışlarla %4-6,5 oranları arasında kullanılmıştır. KTS’de aşınma Tip-1 asfalt betonu için hava boşluğu oranının %3-5 aralığında, bitümle dolu boşluk oranının %65-75 aralığında stabilite değerinin en az 900 kgf ve akma değerinin 2-4 mm aralığında

olması gerektiği belirtilmektedir. Tasarım parametreleri şartnamede verilmiş aralıkların ortalama değerleri olarak kabul edilmiştir. Dolayısı ile %4 boşluk oranı ve %70 bitümle dolu boşluk oranına göre tasarım yapılmıştır. Pratik özgül ağırlık (PÖA) ve stabilite değerleri için ise elde edilen grafiklerden maksimum değerler belirlenmiştir. Tasarım yönteminde bu dört farklı değerlerin ortalaması OBİ olarak kabul edilmektedir. Saf ve modifiye edilmiş üç bitüm tipi için OBİ değerleri ayrı ayrı belirlenmiştir. Her karışım tpi için sadeleştirilmiş tasarım deneyleri Tablo 4.10, Tablo 4.11, Tablo 4.12 ve Tablo 4.13'te verilmiştir. Sadeleştirilmiş değerlerin ortalaması alınarak bulunan OBİ'ler ise Tablo 4.14'te verilmiştir.

Tablo 4.10. *Saf bitüm için sadeleştirilmiş tasarım değerleri*

Bitüm Oranı (%)	VFA (%)	V (%)	PÖA (gr/cm³)	Stabilite (kgf)	Akma (mm)
3,50	57,87	5,88	2,46	1482	2,20
4,00	67,65	4,42	2,48	1584	2,50
4,50	79,02	2,77	2,50	1698	2,50
5,00	84,22	2,16	2,50	1719	3,10
5,50	88,34	1,66	2,50	1557	3,00
6,00	88,58	1,75	2,48	1218	4,70
6,50	90,05	1,61	2,46	994	5,30

Tablo 4.11. *% 1 Atık PVC katkılı bitüm için sadeleştirilmiş tasarım değerleri*

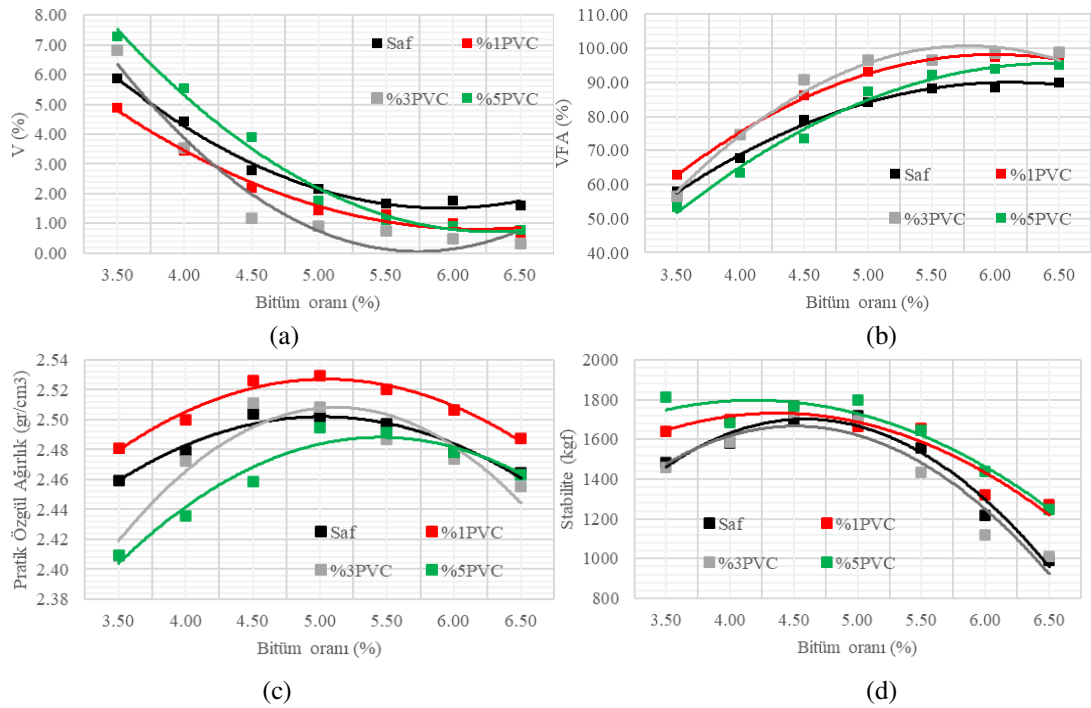
Bitüm Oranı (%)	VFA (%)	V (%)	PÖA (gr/cm³)	Stabilite (kgf)	Akma (mm)
3,50	62,90	4,90	2,48	1642	2,30
4,00	74,35	3,43	2,50	1699	2,20
4,50	86,29	2,20	2,53	1769	2,90
5,00	93,25	1,44	2,53	1667	3,00
5,50	96,27	1,30	2,52	1654	4,10
6,00	97,44	1,00	2,51	1319	5,20
6,50	97,20	0,69	2,49	1272	6,50

Tablo 4.12. % 3 Atık PVC katkılı bitüm için sadeleştirilmiş tasarım değerleri

Bitüm Oranı (%)	VFA (%)	V (%)	PÖA (gr/cm ³)	Stabilite (kgf)	Akma (mm)
3,50	56,42	6,83	2,41	1460	3,2
4,00	74,62	3,53	2,47	1586	3,6
4,50	90,85	1,18	2,51	1731	3,8
5,00	96,46	0,92	2,51	1696	4,3
5,50	96,51	0,75	2,49	1434	4,5
6,00	98,53	0,47	2,47	1121	6,0
6,50	98,77	0,33	2,46	1009	6,4

Tablo 4.13. % 5 Atık PVC katkılı bitüm için sadeleştirilmiş tasarım değerleri

Bitüm Oranı (%)	VFA (%)	V (%)	PÖA (gr/cm ³)	Stabilite (kgf)	Akma (mm)
3,50	53,38	7,30	2,41	1814	3,1
4,00	63,37	5,55	2,44	1683	3,5
4,50	73,60	3,91	2,46	1768	3,9
5,00	87,44	1,75	2,49	1799	4,3
5,50	92,23	1,12	2,49	1646	4,7
6,00	94,00	0,92	2,48	1437	6,2
6,50	95,09	0,80	2,46	1247	6,4



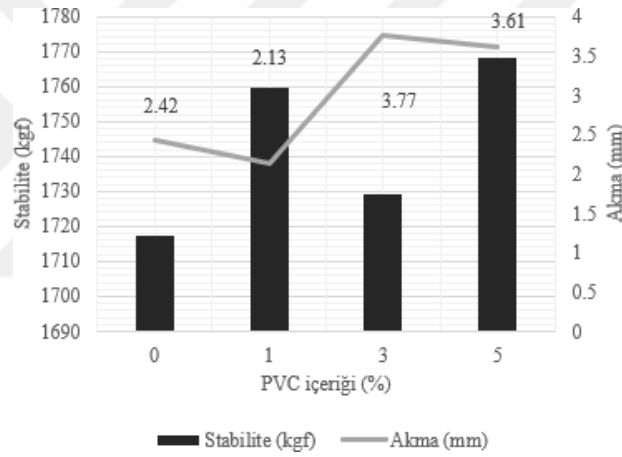
Şekil 4.2. Saf ve modifiye bitüm için Marshall tasarımına ait; a) Hava boşluğu, b) Bitümle dolu boşluk oranı, c) Pratik özgül ağırlık, d) Stabilite grafikleri

Tablo 4.14. Optimum bitüm içerikleri

	Saf bitüm	%1 PVC	%3 PVC	%5 PVC
VFA (%)	4.34	3.96	3.84	4.19
V (%)	4.11	3.86	3.95	4.35
PÖA (gr/cm ³)	5.08	5.15	5.13	5.13
Stabilite (kgf)	4.58	4.35	4.50	4.50
OBI (%)	4.53	4.33	4.36	4.54

4.3.2. Marshall akma ve stabilite testi sonuçları

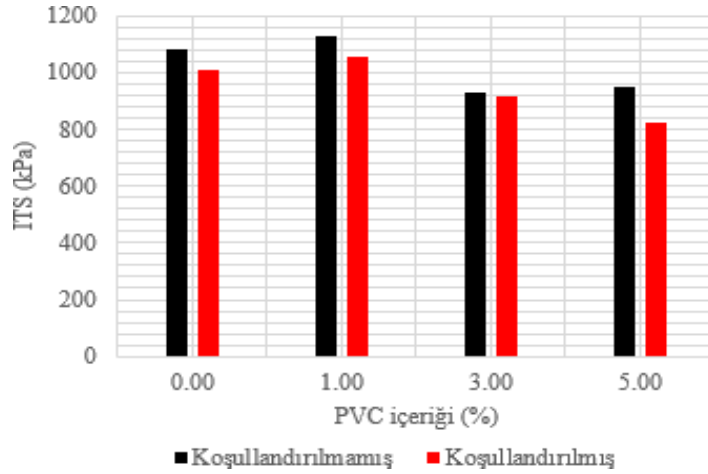
Belirlenen optimum bitüm içerikleri ve uygun agrega gradasyonları ile Marshall briketleri üretilmiştir. Her bir katkı oranından hazırlanan üçer adet briketlerin havada, suda ve doygun kuru yüzey ağırlıkları not edilmiştir. Hesaplanan toplamda 12 adet numuneye Marshall stabilite ve akma deneyi uygulanarak veriler Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. OBI'ye göre üretilen numunelerin akma ve stabilite değerleri

4.3.3. Neme karşı hassasiyet ve indirekt çekme dayanımı testi sonuçları

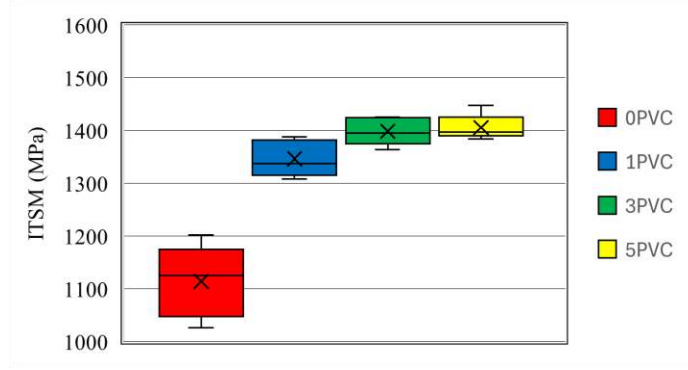
ASTM D4867 prosedürüne göre test edilen koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numunelere ait sonuçlar Şekil 4.4'te sunulmuştur. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numunelerin tamamı KTŞ 2023'te verilen 5 kg/cm² (490 kPa) değerinin fazlasıyla üzerindedir. %0, %1, %3 ve %5 PVC ile modifiye edilmiş bitümle üretilen numunelerin TSR değerleri sırasıyla %94, %93, %98 ve %86 olmuştur. Suya doygun hale getirildikten sonra donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılmış numunelerin, koşullandırılmamış numunelere oranı bütün gruplar için KTŞ sınırı olan %80 in üzerindedir [170].



Şekil 4.4. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numunelerin ITS değerleri

4.3.4. İndirekt çekme rijitlik modülü testi (ITSM) sonuçları

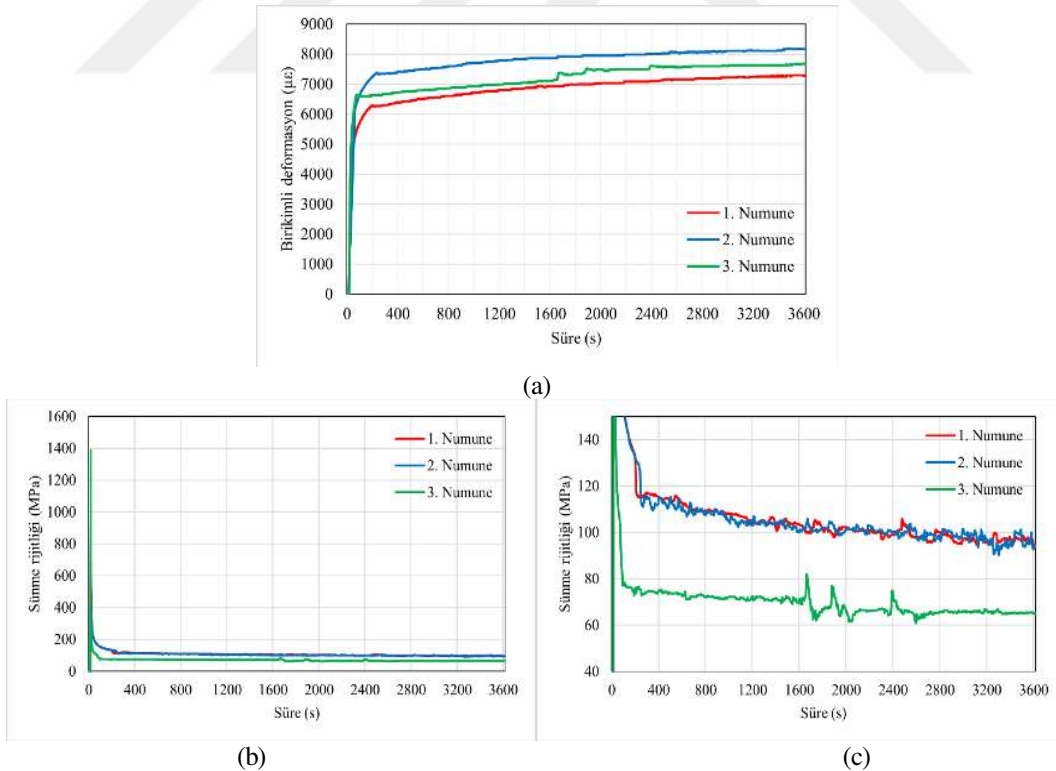
Her karışım grubu için beş numune test edilmiş olup, her bir numune tahribatsız bir yöntem olan ITSM (Dolaylı Çekme Rijitlik Modülü) testi kapsamında 90° döndürülerek iki kez test edilmiştir. Farklı PVC oranlarıyla modifiye edilen Sıcak Karışım Asfalt (HMA) numunelerine ait ITSM sonuçları Şekil 4.5'te sunulmuştur. PVC ilavesiyle birlikte ITSM değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiş, bu durum karışımların rijitlik özelliklerinde bir iyileşmeye işaret etmektedir. Kontrol karışımı (0PVC), 1114 MPa ile en düşük ITSM değerine sahip olmuş ve bu da çekme yüklemesi altında deformasyona karşı görece düşük bir direnç sergilediğini göstermektedir. %1 PVC ilavesiyle rijitlik modülü önemli ölçüde artarak 1346 MPa'ya ulaşmış ve yaklaşık %20,8 oranında bir iyileşme kaydedilmiştir. Bu artış, PVC parçacıklarının asfalt matrisine daha iyi dağılmasıyla açıklanabilir; bu durum karışımın rijitliğini artırmaktadır. PVC içeriğinin %3'e çıkarılmasıyla ITSM değeri 1399 MPa'ya ulaşarak artış trendi devam etmiştir; ancak artış oranı daha az belirgin hale gelmiştir. En yüksek ITSM değeri, 1406 MPa ile %5 PVC içeren karışımda elde edilmiştir. %3 ve %5 PVC karışımları arasındaki sınırlı fark, belirli bir eşiğin ardından PVC katkısının sertleştirici etkisinin daha az belirgin hale geldiğini göstermektedir. PVC içeriğinin artışıyla birlikte ITSM değerlerindeki yükseliş, PVC'nin HMA'nın rijitliğini artırıcı etkisini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.5. Saf ve modifiye edilmiş numunelerin ITSM testi sonuçları

4.3.5. Statik sünme deneyi sonuçları

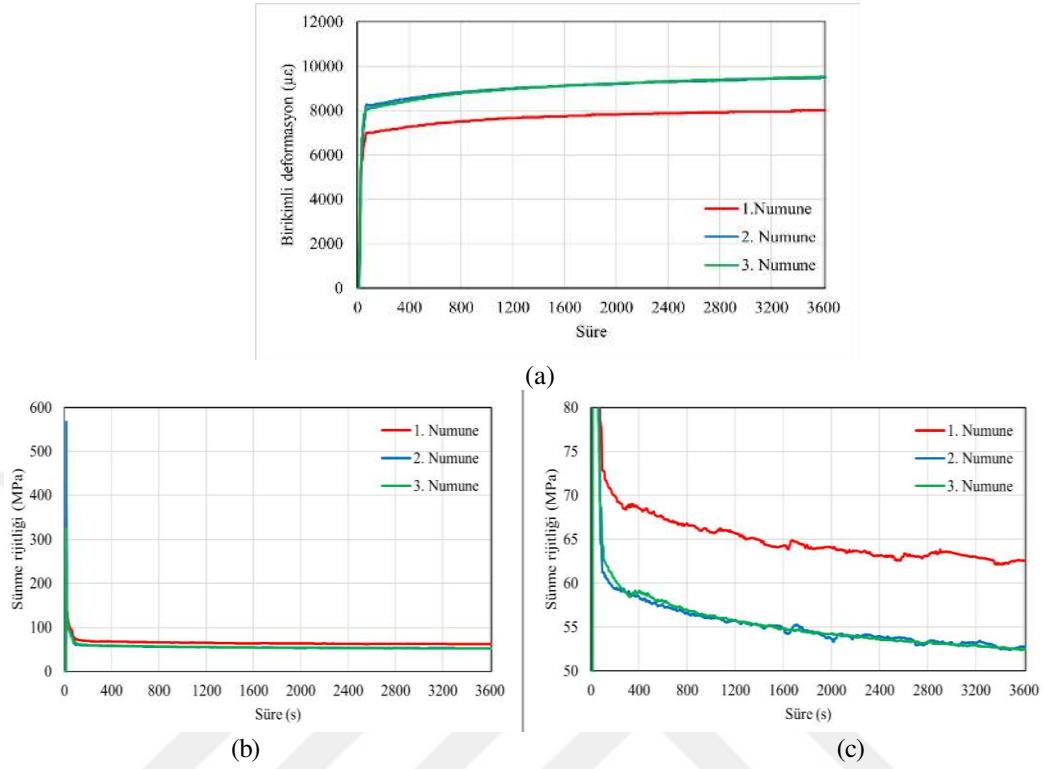
Bu çalışmada statik sünme testi sonuçları, atık PVC ile modifiye edilmiş asfalt karışımlarının viskoelastik davranışları üzerindeki etkilerini ortaya koyan önemli bulgular sunmaktadır. Birikimli şekil değiştirme-zaman ve sünme rijitliği-zaman grafiklerinde, malzemenin sürekli yükleme altında deformasyona karşı gösterdiği direnç ve yapısal bütünlüğünü koruma kabiliyeti gözlemlenmektedir. Saf bağlayıcılı karışımlar için uygulanan statik sünme testi sonuçları Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. Saf bağlayıcılı karışımlara uygulanan statik sünme testine ait; a) Birikimli deformasyon-zaman, b) Sünme rijitliği-zaman ve c) Sünme rijitliği-zaman grafiğinin yakınlaştırılmış grafikleri

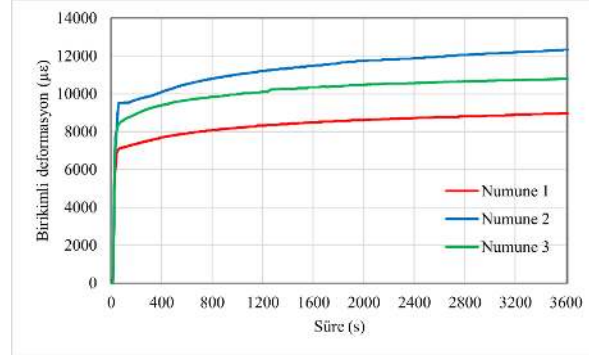
%1 PVC katkılı modifiye edilmiş bağlayıcı ile hazırlanan numunelere uygulanan

statik sünme testine ait sonuçlar Şekil 4.7’de verilmiştir.

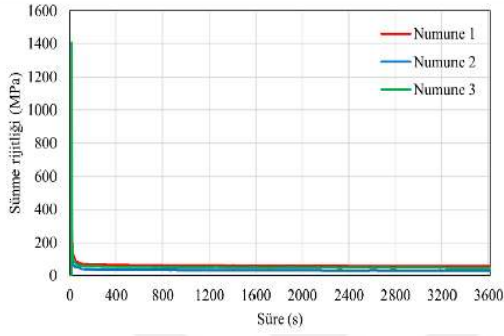


Şekil 4.7. % 1 PVC katkı karışım için uygulanan statik sünme testine ait; a) Birikimli deformasyon-zaman, b) Sünme rijitliği-zaman ve c) Sünme rijitliği-zaman grafiğinin yakınlaştırılmış grafikleri

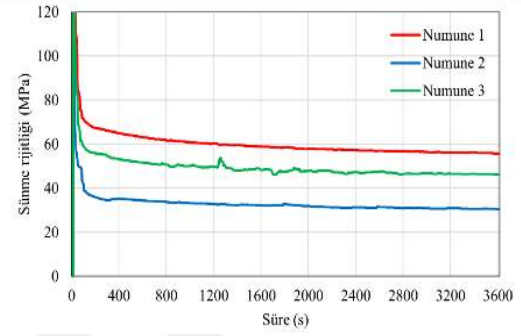
%3 PVC katkı modifiye edilmiş bağlayıcı ile hazırlanan numunelere uygulanan statik sünme testine ait sonuçlar Şekil 4.8’de verilmiştir.



(a)



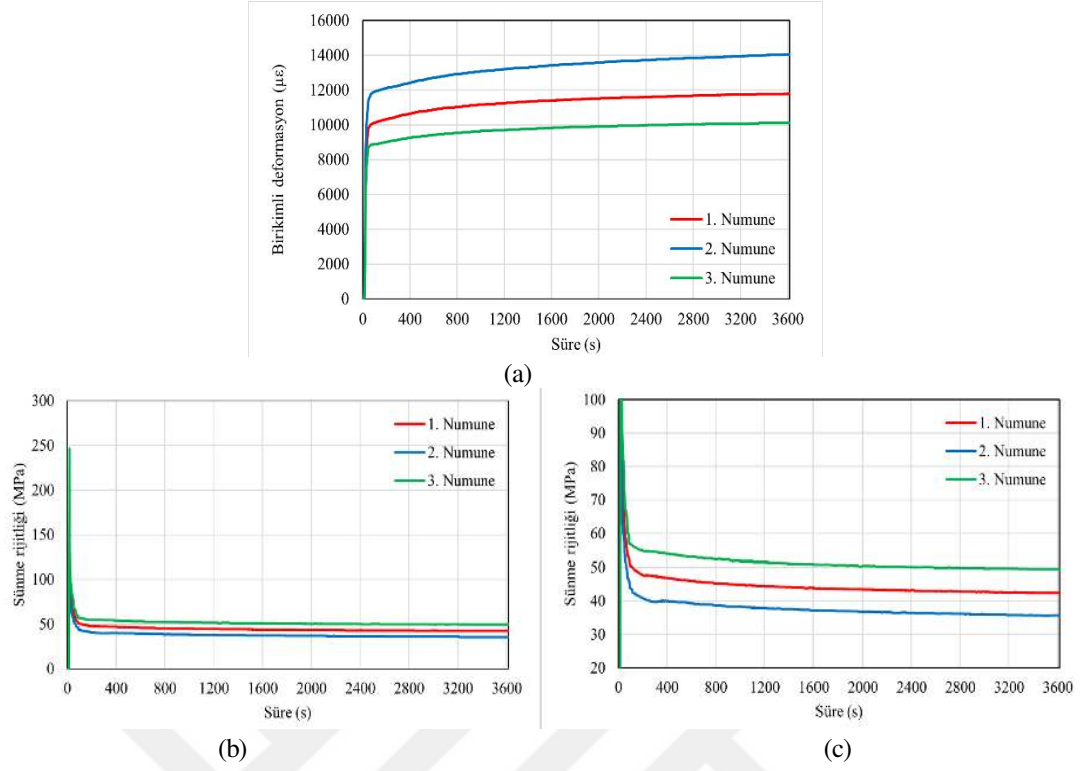
(b)



(c)

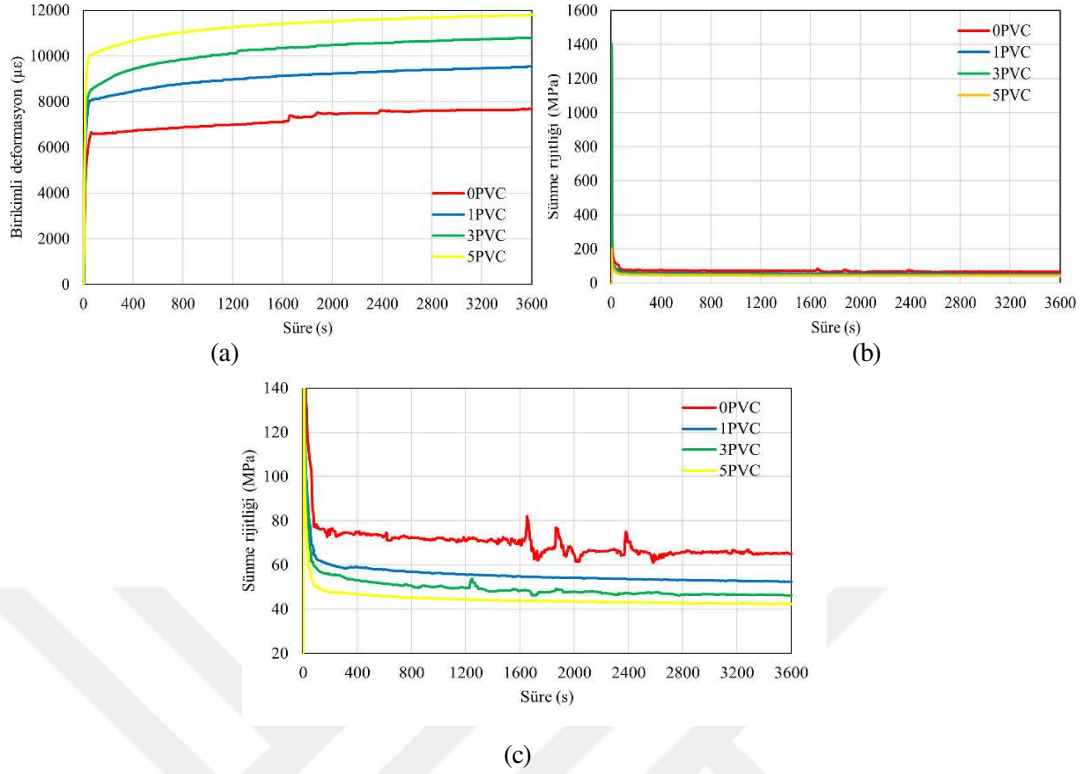
Şekil 4.8. % 3 PVC katkılı karışım için uygulanan statik sünme testine ait; a) Birikimli deformasyon-zaman, b) Sünme rijitliği-zaman ve c) Sünme rijitliği-zaman grafiğinin yakınlaştırılmış grafikleri

%5 PVC katkılı modifiye edilmiş bağlayıcı ile hazırlanan numunelere uygulanan statik sünme testine ait sonuçlar Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. % 5 PVC katkılı karışım için uygulanan statik sünme testine ait; a) Birikimli deformasyon-zaman, b) Sünme rijitliği-zaman ve c) Sünme rijitliği-zaman grafiğinin yakınlaştırılmış grafikleri

Saf ve atık PVC katkılı modifiye bitüm ile hazırlanmış karışımların statik sünme testine ait karşılaştırılmalı grafikleri Şekil 4.10'da verilmiştir.



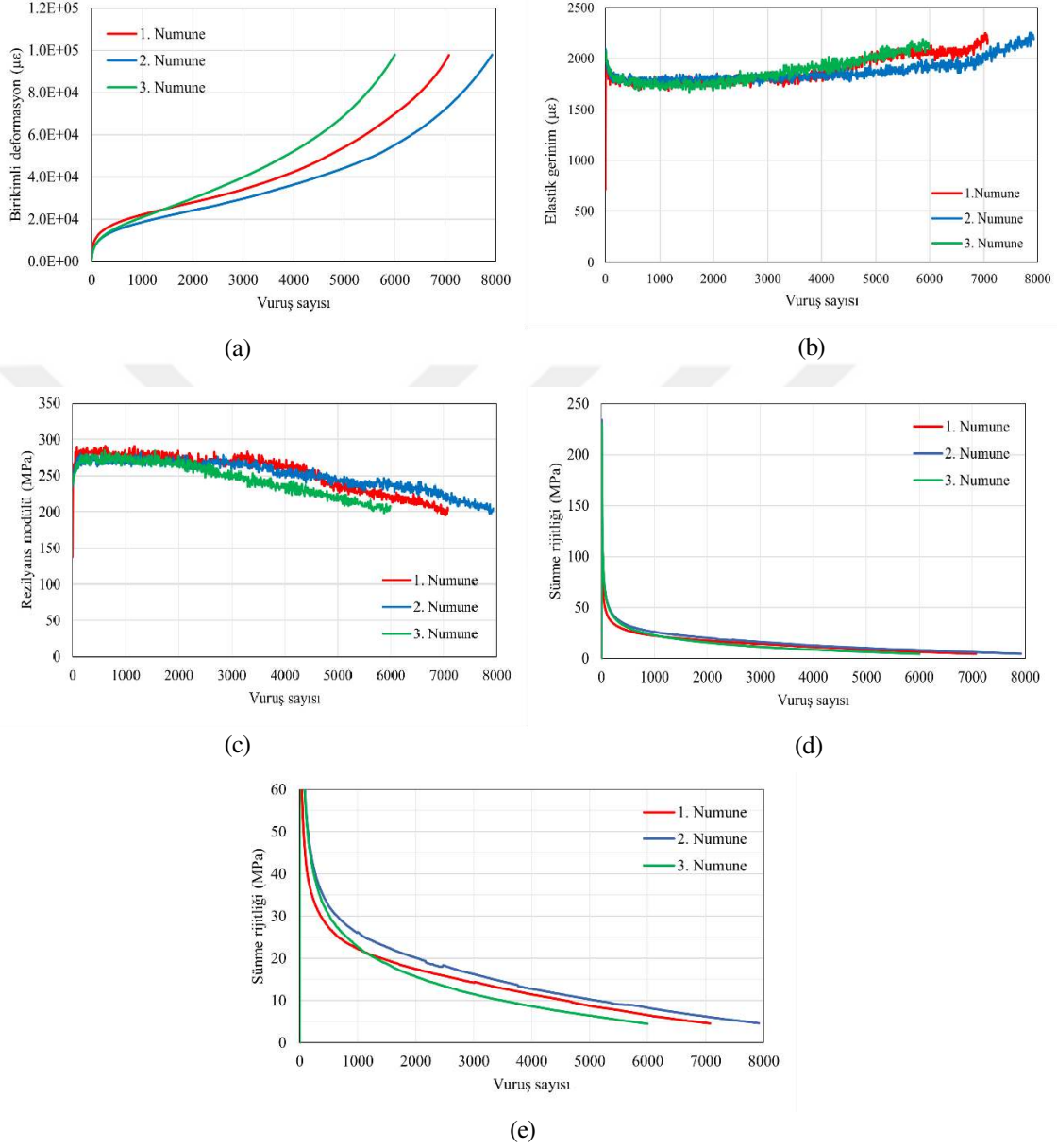
Şekil 4.10. Statik sünme testine ait saf, %1, %3 ve %5 PVC katkılı karışımların; a) Birikimli deformasyon-zaman, b) Sünme rijitliği-zaman, c) Sünme rijitliği-zaman grafiğinin yakınlaştırılmış grafiklerinin karşılaştırılmış grafikleri

Birikimli deformasyon-zaman grafikleri, PVC içeriğindeki artışın test süresi boyunca daha fazla şekil değiştirmeye yol açtığını göstermektedir. Referans karışım (0PVC), en düşük şekil değiştirme birikimini sergilerken, en yüksek PVC içeriğine sahip olan karışım (%5 PVC), en fazla şekil değiştirme gelişimini göstermiştir. Bu eğilim, PVC ilavesinin asfalt karışımının sünme deformasyonuna karşı daha duyarlı hale gelmesine neden olduğunu ve bunun da modifiye asfalt bağlayıcının ve karışımın iç yapısındaki değişimlerden kaynaklanabileceğini düşündürmektedir.

Öte yandan, sünme rijitliği-zaman grafikleri, viskoelastik malzemelerde beklenildiği üzere tüm karışımlar için zamanla azalan bir rijitlik eğilimi göstermektedir. 0PVC karışımı, test süresi boyunca en yüksek sünme rijitliğini korurken, PVC içeriği arttıkça rijitlik değerleri azalmıştır. %5 PVC içeren karışım ise en düşük rijitlik değerini göstermiş ve bu da sürekli yükleme altında kalıcı deformasyona karşı direnç kabiliyetinin azaldığını ortaya koymuştur. Bu davranış, birikimli şekil değiştirme sonuçlarıyla da uyumlu olup, daha yüksek PVC içeriğinin artan sünme deformasyonuna ve daha düşük yapısal rijitliğe yol açtığını teyit etmektedir.

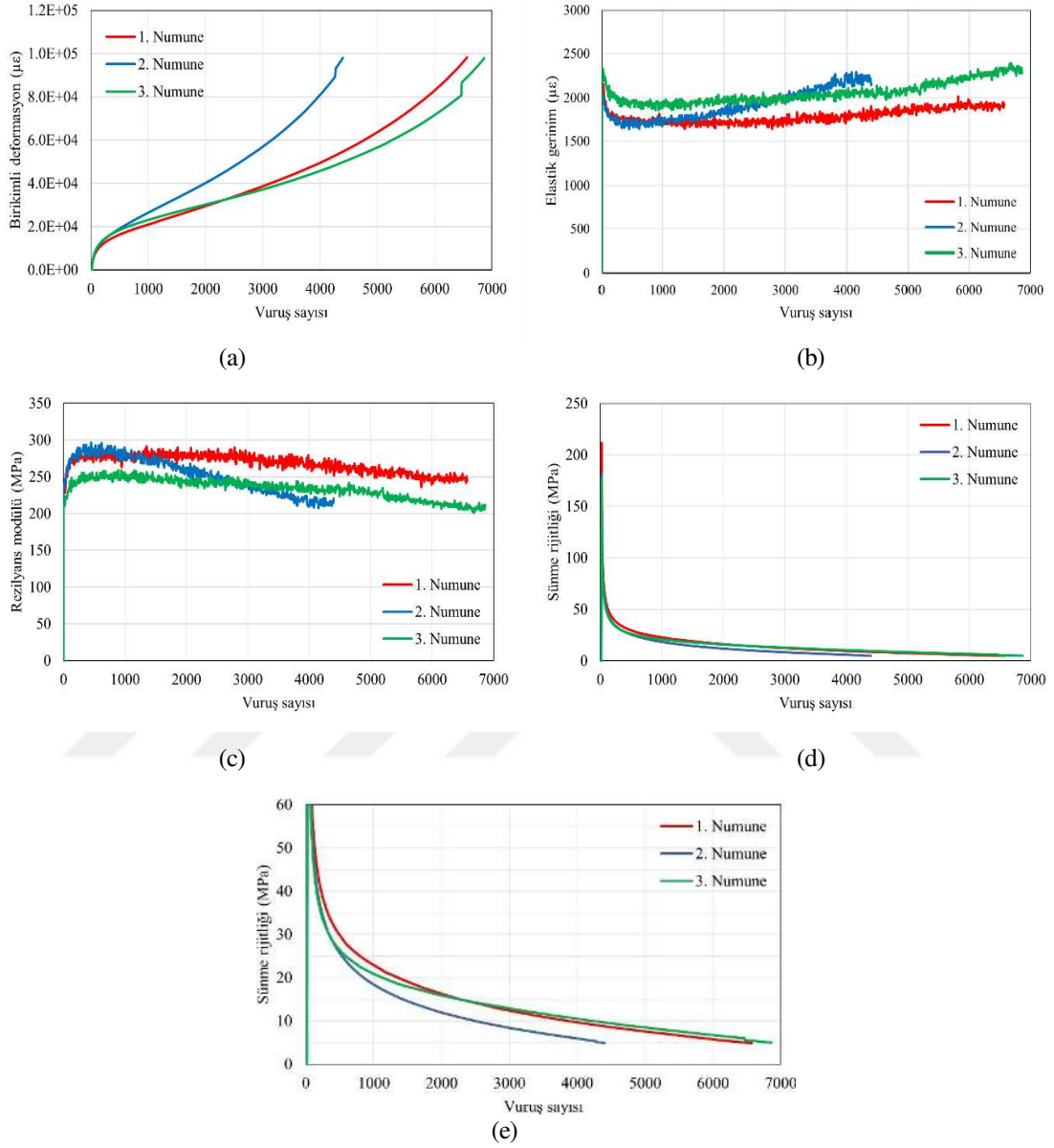
4.3.6. Dinamik sünme testi sonuçları

Saf bağlayıcılar için uygulanan dinamik sünme testi sonuçları Şekil 4.11’de verilmiştir.



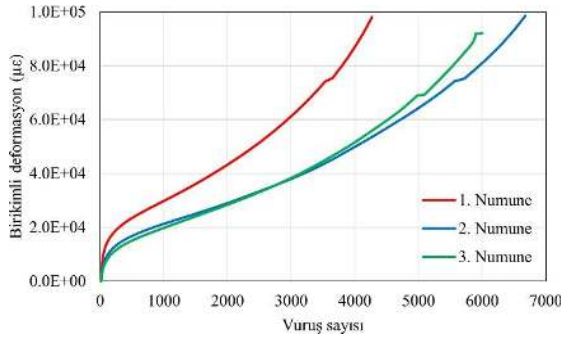
Şekil 4.11. Saf bağlayıcılar için uygulanan dinamik sünme testine ait; a) Birikimli deformasyon-vuruş sayısı, b) Elastik gerinim-vuruş sayısı, c) Rezilyans modülü-vuruş sayısı, d) Sünme rijitliği-vuruş sayısı, e) Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiğinin yakınlaştırılmış grafikleri

%1 PVC katkıli modifiye edilmiş bağlayıcı ile hazırlanan numunelere uygulanan statik sünme testine ait sonuçlar Şekil 4.12’de verilmiştir.

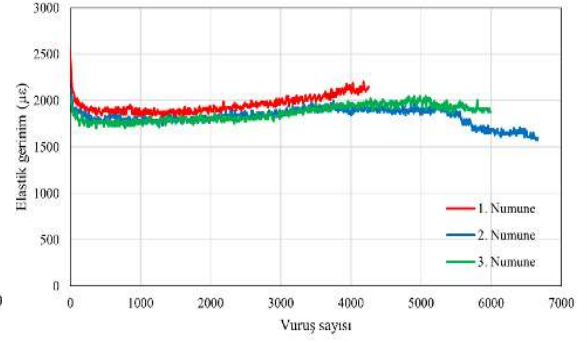


Şekil 4.12. % 1 PVC katkıli karışım için uygulanan dinamik sünme testine ait; a) Birikimli deformasyon-vuruş sayısı, b) Elastik gerinim-vuruş sayısı, c) Rezilyans modülü-vuruş sayısı, d) Sünme rijitliği-vuruş sayısı, e) Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiğinin yakınlştırılmış grafikleri

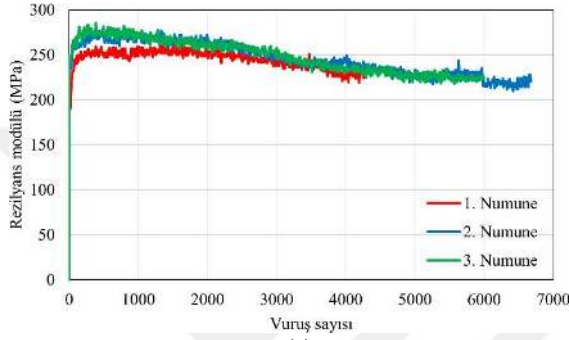
%3 PVC katkıli modifiye edilmiş bağlayıcı ile hazırlanan numunelere uygulanan statik sünme testine ait sonuçlar Şekil 4.13’te verilmiştir.



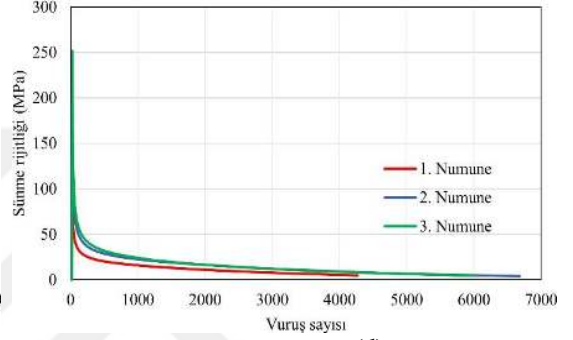
(a)



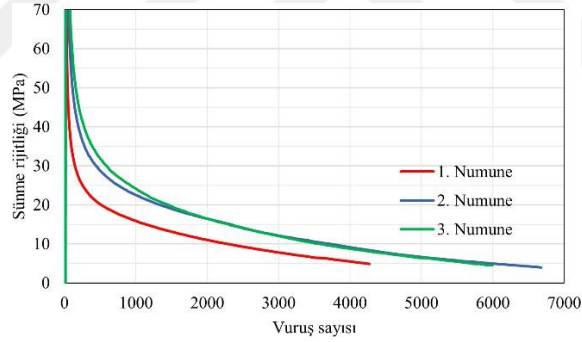
(b)



(c)



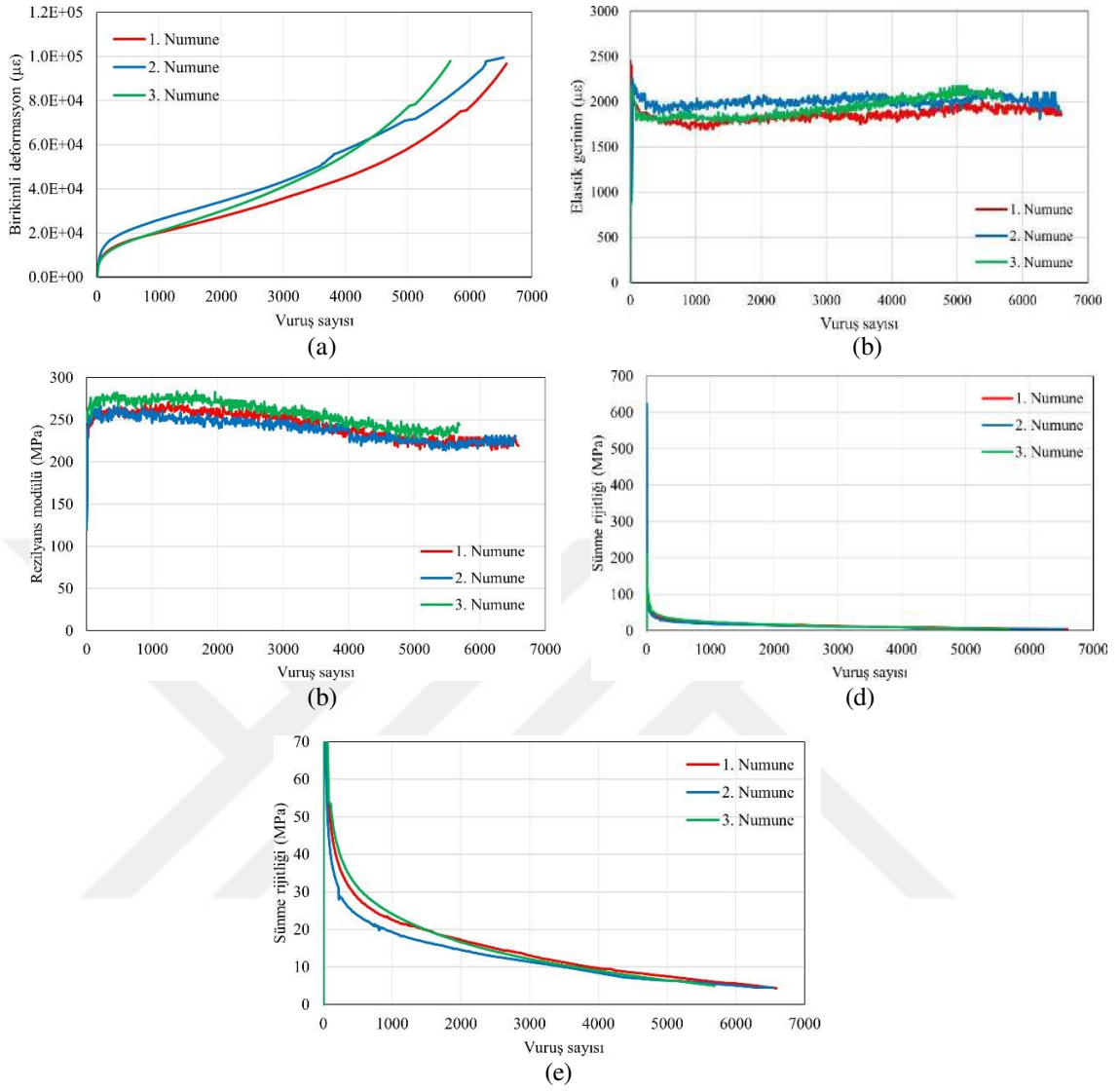
(d)



(e)

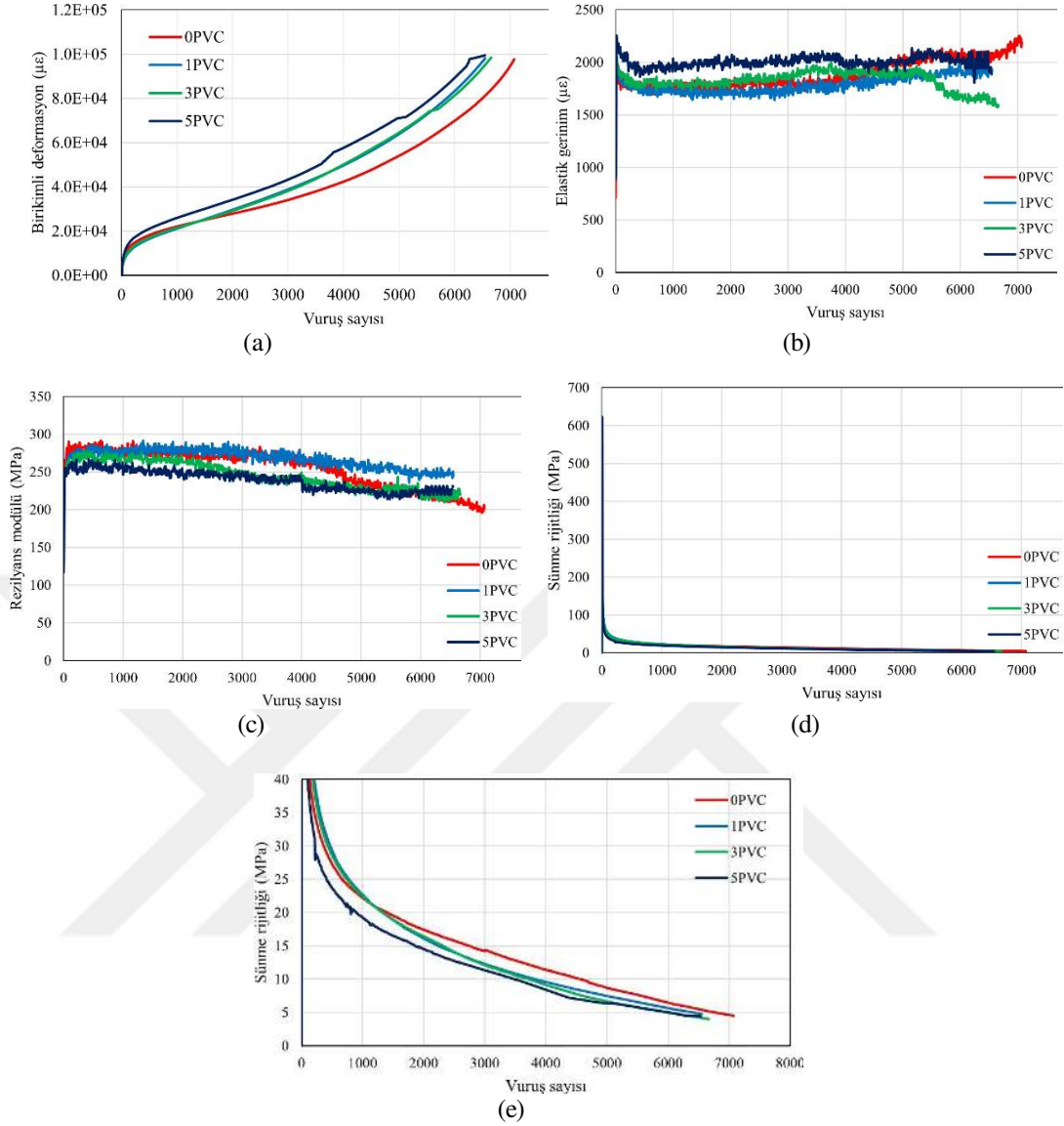
Şekil 4.13. % 3 PVC katkılı karışımlar için uygulanan dinamik sünme testine ait; a) Birikimli deformasyon- vuruş sayısı, b) Elastik gerinim-vuruş sayısı, c) Rezilyans modülü-vuruş sayısı, d) Sünme rijitliği-vuruş sayısı, e) Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiğinin yakınlaştırılmış grafikleri

%5 PVC katkılı modifiye edilmiş bağlayıcı ile hazırlanan numunelere uygulanan statik sünme testine ait sonuçlar Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. % 5 PVC katkılı karışım için uygulanan dinamik sünme testine ait; a) Birikimli deformasyon-vuruş sayısı, b) Elastik gerinim-vuruş sayısı, c) Rezilyans modülü-vuruş sayısı, d) Sünme rijitliği vuruş sayısı, e) Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiğinin yakınlaştırılmış grafikleri

Saf ve atık PVC katkılı modifiye bitüm ile hazırlanmış karışımların dinamik sünme testine ait karşılaştırılmalı grafikleri Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15. Dinamik sünme testine ait saf, %1, %3 ve %5 PVC katkılı karışımların; a) Birikimli deformasyon-vuruş sayısı, b) Elastik gerinim-vuruş sayısı, c) Rezilyans modülü-vuruş sayısı, d) Sünme rijitliği-vuruş sayısı, e) Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiğinin yakınlştırılmış grafiklerinin karşılaştırılmış grafikleri

Dinamik sünme testi sonuçları, atık PVC içeren asfalt karışımlarının 50 °C’de tekerlek izi direnci (rutting direnci) ve viskoelastik davranışları hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Deneyin sonlandırma kriteri, maksimum darbe sayısı olarak 4.10^4 veya maksimum şekil değiştirme değeri olarak 10^5 $\mu\epsilon$ olarak tanımlanmıştır.

Şekil 4.15’teki birikimli deformasyon – vuruş sayısı grafiği, tekrar eden yükleme koşullarında beklendiği üzere, tüm karışımlar için şekil değiştirmenin darbe sayısı ile birlikte arttığını göstermektedir. Referans karışım (0PVC) daha düşük şekil değiştirme değerleri göstermiş, bu da kalıcı deformasyona karşı daha iyi bir direnç sergilediklerini ortaya koymuştur. Karışımlar arasında tekrar eden yükler altında belirgin bir davranış

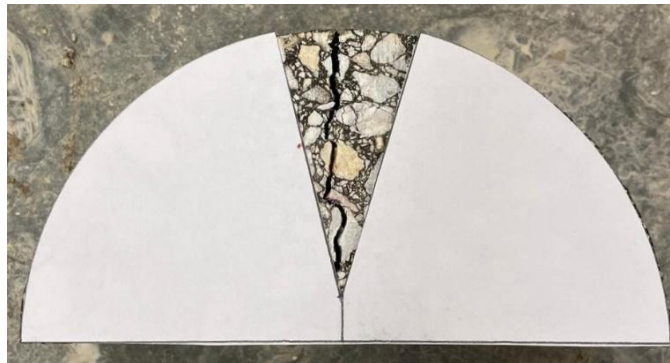
farkı gözlenmemiştir. 0PVC karışımı $10^5 \mu\epsilon$ 'ye yaklaşık 7000 darbeye ulaşırken, %1, %3 ve %5 PVC içeren karışımlar yaklaşık 6500 darbeye bu değere ulaşmıştır. Bu durum, PVC ilavesinin karışımın tekrar eden yüklere karşı direncini azalttığını ve yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna karşı daha duyarlı hale getirdiğini göstermektedir.

Daha yüksek PVC içeriğine sahip karışımlar (%3PVC ve %5PVC), 50 °C'de daha belirgin şekil değiştirme birikimi göstermiştir; bu sıcaklıkta deformasyonun hızlandığı gözlemlenmiştir.

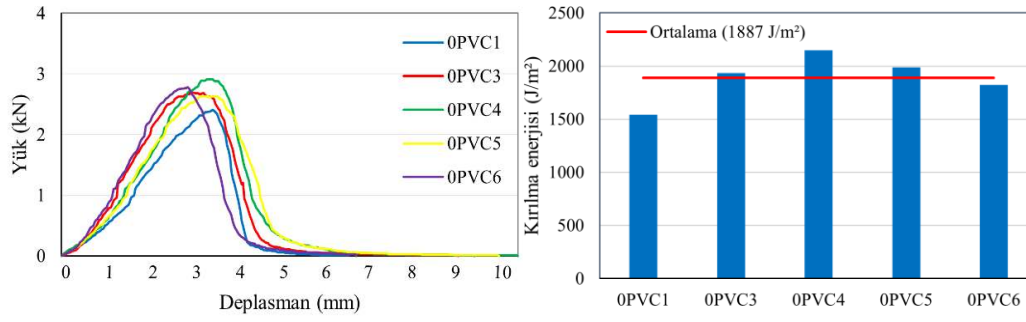
Sünme rijitliği – vuruş sayısı grafiği (Şekil 4.15) bu bulguları desteklemektedir. Tüm karışımların rijitlikleri zamanla azalmış, bu da döngüsel yükleme altında ilerleyici yumuşama ve artan deformasyonu yansıtmaktadır. %1 PVC ile modifiye edilmiş bağlayıcı ile hazırlanan karışım test boyunca daha yüksek rijitlik değerini korumuştur. Karışımlar daha düşük rijitlik göstermiş ve önemli bir azalma yaşanmıştır. Bu durum, PVC ile modifiye edilmiş karışımların yüksek sıcaklıklarda sürekli yükleme altında rijitliklerini daha fazla kaybettiğini göstermektedir.

4.3.7. Yarı dairesel eğilme (SCB) testi sonuçları

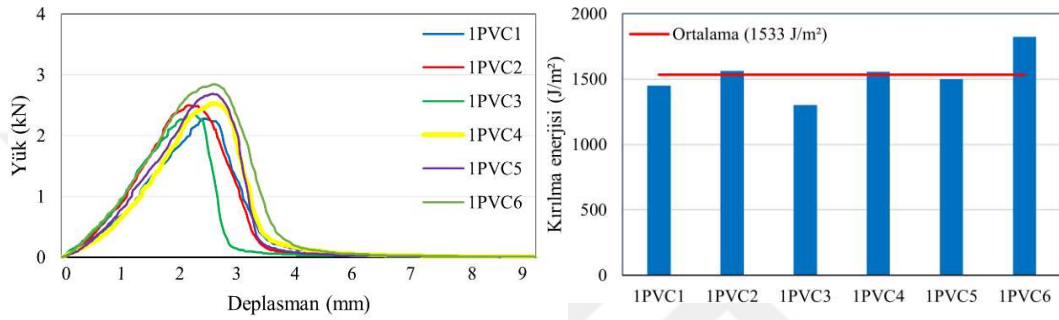
Tüm gruplar altı tekrar numunesiyle teste tabi tutulmuştur. Tüm numunelerde çatlama bölgesi 1:1 ölçekli kağıt kullanılarak Şekil 4.16'daki gibi kontrol edilmiştir. 0PVC grubundaki bir numune (0PVC2), gözlemlenen çatlak ilerleme hattının tanımlanmış geçerli bölgenin dışında olması nedeniyle değerlendirme dışı bırakılmıştır. Geriye kalan tüyayım numunelerdeki çatlaklar geçerli çatlama bölgesi içerisinde yer almıştır. Elde edilen yük-deplasman eğrilerinden kırılma enerjileri trapezoid yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve ortalamaları bulunmuştur. Saf bitüm ile hazırlanmış karışımlara ait yarı dairesel eğilme deneyi sonuçları Şekil 4.17'de verilmiştir.



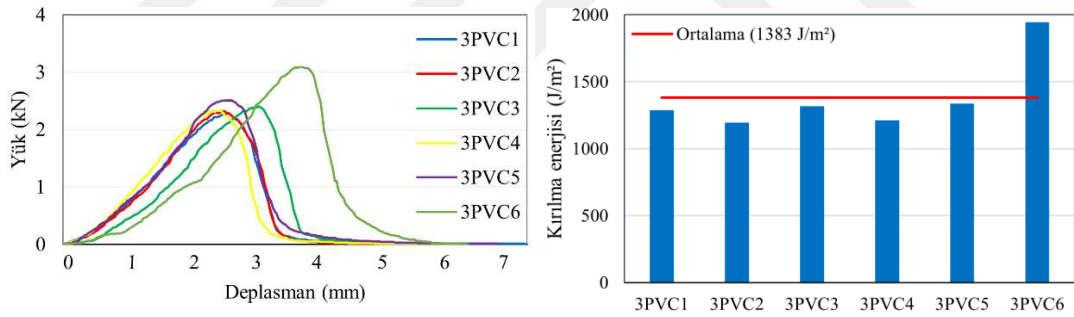
Şekil 4.16. Geçerli çatlama bölgesi kontrolü



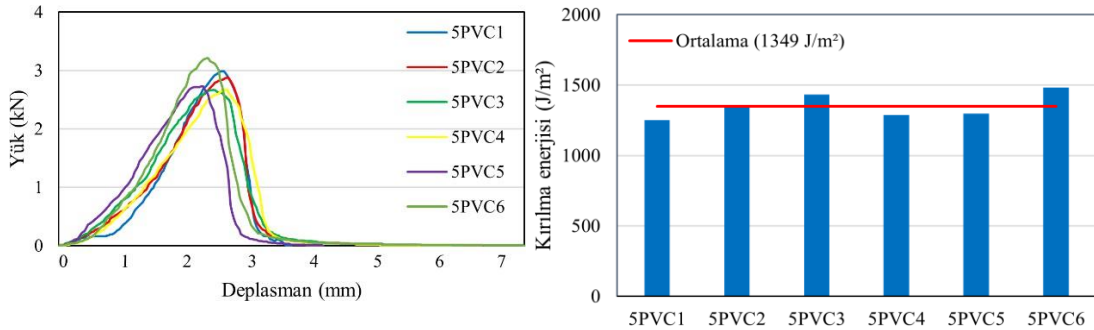
Şekil 4.17. Saf bağlayıcılı karışımların SCB testine ait; a) Yük-deplasman, b) Kırılma enerjisi grafikleri



Şekil 4.18. % 1 PVC katkılı karışımların SCB testine ait; a) Yük-deplasman, b) Kırılma enerjisi grafikleri



Şekil 4.19. % 3 PVC katkılı karışımların SCB testine ait; a) Yük-deplasman, b) Kırılma enerjisi grafikleri



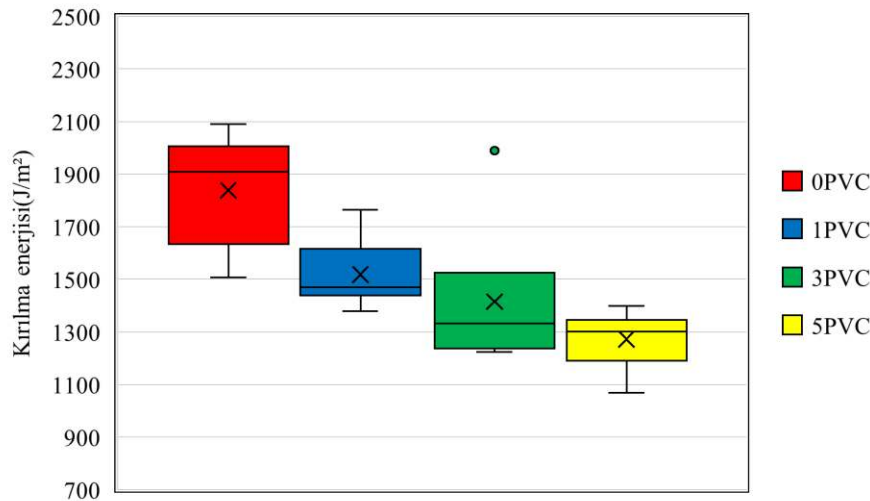
Şekil 4.20. % 5 PVC katkılı karışımların SCB testine ait; a) Yük-deplasman, b) Kırılma enerjisi grafikleri

4.3.7.1. Kırılma enerjisi

Hesaplanan kırılma enerjilerinin ortalama değerler ve dağılımları Şekil 4.21’de verilmiştir. Kırılma enerjisi, tamamen kırılmadan önce malzeme tarafından emilen

toplam enerjiyi temsil eder ve bu da çatlamaya karşı direncin bir göstergesidir. Daha yüksek kırılma enerjisi değerleri, daha iyi tokluk ve çatlak ilerlemesine karşı direnç anlamına gelir; bu da dayanıklı asfalt kaplamalar için kritik önemdedir.

Şekil 4.21’de gösterildiği üzere, saf bitümle (0PVC) hazırlanan karışım en yüksek kırılma enerjisini göstermiştir (medyan değer: 1839 J/m²), bu da PVC modifikasyonu olmadan karışımın üstün çatlak direncine sahip olduğunu göstermektedir. %1 PVC ilavesiyle (1PVC), kırılma enerjisi 1518 J/m²’ye düşmüştür; bu da küçük bir PVC katkısının bile kırılma öncesi enerji emme kapasitesini azalttığını göstermektedir. PVC oranı arttıkça bu düşüş devam etmiş, 3PVC karışımı 1415 J/m², 5PVC karışımı ise en düşük kırılma enerjisi olan 1272 J/m² değerini göstermiştir. PVC içeriği arttıkça kırılma enerjisindeki bu kademeli azalma, PVC’nin asfalt karışımını sertleştirdiğini ve kırılma sırasında enerjiyi yayma kapasitesini azalttığını göstermektedir.



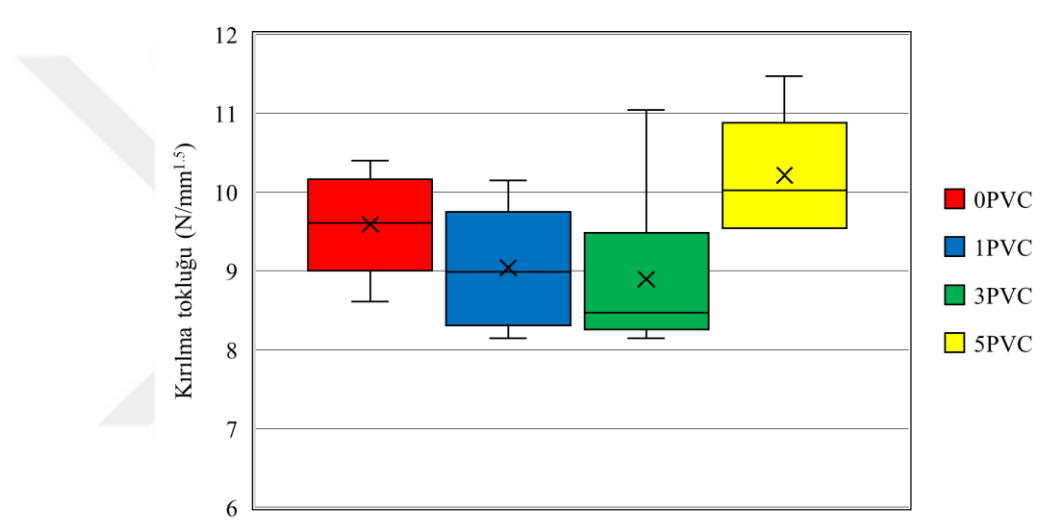
Şekil 4.21. Tüm karışım tipleri için kırılma enerjisi değerleri

4.3.7.2. Kırılma tokluğu

Farklı atık PVC içeriklerine sahip asfalt karışımları için kırılma tokluğu değerleri Şekil 4.22’de sunulmuştur. Kırılma tokluğu, yükleme altındaki çatlak ilerlemesine karşı malzemenin direncini nicel olarak ifade eden önemli bir parametredir. Daha yüksek kırılma tokluğu değerleri, asfalt kaplamaların uzun ömürlü olması için kritik olan çatlama direncinin arttığını gösterir.

Şekil 4.22’de görüldüğü gibi, saf bitümle hazırlanan karışım, ortalama 9.59 N/mm^{1.5} kırılma tokluğu değeriyle dengeli bir çatlak başlatma ve ilerleme direnci sergilemiştir. %1 PVC içeren karışım, kontrol grubuna kıyasla hafif bir düşüş göstermiş olup ortalama değeri 9.04 N/mm^{1.5}’tir. Bu, %1 PVC ilavesinin asfalt karışımının kırılma

direncini önemli ölçüde zayıflatmadığını göstermektedir. Ancak daha yüksek PVC dozajlarında, sonuçlar daha belirgin farklılıklar göstermiştir. %3 PVC içeren karışım, 8.90 N/mm^2 ,⁵ ortalama değeriyle daha düşük bir kırılma tokluğu sergilemiştir; bu da PVC parçacıklarının asfalt matrisinde sertleştirici etkisinin kırılma direncini azaltabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, % 5 PVC içeren karışım, ters bir eğilim sergilemiş ve 10.21 N/mm^2 ,⁵yi aşarak en yüksek kırılma tokluğu değerine ulaşmıştır. Bu durum, daha yüksek PVC konsantrasyonlarında karışımın daha birbirine bağlı bir yapı oluşturarak kırılma sırasında enerji emilimini artırabileceğini ve karışımın tokluğunu geliştirebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.22. Tüm karışım tipleri için karışım tokluğu değerleri

4.3.7.3. Esneklik indeksi

Farklı oranlarda atık PVC içeren asfalt karışımları için esneklik indeksi (FI) sonuçları Şekil 4.23'te sunulmuştur. FI değerleri, Illinois Esneklik İndeksi Testi (I-FIT) kullanılarak belirlenmiştir ve asfalt numunelerinin çatlama direnci hakkında bilgi vermektedir. Daha yüksek FI değerleri, daha fazla esneklik ve gevrek kırılmaya karşı gelişmiş direnç anlamına gelirken; daha düşük FI değerleri daha gevrek bir davranışı ifade eder.

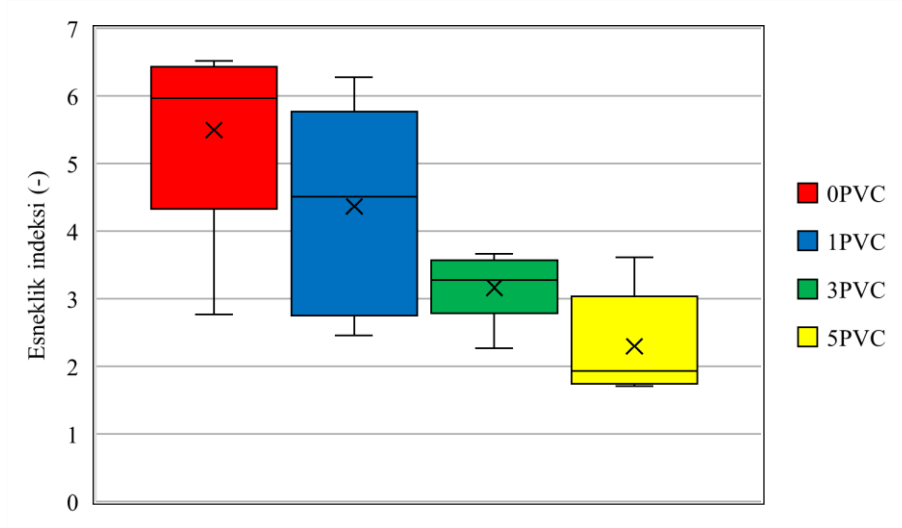
Şekil 4.23'te görüldüğü gibi, saf bitümle hazırlanan karışım ortalama 6.31 değeriyle en yüksek esneklik indeksine sahiptir. Bu, PVC katkısı olmayan baz asfalt karışımının, modifiye karışımlara kıyasla daha iyi esneklik ve çatlak ilerlemesine karşı direnç gösterdiğini ortaya koymaktadır. %1 PVC katkısı FI değerinde %36'lık bir azalmaya neden olmuş (4.03), ancak bu karışım yine de daha yüksek PVC içerikli karışımlara göre orta düzeyde esnekliğini korumuştur. 0PVC ve 1PVC gruplarında FI

değerlerinin değişkenliği, daha geniş çeyrekler arası aralıklarla ifade edilmiştir. PVC oranı %3'e ve %5'e çıktığında FI değerlerinde sırasıyla %49 (3.25) ve %64 (2.30) oranlarında belirgin azalmalar gözlemlenmiştir. 3PVC karışımı ortalama 3.24 FI değeriyle baz karışıma göre esneklikte önemli bir düşüş sergilemiştir. Bu durum, yüksek PVC içeriğinin asfaltı daha sert hale getirdiğini ve dolayısıyla çatlak direncini azalttığını göstermektedir. Eğilim, %5 PVC içeren karışımla da devam etmiş; bu karışım en düşük esneklik indeksini göstermiştir (medyan değer: 2.30 civarında). %5 PVC içeren karışım için çeyrekler arası aralığın daha dar olması, numuneler arasında daha tutarlı bir davranış sergilendiğini göstermektedir; ancak genel esneklik önemli ölçüde azalmıştır.

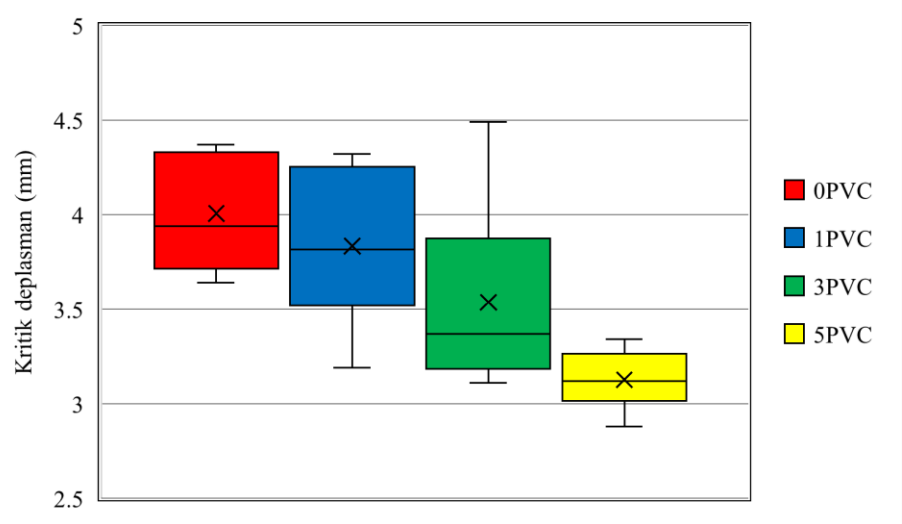
Esneklik indeksi değerine ek olarak, I-FIT programı ile elde edilen bir diğer yardımcı parametre de kritik yer değiştirme (critical displacement – CD) değeridir. Bu, tepe sonrası eğimle yer değiştirme ekseninin kesişim noktası olarak tanımlanır.

Farklı PVC içeriği ile hazırlanan asfalt karışımları için kritik yer değiştirme değerleri Şekil 4.24'te verilmiştir. Kritik yer değiştirme, sünekliği ve kırılmaya karşı direnci belirlemede ek bir parametre olarak değerlendirilir. Daha yüksek CD değerleri, genellikle artan tokluk ve kırılmadan önce daha fazla şekil değiştirme kabiliyetine işaret eder.

Şekil 4.24'te gösterildiği üzere, kontrol karışımı (0PVC) en yüksek ortalama kritik yer değiştirme değerine (4.01 mm) sahiptir ve PVC katkısı olmadan yüksek süneklik gösterdiğini ortaya koymaktadır. 1PVC karışımı benzer bir davranış sergilemiş olup ortalama CD değeri 3.83 mm'dir ve bu da %1 PVC katkısının asfaltın şekil değiştirme kapasitesini (%4.5 oranında) anlamlı şekilde değiştirmediğini göstermektedir. Daha yüksek PVC içeriğinde, kritik yer değiştirme değerinde kademeli bir düşüş gözlemlenmiştir. 3PVC karışımı ortalama 3.54 mm, 5PVC karışımı ise ortalama 3.13 mm değerinde CD göstermiştir.



Şekil 4.23. Tüm karışım tipleri için esneklik indeksi değerleri



Şekil 4.24. Tüm karışım tipleri için kritik yer değiştirme değerleri

5. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, yukarıda verilen yöntemler ve bu yöntemlerden elde edilen bulgulardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Atık PVC'den elde edilen PVC tozu ile modifiye edilmiş bitümlerin viskozite değerleri artmıştır. Dolayısı ile ihtiyaç duyulan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları da yükselmiştir. Bununla beraber modifiye bitümlerin yumuşama noktaları da yükselmiştir. Dolayısı ile sahada uygulanmış olan bir PVC modifiyeli bitüm sıcaklık değişimine karşı duyarsızlaşmış olacaktır.

- PVC modifiye bitümlerin penetrasyon indeksi değerleri saf bitümden daha yüksektir. Bu durum PVC modifikasyonunun bitümün sıcaklığa karşı olan duyarlılığını azaltmıştır. %3PVC modifiyeli bitümde ise penetrasyon indeksi maksimum olmuştur. PVC modifikasyonu aynı bitümün farklı iklimlerde kullanılabilirliğini genişletmiştir.

- Optimum bitüm içeriği %1 ve %3 katkılı bitüm için azalmıştır. %1-3 aralığında yapılacak PVC modifikasyonu ihtiyaç duyulan bitüm oranını %3 oranında azaltacaktır.

- %1 ve %5 PVC modifiyeli karışımlarda stabilite değerleri en yüksek değerlere ulaşmıştır. Ancak akma değeri %1 için 2.13 mm olmuştur. Stabilite ve akma değerleri üzerinden değerlendirildiğinde %1 PVC modifikasyonlu karışım en iyi performansı vermiştir.

- Endirek çekme değerleri (ITS) saf ve PVC modifiyeli karışımlarda şartname limitlerinin üzerindedir. Bütün modifikasyon oranları şartname uyarınca kullanılabilir. %1 PVC'li modifikasyonda ITS değeri maksimuma ulaşmıştır. Ayrıca ITS oranlarının kıyasına bakıldığında %3 PVC modifiyeli bitümle hazırlanan karışımın ITS oranı %98 olmuştur. %3 PVC modifiyeli bitümlü karışım nemden ve donma-çözülme döngüsünden neredeyse etkilenmemiştir.

- Dinamik sünme testleri, tekerlek izi direncine dair daha kapsamlı bir değerlendirme sunmuştur. Yüksek sıcaklıklarda (50°C), PVC ile modifiye edilmiş karışımların akış sayılarında hafif bir azalma gözlemlenmiş; bu da PVC ilavesinin tekerlek izi direncini artırmadığını ortaya koymuştur.

- Elastik modül testleri, PVC modifikasyonunun 50°C'de elastik davranışı iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Yüksek sıcaklıklarda %1 PVC modifikasyonu, tekrarlı yükler altında elastik modülün korunmasına katkı sağlamıştır.

- ITSM test sonuçları, PVC ilavesiyle birlikte sertlikte belirgin bir artış olduğunu göstermiştir; bu da PVC ile modifiye edilmiş asfalt karışımlarının tekerlek izi oluşumuna karşı dirençli olduğunu ancak esnekliklerinde potansiyel bir azalma yaşandığını

düşündürmektedir.

- SCB testlerinden elde edilen bulgular bu sonuçları desteklemiş ve PVC içeriği arttıkça kırılma enerjisinin azaldığını, dolayısıyla esnekliğin azaldığını göstermiştir. Bu eğilim, ITSM sonuçlarıyla da örtüşmektedir. Kırılma tokluğu, %3'e kadar artan PVC içeriğiyle birlikte azalma göstermiştir. Ancak %5 PVC ile modifiye edilen karışımda, daha düşük kırılma enerjisine rağmen kırılma tokluğundaki artış, yük-deplasman eğrisindeki maksimum yükün kırılma tokluğunu etkilediğini ve bu parametrenin tek başına kırılma davranışını tam olarak yansıtamayabileceğini göstermektedir.

- Esneklik İndeksi (FI), kırılma davranışı konusunda daha net bir bakış sunmuştur. PVC ilavesiyle birlikte FI değerleri azalmış ve diğer testlerde gözlemlenen esneklik kaybını doğrulamıştır.

Genel olarak, bu çalışma PVC modifikasyonunun sıcak karışım asfalt performansında belirgin bir avantaj sunmadığını ortaya koymuştur. %1 PVC modifikasyonu yüksek sıcaklıkta (50°C) elastik modülün daha kararlı kalmasına katkı sağlamıştır. Bu özel durum dışında, daha yüksek PVC içerikleri genellikle sertliği artırmış, esnekliği azaltmış ve yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direncinde anlamlı bir iyileşme sağlamamış; bu da asfalt kaplama uygulamalarında pratik faydalarını sınırlamış ve sıcak karışım asfaltta PVC kullanımının yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna (rutting) karşı duyarlılığı artırabileceğini göstermiştir. Nihai olarak PVC modifiyeli asfalt karışımların yüksek sıcaklığa maruz kalmayan düşük trafikli yollarda uygulamada kullanılabilir olabileceği değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında yoğun gradasyonlu agrega tercih edilmiştir. İlerleyen çalışmalarda farklı gradasyonlar için ideal PVC katkısı oranı tespit edilebilir. Ayrıca çalışma kapsamında en iyi performans %1 ve %3 PVC modifikasyonu aralığında elde edilmiştir. Dolayısı ile gelecekte yapılabilecek çalışmalarda %2 PVC ile modifiye edilmiş bitümlü karışımın performansı %1 ve %3 PVC ile modifiye edilmiş karışımlarla kıyaslanarak modifikasyon değeri optimize edilebilir.

SCB testleri yalnızca orta sıcaklıkta (25°C) gerçekleştirilmiştir. Farklı sıcaklıklarda yapılacak testler, PVC modifikasyonunun sıcak karışım asfalt üzerindeki kırılma davranışına dair daha kapsamlı bir görüş sağlayacaktır. Ayrıca, çalışmada yalnızca çekme kırılması (Mod I) değerlendirilmiştir. Kesme kırılması (Mod II) ve karma mod (Mod I+II) testlerinin yapılması, kırılma analizine daha ayrıntılı bir yaklaşım sunacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Gedde, U.W. ve Hedenqvist, M.S. (2019). *Fundamental Polymer Science. Graduate Texts in Physics*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-29794-7.
- [2] Echte, A., Haaf, F. and Hambrecht, J. (1981). Half a century of polystyrene, a survey of the chemistry and physics of a pioneering material. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 20 (4), 344-361. Nis. 1981. doi: 10.1002/anie.198103441.
- [3] Brandrup, J., Immergut, E.H. ve Grulke, E.A. (Ed.) (1999). *Polymer handbook*, 4th ed. New York: Wiley.
- [4] Rajeswari, S. (2017). Natural polymers: A recent review. *WJPPS*, 472-494. Ağu. 2017. doi: 10.20959/wjpps20178-9762.
- [5] Tamošaitienė, J., Parham, S., Sarvari, H., Chan, D.W.M. ve Edwards, D.J. (2024). A review of the application of synthetic and natural polymers as construction and building materials for achieving sustainable construction. *Buildings*, 14 (8), 2569. Ağu. 2024. doi: 10.3390/buildings14082569.
- [6] Odian G. (2004), *Principles of Polymerization*, 1. bs. Wiley, doi: 10.1002/047147875x.
- [7] Das, T.K. ve Prusty, S. (2012). Review on conducting polymers and their applications. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 51(14), 1487–1500. doi: 10.1080/03602559.2012.710697.
- [8] Lieberzeit, P., Bekchanov, D. ve Mukhamediev, M. (2022). Polyvinyl chloride modifications, properties, and applications: Review. *Polymers for Advanced Technologies*, 33(6), 1809–1820. doi: 10.1002/pat.5656.
- [9] Ashby, M.F. ve Jones, D.R.H. (Eds.) (2012). *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications, and Design* (4th ed.). Boston, MA: Butterworth-Heinemann.
- [10] Kloxin, C.J. ve Bowman, C.N. (2013). Covalent adaptable networks: Smart, reconfigurable and responsive network systems. *Chemical Society Reviews*, 42(17), 7161–7173. doi: 10.1039/C3CS60046G.
- [11] Röttger, M., Domenech, T., Van Der Weegen, R., Breuillac, A., Nicolaÿ, R. ve Leibler, L. (2017). High-performance vitrimers from commodity thermoplastics through dioxaborolane metathesis. *Science*, 356(6333), 62–65. doi: 10.1126/science.aah5281.

- [12] Pilapitiya, P.G.C.N.T. ve Ratnayake, A.S. (2024). The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, 11, 100220. doi: 10.1016/j.clema.2024.100220.
- [13] Sarkingobir, Y., Dikko, M., Aliyu, S., Tambari, U., Adamu, A. ve Salau, I.A. (2020). The dangers of plastics to public health: A review. *NIPES Journal of Engineering and Technology*, 2(2), 196. doi: 10.37933/nipes/2.2.2020.20.
- [14] Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M. ve Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*, 262, 113640. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113640.
- [15] Ratna, D. (Ed.) (2009). *Handbook of Thermoset Resins*. Handbook Series. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire: iSmithers.
- [16] Li, C. ve Strachan, A. (2015). Molecular scale simulations on thermoset polymers: A review. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 53(2), 103–122. doi: 10.1002/polb.23489.
- [17] Aksakal, R., Mertens, C., Soete, M., Badi, N. ve Du Prez, F. (2021). Applications of discrete synthetic macromolecules in life and materials science: Recent and future trends. *Advanced Science*, 8(6), 2004038. doi: 10.1002/advs.202004038.
- [18] Guo, Q. (2018). *Thermosets: Structure, Properties, and Applications* (2nd ed.). Amsterdam: Elsevier.
- [19] Stenzenberger, H.D. (1993). Recent developments of thermosetting polymers for advanced composites. *Composite Structures*, 24(3), 219–231. doi: 10.1016/0263-8223(93)90216-D.
- [20] Vengatesan, M.R., Varghese, A.M. ve Mittal, V. (2018). Thermal properties of thermoset polymers. In: *Thermosets*. Elsevier, pp. 69–114. doi: 10.1016/B978-0-08-101021-1.00003-4.
- [21] Pascault, J. ve Williams, R.J.J. (2013). Thermosetting polymers. In: Saldívar-Guerra, E. ve Vivaldo-Lima, E. (Eds.), *Handbook of Polymer Synthesis, Characterization, and Processing* (1st ed.), pp. 519–533. Wiley. doi: 10.1002/9781118480793.ch28.
- [22] Kausar, A. (2017). Role of thermosetting polymer in structural composite. *American Journal of Polymer Science & Engineering*, 5(1), 1–12.
- [23] Brydson, J.A. (1999). *Plastics Materials* (7th ed.). Oxford; Boston: Butterworth-Heinemann.

- [24] Penczek, P., Czub, P. ve Pielichowski, J. (2005). Unsaturated polyester resins: Chemistry and technology. In: *Crosslinking in Materials Science*, Vol. 184, *Advances in Polymer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 1–95. doi: 10.1007/b136243.
- [25] Pascault, J.-P. ve Williams, R.J.J. (2018). Overview of thermosets: Present and future. In: Guo, Q. (Ed.), *Thermosets: Structure, Properties and Applications* (2nd ed.). Oxford, UK: Elsevier, pp. 3–34. doi: 10.1016/b978-0-08-101021-1.00001-0.
- [26] Gangil, B., Kumar, S., Tejyan, S., Ranakoti, L. ve Verma, S. (2024). Introduction to thermosetting polymer composites: Applications, advantages, and drawbacks. In: *Dynamic Mechanical and Creep-Recovery Behavior of Polymer-Based Composites*. Elsevier, pp. 11–19. doi: 10.1016/B978-0-443-19009-4.00002-3.
- [27] Mullins, M.J., Liu, D. ve Sue, H.-J. (2018). Mechanical properties of thermosets. In: *Thermosets*. Elsevier, pp. 35–68. doi: 10.1016/B978-0-08-101021-1.00002-2.
- [28] Bîrcă, A., Gherasim, O., Grumezescu, V. ve Grumezescu, A.M. (2019). Introduction in thermoplastic and thermosetting polymers. In: *Materials for Biomedical Engineering*. Elsevier, pp. 1–28. doi: 10.1016/B978-0-12-816874-5.00001-3.
- [29] Backes, E.H. vd. (2024). Thermoplastic polyurethanes: Synthesis, fabrication techniques, blends, composites, and applications. *Journal of Materials Science*, 59(4), 1123–1152. doi: 10.1007/s10853-023-09077-z.
- [30] Baek, Y.-M., Shin, P.-S., Kim, J.-H., Park, H.-S., DeVries, K.L. ve Park, J.-M. (2020). Thermal transfer, interfacial and mechanical properties of carbon fiber/polycarbonate CNT composites using infrared thermography. *Polymer Testing*, 81, 106247. doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.106247.
- [31] Ibeh, C.C. (2011). *Thermoplastic Materials: Properties, Manufacturing Methods, and Applications*. CRC Press. doi: 10.1201/b13623.
- [32] Amanat, N., James, N.L. ve McKenzie, D.R. (2010). Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices. *Medical Engineering & Physics*, 32(7), 690–699. doi: 10.1016/j.medengphy.2010.04.011.
- [33] Pascault, J.-P. ve Williams, R.J.J. (2018). Overview of thermosets: Present and future. In: Guo, Q. (Ed.), *Thermosets: Structure, Properties, and Applications* (2nd ed.), pp. 3–34. Oxford, UK: Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-08-101021-1.00001-0.

- [34] Zakaulla, M., Parveen, F., Amreen, Harish ve Ahmad, N. (2020). Artificial neural network-based prediction on tribological properties of polycarbonate composites reinforced with graphene and boron carbide particle. *Materials Today: Proceedings*, 26, 296–304. doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.276.
- [35] Tess, R.W. ve Poehlein, G.W. (Eds.) (1985). *Applied Polymer Science* (ACS Symposium Series, Vol. 285). Washington, D.C.: American Chemical Society. doi: 10.1021/bk-1985-0285.
- [36] Li, H. vd. (2020). Interfacial adhesion and shear behaviors of aramid fiber/polyamide 6 composites under different thermal treatments. *Polymer Testing*, 81, 106209. doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.106209.
- [37] Song, X., Wang, Y., Jiao, C., Huang, M., Wang, G.-H. ve Jiang, H. (2020). Microstructure regulation of polyamide nanocomposite membrane by functional mesoporous polymer for high-efficiency desalination. *Journal of Membrane Science*, 597, 117783. doi: 10.1016/j.memsci.2019.117783.
- [38] Olivera, S., Muralidhara, H.B., Venkatesh, K., Gopalakrishna, K. ve Vivek, C.S. (2016). Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: A review. *Journal of Materials Science*, 51(8), 3657–3674. doi: 10.1007/s10853-015-9668-7.
- [39] Kozlova, I.I. (2024). Brief history of the creation and development of adhesive polyvinyl chloride plastisols (Review). *Polymer Science Series D*, 17(3), 551–555. doi: 10.1134/S199542122470093X.
- [40] Everard, M. (2020). Twenty years of the polyvinyl chloride sustainability challenges. *Vinyl Additive Technology*, 26(3), 390–402. doi: 10.1002/vnl.21754.
- [41] Mulder, K. ve Knot, M. (2001). PVC plastic: A history of systems development and entrenchment. *Technology in Society*, 23(2), 265–286. doi: 10.1016/S0160-791X(01)00013-6.
- [42] Mark, J.E. (2007). *Physical Properties of Polymers Handbook* (2nd ed.). New York: Springer.
- [43] Brockmann, W., Geiß, P.L., Klingen, J. ve Schröder, B. (2008). *Adhesive Bonding: Materials, Applications and Technology* (1st ed.). Wiley. doi: 10.1002/9783527623921.
- [44] Thornton, J. (2002). *Environmental Impacts of Polyvinyl Chloride (PVC), Building Materials*. Washington, D.C.: Healthy Building Network.
- [45] Daniels, P.H. (2009). A brief overview of theories of PVC plasticization and methods used to evaluate PVC–plasticizer interaction. *Vinyl Additive Technology*, 15(4), 219–223. doi: 10.1002/vnl.20211.

- [46] Cadogan, D.F. ve Howick, C.J. (2000). Plasticizers. In: *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (1st ed.). Kirk-Othmer (Ed.). Wiley. doi: 10.1002/0471238961.1612011903010415.a01.
- [47] Faith, W.L., Keyes, D.B. ve Clark, R.L. (1950). *Industrial Chemicals*. New York, NY: John Wiley & Sons, xi + 652 pp. (Reviewed in *Journal of the American Pharmaceutical Association (Scientific Edition)*, 39(11), 651). doi: 10.1002/jps.3030391121.
- [48] Huang, S. vd. (2022). Plastic waste management strategies and their environmental aspects: A scientometric analysis and comprehensive review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(8), 4556. doi: 10.3390/ijerph19084556.
- [49] Idris, A., Inanc, B. ve Hassan, M.N. (2004). Overview of waste disposal and landfills/dumps in Asian countries. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 6(2). doi: 10.1007/s10163-004-0117-y.
- [50] Okunola A., A., Kehinde I., O., Oluwaseun, A. ve Olufiropo E., A. (2019). Public and environmental health effects of plastic wastes disposal: A review. *Journal of Toxicology & Risk Assessment*, 5(2). doi: 10.23937/2572-4061.1510021.
- [51] Rajmohan, K.V.S., Ramya, C., Raja Viswanathan, M. ve Varjani, S. (2019). Plastic pollutants: Effective waste management for pollution control and abatement. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12, 72–84. doi: 10.1016/j.coesh.2019.08.006.
- [52] Li, X., Ling, T.-C. ve Hung Mo, K. (2020). Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 240, 117869. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117869.
- [53] Briassoulis, D., Hiskakis, M. ve Babou, E. (2013). Technical specifications for mechanical recycling of agricultural plastic waste. *Waste Management*, 33(6), 1516–1530. doi: 10.1016/j.wasman.2013.03.004.
- [54] Ragaert, K., Delva, L. ve Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24–58. doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.044.
- [55] Subramanian, P.M. (2000). Plastics recycling and waste management in the US. *Resources, Conservation and Recycling*, 28(3–4), 253–263. doi: 10.1016/S0921-3449(99)00049-X.
- [56] Soto, J.M., Blázquez, G., Calero, M., Quesada, L., Godoy, V. ve Martín-Lara, M.Á. (2018). A real case study of mechanical recycling as an alternative for managing polyethylene plastic film present in mixed municipal solid waste. *Journal of Cleaner Production*, 203, 777–787. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.302.

- [57] Miandad, R., Barakat, M.A., Aburiazaiza, A.S., Rehan, M. ve Nizami, A.S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 822–838. doi: 10.1016/j.psep.2016.06.022.
- [58] Sharma, B.K., Moser, B.R., Vermillion, K.E., Doll, K.M. ve Rajagopalan, N. (2014). Production, characterization and fuel properties of alternative diesel fuel from pyrolysis of waste plastic grocery bags. *Fuel Processing Technology*, 122, 79–90. doi: 10.1016/j.fuproc.2014.01.019.
- [59] Miandad, R., Barakat, M.A., Aburiazaiza, A.S., Rehan, M., Ismail, I.M.I. ve Nizami, A.S. (2017). Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 239–252. doi: 10.1016/j.ibiod.2016.09.017.
- [60] Zhang, X. vd. (2016). Thermal behavior and kinetic study for catalytic co-pyrolysis of biomass with plastics. *Bioresource Technology*, 220, 233–238. doi: 10.1016/j.biortech.2016.08.068.
- [61] Cai, J. vd. (2017). Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 309–322. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.072.
- [62] Xu, D., Lin, G., Guo, S., Wang, S., Guo, Y. ve Jing, Z. (2018). Catalytic hydrothermal liquefaction of algae and upgrading of biocrude: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 103–118. doi: 10.1016/j.rser.2018.08.042.
- [63] Prawisudha, P., Namioka, T. ve Yoshikawa, K. (2012). Coal alternative fuel production from municipal solid wastes employing hydrothermal treatment. *Applied Energy*, 90(1), 298–304. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.03.021.
- [64] Behl, A., Sharma, G. ve Kumar, G. (2014). A sustainable approach: Utilization of waste PVC in asphaltting of roads. *Construction and Building Materials*, 54, 113–117. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.050.
- [65] Arena, U., Zaccariello, L. ve Mastellone, M.L. (2009). Tar removal during the fluidized bed gasification of plastic waste. *Waste Management*, 29(2), 783–791. doi: 10.1016/j.wasman.2008.05.010.
- [66] Mastellone, M.L. ve Arena, U. (2008). Olivine as a tar removal catalyst during fluidized bed gasification of plastic waste. *AIChE Journal*, 54(6), 1656–1667. doi: 10.1002/aic.11497.

- [67] Caputo, P., Porto, M., Loise, V., Teltayev, B. ve Rossi, C.O. (2019). Analysis of Mechanical Performance of Bitumen Modified with Waste Plastic and Rubber Additives by Rheology and Self Diffusion NMR Experiments. *Eurasian Chem.-Technol. J.*, 21(3), 235–239. doi: 10.18321/ectj864.
- [68] Jafar, J.J. (2016). Utilisation of waste plastic in bituminous mix for improved performance of roads. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(1), 243–249. doi: 10.1007/s12205-015-0511-0.
- [69] Gopinath, K.P., Nagarajan, V.M., Krishnan, A. ve Malolan, R. (2020). A critical review on the influence of energy, environmental and economic factors on various processes used to handle and recycle plastic wastes: Development of a comprehensive index. *Journal of Cleaner Production*, 274, 123031. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123031.
- [70] Lu, S.-M., Lu, C., Tseng, K.-T., Chen, F. ve Chen, C.-L. (2013). Energy-saving potential of the industrial sector of Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 674–683. doi: 10.1016/j.rser.2013.01.021.
- [71] Saikia, N. ve De Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 34, 385–401. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066.
- [72] Ismail, Z.Z. ve AL-Hashmi, E.A. (2008). Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management*, 28(11), 2041–2047. doi: 10.1016/j.wasman.2007.08.023.
- [73] Mohammed, A.A., Mohammed, I.I. ve Mohammed, S.A. (2019). Some properties of concrete with plastic aggregate derived from shredded PVC sheets. *Construction and Building Materials*, 201, 232–245. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.145.
- [74] Manjunath, B.T.A. (2016). Partial Replacement of E-plastic Waste as Coarse-Aggregate in Concrete. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 731–739. doi: 10.1016/j.proenv.2016.07.079.
- [75] Basha, S.I., Ali, M.R., Al-Dulaijan, S.U. ve Maslehuddin, M. (2020). Mechanical and thermal properties of lightweight recycled plastic aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, 32, 101710. doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101710.
- [76] Liguori, B., Iucolano, F., Capasso, I., Lavorgna, M. ve Verdolotti, L. (2014). The effect of recycled plastic aggregate on chemico-physical and functional properties of composite mortars. *Materials & Design*, 57, 578–584. doi: 10.1016/j.matdes.2014.01.006.

- [77] Gu, L. ve Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*, 51, 19–42. doi: 10.1016/j.wasman.2016.03.005.
- [78] Saikia, N. ve De Brito, J. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 52, 236–244. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049.
- [79] Adelhafidi, A., Babaghayou, I.M., Chabira, S.F. ve Sebaa, M. (2015). Impact of Solar Radiation Effects on the Physicochemical Properties of Polyethylene (PE) Plastic Film. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 2210–2217. doi: 10.1016/j.sbspro.2015.06.302.
- [80] Amasuomo, E. ve Baird, J. (2016). The Concept of Waste and Waste Management. *JMS*, 6(4), 88. doi: 10.5539/jms.v6n4p88.
- [81] Bai, B., Jin, H., Fan, C., Cao, C., Wei, W. ve Cao, W. (2019). Experimental investigation on liquefaction of plastic waste to oil in supercritical water. *Waste Management*, 89, 247–253. doi: 10.1016/j.wasman.2019.04.017.
- [82] Gopinath, K.P., Nagarajan, V.M., Krishnan, A. ve Malolan, R. (2020). A critical review on the influence of energy, environmental and economic factors on various processes used to handle and recycle plastic wastes: Development of a comprehensive index. *Journal of Cleaner Production*, 274, 123031. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123031.
- [83] Ural, N., Kut, Ü. ve Gülsevinç, N. (2020). Atık PVC ile Zemin İyileştirme. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, Ağustos 2020. doi: 10.31202/ecjse.747919.
- [84] Ceran, Ö.B., Şimşek, B., Uygunoğlu, T. ve Şara, O.N. (2019). PVC concrete composites: comparative study with other polymer concrete in terms of mechanical, thermal and electrical properties. *J Mater Cycles Waste Manag*, 21(4), 818–828. doi: 10.1007/s10163-019-00846-0.
- [85] Manjunatha, M., Seth, D., Kvgd, B. ve Tangadagi, R.B. (2023). Utilization of industrial-based PVC waste powder in self-compacting concrete: A sustainable building material. *Journal of Cleaner Production*, 428, 139428. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139428.
- [86] Manjunatha, M., Seth, D., Kvgd, B. ve A, B. (2022). Engineering properties and environmental impact assessment of green concrete prepared with PVC waste powder: A step towards sustainable approach. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01404. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01404.

- [87] Binhussain, M.A. ve El-Tonsy, M.M. (2013). Palm leave and plastic waste wood composite for out-door structures. *Construction and Building Materials*, 47, 1431–1435. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.031.
- [88] Görkem, İ.Ç., Artagan, S.S., Kayaalp, B.T., Saykan, C. ve Özdemir, İ.A. (2024). Determination of Resistance to Water-Induced Damage of Bituminous Mixtures Containing Hydrated Lime Prepared with Different Contents of PVC Waste. *Firat Univ. J. Exp. Comput. Eng.*, 3(1), 28–51. doi: 10.62520/fujece.1406206.
- [89] Arabani, M. ve Yousefpour Taleghani, M. (2017). Rutting behavior of hot mix asphalt modified by polyvinyl chloride powder. *Petroleum Science and Technology*, 35(15), 1621–1626. doi: 10.1080/10916466.2017.1336772.
- [90] Köfteci, S., Ahmedzade, P. ve Kultayev, B. (2014). Performance evaluation of bitumen modified by various types of waste plastics. *Construction and Building Materials*, 73, 592–602. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.067.
- [91] Ziari, H., Nasiri, E., Amini, A. ve Ferdosian, O. (2019). The effect of EAF dust and waste PVC on moisture sensitivity, rutting resistance, and fatigue performance of asphalt binders and mixtures. *Construction and Building Materials*, 203, 188–200. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.101.
- [92] Murana, A.A., Amartey, Y.D., Abah, L.I., Ibedu, K.E. ve Bitrus, J.N. (2024). Strength Properties of Asphalt Mixture Produced with Polyvinyl Chloride (PVC) Modified Bitumen. *Covenant Journal of Engineering and Technology (CJET)*, 8(2).
- [93] Cajina Cruz, N.A., Baldi, A., Camacho Garita, E. ve Aguiar Moya, J.P. (2021). Evaluación de desempeño de la mezcla asfáltica modificada con residuos de PVC tipo blíster. *Infraestructura Vial*, 23(42), 13–22. doi: 10.15517/iv.v23i42.44688.
- [94] Salman, N. ve Jaleel, Z. (2018). Effects of waste PVC addition on the properties of (40-50) grade asphalt. *MATEC Web Conf.*, 162, 01046. doi: 10.1051/mateconf/201816201046.
- [95] Rahman, Md. N., Ahmeduzzaman, M., Sobhan, M.A. ve Ahmed, T.U. (2013). Performance Evaluation of Waste Polyethylene and PVC on Hot Asphalt Mixtures. *AJCEA*, 1(5), 97–102. doi: 10.12691/ajcea-1-5-2.
- [96] Rahman, Z.U., Abbas, A., Ahmad, I., Khan, F.A. ve Badrashi, Y.I. (2021). Suitability of Waste Poly-Vinyl-Chloride (PVC) Pipes as a Modifier in the Construction of Pavements in Hot Climates: Suitability of waste PVC pipes in HMA. *SSURJ*, 10(2). doi: 10.33317/ssurj.226.

- [97] Al-Shawabkeh, A.F., Awwad, M.T., Ikhries, I.I., Abu-Hamattah, Z.S. ve Al-Najdawi, N.A. (2025). Assessing recycled polyvinyl chloride reinforced modified asphalt mixtures for sustainable paving applications. *Journal of Cleaner Production*, 486, 144583. doi: 10.1016/j.jclepro.2024.144583.
- [98] Shahin, M., Ahmed, T.U., Bari, M.N. ve Sobhan, M.A. (2022). Effects of soaking on compressive strength of recycled polymer modified asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(5), 1634–1644. doi: 10.1080/10298436.2020.1817450.
- [99] Yayla, N. (2011). *Karayolu mühendisliği*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- [100] Thives, L.P. ve Ghisi, E. (2017). Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 473–484. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.087.
- [101] Asfal, J. (2019, Jan. 25). *Difference Between Flexible And Rigid Pavement*. The Engineering Community.
- [102] National Research Council (U.S.), Ed. (1989). *Rigid and flexible pavement design and analysis: unbound granular materials, tire pressures, backcalculation, and design methods*. Transportation Research Record, No. 1227. Washington, D.C: Transportation Research Board, National Research Council.
- [103] Mohod, M.V. ve Kadam, D.K.N. (2016). A Comparative Study on Rigid and Flexible Pavement: A Review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 13(3), 84–88. doi: 10.9790/1684-1303078488.
- [104] Jain, S., Joshi, D.Y.P. ve Goliya, S.S. (2013). Design of Rigid and Flexible Pavements by Various Methods & Their Cost Analysis of Each Method. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 3(5).
- [105] Deshmukh, A., Rabbani, A. ve Dhapekar, N.K. (2017). Study of rigid pavements – review. *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, 8(6), 147–152.
- [106] Sunil, S., Varuna, M. ve Nagakumar, M.S. (2021). Performance evaluation of semi rigid pavement mix. *Materials Today: Proceedings*, 46, 4771–4775. doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.311.
- [107] Battey, R.L. (2002). *Construction, Testing and Preliminary Performance Report on the Resin Modified Pavement Demonstration Project*. Jackson, MS, USA: Mississippi Department of Transportation, Research Division.
- [108] Gamal Othman, M., Hussein, Z. ve Abu El-Maaty, A. (2020). Evaluation of Semi-Flexible Pavement Performance. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, 15(54), 100–111. doi: 10.21608/aej.2020.73146.

- [109] Pradeep, K.I. ve Mampearachchi, W.K. (2019). Determination of Optimum Design Parameters for Semi Rigid Pavement. In *2019 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, Moratuwa, Sri Lanka: IEEE, 7–12. doi: 10.1109/MERCon.2019.8818916.
- [110] Battey, R.L. (2002). *Construction, Testing, and Preliminary Performance Report on the Resin Modified Pavement Demonstration Project*. Jackson, MS, USA: Mississippi Department of Transportation, Research Division.
- [111] Gautam, P.K., Kalla, P., Jethoo, A.S., Agrawal, R. ve Singh, H. (2018). Sustainable use of waste in flexible pavement: A review. *Construction and Building Materials*, 180, 239–253. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.067.
- [112] Jelušič, P. vd. (2023). Potential of Using Waste Materials in Flexible Pavement Structures Identified by Optimization Design Approach. *Sustainability*, 15(17), 13141. doi: 10.3390/su151713141.
- [113] Kumar, P. ve Shukla, S. (2022). Flexible pavement construction using different waste materials: A review. *Materials Today: Proceedings*, 65, 1697–1702. doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.713.
- [114] Agnihotri, A.K., Reddy, K. ve Bansal, A. (Eds.). (2019). *Sustainable Engineering: Proceedings of EGRWSE 2018*, Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 30. Singapore: Springer Singapore. doi: 10.1007/978-981-13-6717-5.
- [115] Shanbara, H.K. vd. (2021). The future of eco-friendly cold mix asphalt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111318. doi: 10.1016/j.rser.2021.111318.
- [116] Deb, P. ve Lakshman Singh, Kh. (2022). Mix design, durability and strength enhancement of cold mix asphalt: a state-of-the-art review. *Innov. Infrastruct. Solut.*, 7(1), 61. doi: 10.1007/s41062-021-00600-2.
- [117] Jain, S. ve Singh, B. (2021). Cold mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124378. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124378.
- [118] Addae, D.T., Rahman, M. ve Abed, A. (2023). State of art literature review on the mechanical, functional and long-term performance of cold mix asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 400, 132759. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132759.
- [119] Lv, S., Wang, S., Xia, C. ve Liu, C. (2020). A New Method of Mix Design for Cold Patching Asphalt Mixture. *Frontiers in Materials*, 7, 182. doi: 10.3389/fmats.2020.00182.

- [120] Hafezzadeh, R., Autelitano, F. ve Giuliani, F. (2023). Performance-related methods for the characterization of cold mix patching materials used in asphalt pavements maintenance. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02600. doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02600.
- [121] Addae, D.T., Rahman, M. ve Abed, A. (2023). State of art literature review on the mechanical, functional and long-term performance of cold mix asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 400, 132759. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132759.
- [122] Dash, S.S., Chandrappa, A.K. ve Sahoo, U.C. (2022). Design and performance of cold mix asphalt – A review. *Construction and Building Materials*, 315, 125687. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125687.
- [123] Caputo, P. vd. (2020). The Role of Additives in Warm Mix Asphalt Technology: An Insight into Their Mechanisms of Improving an Emerging Technology. *Nanomaterials (Basel)*, 10(6), 1202. doi: 10.3390/nano10061202.
- [124] Nithinchary, J., Dhandapani, B.P. ve Mullapudi, R.S. (2024). Application of warm mix technology - design and performance characteristics: Review and way forward. *Construction and Building Materials*, 414, 134915. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134915.
- [125] Cheraghian, G. vd. (2020). Warm mix asphalt technology: An up to date review. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122128. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122128.
- [126] Sharma, A., Rongmei Naga, G.R., Kumar, P. ve Rai, P. (2022). Mix design, development, production and policies of recycled hot mix asphalt: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(5), 765–794. doi: 10.1016/j.jtte.2022.06.004.
- [127] Arun Sagar, K.M., Venudharan, V. ve Saha, G. (2025). Prospects of warm mix asphalt in maximizing reclaimed asphalt pavement utilization: Review on mix design and performance. *Cleaner Waste Systems*, 10, 100229. doi: 10.1016/j.clwas.2025.100229.
- [128] Ferrotti, G., Mancinelli, E., Passerini, G. ve Canestrari, F. (2024). Comparison of energy and environmental performance between warm and hot mix asphalt concrete production: A case study. *Construction and Building Materials*, 418, 135453. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135453.
- [129] Naveed, M., Raza, M.A. ve Mehmood, R. (2022). Performance analyses of conventional hot mix asphalt with waste additives. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00850. doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00850.

- [130] Zaumanis, M., Mallick, R.B. ve Frank, R. (2014). 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 230–245. doi: 10.1016/j.resconrec.2014.07.007.
- [131] Gao, Y., Zhou, Y., Gong, H., Zhang, H. ve Shan, W. (2024). A probabilistic investigation of long-term field performance of warm mix asphalt pavements. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03460. doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03460.
- [132] Pasetto, M. ve Baldo, N. (2017). Fatigue Performance of Recycled Hot Mix Asphalt: A Laboratory Study. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 1–10. doi: 10.1155/2017/4397957.
- [133] Wu, D. Q. & Zhang, Y. (2011). The semi-rigid pavement with higher performances for roads and parking aprons. In Proceedings of the 29th Conference of the ASEAN Federation of Engineering Organisations (CAFEO 29), *Sustainable Urbanization – Engineering Challenges and Opportunities*, Brunei, 27–30 November 2011, s. 1–7.
- [134] C09 Committee. Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/c0136-06.
- [135] C09 Committee. Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/c0127-24.
- [136] C09 Committee. Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/c0128-22.
- [137] C09 Committee. Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/c0535-16.
- [138] C09 Committee. Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/c0088-13.
- [139] Paliukaitė, M., Vaitkus, A. ve Zofka, A. (2014). Evaluation of bitumen fractional composition depending on the crude oil type and production technology. In *The 9th International Conference “Environmental Engineering 2014”*, Vilnius, Lithuania: Vilnius Gediminas Technical University Press “Technika”. doi: 10.3846/enviro.2014.162.
- [140] Laukkanen, O.-V., Winter, H.H. ve Soenen, H. (2015). Rheological analysis of the low-temperature dynamics of bitumens. *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, 23, 23–26.

- [141] Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Eskandarsefat, S., Teltayev, B. ve Oliviero Rossi, C. (2019). Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances. *Applied Sciences*, 9(4), 742. doi: 10.3390/app9040742.
- [142] Hunter, R. N., Ed. (2015). *The Shell Bitumen Handbook* (6th ed.). Thomas Telford Ltd. doi: 10.1680/tsbh.58378.
- [143] Lavin, P. (2003). *Asphalt Pavements: A Practical Guide to Design, Production and Maintenance for Engineers and Architects*. CRC Press. doi: 10.1201/9781482267716.P.
- [144] Karayolları Genel Müdürlüğü. (2023). *Karayolu Teknik Şartnamesi*, Ankara.
- [145] Oliver, J. W. (2008). *A Review of Austroads Gyratory Compaction Research*. Austroads Publication. No. AP-T94/08, Sydney, Australia.
- [146] James, R. S., Cooley, L. A., Ahlrich, R. C., Prowell, B. D., ve Howard, I. L. (2015). Development of design gyration levels for airfield asphalt pavement. *Advances in Civil Engineering Materials*, 4(1), 61–79. doi: 10.1520/ACEM20140024.
- [147] Xie, H., Watson, D. E., ve Brown, E. R. (2005). Evaluation of two compaction levels for designing Stone Matrix Asphalt. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1929(1), 149–156. doi: 10.1177/0361198105192900118.
- [148] Alderson, A. (2011). *Selection of a laboratory asphalt compactor for Australasia*. Publication No. AP-T192-11, Austroads Ltd., Sydney.
- [149] Tapkın, S., ve Keskin, M. (2019). Design gyration number determination of 100 mm-diameter asphalt mixtures. *Int J Civ Eng*, 17(9), 1383–1396. doi: 10.1007/s40999-019-00399-1.
- [150] Watson, D. E., Moore, J., Heartsill, J., Jared, D., ve Wu, P. (2008). Verification of Superpave number of design gyration compaction levels for Georgia. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2057(1), 75–82. doi: 10.3141/2057-09.
- [151] Cetin, A., Evirgen, B., Karslioglu, A., ve Tuncan, A. (2020). The effect of basalt fiber on the performance of Stone Mastic Asphalt. *Period. Polytech. Civil Eng.* doi: 10.3311/PPci.14190.
- [152] Tapkın, S. (2013). Optimal polypropylene fiber amount determination by using gyratory compaction, static creep and Marshall stability and flow analyses. *Construction and Building Materials*, 44, 399–410. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.060.

- [153] Diab, A., Singh, D., ve Pais, J. C. (2017). Moisture susceptibility of asphalt mixtures: A literature review. In *4th Conference of Transportation Research Group of India (CTRG)*, Mumbai, India, Dec. 2017.
- [154] Al-Qadi, I. L., ve Transportation & Development Institute, Eds. (2006). *Airfield and highway pavements: Meeting today's challenges with emerging technologies; proceedings of the 2006 Airfield and Highway Pavement Specialty Conference, April 30 - May 3, 2006, Atlanta, Georgia*. Reston, Va: American Society of Civil Engineers.
- [155] D04 Committee. (2009). *Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures*. doi: 10.1520/D4867_D4867M-09R14.
- [156] Khodaii, A., ve Mehrara, A. (2009). Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2586–2592. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.015.
- [157] National Research Council, Ed. (1975). *Pavement and soil characteristics: 7 reports prepared for the 54th annual meeting of the Transportation Research Board*. içinde *Transportation Research Record*, no. 537. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council.
- [158] Zhou, F., Scullion, T., ve Sun, L. (2004). Verification and modeling of three-stage permanent deformation behavior of asphalt mixes. *J. Transp. Eng.*, 130(4), 486–494. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:4(486).
- [159] Alataş, T., ve İstek, A. (2020). Farklı katkılarla hazırlanan asfalt karışımların sünme performanslarının incelenmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 11(2), 745–758. doi: 10.24012/dumf.538375.
- [160] Witczak, M. W. (2007). *Specification criteria for simple performance tests for rutting*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- [161] Saha, G., ve Biligiri, K. P. (2016). Fracture properties of asphalt mixtures using semi-circular bending test: A state-of-the-art review and future research. *Construction and Building Materials*, 105, 103–112. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.046.
- [162] Elseifi, M. A., Mohammad, L. N., Ying, H., ve Cooper, S. (2012). Modeling and evaluation of the cracking resistance of asphalt mixtures using the semi-circular bending test at intermediate temperatures. *Road Materials and Pavement Design*, 13(sup1), 124–139. doi: 10.1080/14680629.2012.657035.
- [163] Meng, Y., vd. (2023). A review on evaluation of crack resistance of asphalt mixture by semi-circular bending test. *Journal of Road Engineering*, 3(1), 87–97. doi: 10.1016/j.jreng.2022.07.003.

- [164] Meng, Y., vd. (2023). A review on evaluation of crack resistance of asphalt mixture by semi-circular bending test. *Journal of Road Engineering*, 3(1), 87–97. doi: 10.1016/j.jreng.2022.07.003.
- [165] Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt (2010). Part 44, Crack propagation by semi-circular bending test. *London: British Standards Institution*.
- [166] Ozer, H., Al-Qadi, I. L., Lambros, J., El-Khatib, A., Singhvi, P., ve Doll, B. (2016). Development of the fracture-based flexibility index for asphalt concrete cracking potential using modified semi-circle bending test parameters. *Construction and Building Materials*, 115, 390–401. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.144.
- [167] D04 Committee. Test Method for Penetration of Bituminous Materials. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/d0005-06.
- [168] D08 Committee. Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/d0036-06.
- [169] D04 Committee. Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/d2872-22.
- [170] D04 Committee, Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/d4867_d4867m-09r14.

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0009-0002-0944-468X

Ad Soyad : Gaye AYDOĞDU

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2022, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği

