

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BOR ESASLI KOLOFAN REÇİNELİ YENİ BİR KATKI MADDESİ
SENTEZLENEREK ASFALTIN MODİFİYE EDİLMESİ VE KARIŞIM
PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Merve Gülfer BOZDEMİR

EYLÜL 2023
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BOR ESASLI KOLOFAN REÇİNELİ YENİ BİR KATKI MADDESİ
SENTEZLENEREK ASFALTIN MODİFİYE EDİLMESİ VE KARIŞIM
PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

Merve Gülfer BOZDEMİR

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22/08/2023
Tezin Savunma Tarihi : 18/09/2023**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Şeref ORUÇ

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, KTÜ-BAP FBA-2020-8788 nolu “Bor Esaslı Kolofan Reçineli Yeni Bir Katkı Maddesi Sentezlenerek Asfaltın Modifiye Edilmesi ve Karışım Performansının Araştırılması” başlıklı proje ile gerçekleştirilmiştir. KTÜ-BAP birimine mali desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Akıl ve bilginin kadim değerlerine duyduğu sonsuz inancı, her daim bir adım ileriye götüren araştırma azmi ve bilim yapma anlayışını akademik hayatımın geri kalanında kendime rehber edinmekten onur duyacağım kıymetli hocam Prof.Dr. Şeref ORUÇ’a yol göstericiliği, emeği ve sabrı için çok teşekkür ederim.

Aşılmaz her sorunu aşılar hale getiren, bitti denen yerde umut tohumları eken, tüm alçakgönüllülüğüyle laboratuvarında deneylerimde beni yalnız bırakmayıp emeğini esirgemeyen ve gerek kimyaya dair bilgilerde gerek akademiye ilişkin konularda bana yol gösterip ufuk açan kıymetli hocam Prof.Dr. Kemal SANCAK’a teşekkürü bir borç bilirim. Doktora eğitimim boyunca tüm sürece yakinen şahitlik eden, tüm zorlukları birlikte omuzladığım değerli meslektaşım, yakın arkadaşım, yoldaşım Arş. Gör. Hacer YEŞİLÇİÇEK’e teşekkür ederim.

Yalnızca varlığı ile bile her mücadeleyi olduğundan daha kolay baş edilebilir hale getiren eşim Ferit BOZDEMİR’e, yeniden yola devam etmem için bana güç veren, iş çıkışı yolumu gözleyip umut dolu gözlerle bana gülümseyen canımın şenliği oğullarım Emir Asaf ve Yusuf Kaan’a zorlu doktora sürecimi çok daha keyifli bir yolculuğa dönüştürdükleri için teşekkür ederim.

Üniversitede okuyacağım bölümden, çalışacağım iş yerine ve daha nice kararlarımda beni yönlendirmiş olan ve bu yönlendirmeleri sayesinde de gayet başarılı bir hayata sahip olduğum sevgili babam Nurettin ÖZCAN’a, her daim yanımda olan, kalbi benimle atıp üzerimde herkesten çok emeği olan, yaşam mücadelesine büyük saygı duyduğum ve yerden göğe kadar sevdiğim canım annem Ülker ÖZCAN’a, her sıkıntıda yanımda olup bana erişen, aramızda kocaman bir sevgi ve bağlılığın olduğu, hayatımda ayrı bir yere sahip olan canım abim Yüksek Harita Mühendisi Mehmet Alper ÖZCAN’a ve çok kıymetli canım kardeşim Yüksek Şehir ve Bölge Plancısı Gözde Güher ÖZCAN’a tüm destekleri ve varlıkları için teşekkür ederim.

Merve Gülfer BOZDEMİR
Trabzon, 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Bor Esaslı Kolofan Reçineli Yeni Bir Katkı Maddesi Sentezlenerek Asfaltın Modifiye Edilmesi ve Karışım Performansının Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Şeref ORUÇ’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 18/09/2023

Merve Gülfer BOZDEMİR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	IX
SUMMARY	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Özeti.....	3
1.3. Çalışmanın Amacı, Önemi ve İzlenen Yol	12
1.4. Bitüm	14
1.4.1. Bitümün Kimyasal Yapısı	15
1.4.2. Bitümün Reolojisi.....	17
1.5. Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler	19
1.5.1. Geleneksel Bağlayıcı Deneyleri	19
1.5.1.1. Penetrasyon Deneyi	19
1.5.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi	20
1.5.1.3. Parlama ve Yanma Noktası Deneyi.....	21
1.5.1.4. Düktilite Deneyi.....	22
1.5.1.5. Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deneyi ve Elastik Geri Dönme	23
1.5.1.6. Özgül Ağırlık Deneyi	24
1.5.1.7. Fraass Kırılma Noktası Deneyi.....	25
1.5.1.8. Trikloretilende Çözünürlük Deneyi.....	25
1.5.1.9. Nicholson Soyulma Deneyi	26
1.5.1.10. İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (Thin Film Oven Test, TFOT)	26
1.5.2. Reolojik Bağlayıcı Deneyleri	27
1.5.2.1. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT)	28
1.5.2.2. Basınçlı Yaşlandırma Kabini (Pressure Aging Vessel, PAV) deneyi	29

1.5.2.3.	Dönel Viskozimetre (Rotational Viscosimeter, RV) deneyi	30
1.5.2.4.	Dinamik Kayma Reometresi (Dynamic Shear Rheometer, DSR) deneyi	33
1.5.2.5.	Kiriş Eğme Reometresi (Bending Beam Rheometer, BBR) deneyi	35
1.5.2.6.	Doğrudan Çekme Deneyi (Direct Tension Tester, DDT).....	37
1.5.2.7.	Depolama Stabilitesi Deneyi	38
1.5.2.8.	Çoklu Gerilim Sünme-Geri Kurtarma Deneyi (Multi Stress Creep Recovery, MSCR).....	39
1.5.2.9.	Lineer Genlik Taraması Deneyi (Linear Amplitude Sweep, LAS)	41
1.6.	Sıcak Asfalt Karışımlar.....	44
1.6.1.	Sıcak Asfalt Karışımların Özellikleri	44
1.6.2.	Sıcak Asfalt Kaplamalarda Oluşan Bozulmalar	48
1.6.2.1.	Deformasyonlar	48
1.6.2.2.	Çatlaklar.....	51
1.6.2.3.	Ayrışmalar	53
1.7.	Sıcak Asfalt Karışımlarda Kullanılan Agregalar.....	54
1.7.1.	Agregaların Fiziksel Özellikleri	55
1.7.1.	Agregaların Mekanik Özellikleri.....	58
1.8.	Sıcak Asfalt Karışımlarda Kullanılan Tasarım Yöntemleri.....	59
1.8.1.	Marshall Tasarım Yöntemi	59
1.8.2.	Superpave Tasarım Yöntemi	60
1.9.	Sıcak Asfalt Karışımlara Uygulanan Deneyler.....	61
1.9.1.	Marshall Stabilité ve Akma Deneyi.....	61
1.9.2.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi	63
1.9.3.	Modifiye Lottman Deneyi	65
1.9.4.	Dinamik (tekrarlı yük altında) Sünme	66
1.9.5.	Dolaylı Çekme Yorulma Deneyi	67
1.10.	Asfalt Modifikasyonu	68
1.11.	Yapısal Analiz Yöntemleri	72
1.11.1.	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM)	72
1.11.2.	Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (Fourier Transform Infrared-FT-IR).....	72
1.11.3.	Eşzamanlı Termal Analiz (Thermogravimetric Analysis/Differential Scanning Calorimetry-TGA/DSC)	73
1.11.4.	X-Işını Difraksiyonu (X-Ray Diffraction Analysis-XRD).....	73
1.12.	Kolofan Reçine	74

1.13.	Bor	77
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	81
2.1.	Kullanılan Malzemeler	82
2.2.	Katkı Maddesinin Sentezlenmesi	83
2.3.	Modifiye Asfalt Bağlayıcıların Hazırlanması.....	85
2.4.	Asfalt Bağlayıcıların Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi	86
2.4.1.	SEM Analizi	87
2.4.2.	FT-IR Analizi.....	87
2.4.3.	TGA/DSC Analizleri	88
2.4.4.	XRD Analizi	89
2.5.	Asfalt Bağlayıcıların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi.....	89
2.6.	Asfalt Bağlayıcıların Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi	90
2.6.1.	RTFOT Deneyi Uygulaması.....	90
2.6.2.	PAV Deneyi Uygulaması	90
2.6.3.	RV Deneyi Uygulaması.....	91
2.6.4.	DSR Deneyi Uygulaması.....	91
2.6.5.	BBR Deneyi Uygulaması	92
2.6.6.	Depolama Stabilitesi Deneyi Uygulaması	92
2.6.7.	MSCR Deneyi Uygulaması	93
2.6.8.	LAS Deneyi Uygulaması.....	94
2.7.	Sıcak Asfalt Karışımların Hazırlanması	94
2.8.	Sıcak Asfalt Karışımların Özelliklerinin Belirlenmesi.....	96
2.8.1.	Marshall Tasarımı.....	96
2.8.2.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi Uygulaması.....	97
2.8.3.	Modifiye Lottman Deneyi Uygulaması.....	97
2.8.4.	Dinamik Sünme Deneyi Uygulaması	98
2.8.5.	Dolaylı Çekme Yorulma Deneyi Uygulaması.....	99
3.	BULGULAR VE İRDELEME	100
3.1.	Bor Esaslı Reçine Bileşiğinin Mikro Yapısı.....	100
3.1.1.	SEM Analizi	100
3.1.2.	FTIR Analizi	104
3.1.3.	DSC ve TG Analizleri	106
3.1.4.	XRD Analizi	107
3.2.	Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deney Sonuçları.....	108

3.3.	Düktilite Deney Sonuçları	109
3.4.	Kuvvet Ölçümlü Düktilite ve Elastik Geri Dönme Deneyi Sonuçları.....	109
3.5.	Parlama ve Fraass Kırılma Noktası Deney Sonuçları.....	110
3.6.	Trikloretilende Çözünürlük ve Özgül Ağırlık Deney Sonuçları.....	112
3.7.	Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları.....	113
3.8.	Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deney Sonuçları.....	114
3.9.	Frekans Taraması Deney Sonuçları	117
3.10.	Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deney (RTFOT) Sonuçları	124
3.11.	Basınçlı Yaşlandırma Kabini (PAV) Deney Sonuçları	126
3.12.	Dönel Viskozimetre (RV) Deney Sonuçları	128
3.13.	Eğilme Kirişi Reometresi (BBR) Deney Sonuçları	130
3.14.	Bağlayıcının Sıcaklık Duyarlılığı Sonuçları.....	133
3.15.	Depolama Stabilitesi Deney Sonuçları	134
3.16.	MSCR Deney Sonuçları	140
3.17.	LAS Deney Sonuçları	143
3.16.	Marshall Tasarımına Göre Karışımın Optimum Asfalt İçeriğinin Belirlenmesi.....	145
3.17.	Marshall Stabilitesi ve Akma Deney Sonuçları	148
3.18.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Sonuçları	149
3.19.	Modifiye Lottman Deney Sonuçları	150
3.20.	Dinamik Sünme Deney Sonuçları	153
3.21.	Dolaylı Çekme Yorulma Deney Sonuçları	153
3.22.	Sentezlenen BORB Katkısıyla Ticari Asfalt Modifiyerinin Mali Kıyaslaması.....	155
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	157
5.	KAYNAKLAR.....	163
8.	EKLER	178
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

BOR ESASLI KOLOFAN REÇİNELİ YENİ BİR KATKI MADDESİ SENTEZLENEREK ASFALTIN MODİFİYE EDİLMESİ VE KARIŞIM PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Merve Gülfer BOZDEMİR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Şeref ORUÇ
2023, 177 Sayfa, 1 Sayfa Ek

Tez çalışmasında, ülkemizde önemli rezervi bulunan bor türevlerinden bor oksit ve çam ağaçlarından elde edilen doğal kolofan reçinesi laboratuvarında kimyasal olarak sentezlenerek yeni bir katkı maddesi elde edilmiş olup, bu katkının asfalt modifiyeri olarak kullanılabilirliği ve asfalt bağlayıcı üzerindeki performans özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada, elde edilen Bor esaslı reçine bileşiminin (BORB) yapısal karakterizasyonu, FT-IR, SEM, XRD, DSC/TG analiz yöntemleri ile belirlenerek katkının bağlayıcı ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Çalışmalar için, B 50/70 penetrasyonlu asfalt bağlayıcıya ağırlıkça %0.5, %1, %1.5 ve %3 oranlarında sentez katkı maddesi eklenerek modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Saf ve modifiyeli bağlayıcıların fiziksel özellikleri geleneksel deneyler ile belirlenirken, reolojik özellikleri ise dinamik kesme reometresi (DSR), dönel viskozimetre (RV), dönel ince film halinde yaşlandırma (RTFOT), basınçlı yaşlandırma kabini (PAV), kırılgan eğme reometresi (BBR) gibi Superpave deneyleriyle belirlenmiştir. Ayrıca, bağlayıcılara ileri bağlayıcı deneylerinden Çoklu Gerilme Sünme-Geri Kurtarma (MSCR) ve Lineer Genlik Taraması (LAS) deneyleri de uygulanmıştır. Belirtilen BORB katkı oranlarında modifiye edilen bitümlü bağlayıcı ile Marshall tasarımına göre karışım numuneleri üretilmiş ve numunelerin mekanik özellikleri, Marshall Stabilite ve Akma, Dolaylı Çekme Mukavemeti, Modifiye Lottman, Dinamik Sünme ve Dolaylı Çekme Yorulma deneyleri ile belirlenmiştir.

Elde edilen deney sonuçlarından, BORB katkı miktarı artıkça yüksek sıcaklıklarda bağlayıcı kıvamının ve tekerlek izi performansının iyileştiği belirlenirken, orta ve düşük sıcaklıklarda katkı miktarının etkisinin azaldığı tespit edilmiştir. Katkının varlığı ile saf bağlayıcının adezyon ve kohezyon özelliklerinin iyileştiği, yorulma dayanımının, elastik davranışının arttığı ve sıcaklık hassasiyetinin azaldığı tespit edilmiştir. Bağlayıcı ve karışımlar üzerine uygulanan deneyler bir bütün olarak ele alındığında, %1 BORB katkı oranı ile modifiye edilen bağlayıcının fiziksel, reolojik ve mekanik açıdan en iyi sonuçlara sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kolofan Reçine, Bor Oksit, Sentez Katkı, Asfalt modifikasyonu, Asfalt Reolojisi

PhD. Thesis

SUMMARY

MODIFICATION OF ASPHALT BY SYNTHESISING A NEW ADDITIVE WITH BORON-BASED ROSIN AND INVESTIGATION OF THE MIXTURE PERFORMANCE

Merve Gülfir BOZDEMİR

Karadeniz Technical University
The Graduate school of Natural and Applied sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Şeref ORUÇ
2023, 177 Pages, 1 Pages Appendix

This thesis, a new additive was obtained by chemically synthesising boron oxide, one of the boron derivatives that our country has an important reserve, and natural colophane resin obtained from pine trees in the laboratory, and the usability of this synthesis additive as asphalt modifier and its performance properties on asphalt binder were investigated. The additive was determined to be compatible with the binder after the structural characterisation of the resulting boron based rosin Compound (BORB) was evaluated by FT-IR, SEM, XRD, and DSC/TG analytical methods. Modified binders were produced for the study by adding 0.5%, 1%, 1.5%, 1.5%, and 3% by weight additives to B 50/70 penetration class asphalt binder. While the physical properties of base and modified binders were determined by conventional tests, their rheological properties were determined by Superpave experiments such as dynamic shear rheometer (DSR), rotational viscometer (RV), rotational thin film ageing (RTFOT), pressure ageing chamber (PAV), beam bending rheometer (BBR). In addition, Multiple Stress Creep-Recovery (MSCR) and Linear Amplitude Scanning (LAS) experiments were also performed on the binders. Mix specimens were produced according to the Marshall design with the modified bituminous binder at the specified BORB additive ratios and the mechanical properties of the specimens were determined by Marshall Stability and Yield, Indirect Tensile Strength, Modified Lottman, Dynamic Creep and Indirect Tensile Fatigue tests.

From the experimental results obtained, it was determined that the binder consistency and rutting performance improved at high temperatures as the BORB additive amount increased, while the effect of the additive amount decreased at medium and low temperatures. It was found that the additive's presence enhanced the base binder's adhesion and cohesion capabilities, fatigue strength, elastic behavior, and temperature sensitivity. When the experiments on the binder and mixtures were considered as a whole, it was seen that the binder modified with 1% BORB additive rate had the best physical, rheological and mechanical results.

Key Words: Rosin, Boron Oxide, Synthesis Additive, Asphalt Modification, Asphalt Rheology

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.	Ham petrolün işlenmesi ve bitümün elde edilmesi 15
Şekil 2.	SARA ayrımının akış şeması 16
Şekil 3.	Asfalt bağlayıcının yaşlanma süreci..... 18
Şekil 4.	Penetrasyon cihazı..... 20
Şekil 5.	Yumuşama noktası cihazı..... 21
Şekil 6.	Parlama ve yanma noktası cihazı 22
Şekil 7.	Düktilite cihazı ve deney için hazırlanan numuneler 23
Şekil 8.	Elastik geri dönme deneyinde kesilen bağlayıcı numuneleri 24
Şekil 9.	Fraass kırılma noktası cihazı ve deney sonrası kırılan numune 25
Şekil 10.	Dönel ince film halinde ısıtma deneyi ve aşamaları 29
Şekil 11.	PAV ve Gaz alma cihazları 30
Şekil 12.	Dönel viskozimetre cihazı 31
Şekil 13.	Tipik viskozite-sıcaklık grafiği 32
Şekil 14.	DSR cihazı salınım hareketi bulunabilir 33
Şekil 15.	Asfalt bağlayıcının viskoelastik davranışı..... 34
Şekil 16.	BBR deney aleti 35
Şekil 17.	BBR cihazının şematik görünüşü 36
Şekil 18.	Sünme oranının grafikte belirlenmesi 37
Şekil 19.	Doğrudan Çekme Deneyi şeması 38
Şekil 20.	Lineer genlik taraması için temsili yükleme şeması 42
Şekil 21.	Tekerlek izi deformasyonu 49
Şekil 22.	Kaplamada meydana gelen (a) oturma ve (b) çökme deformasyonu..... 50
Şekil 23.	Kaplamada meydana gelen ondülasyonlar 50
Şekil 24.	Kaplamada meydana gelen timsah sırtı çatlaklar 52
Şekil 25.	Kaplamada meydana gelen düşük ısı çatlakları 52
Şekil 26.	Kaplamada meydana gelen sökülmeler..... 53
Şekil 27.	Kaplamada meydana gelen soyulmalar..... 54
Şekil 28.	Agrega gradasyon tipleri 56
Şekil 29.	Agregaların biçimsel sınıflandırılması 57
Şekil 30.	Porozite sınıflandırması..... 57
Şekil 31.	Agreganın hacim içeriğine göre özgül ağırlıkları 58

Şekil 32.	Marshall stabilitesi ve akma deney cihazı.....	62
Şekil 33.	Marshall stabilite deneyinde akmanın belirlenmesi örneği.....	63
Şekil 34.	Dolaylı çekme mukavemeti deneyi	64
Şekil 35.	Dinamik sünme deneyi uygulanan numune	66
Şekil 36.	Yük-zaman ve yük-deformasyon ilişkisi.....	67
Şekil 37.	Dolaylı çekme yorulma deneyi uygulanan numune	68
Şekil 38.	Çam ağacından reçine üretim teknikleri ve elde edilen ürünler	74
Şekil 39.	Farklı kolofan reçineleri	76
Şekil 40.	Abietat tipi reçine asitlerinin kimyasal yapısı	76
Şekil 41.	Bor cevheri görünümü.....	78
Şekil 42.	Bor oksit	80
Şekil 43.	Katkının genel görüntüsü	85
Şekil 44.	Modifiye asfalt bağlayıcıların üretilmesi (Yüksek Parçalayıcı Karıştırıcı)	86
Şekil 45.	SEM cihazı	87
Şekil 46.	FTIR spektrometresi.....	88
Şekil 47.	TGA/DSC cihazı	88
Şekil 48.	XRD cihazı	89
Şekil 49.	BBR deneyi için hazırlanan numuneler	92
Şekil 50.	Deney için hazırlanan numuneler ve etüve yerleştirilmesi	93
Şekil 51.	Etüvden çıkarılıp kesilen alt ve üst parçaların görünümü	93
Şekil 52.	Karışımlarda kullanılan agrega granülometrisi	95
Şekil 53.	Üretilen Marshall briketleri	97
Şekil 54.	Su hasarına maruz bırakılan numunelerin koşullandırma aşamaları.....	98
Şekil 55.	Sentez katkı maddesinin genel morfolojik görüntüleri; (1a) 10 µm büyütme, (1b) 2 µm büyütme, (1c) 1 µm büyütme	101
Şekil 56.	%3 Modifiye asfalt bağlayıcının SEM görüntüleri; (2a) 20 µm büyütme, (2b) 2 µm büyütme, (2c) 200 nm büyütme	103
Şekil 57.	Kolofan reçinesinin FTIR spektrumu.....	104
Şekil 58.	BORB katkısının FTIR spektrumu.....	104
Şekil 59.	Saf asfaltın (a) ve %3 sentez katkı maddesiyle modifiye edilmiş asfaltın (b) FTIR spektrumları.....	105
Şekil 60.	Bor esaslı reçine bileşiğinin DSC/TG eğrileri.....	106
Şekil 61.	Bor esaslı reçine bileşiğinin XRD grafiği	107
Şekil 62.	Penetrasyon deney sonuçları	108
Şekil 63.	Yumuşama noktası deney sonuçları	108

Şekil 64.	Düktilite deney sonuçları	109
Şekil 65.	Asfalt bağlayıcıların yük-deformasyon ilişkisi	110
Şekil 66.	Parlama noktası deney sonuçları	111
Şekil 67.	Fraass kırılma noktası deney sonuçları	111
Şekil 68.	Özgül ağırlık deney sonuçları	112
Şekil 69.	BA3.0 modifiyeli asfalt bağlayıcının trikloretilende çözünmesi	112
Şekil 70.	Nicholson soyulma deneyi sonrası sıkıştırılmamış karışımların görüntüsü	113
Şekil 71.	Asfalt bağlayıcı karışımların soyulma direnci değerleri	113
Şekil 72.	Bağlayıcılara ait kompleks modül (G^*) değerleri	115
Şekil 73.	Bağlayıcılara ait faz açısı (δ°) değerleri	115
Şekil 74.	Bağlayıcılara ait tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin \delta$) değerleri.....	116
Şekil 75.	Saf ve modifiye bağlayıcıların 40 °C referans sıcaklıktaki G^* ana eğrileri	118
Şekil 76.	Saf ve modifiye bağlayıcıların 40 °C referans sıcaklıktaki faz açısı ana eğrileri	118
Şekil 77.	Siyah (Black) diyagram.....	119
Şekil 78.	Cole-cole diyagram	120
Şekil 79.	Saf ve modifiyeli bağlayıcıların 40 °C'deki kompleks modül değerlerinin frekansla değişimi	121
Şekil 80.	Saf ve modifiyeli bağlayıcıların 40 °C'deki faz açısı değerlerinin frekansla değişimi	122
Şekil 81.	Saf ve modifiyeli bağlayıcıların G^* -sıcaklık ilişkisi a) 0.1 rad/sn b) 1 rad/sn c) 10 rad/sn d) 100 rad/sn	122
Şekil 82.	Saf ve modifiyeli bağlayıcıların faz açısı-sıcaklık ilişkisi a) 0.1 rad/sn b) 1 rad/sn c) 10 rad/sn d) 100 rad/sn.....	123
Şekil 83.	RTFOT sonrası tekerlek izi ($G^*/\sin\delta$) değerleri.....	126
Şekil 84.	PAV sonrası yorulma parametresi ($G^* \cdot \sin\delta$) değerleri.....	127
Şekil 85.	Dönel viskozimetre (RV) deney sonuçları, cP	129
Şekil 86.	Logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği	130
Şekil 87.	Sünme rijitliği (S) değerlerinin sıcaklıkla değişimi	131
Şekil 88.	Sünme oranı (m) değerlerinin sıcaklıkla değişimi	132
Şekil 89.	Bağlayıcılara ait penetrasyon indeksi değerleri	133
Şekil 90.	Bağlayıcılara ait VTS parametre değerleri.....	134
Şekil 91.	Depolama stabilitesi sonrası penetrasyon deneyi sonuçları	134
Şekil 92.	Depolama stabilitesi sonrası yumuşama noktası deneyi sonuçları.....	136

Şekil 93.	Depolama stabilitesi sonrası bağlayıcıların 135°C'deki viskozite sonuçları	137
Şekil 94.	Depolama stabilitesi sonrası bağlayıcıların 165°C'deki viskozite sonuçları	138
Şekil 95.	Depolama stabilitesi sonrası tekerlek izi parametreleri.....	140
Şekil 96.	Saf ve modifiye bağlayıcıların sünme uyumu ilişkisi	141
Şekil 97.	0.1 kPa ve 3.2 kPa gerilme seviyelerindeki sünme uyumunun yüzdesel farkları	141
Şekil 98.	Saf ve modifiye bağlayıcılar 0.1 kPa ve 3.2 kPa gerilme seviyelerinde yüzdesel geri dönme değerleri.....	142
Şekil 99.	Saf ve modifiye bağlayıcıların (a) %2.5 ve (b) %5 gerinim seviyelerindeki yorulma ömürleri	144
Şekil 100.	Farklı gerinim seviyelerindeki yorulma ömürleri	144
Şekil 101.	Saf ve modifiye bağlayıcıların malzeme bütünlüğü ve hasar yoğunluğu ilişkisi	145
Şekil 102.	Stabilite, akma, Dp, Vh, Vf, VMA değerlerini gösteren grafik	146
Şekil 103.	Karışımlarının stabilite ve MQ değerlerinin katkı oranı ile değişimi.	149
Şekil 104.	Dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları	150
Şekil 105.	Koşullu ve koşulsuz briketlerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri	151
Şekil 106.	Dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR değerleri).....	152
Şekil 107.	Karışımların 40°C sıcaklıktaki deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	153
Şekil 108.	Saf ve modifiye bağlayıcıların deformasyon-yük tekrar sayıları arasındaki ilişki	154

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Superpave bağlayıcı deneyleri ve deneylerle ilgili bilgiler	27
Tablo 2. Ölçülen Jnr değerleri için Minimum % R	40
Tablo 3. Sıcak asfalt karışımların özelliklerini etkileyen parametreler	47
Tablo 4. Katkıların genel sınıflandırması	70
Tablo 5. Yaygın olarak kullanılan asfalt modifiyerlerin bozulmalar üzerindeki olumlu etkileri	71
Tablo 6. Çam ağacı türlerine göre ortalama üretilen reçine miktarları	75
Tablo 7. Derecelerine göre reçinelerin fiziksel özellikleri	77
Tablo 8. Dünyadaki bor rezervi	79
Tablo 9. Türkiye'deki bor rezervleri dağılımı	79
Tablo 10. Kolofan reçinenin özellikleri	82
Tablo 11. Bor oksidin özellikleri	83
Tablo 12. Saf asfalt bağlayıcının fiziksel özellikleri	83
Tablo 13. Çalışmalarda kullanılan bağlayıcılar ve gösterimleri	86
Tablo 14. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri	94
Tablo 15. Karışımlarda kullanılan agrega granülometrisi ve şartname sınırları	96
Tablo 16. Asfalt bağlayıcıların kuvvet ölçüm düktilite alanları ve elastik geri dönme yüzdeleri	110
Tablo 17. Bağlayıcılara ait DSR deney sonuçları	114
Tablo 18. RTFOT sonrası bağlayıcıların fiziksel özellikleri	124
Tablo 19. RTFOT sonrası DSR deney sonuçları	125
Tablo 20. PAV sonrası DSR deney sonuçları	127
Tablo 21. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları	130
Tablo 22. Eğilme kırışi reometresi (BBR) deney sonuçları	131
Tablo 23. Bağlayıcılara ait performans sınıfları	133
Tablo 24. Depolama stabilitesi sonrası DSR deney sonuçları	139
Tablo 25. PG ve MSCR test sonuçlarına göre bağlayıcı performans seviyeleri	142
Tablo 26. VECD yorulma parametreleri	143
Tablo 27. Saf asfalt bağlayıcıyla yapılan karışımların tasarım sonuçları ve şartname limitleri	146
Tablo 28. Optimum bağlayıcı içeriğinde kullanılan değerler	148
Tablo 29. Bağlayıcılara ait Marshall stabilite deney sonuçları	148

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
BBR	: Eğilme Kirişi Reometresi
DMTA	: Dinamik Mekanik Termal Analiz
DSC	: Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi
DSR	: Dinamik Kayma Reometrisi
FT-IR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi
dk	: Dakika
Hz	: Hertz
kPa	: Kilopascal
mPa	: Megapascal
ms	: Milisaniye
nm	: Nanometre
Pa.s	: Pascal-saniye
PAV	: Basınçlı Yaşlandırma Kabini
PE	: Polietilen
PG	: Performans Aralığı
PP	: Polipropilen
PVA	: Poli vinil alkol
RTFOT	: Dönel İnce Film Halinde Yaşlandırma Deneyi
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
RV	: Dönel Viskozimetre
SARA	: Doymuş, Aromatik, Reçine Ve Asfaltanlar
SBS	: Sitren-Butadien-Sitren
SBR	: Sitren-Butadien-Rubber
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SHRP	: Stratejik Karayolu Araştırma Programı
sn	: Saniye
TG	: Termogravimetri
UV	: Ultraviyole
XRD	: X-Işını Difraksiyonu
cP	: Santipoise

δ : Faz açısı
 μm : Mikrometre
 ΔS : Sıcaklık Farkı



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünyadaki yol kaplamalarının büyük çoğunluğu, fiziksel ve reolojik özelliklerinden dolayı çeşitli şekillerde kullanılan asfalt bağlayıcılardan yapılmaktadır (J. Zhu, 2014). Son yıllarda, ekonomik gelişme ve yükselen yaşam standartlarının sonucu olarak trafik yüklerinin artması, iklim ile çevre koşullarının etkisi ve bununla beraber yapım sırasında meydana gelen üretim hataları, asfalt kaplama performansını etkilemektedir (H. Wang, 2010; J. Baek, 2010). Kaplamalarda bu istenmeyen bozulmaların meydana gelmesi, karayollarının servis ömrünü ve konfor düzeyini azaltmakta ve mevcut yollarda ise planlanan süreden daha önce bakım ve onarım çalışması yapılmasını mecburi hale getirerek maliyeti arttırmaktadır. Asfalt yol endüstrisinde kullanılan asfaltın büyük bir kısmının ithal edildiği ve bu bağlamda ülkemiz yük ve yolcu taşımacılığının yaklaşık %90-95'inin karayollarından sağlandığı düşünüldüğünde, ülkemiz ekonomisi açısından asfalt kaplamalar için harcanan bakım-onarım masraflarının önlenmesi ve asfalt kaplama malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi büyük önem taşımaktadır (URL-1, 2023)

Üstyapı tabakalarını oluşturan agrega ve asfalt bağlayıcının seçilmesi, tasarlanması ve uygulanması ciddi bilgi birikimi, tecrübe ve dikkat gerektirmektedir. Üstyapı kaplamalarında sıklıkla kullanılan asfalt kaplamalar, başta konfor olmak üzere birçok avantajları sayesinde tüm dünyada tercih edilmektedir. Esnek üstyapı kaplamaları konusunda oluşan geniş bilgi ve tecrübeye rağmen, kaplamalarda meydana gelen tekerlek izi, soyulma ve çatlama gibi farklı nedenlere bağlı karmaşık problemlerle günümüzde sıklıkla karşılaşilmektedir. Bitümlü kaplamalarda istenilen performansı elde etmek için çeşitli katkı maddelerinin kullanımı, dane boyutu dağılımı ve farklı tasarım yöntemleriyle malzeme seçimi gibi parametrelerinin gözden geçirildiği çok yönlü çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda, kaplamanın hizmet ömrünü arttırmak ve bakım-onarım maliyetini düşürmek gibi önemli sonuçlar elde edilmektedir.

Esnek yol kaplamaları agrega, asfalt bağlayıcı ve havadan oluşan kompleks bir yapıya sahiptirler. Esnek kaplamalarda genellikle bağlayıcı olarak kullanılan asfalt, %5-7 gibi düşük oranlarda kullanılmasına rağmen yol kaplama performansı açısından önemli bir yere sahiptir. Asfalt bağlayıcı, viskoelastik özelliğinden dolayı, iklim koşullarına bağlı olarak

farklı davranışlar göstermektedir. Asfalt yol kaplamalarında, artan trafik hacminin etkisiyle beraber farklı sıcaklıklarda tekerlek izi, yorulma, çatlama gibi bozulmalar meydana gelmektedir. Oluşan bu bozulmaları azaltmak ve asfalt kaplama performansını iyileştirmek için asfalt bağlayıcıya farklı birçok katkı maddeleri ilave edilerek bağlayıcı modifikasyonları yapılmaktadır (Geçkil, 2008; Arabani, Mirabdolazimi, & Sasani, 2010; Yıldırım, 2014). Asfalt bağlayıcının özelliklerinin geliştirilebilmesi için çeşitli polimerler (Yılmaz, Kök, N., & Alataş, 2013; G., A., D., & Santini S., 2006; B. & Işıkyakar G., 2008; Jones R., 1990; Liang, ve diğerleri, 2015; Adeboje, Kupolati, Sadiku, & Ndambuki, 2020), nano ve nano kompozit malzemeler (Yao, Dai, & You, 2015; Yusoff, Breem, Alattug, Hamim, & Ahmad, 2014; Jahromi & Khodaii, 2009; Fang, Yu, Liu, & Li, 2013; (Zhou, Dou, & Chen, 2021; Ray & Okamoto, 2003), yağ bazlı malzemeler (Portugal, Lucena, Lucena, & Costa, 2017; Rahman, Aziz, Hainin, & Bakar, 2014) ve atık malzemeler (Gürü, Nubuk, Arslan, Farzanian, & Bilici, 2014; García-Morales, Partal, Navarro, & Gallegos, 2006; Aguiar-Moya & Loria-Salazar, 2013; Kumar, Choudhary, Narzari, Kataki, & Shukla, 2018) kullanılmaktadır.

Bor rezervleri açısından dünyada birinci sırada olan ülkemiz, dünya rezervinin yaklaşık %73'ünü oluşturmaktadır. Teknolojik ve bilimsel gelişmelerin getirdiği güncel kullanımlara bakıldığında bor ve türevlerinin 250'den fazla malzemede kullanıldığı görülmektedir. Bu doğrultuda, bor ve ürünleri birçok sektörle doğrudan ve yakından bağlantılı 'teknolojik ekonomik' bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Ülkemiz bor yataklarının bolluğu göz önüne alındığında borun, önemli ve stratejik bir kaynak olarak görülmesi gerektiği açıktır (URL-2, 2023).

Bir çeşit doğal reçine olan kolofan reçinesi, kimyasal yapısının özelliklerinden dolayı diğer yenilenebilir kimyasallardan çok farklıdır. Diğer polimer yapılarıyla birlikte kullanıldığında, hidrokarbonca zengin biyokütlesi hidrofobik bir etki sağlamakta ve hidrofenantren yapısı ise termal özellikleri geliştirmektedir (Yao K. , 2013).

Son 20 yılda, araştırmacılar asfalta farklı reolojik özellikler katan polimer türü katkılara yönelmiştir. Ancak, katkıların maliyetli olması, özel karışım tesisi gerektirmesi ve çevre kirliliğine neden olması sebebiyle mevcut katkılara eş, düşük maliyetli ve çevreye duyarlı katkıların üretilerek asfalt kaplama performansının artırılması gerekmektedir. Bor ve türevlerinin asfalt bağlayıcının fiziksel ve reolojik özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesini içeren çalışmalar literatürde mevcuttur ancak bu iki katkının beraber kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca, çam reçinesi olan kolofan reçinesinin ise

asfalt bağlayıcıların modifiyesinde kullanılmadığı literatür araştırmasında görülmüştür. Kendiliğinden doğada bulunan sürdürülebilir, hammadde sıkıntısı olmayan kolofan reçinenin yine ülkemizde hammadde sıkıntısı olmayan kendi yeraltı kaynaklarımızdan elde ettiğimiz bor oksitle beraber asfaltın modifiye edilmesinde yeni bir sentez katkı maddesi olarak kullanılması amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, bor oksidin doğal kolofan reçinesiyle birlikte asfalta katkı olarak ilave edilmesiyle bor ürünlerinin ülke yararına kullanılması, üretim, sanayi ve çevre politikalarıyla bütünleşik kapsamda değerlendirilmesi hem bilimsel anlamda hem de ülke çıkarları konusunda önem arz etmektedir.

1.2. Literatür Özeti

Günümüze kadar pek çok araştırmacı, asfalt kaplamaların performansını arttırmak ve servis ömrünü uzatmak adına asfalta farklı tip ve oranlarda birçok katkı maddesi ekleyerek asfalt modifikasyonunu içeren çalışmalar yapmıştır. Literatürde, asfalt modifikasyonunda reçine ve türevleriyle ilgili modifikasyon çalışmaları bulunmakla birlikte kolofan reçinesinin asfaltda modifiyer olarak kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu bağlamda, yapılan çalışmalarda reçine ve bor türevleri iki ayrı kısımda ele alınarak özetlenmiştir.

- Reçine ve türevleri kullanılarak yapılan çalışmalar;

Polyester reçinenin bitümlü bağlayıcılarda yüksek sıcaklık performansı üzerine etkisini araştırmak amacıyla dört farklı oranda (%0,75, %1,0, %2,0 ve %3,0) polyester reçine kullanarak asfalt bağlayıcı modifiye edilmiştir. Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) ile yaşlandırılmaya maruz bırakılmıştır. RTFOT öncesi ve sonrası bütün bağlayıcılar DSR deneyine tabi tutularak numunelerin tekerlek izi dayanımları incelenmiştir. Deney sonucunda Superpave sistemine göre saf ve modifiye bağlayıcıların performans seviyesi belirlenmiş ve %3 polyester reçineli modifiye bağlayıcının şartname sınırını 76 °C'de sağladığı belirlenmiştir. Modifiye bağlayıcılardaki katkı maddesinin artmasıyla bitümün performans seviyesinin yükseldiği belirtilmiştir. Ayrıca, faz açısındaki (δ) azalmayla birlikte polyester reçineli bağlayıcıların daha elastik davranış gösterdiği ifade edilmektedir (Ahmedzade, Yılmaz, & Yılmaz, 2008).

Polyester reçinenin asfalt karışımı üzerindeki performansın incelenmesi amacıyla %0.75 oranında reçine ile saf asfalt bağlayıcı modifiye edilerek Marshall briketleri hazırlanmıştır. Polyester reçine ile modifiye edilmiş bağlayıcıların yüksek Marshall stabilite ve düşük akma değerine sahip olduğu ve bu bağlamda bağlayıcıların yüksek rijitlik

göstererek kalıcı deformasyona karşı daha dirençli olduğu kaydedilmiştir (Ahmedzade & Yılmaz, Effect of Polyester Resin Additive on The Properties of Asphalt Binders and Mixtures, 2008).

Epoksi reçinenin bitüm üzerine etkisinin araştırılması amacıyla saf bitüme ağırlıkça %1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında modifiyer olarak ilave edilmiştir. Çalışmada, epoksi reçinesinin etkisini anlamak için superpave deneylerinden DSR, RTFOT, PAV ve BBR ile geleneksel bitüm deneyleri saf bitüme ve modifiye bitümlere uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonrasında bağlayıcılar arasında optimum değerlerin %2 epoksi reçineli bağlayıcıya ait olduğu belirlenmiştir. Epoksi reçine katkısıyla tekerlek izi, kuma, soyulma ve çatlama değerlerinde bir azalmanın gözlemlendiği ve bu bağlamda yoğun trafikli ve sıcak iklime sahip bölgelerde epoksi reçinenin modifiyer olarak kullanımının uygun olabileceği belirtilmiştir (Çubuk, Gürü, & Çubuk, 2009).

Epoksi reçinesi ile kürlenerek elde edilen epoksi asfaltın açık gradasyonlu gözenekli asfalt karışım üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla performans deneyleri yapılmıştır. Epoksi asfalt bağlayıcı ve geleneksel asfalt bağlayıcı içeren asfalt karışımlarının kaplama yüzey performansları karşılaştırıldığında nem hasarına, eskimeye, dağılmaya ve erken bozulmaya karşı direncin önemli ölçüde iyileşebildiği belirlenmiştir. Ayrıca, olumlu özelliklerinin yanında epoksi asfaltın yeterli mukavemeti kazanması, kürlenme süresine ihtiyaç duyulması ve maliyetinin yüksek olması sebepleriyle de olumsuz yönlerinin mevcut olduğu belirtilmiştir (Luo, Lu, & Qian, 2015).

Geleneksel (saf) asfalt bağlayıcı, SBS modifiye asfalt bağlayıcı ve epoksi asfaltın karşılaştırmalı olarak reolojik performanslarını belirlenmek için DSR cihazı kullanılmıştır. Üç bağlayıcının uzun vadeli sünme davranışları 40 °C ve 100 Pa koşulları altında test edilmiştir. Epoksi asfaltın yüksek esnekliğe sahip olduğu ve uzun sünme süresi boyunca diğer iki bağlayıcının akışkan hale geldiği belirlenmiştir. Ayrıca, epoksi asfaltın elastik yapısı sayesinde tekerlek izi önleme kabiliyetinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Yapısal olarak incelendiğinde, epoksi asfaltın diğer bağlayıcılara göre üstün özelliklerinin olmasının nedeninin termal kürlenme sırasında çapraz bağlı çift modlu ağların varlığı sayesinde olduğu belirtilmiştir (Kang, Song, Pu, & Liu, 2015).

Bitkisel atıkların asidik hidrolizi ile elde edilen furfuraldan üretilmiş furan reçinesi, 50/70 penetrasyon sınıfı asfalta, asfalt ağırlığının %2, %3, %4, %5, %6 oranlarında, 150°C sıcaklıkta ve 45 dakika süre ile karıştırılarak modifiye asfalt numuneleri oluşturulmuştur. Oluşturulan numuneler üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, DSR ve RV deneyleri

yapılmıştır. Ayrıca karıştırma süreleri değiştirilerek (15 dk., 30 dk., 45 dk., 60 dk.) yumuşama noktası üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Yumuşama noktası test sonuçlarından minimum kullanılacak katkı oranının %3'den fazla ve karıştırma süresinin ise 30 dakika veya üzeri bir sürede olması gerektiği bildirilmiştir. DSR ve RV sonuçlarına göre sırasıyla katkı maddesinin asfaltın elastik özelliğini iyileştirerek tekerlek izi dayanımını artırdığı, saf asfaltın performans aralığı sınıfını 64°C'den 76°C'ye yükselttiği ve işlenebilirliğini azalttığı ve bu işlenebilirliğin ise sınır limitlerin üzerinde olmadığı raporlanmıştır (Bostancıoğlu & Oruç, 2015).

Epoksi asfalt bağlayıcının performansını arttırmak amacıyla farklı lif içerikleri ve uzunluklarda mineral elyaf kullanılarak asfalt modifikasyon gerçekleştirilmiştir. Saf ve modifiyeli bağlayıcıların yorulma ve düşük sıcaklık performansları değerlendirilmiştir. Mineral elyafın düşük sıcaklık çatlak direncini arttırdığı ancak lif içeriğinin %6'dan fazla olduğu zaman bağlayıcının performansının olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. Universal Test Makinesi Sistemi (UTM) ile 0 °C'de dört noktalı eğilme yorulma testi gerçekleştirilmiş ve yorulma ömrünün önce arttığı, ardından lif içeriğinin artmasıyla sabitlendiği ve hafifçe azaldığı gözlemlenmiştir. Epoksi asfaltın yorulma performansının uygun miktarda mineral lifle artabileceği ve yoğun stres altında mineral elyafın bu durumu absorbe edip dağıtabildiği, mikro çatlakların oluşumunu geciktirebildiği belirlenmiştir (Xue & Qian, 2016).

Furan reçenesi (FR) ve fındık kabuğunun vakum piroliziyle elde edilen aktif karbon bileşenleri (C-A) bitümlü bağlayıcıya ilave edilerek modifiye asfalt karışımları elde edilmiştir. Asfalt karışıma bitüm ağırlığının %10, 15 ve 20 oranlarında C-A ve %4, 5 ve 6 oranlarında FR katılarak elde edilen modifiye asfalt karışımlarının tekerlek izine karşı direnci ve su hasarı incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, %10 C-A ve %5 FR içeren numunelerin en yüksek sertlik modülüne sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca C-A katkısı karışımın dayanımını azaltmıştır. Modifiyer olarak C-A ve FR kullanılması ile tekerlek izi direnci ve sertlik modülü bakımından yüksek performans göstermiştir. Su hasarında ise C-A bozulurken, FR modifikasyonunun dayanıklılığı arttırdığı görülmüştür (Bostancıoğlu & Oruç, 2016).

Epoksi reçine ve asfalt bağlayıcıdan elde edilen reçine asfaltın, ıslak agregalarla arasındaki adezyonun etkisinin belirlenmesi amacıyla tekerlek izi ve neme karşı duyarlılık deneyleri yapılmıştır. Agregalardaki nemin, agregalar ile reçineli asfalt arasındaki yapışmayı zayıflattığı ve reçineli asfalt karışımının nem stabilitesini ve eğilme özelliklerini olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Islak agregalardaki nemin buharlaşması, sıcak havalarda reçineli

asfaltın akmasına neden olmuş ve reçine asfaltın yorulma ömrünü azaltmıştır. Reçine asfalt ve ıslak agrega karışımına sönmemiş kirecin ilave edilmesiyle Marshall stabilitesinin iyileştiği, neme duyarlılığı azaltabildiği ve ıslak agregaların reçine asfalt karışımının performansının üzerindeki olumsuz etkiyi azalttığı belirtilmiştir (Liu, ve diğerleri, 2016).

Epoksi asfalt betonunun geçirgenlik, kayma direnci, sökölme ve sıyırılma ve yüzey dokusu gibi yüzey özelliklerinin belirlenebilmesi için geçirgenlik testi, dinamik sürtünme testi ve Hamburg tekerlek izi deneyleri yapılmıştır. Epoksi asfalt betonunun geçirgenlik katsayısının çok düşük olduğu ve bu katsayısının düşüklüğü epoksi asfaltın yaygın kullanıldığı çelik tabliyelerde suyun içeri girmesini engellediği için istenen bir durum olduğu belirlenmiştir. Hamburg tekerlek izi testi ile epoksi asfalt betonunun geleneksel asfalt betona kıyasla mükemmel bir soyulma önleyici performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Araç hızının 80 km/s'nin üzerine çıktığında sürtünme katsayısının hızla düşebileceği ve yüksek hızlarda patinaj direnci kaybının olabileceği belirtilmiştir (Zhong, Yang, & Wei, 2017).

Epoksi reçinesi, asfalta modifiyer olarak kullanımının okside asfalt üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla bitüme %2,5, 10 ve 20 oranlarında katılmıştır. Okside asfalt ve epoksi reçinenin etkileşiminin anlaşılması için FTIR ve DSC analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, epoksi katkısının modifiye edilmesiyle viskoelastik ve termoplastik özellikleri DMTA ve TGA analizleri ile belirlenmiştir. Epoksi reçinesi ve bitüm arasında kimyasal etkileşimin olduğunun ancak epoksi oranın %10 ve 15 seviyelerinde olduğunda bitüm performansı olumsuz etkelediği belirtilmiştir. Epoksi reçine kullanımının okside asfaltın termal stabilitesini arttırdığı ve ayrıca en iyi katkı oranının %5 epoksi reçinesiyle sağlandığı gözlemlenmiştir (Motamedi, Attar, & Rostami, 2017).

Epoksi asfalt bağlayıcının yorulma performansını ve nem hasarına duyarlılığını araştırmak amacıyla dört noktalı ışın yorulma testi yapılmıştır. Numunelerin kuru koşullarda ve nem hasarından sonraki yorulma ömürleri ve neme duyarlılığı değerlendirilmiştir. Deney parametreleri karşılaştırıldığında, epoksi asfaltın yorulma ömrünün geleneksel asfalt bağlayıcıya kıyasla iki kat daha uzun olduğu ve benzer şekilde, daha yüksek bir sıcaklıkta veya daha düşük bir gerinim seviyesinde epoksi asfaltın yorulma ömrü bakımından daha iyi bir performans gösterdiği belirlenmiştir. Nem koşullandırma durumunda ise epoksi asfaltın yorulma ömründe gözle görülür bir azalma olduğu ve nemin epoksi asfaltın yorulma davranışı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir (Luo, Qian, Yang, & Lu, 2017).

Fenolik reçinenin, Stiren-bütadien kauçuğu (SBR) modifiyeli asfalt üzerindeki etkisini araştırmak ve SBR modifiye asfalttan yüksek performans elde etmek amacıyla geleneksel ve reolojik deneyler yapılmıştır. Farklı SBR ve PF (%1-5) içerikleri ile asfalt bağlayıcı modifiye edilmiştir. Fenolik reçinenin SBR modifiye asfaltın yumuşama noktasını arttırdığı ve penetrasyon değerlerini düşürdüğü belirlenmiştir. Bileşik (SBR ve Fenolik Reçine) modifiye asfalt karışım numunelerinin, SBR modifiye asfalt karışım numunelerine göre daha az deformasyona ve daha iyi tekerlek izi direncine sahip olduğu belirtilmiştir. Fenolik reçine, SBR ile modifiye edilmiş asfalt karışımını güçlendirmiş, bağlayıcı ile agregalar arasındaki yapışmayı arttırırken, çatlama önleyici gücünü iyileştirmiş ve HMA kaplamaların soyulma önleyici özelliğini geliştirmiştir (Ming., Feng, & Sidding, 2018).

Bromlu stiren-bütadien stiren triblok kopolimerinin (BrSBS) ile modifiye edilmiş epoksi asfaltın alev geciktirici özelliği üzerine etkisinin araştırılması amacıyla saf asfalt bağlayıcıya %2-8 oranında BrSBS katkısı eklenmiş ve sonrasında epoksi reçinesiyle modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Epoksi matrisindeki asfalt alanların homojen dağıldığı ve BrSBS içeriği ağırlıkça %6'nın üzerinde olduğunda BrSBS ile asfalt arasında faz değişimi olmadığı görülmüştür. BrSBS ile modifiye edilmiş epoksi asfaltın alev geciktiriciliği önemli ölçüde iyileşmiştir (Jiang, ve diğerleri, 2019).

C9 petrol reçinesinin SBS ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcının performansı üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla SBS modifiyeli asfalt %0, %3, %6, %9 ve %12 oranlarında C9 petrol reçinesi ile modifiye edilmiştir. Petrol reçinesi, SBS'nin parçacık boyutunu azaltarak SBS'nin asfalttaki şişme davranışını ve nihai mikro yapısını etkilediği, yapıdaki reçinenin miktarı arttıkça şişmeden sonra SBS'nin işgal ettiği alanın arttığı ve bu bağlamda SBS'nin uzun iskeleti ile çapraz bağlı ağ yapısının daha yoğun olduğu görülmüştür. C9 petrol reçinesinin, yüksek sıcaklıkta depolama sırasında SBS modifiye edicinin asfaltta yüzmesini ve toplanmasını etkili bir şekilde engelleyebildiği ve böylece SBS ile modifiye edilmiş asfaltın depolama stabilitesini geliştirdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, petrol reçinesinin, SBS ile modifiye edilmiş asfaltın viskozitesinin ve yaşlanma karşıtı performansının iyileştiği belirtilmiştir (Zhang, ve diğerleri, 2021).

Fenol formaldehit reçine ve lignin bazlı fenol formaldehit reçine ile modifiye edilmiş iki ayrı asfalt bağlayıcının kimyasal ve reolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla FTIR, SEM, UV spektrum analizleriyle asfalt performans deneyleri yapılmıştır. İki reçine türünde de benzer kimyasal yapının varlığı tespit edilmiş ancak lignin bazlı fenol formaldehit reçinenin termal stabilitesinin fenol formaldehit reçineye göre düşük olduğu belirlenmiştir.

Bu durum, ligninin boşluklu yapıya sahip olmasıyla açıklanmıştır. Asfalt bağlayıcıya reçine eklenmesiyle asfaltın yorulma direncinin arttığı ve yükleme sırasında asfaltın hasar birikiminin azalabildiği gözlemlenmiştir. Lignin bazlı fenol formaldehit reçinesi ile Fenol formaldehit reçine karşılaştırıldığında, asfaltın yorulma direncini iyileştirmede daha iyi bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Asfalt bağlayıcıya reçine eklenmesiyle, asfalt bileşenleri oranı üzerindeki yaşlanmanın etkisini azaltabildiği gözlemlenmiştir (Li, Lv, Cheng, Chen, & Zhang, 2023).

- Bor ve türevleri kullanılarak yapılan çalışmalar;

Asfalt bağlayıcının reolojik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla asfalta uyum sağlayabilecek organik esaslı kalsiyum ve organik esaslı borik asit bileşiği laboratuvar ortamında sentezlenmiştir. Saf asfalt bağlayıcıya ağırlıkça %1, %2, %3, %5 ve %10'u oranlarında eklenen sentez katkılarıyla modifikasyon gerçekleştirilmiş ve modifiyeli bağlayıcılara fiziksel ve reolojik deneyler uygulanmıştır. Organik esaslı borik asit bileşiği ile asfalt bağlayıcının viskozite ve yumuşama noktası değerlerinin düştüğü, sünekliğin arttığı görülmüş ve bu durumun modifiye bağlayıcıların soğuk iklimlerde daha iyi performans gösterebileceği ifade edilmiştir. Katkıyla beraber yüksek sıcaklık performansında herhangi bir değişimin olmadığı ancak her iki katkının soyulmaya karşı direnci ve Marshall stabilitesini iyileştirdiği belirtilmiştir (Arslan, Gürü, & Çubuk, 2012).

Borik asidin asfalt bağlayıcı üzerindeki performansı araştırmak amacıyla 50/70 penetrasyonlu saf bağlayıcı farklı oranlarda borik asit ve aromatik hidrokarbonla modifiye edilmiştir. Modifikasyon işlemi, 150°C sıcaklıkta, 800 rpm karıştırma hızında ve 15 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Modifiye bağlayıcıların performansının belirlenmesi amacıyla fiziksel deneylerden penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre en iyi sonucu %3 BA+ %1 AH ile modifiye edilen bağlayıcının verdiği kaydedilmiştir (Oruç, Yılmaz, & Bostancıoğlu, 2013).

Borik asit ile monoetilen glikol ve dietilen glikol maddeleri yeni bir modifiyer elde edilmesi amacıyla laboratuvar ortamında kimyasal olarak sentezlenmiştir. Monoetilen ve dietilen glikol kökenli sentetik poliboron bileşikler saf asfalta ağırlığının %1, %2, %3 ve %5'i oranlarında ayrı ayrı eklenmişlerdir. Modifiyeli bağlayıcılara numunelere yumuşama noktası, Nicholson soyulma, Marshall stabilite, RV, DSR ve BBR deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda, her iki bileşiginde saf asfalt bağlayıcıya göre Marshall stabilitesi değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Monoetilen glikol kökenli sentetik poliboron bileşiğinin bağlayıcının düşük sıcaklık çatlama direncini arttırırken, dietilen glikol kökenli sentetik

poliboron bileşiminin ise bağlayıcının bitümün tekerlek izine karşı direncinin arttığı tespit edilmiştir (Arslan, Gürü, & Çubuk, Preventing of Rutting and Crakings in The Bituminous Mixtures by Monoethylene and Diethylene Glycol Based Synthetic Polyboron Compounds, 2014).

Bor türevi olan kolemanitin işlenmesi sırasında çıkan kolemanit atığının, sıcak karışımlarda agrega olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi amacıyla 60 adet asfalt beton numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler, sadece kolemanit, kolemanit kaba kireçtaşı ince, kolemanit ince kireçtaşı kaba olmak üzere farklı malzeme boyutlarında hazırlanmıştır. Yapılan deneyler sonrasında, kireçtaşı agregalı numunelerde %5,3 ve kolemanit agregalı numunelerde %6,65 oranında optimum bitüm yüzdesi bulunmuştur. Kolemanit agrega numunelerinde daha fazla bitüme ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Kolemanit atığının yaygın olduğu bölgelerde kireçtaşının taşıma maliyetini geçmediği sürece, ince agrega olarak asfalt beton karışımlarında kireçtaşı yerine atık kolemanitin kullanılabileceği vurgulanmıştır (Morova & Terzi, 2015).

Bor atığı tinkalin sıcak asfalt karışımlarda filler malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla karışma farklı oranlarda tinkal eklenerek asfalt numuneleri hazırlanmıştır. Deney sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için %6 oranında kireçtaşı içeren kontrol numunesi yapılmıştır. Bütün numunelere, Marshall stabilitesi ve akma, dolaylı çekme ve mekanik Marshall batırma deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre, sıcak karışım numunelerinde en yüksek yoğunluk değeri ile plastik deformasyon oluşumuna karşı en iyi davranışın % 5 bor atığı filler katkılı numunelerde olduğu ifade edilmiştir. Kontrol numunesiyle karşılaştırıldığında, tinkalin sıcak karışımlarda mineral filler olarak kullanılmasıyla rijitlik değerlerinde hafif bir azalmanın olduğu tespit edilse de bor atığı filler katkılı numunelerin düşük ve orta trafik hacimli kesimlerdeki aşınma tabakalarında en az geleneksel filler kadar iyi davranış sergileyebileceği vurgulanmıştır (Selman, 2015).

Borik asidin asfalta modifiyer olarak eklenebilmesi amacıyla kimyasal olarak laboratuvar ortamında bor içerikli yeni 4 asfalt modifiyeri sentezlenmiştir. Çeşitli karbon içeren alkil grupları etil (iki karbon içeren), butil (dört karbon içeren) ve oktil (sekiz karbon içeren), borik asitle beraber sentezlenen katkı maddelerinin yapısal bileşiklerinde kullanılmıştır. 50/70 penetrasyonlu saf asfalt bağlayıcıya ağırlığının %1'i oranında ayrı ayrı eklenerek modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Saf ve modifiyeli asfalt bağlayıcılara asfalt deneyleri uygulanmış ve FT-IR ve SEM analizleri yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre, bor içerikli katkıların bağlayıcının tekerlek izi direncini arttırdığı ve elastik davranışını

iyileştirdiği belirtilmiştir (Oruç, Yılmaz, & Sancak, Effect of Boron-containing Additives on Rheological Properties of Asphalt Binder, 2016).

Asfalt bağlayıcının performans özelliklerini iyileştirmek amacıyla laboratuvar ortamında halkalı borat ester (CBE) adı verilen bor içeren yeni bir katkı geliştirilmiştir. Katkı, penetrasyon sınıfı 50/70 olan asfalta ağırlığının %1, %2, %4 ve %6'sı oranında eklenerek modifikasyon gerçekleştirilmiştir. Saf ve modifiyeli bağlayıcılara fiziksel ve reolojik deneyler uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, CBE katkısı ile asfalt bağlayıcının tekerlek izine ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direncin arttığı ve en iyi performansı %6 oranında katkı ilavesi ile görüldüğü belirtilmiştir (Oruç & Yılmaz, Improvement in Performance Properties of Asphalt Using a Novel Boron-containing Additive, 2016).

Ham şekerin işlenmesi sırasında atık olarak elde edilen şeker pancarı melası ve bor oksidin asfalta modifiyer olarak eklenebilmesi amacıyla kimyasal olarak laboratuvar ortamında melas bazlı bor oksit sentezlenmiştir. Saf asfalt bağlayıcıya şeker pancar melası ve melas bazlı bor oksit farklı oranlarda ayrı ayrı eklenmiştir. Numunelere fiziksel deneylerle beraber Marshall stabilite deneyi de uygulanmıştır. Melas bazlı bor oksitle stabilite ve soyulmaya karşı direnç artarken şeker pancarı melası ile herhangi bir değişim olmadığı gözlenmiştir. Ayrıca, melas bazlı bor oksit katkısıyla bağlayıcının tekerlek izine karşı performansın geliştiği ifade edilmiştir (Gürü, Çubuk, Arslan, & Aminbakhsh, 2017).

Aspir yağı ve borik asidin asfalt bağlayıcıya modifiyer olarak eklenebilmesi amacıyla laboratuvar ortamında kimyasal olarak yağ ve bor içerikli yeni bir katkı maddesi sentezlemiştir. Katkı maddesinin, asfalt bağlayıcıya ağırlığının %0.3, %0.5, %0.7 ve %1'i oranında 30 dakika, 1000rpm hızda, 150°C sıcaklıkta mekanik karıştırıcı yardımıyla karıştırılarak modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Asfalt bağlayıcıların yapısal analizi FT-IR analiziyle gerçekleştirilmiş ve analiz sonucunda katkı maddesinin saf asfalt bağlayıcıyla uyum içerisinde olduğu, elektrostatik bağların mevcut olabileceği ifade edilmiştir. Saf ve modifiyeli asfalt bağlayıcılara fiziksel ve reolojik deneyler uygulanmıştır. Katkı maddesinin, saf asfalt bağlayıcının yaşlanmaya ve tekerlek izine karşı direncini iyileştirdiği ve sıcaklık hassasiyetini azalttığı tespit edilmiştir (Şahin, 2017).

Bor minerali üleksitin asfalt karışımlardaki suya karşı hassasiyetine etkisinin araştırılması amacıyla nano partikül öğütücü değirmen ile öğütülerek küçük boyutlara getirilmiş üleksitten 25 mikron altı (U-25 μ m) ve 53 mikron üstü (U+53 μ m) şeklinde iki farklı boyutta nano partiküllerden asfalt beton numuneleri hazırlanmıştır. Numunelere nem

duyarlılığının ölçüsü olan indirekt çekme mukavemeti deneyi uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, bor minerali üleksitin asfalt beton numuneler üzerinde olumlu etkisi olduğu ve numunelerin adezyonunu güçlendirdiği ifade edilmiştir (Kütük Sert, 2017).

Kırılmış bor atığı, boraks pentahidrat ve susuz boraksın asfalt karışımlarda kullanılabilirliği ve performans özelliklerinin belirlenmesi amacıyla asfalt beton numuneleri hazırlanmıştır. Numunelere Marshall tasarım testleri ve sünme testleri uygulanmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre, bor içerikli üç malzemenin karışımların hava boşluklarını, mineral agrega boşluklarını, akış ve optimum bitüm içeriği değerlerini artırdığını, stabiliteyi, birim ağırlığı, asfaltla dolu boşlukları ve Marshall Katsayısı değerlerini azalttığını ancak değerlerin şartname sınırları içinde kaldığı ifade edilmiştir. Kırılmış bor atığının en yüksek stabiliteye, en yüksek hizmet ömrüne ve tekerlek izine karşı yüksek dirence sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, %10 kırılmış bor atığı içeriğiyle hazırlanan asfalt kaplamaların 1 km yol için 86 ton atık malzemenin geri dönüşümünü sağlayacağı ve tekerlek izine karşı daha iyi performans gösterebileceği vurgulanmıştır (Keskin & Karacasu, 2019).

Üleksitin taş mastik asfalt karışımlarda filler malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla karışma farklı oranlarda üleksit eklenerek asfalt numuneleri hazırlanmıştır. Taş mastik asfalt karışımlarda %10 mineral filler malzemesi kullanılmıştır. Asfalt numuneleri; %0 üleksit - %10 bazalt, %3 üleksit - %7 bazalt, %6 üleksit - %4 bazalt, %10 üleksit - %0 bazalt mineral olacak şekilde 24 adet Marshall briketi hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde Marshall ve dolaylı çekme rijitlik modülü deneyleri yapılmıştır. Marshall deneyi sonuçlarına göre, %6 oranına kadar filler olarak üleksitin kullanımının karışım stabilitesini arttırdığı ve üleksitin filler olarak karışımda kullanımının uygun olabileceği belirtilmiştir. Dolaylı çekme deney sonuçlarına göre ise, %3 üleksit - %7 bazalt filleri oranına kadar esneklik modülünde artış olduğu ancak üleksit miktarının artması ile bir azalmanın meydana geldiği vurgulanmıştır (Kabadayı, 2019).

Bor türevi kolemanit(C) mineralinin partikül boyutunun nano boyuta indirgemek ve ılık asfalt karışım üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla yapılan çalışmada yapısal ve reolojik özellikleri incelenmiştir. Nano boyutun etkisinin incelenmesi için, mikron boyutu 53 μm (C + 53 μm) üzeri toz, mikron altı boyut/nano boyut için 25 μm (C - 25 μm) altı toz tercih edilmiştir. Yapısal analizde, parçacık boyutu analiz cihazı, mikroskoplar ve bir enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi kullanılarak dönüşümlü olarak ölçümler alınmıştır. Bağlayıcı olarak BBR ve karışım testleri olarak Marshall, Tekrarlı Sünme (RC), dolaylı

çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, kolemanit mineralinin öğütme işleminden sonra elemental yapısının değişmediği ve başarıyla nano boyuta indirgenemediği görülmüştür. En yüksek stabilite değeri %5 C-25 μm ve %10 C + 53 μm karışımlarında görülürken en yüksek sünme ve Marshall Katsayısı değerlerinin de %5 C - 25 μm karışımında bulunduğu ifade edilmiştir. Tekrarlı sünme testiyle, normal kolemanit boyutundan ziyade nano boyutun asfalt bağlayıcı üzerindeki etkisinin daha iyi olduğu belirtilmiştir (Kutuk & Kutuk-Sert, 2020).

Kâğıt üretiminin bir yan ürünü olan tall yağı ve bor oksidin asfalta modifiyer olarak eklenebilmesi amacıyla kimyasal olarak laboratuvar ortamında TOBO adında tall yağı ve bor içeren yeni bir asfalt modifiyeri sentezlenmiştir. Üretilen modifiye edicinin mikro yapısal özelliklerini belirlemek için FTIR, TG/DTG ve SEM analizleri yapılmıştır. Ayrıca, modifiye asfaltların reolojik özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası, süneklik, parlama noktası testi, dönme viskozitesi (RV), Dinamik Kayma Reometresi (DSR), Eğilme Kirişi Reometresi (BBR) testleri yapılarak incelenmiştir. FTIR analizi, kimyasal bir sentezin meydana geldiğini, TG/DTG analizi termal yapı karakterizasyonunu, SEM analizi ise yeni modifiyerin asfalt matrisine homojen olarak dağıldığını göstermiştir. Deneysel sonuçlar, asfalt bağlayıcının işlenebilirliğinin arttığını, sıcaklık duyarlılığının ise azaldığını göstermiştir. Ayrıca asfalt bağlayıcının tekerlek izi ve yorulma direncinin arttığı ancak düşük sıcaklık performansı belli bir katkı oranından sonra kötü etkilendiği ifade edilmiştir (Yeşilçiçek, Oruç, & Bozdemir, 2022).

1.3. Çalışmanın Amacı, Önemi ve İzlenen Yol

Hızla gelişen teknoloji ve sanayileşmenin ekonomide yarattığı istihdam artışı birçok sorunu da beraberinde getirmiştir. Bu gelişmelerin yanında, asfalt endüstrisi ve birçok alanda kullanılan SBS, PE, PP, PVA gibi petrol bazlı plastiklerin büyük tüketimi biyolojik olarak parçalanamaması nedeniyle ciddi çevresel etkiler oluşturmaktadır (Rahman A.-M. T., Aziz, Hainin, & Bakar, 2014; Yesilcicek, Bozdemir, & Ş., 2023). Çevresel kaygıların artmasıyla yenilebilir polimerlerin paletini genişletmek amacıyla biyo-bazlı, biyo-bozunur polimerlerin (moleküller) araştırılması önem kazanmıştır. Doğal kaynaklardan elde edilen polimerlerin araştırılması, mevcut çevre sorununu çözmek için umut verici bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Son zamanlarda, çam ağaçlarından elde edilen biyolojik kaynaklar, düşük maliyet ve kolay kimyasal modifikasyonlar nedeniyle ilgi uyandırmaktadır. Ülkemizin de

ormanlık alanlarının %60'ını çam ağaçlarının oluşturduğu ve bu ağaçların doğal olarak kendiliğinden reçine salgısı ürettiği göz önünde bulundurulduğunda reçinenin asfaltın modifiyesinde yeni bir katkı maddesi olarak kullanılması gündeme gelmiştir.

Ulusal kaynağımız olan borun literatürde asfalt kaplamalarda katkı maddesi olarak kullanımına dair çok az sayıda çalışma vardır. Bu çalışmalarda da bor türevi borik asidin yüksek sıcaklıklarda ergimesi sağlanarak asfalta tutundurulması üzerine çalışılmış ve kısmen başarı sağlanmıştır (United States Patent Office Patent No. 2375117, 1945; 1964; United States Patent Office Patent No. 3094427; 1963 United States Patent Office, Patent No. 3152093). Ancak bahsedilen sıcaklıkta gerçekleşen modifikasyonun, asfaltın kütle kaybıyla beraber oksidasyona uğramasına yol açmaktadır (AASHTO, 2010). Borik asidin asfalta direkt katılmasıyla da asfalta tutunamadığı (uyum sağlayamadığı) ve başka bir maddeyle sentezi gerçekleştirilerek asfaltı modifiye edebildiği görülmektedir (Yılmaz B., 2016). Bu olumsuzlukların giderilmesi için, bu çalışmada, susuz borik asidin (bor oksit), asfalt yapısına uygun hidrokarbon içeriğine sahip kolofan reçine ile sentezinin yapılarak asfaltla etkileşime girebilecek özelliğe kavuşturulması hedeflenmiştir. Son yıllarda, bor içeren reçineler üzerine yapılan çalışmalar bor oksidin reçineyle beraber sentezlenerek asfalta katılabileceği yönünde çalışmamıza ışık tutmuştur. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanabilir:

Polimer kompozitleri ve kaplama malzemeleri olarak yaygın kullanılan fenol-formaldehit reçineleri alkali varlığında fenol ve formaldehitten oluşturulmaktadır. Yapılan bir çalışmada, formalin yöntemini kullanılarak bor içeren fenol-formaldehit reçinesi, fenol, formaldehit ve borik asitten sentezlenmiştir. Formalin yönteminden oluşturulan bor içeren fenol-formaldehit reçinelerinde, benzil borat bağı esas olarak sentez işlemi sırasında ve fenol borat bağı kütleme işleminde yüksek sıcaklıkta oluşturulmuştur. Reçinenin, B --- O borat bağlantısı ile daha iyi ısı oksidatif dirence ve termal stabiliteye sahip olduğu belirtilmiştir (Gao, Liu, & Yang, 1999).

Yüksek mukavemet, yüksek yapışma, sertleşme sırasındaki düşük büzülme ve iyi korozyon direnci sayesinde en yaygın kullanılan termoset polimer olan epoksi reçinenin, uygulama genişliğini uzatmak için alev geciktirici özelliğe sahip olması istenmektedir. Bor içeren fenolik reçine ile geleneksel fenolik reçinenin alevlenme özelliğini karşılaştırılması üzerine yapılan bir çalışmada, bor içeren fenolik reçinenin çok daha yüksek cam geçiş sıcaklığına ve daha düşük ısı salınımına sahip olduğu belirtilmiştir (Deng, Shi, Liu, Liu, & Wang, 2018).

Bor bileşiklerinin yüksek moleküllü hidrokarbon türevleriyle uyum sağlayabilmesi, bu ürünlere oksidatif ve mekanik direnç, termal stabilite ve yangın geciktirici gibi çarpıcı özellikler kazandırmaktadır. Yüksek yapışma ve yüksek mukavemet özelliğine sahip reçinelerin başka elementleri kolaylıkla alabilme özelliği, borun asfalta reçine aracılığıyla katılabileceği fikrini doğurmuştur. Bu bağlamda, asfalt bağlayıcının mekanik ve reolojik özelliklerini geliştirebileceğini düşündüğümüz; bor ve kolofan reçine koordinasyonundan oluşan yeni, tamamen yerli, ucuz ve orijinal nitelikteki katkı laboratuvar ortamında sentezlenip saf asfalt bağlayıcıya ağırlığının %0.5, %1, %1.5 ve %3 oranlarında ayrı ayrı eklenerek asfaltın modifikasyonu gerçekleştirilmiştir.

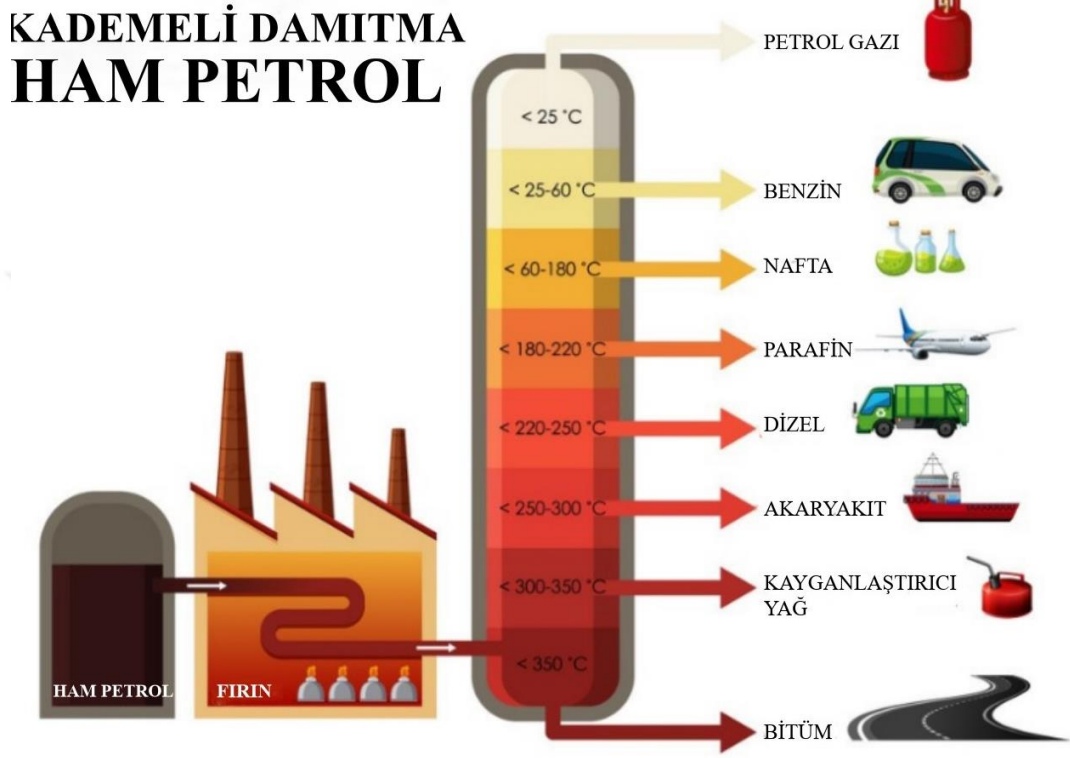
Katkıyı oluşturan maddelere (kolofan reçinesi ve bor oksit), katkıya ve katkıyla beraber modifiye edilmiş asfalta ayrı ayrı Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR), X-ışını kırınımı (XRD) ve Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazları ile yapısal analiz testleri uygulanmıştır.

Saf ve modifiyeli bağlayıcıların fiziksel özellikleri geleneksel deneyler ile belirlenirken, asfalt bağlayıcılara üretim ve kullanım süresindeki kısa ve uzun süreli yaşlanmasını temsil eden RTFO ve PAV deneyleri de uygulanmıştır. Bütün numunelerin yüksek ve düşük sıcaklıklardaki reolojik davranışları Superpave deneyleriyle belirlenmiştir. Saf ve modifiyeli bağlayıcılarla sıcak asfalt karışım numuneleri hazırlanmış olup Marshall Stabilite ve Akma, Dolaylı Çekme Mukavemeti, Modifiye Lottman, Dinamik Sünme ve Dolaylı Çekme Yorulma deneyleri uygulanmıştır.

1.4. Bitüm

Bitüm; esas olarak yüksek moleküllü hidrokarbon ve türevlerini içeren, katı, yarı katı ve sıvı halde bulunabilen, doğal ya da üretilmiş, metal-dışı türevleri ile bir arada bulunan, yapıştırıcı özelliğe sahip karbon disülfürde tamamen çözünebilen siyah veya koyu renkli bağlayıcı maddedir (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002; (Orhan, 2005; Geçkil, 2008; Lavin, 2003). Bitümlü bağlayıcılar, katran ve asfalt olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Katran, odun veya kömürün kapalı bir kutu içinde damıtılması ile ham katran olarak elde edilmekte ve elde edilen ham katranın, yol inşaatında kullanılabilmesi için tekrar bir damıtma işlemi gerekmektedir. Asfaltlar kendi içinde doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Doğal asfaltlar doğada genellikle mineral maddelerle karışmış halde bulunan ve konumlarına göre göl ve kaya diye adlandırılan asfalt bağlayıcılardır. Yapay asfaltlar ise,

ham petrolün arıtılması ile elde edilen, katı veya yarı katı özellikteki petrol asfaltları olup asfalt çimentosu (AC) olarak isimlendirilmişlerdir. Şekil 1’de ham petrolün işlenmesi ve bitüm elde edilmesi gösterilmiştir. Asfalt çimentoları kıvamlılığını belirleyen penetrasyon derecesine göre sınıflandırılmaktadır (Orhan, 2005; Yılmaz B., 2016; Tunç, 2007).



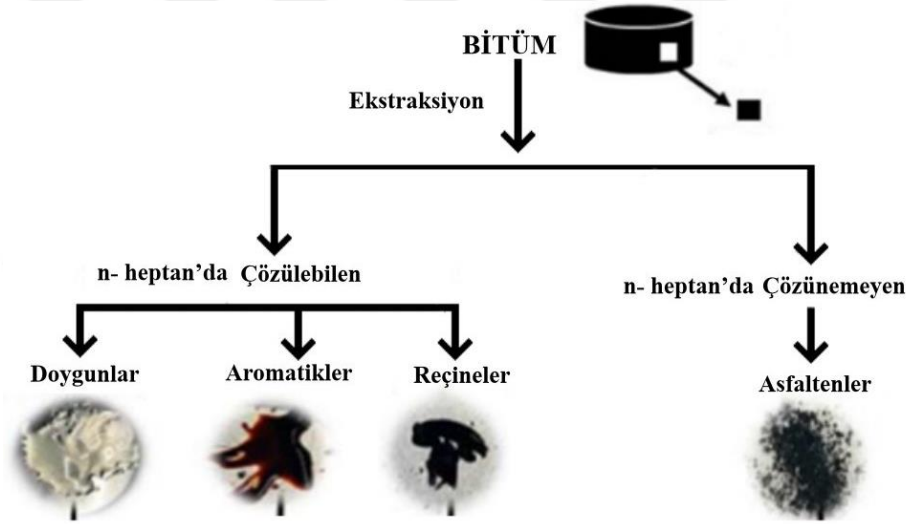
Şekil 1. Ham petrolün işlenmesi ve bitümün elde edilmesi (URL-3, 2023)

1.4.1. Bitümün Kimyasal Yapısı

Bitümün iç yapısının şekli, mevcut moleküler türlerinin kimyasal bileşimi ile belirlenebilmektedir. Bitümler çoğunlukla hidrokarbon moleküllerinden oluşmakla birlikte hidrokarbon yapıya benzer heterosiklik türleri ve oksijen, kükürt ve azot moleküllerini de bulunduran fonksiyonel grupların karışımıdır. Aynı zamanda, bitümün yapısında az miktarda inorganik tuzlar ve oksitler veya kalsiyum, vanadyum, nikel, demir ve magnezyum gibi metalleri de bulunabilmektedir. Bitümün kimyasal içeriği, malzemenin elde edildiği ham petrolün yerine, kaynağına ve imalat süresindeki değişime bağlı olarak değişmektedir. Yapılan analizlere göre genel olarak bitüm; % 82-88 karbon, % 8-11 hidrojen, % 0-1.5

oksijen, % 0-6 sülfür ve % 0-1 azot içermektedir (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi,, 2002; Malkoç, 2000).

Bitümün kimyasal yapısı oldukça karmaşık olduğundan tam bir kimyasal analizin yapılması zahmetli olmakta, analiz sonuçlarında çok veri ortaya çıkmakta ve reolojik anlamda korelasyonu zor olmaktadır. Genel olarak bitüm, asfaltenler ve maltenler diye iki kimyasal gruba ayrılmıştır. Maltenler de kendi aralarında doygunlar, aromatikler ve reçineler olmak üzere üç alt gruba bölünebilirler. Bitümü fraksiyonlarına ayırmak için farklı yöntemler kullanılmakla birlikte en yaygın olanı çözücü kullanarak (kromatografik yöntem) ayırmaktır. Bu yöntemle beraber bitüm, asfaltenler, doygunlar, aromatikler ve reçineler olmak üzere dört geniş bileşene ayrılabilir (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002; Çeloğlu, 2020). Bu dört grubun analiz şeması Şekil 2.'de verilmiştir.



Şekil 2. SARA ayrımının akış şeması (Wang ve diğerleri, 2022; J., Wang T., & F., 2019)

• Asfaltenler

Asfaltenler, karbon ve hidrojene ek olarak bir miktar sülfür, nitrojen ve oksijen atomları içeren n-heptan içerisinde çözünmeyen siyah ya da kahverengi amorf katı maddeler olup bitümün %5 ila %25'ini oluştururlar. Asfalten miktarı bitümün reolojik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Asfaltenin miktarındaki artış ile bağlayıcı, daha katı kıvam, daha yüksek yumuşama noktası ve viskozite özelliklerine sahip olmaktadır (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002; Yüknü, Öztürk., & Komut, 2020).

- Reçineler

Reçineler, n-heptan içerisinde çözünebilen, asfaltlenler gibi büyük ölçüde hidrojen ve karbondan oluşan ve az miktarda oksijen, kükürt ve azot atomları içeren maddelerdir. Koyu kahverengi renkte katı veya yarı katı halde olan reçineler, elektriksel yükü yükledürler ve bu elektriksel yük reçinelerin bağlayıcı içerisinde güçlü bir yapışkan olmalarını sağlamaktadır (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002; Yüknü, Öztürk., & Komut, 2020).

- Aromatikler

Bitüm içerisinde en düşük molekül ağırlığına sahip olan aromatikler, bitüm içerisinde dağılmış olan asfaltlenlerin yayılımları için gereken ortamın büyük bir kısmını teşkil etmektedir. Toplam bitümün %40-65'ini oluşturan aromatikler, koyu kahverengi renkte olan viskoz sıvılardır. Aromatikler, halkalı sistemlere sahip polar olmayan karbon zincirlerinden oluşmaktadırlar (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002; Yüknü, Öztürk., & Komut, 2020).

- Doygunlar

Doygunlar, düz ve zincir şeklinde alifatik hidrokarbonlardan oluşan, saman veya beyaz renkteki polar olmayan viskoz yağlardır. Ortalama molekül ağırlığı aromatiklere benzer olan doygular, bitümün %5-20'sini oluşturmaktadır. Kimyasal yapısında hem parafinik hem de naftanik yağ halkaları bulunmaktadır (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002; Yüknü, Öztürk., & Komut, 2020).

1.4.2. Bitümün Reolojisi

Bir maddenin akma ve deformasyonunu basınç ve zaman parametreleri içerisinde inceleyen bilim dalı reolojidir. Bitümün reolojisi ise, belirli sıcaklıkta malzemeye hem uygulanan yük hem de yükün uygulanma süresi dikkate alınarak kimyasal yapısındaki değişikliklerin incelenmesidir. Bitüm, uygulanan yüke, süresine ve o esnadaki sıcaklığa bağlı olarak viskoelastik davranış gösteren termoplastik bir malzemedir. Yine benzer şekilde, düşük sıcaklıklarda elastik davranış ve yüksek mukavemet, yüksek sıcaklıklarda ise viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler (Geçkil, 2008; Yılmaz, 2016; Sybilski, 1994; Kizirgil, 2013).

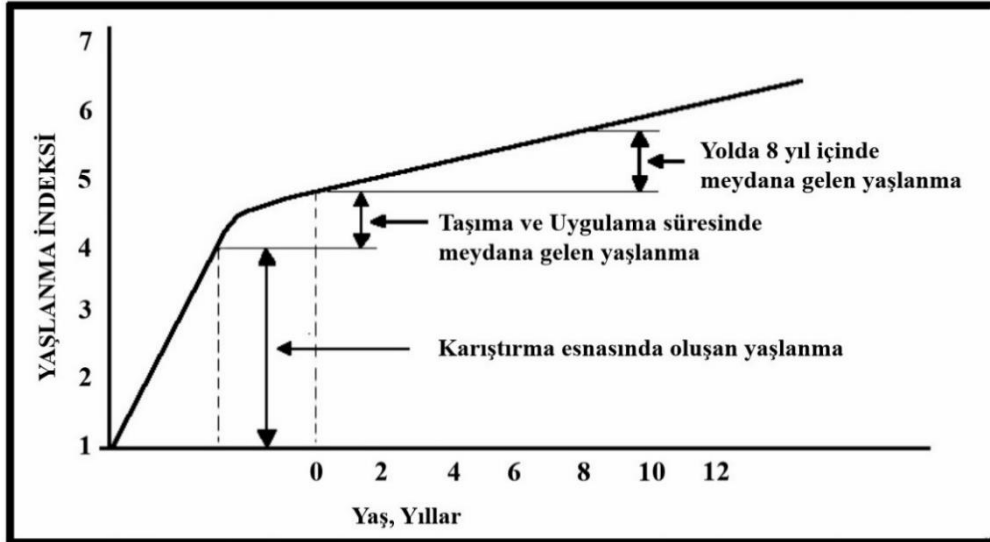
Sıcak havalarda, bitüm viskoz sıvılar gibi hareket eder ve akar, soğuma olsa da bitüm eski haline gelemez. Bu durum, bitümün yapısında plastik davranış olarak nitelendirilir ve

yüksek sıcaklıklarda düşük stabiliteden dolayı kaplama üzerinde tekerlek izi oluşur (Geçkil, 2008; Kizirgil, 2013).

Soğuk havalarda ise, bitüm elastik bir katı gibi hareket eder ve yükleme sonrası eski haline dönebilir. Ancak, soğuk iklim şartlarında kaplamaya kapasitesinden fazla yükleme yapılırsa, kaplama üzerinde çatlama veya kopmalar meydana gelebilir. Bu durumda, soğuk havalarda termal çatlaklar görülebilir (Geçkil, 2008; Kizirgil, 2013).

Hidrokarbonlardan oluşan bitüm, servis ömrü boyunca sıcaklık değişimlerinden, ultraviyole ışınlarından ve oksidasyondan etkilenmektedir. Bunun sonucunda, bitüm daha sert ve kırılgan yapıya dönüşür ve yaşlanma sertleşmesi süreci başlamış olur. Yaşlanma süresince bitümün kimyasal yapısında değişimler olmaktadır. Bu süreçte, bitümün yapısındaki asfalten ve reçinelerin yüzdelik oranları artarken, aromatiklerin yüzdelik oranı azalmaktadır (Geçkil, 2008; Çeloğlu, 2020).

Bitümde meydana gelen yaşlanma, kısa süreli ve uzun süreli yaşlanma olarak kabul edilmektedir. Kısa süreli olan, bitümün karıştırma, depolama, taşıma ve uygulama süresinde meydana gelen yaşlanmayı, uzun süreli ise, 8 yıllık hizmet süresinden sonra oluşan yaşlanmayı temsil etmektedir. Bitümün kısa ve uzun süreli yaşlanması Şekil 3'te görülmektedir (Whiteoak, 2004).



Şekil 3. Asfalt bağlayıcının yaşlanma süreci (Whiteoak, 2004)

1.5. Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Esnek kaplamalarda kullanılan asfalt bağlayıcıların sahip oldukları özelliklerin belirlenmesi amacıyla Karayolları Teknik Şartnamesinde bulunan geleneksel bağlayıcı deneyleri ve performansa dayalı asfalt karışım tasarım yöntemlerine yönelik Amerika Stratejik Karayolu Araştırma Programı (Strategic Highway Research Program, SHRP) tarafından geliştirilen superpave bağlayıcı deneyleri uygulanmaktadır.

- Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Geleneksel Deneyler
 - Penetrasyon deneyi
 - Yumuşama noktası deneyi
 - Parlama ve yanma noktası deneyi
 - Düktilite deneyi
 - Elastik geri dönme ve Kuvvet ölçümlü düktilite deneyi
 - Özgül ağırlık deneyi
 - Fraass kırılma noktası deneyi
 - Trikloretilende çözünürlük deneyi
 - Nicholson soyulma deneyi
 - İnce film halinde ısıtma deneyi (Thin Film Oven Test, TFOT)
- Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Superpave Deneyleri
 - Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT)
 - Basıncılı yaşlandırma kabini (Pressure Aging Vessel, PAV) deneyi
 - Dönel viskozimetre (Rotational Viscosimeter, RV) deneyi
 - Dinamik kayma reometresi (Dynamic Shear Rheometer, DSR) deneyi
 - Kiriş eğme reometresi (Bending Beam Rheometer, BBR) deneyi
 - Doğrudan Çekme (DTT) Deneyi

1.5.1. Geleneksel Bağlayıcı Deneyleri

1.5.1.1. Penetrasyon Deneyi

Penetrasyon, ASTM D5/D5M-13 standardına göre 100 g kütleli standart bir iğnenin asfalt bağlayıcıyı 5 saniye süreyle deldiği derinlik değeridir. Penetrasyon deneyi ile asfalt

bağlayıcının 25°C sıcaklıktaki kıvamı belirlenmektedir. Penetrasyon değerindeki bir azalma asfaltın kıvamını ve sertliğini artırırken, penetrasyon değerindeki bir artış ise asfaltın kıvamını azaltıp yumuşatır (Bektaş, Yalçın, Yamaç, & Ö., 2021). Penetrasyon cihazı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Penetrasyon cihazı

1.5.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi

Yumuşama noktası testi, asfalt bağlayıcının yüksek sıcaklık dayanımlarının belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. ASTM D36/D36M-14 standardına göre, piring halkalarda hazırlanan asfalt numuneler üzerine çelik bilyeler bırakılır, halka mekanizması su banyosuna yerleştirilir ve dakikada 5 °C artacak şekilde beher ısıtılır. Bilyelerin 25 mm aşağıdaki çelik tabakaya temas ettiği sıcaklık, asfalt numunesinin yumuşama noktasını verir. Yumuşama noktası değeri, asfaltın akmaya başladığı sıcaklığı temsil eder (Sultani, 2021). Şekil 5'te yumuşama noktası cihazı verilmiştir.



Şekil 5. Yumuşama noktası cihazı

Penetrasyon İndeksi (PI), bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa duyarlılığını belirlemek için yumuşama noktası ve standart penetrasyon testi sonuçları kullanılarak belirlenmektedir (Ullidtz, 1987). Penetrasyon indeksi, Denklem 1'de görüldüğü gibi verilir:

$$Penetration Index (PI) = \frac{1952 - 500 \log(Pen25) - 20SP}{50 \log(Pen25) - SP - 120} \quad (1)$$

Denklemde Pen25 değeri 25°C'deki asfalt penetrasyonunu, SP ise asfaltın yumuşama noktası sıcaklığını göstermektedir (Hunter, Self, & Read, 2015). PI değerinin sınırları -2 ile +2'dir. Sınır değerlerden daha küçük değerler asfaltın sıcaklık duyarlılığının artmasına, daha yüksek değerler ise asfaltın okside olmasına sebep olmaktadır (Whiteoak, 2004). PI değeri arttıkça ısıya duyarlılık azalır ve kalıcı deformasyona karşı direnç artar (Deng, Shi, Liu, Liu, & Wang, 2018; Kuloğlu, Yılmaz, & Kök, 2008; Sengoz & Isikyakar, 2008; Zhang, Wang, Wu, Wang, & Wang, 2009; Hadavand, 2010).

1.5.1.3. Parlama ve Yanma Noktası Deneyi

Yüksek sıcaklıklarda asfalt bağlayıcıların içindeki uçucu maddeler havaya karışı ve uçucular alev alarak parlamaya sebep olur. Asfalt bağlayıcıların ısıtılırken herhangi bir

tutuşma ve yanma riskini önlemek için her asfalt numunenin parlama ve yanma noktası değerleri belirlenmelidir. Asfalt bağlayıcının alev ile teması sırasında geçici olarak parladığı sıcaklık değeri bağlayıcının parlama noktası değerini verirken, tutuşup yanmaya başladığı sıcaklık değeri ise bağlayıcının yanma noktası değerini göstermektedir. ASTM D92-18 standardına göre, parlama noktası, her derecedeki bitümlü malzemeler için minimum 175 °C'dir (Orhan, 2005). Cleveland açık kap metodu ile numunenin ısıtılması sırasında yüzeyinde oluşan kıvılcımların oluştuğu sıcaklık ile bağlayıcının parlama noktası belirlenebilmektedir (Orhan, 2005; Yılmaz, 2016). Parlama noktası değeri asfaltın güvenli çalışma sıcaklığını belirlemektedir (Gökalp, Özinal, & Uz, 2018). Şekil 6'da parlama ve yanma noktası cihazı verilmiştir.



Şekil 6. Parlama ve yanma noktası cihazı

1.5.1.4. Düktilite Deneyi

Düktilite, belli bir sıcaklıkta asfalt bağlayıcının uzayabilme veya çekilebilme özelliğidir (Yılmaz, 2016). ASTM D113-17 standardına göre, 25 °C sıcaklıktaki su dolu düktilite cihazı içerisine asfalt numunesini yerleştirilip 5 cm/dk. hızla çekilir ve asfalt ipliğinin koptuğu ana kadar deney devam eder. İpin koptuğu an asfalt bağlayıcının cm cinsinden düktilite değerini verir. Cihazda 3 asfalt numunenin ölçümü alınır ve ortalaması alınarak bağlayıcının düktilite değeri elde edilmiş olur. Yüksek düktilite değeri, asfalt bağlayıcının iyi kohezyon ve elastikiyet özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir

(Geçkil, İnce, & Özpınar, Nanosilikanın Bitümün Kıvamı, Viskozitesi ve Mikroyapısına Etkileri, 2021).

1.5.1.5. Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deneyi ve Elastik Geri Dönme

Kuvvet ölçümlü düktilite deneyi, saf ve modifiye edilmiş asfalt bağlayıcıların çekme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılır. TS EN 13589 standardına göre, düktilite deneyine benzer şekilde numuneler hazırlanır ve 5 °C sıcaklıktaki su dolu cihazın içine yerleştirilir. Numunelere, 50.0 ± 2.5 mm/dk hızla 0.4 m uzamaya kadar çekme işlemi yapılır ancak uzama 0,4 m'ye erişemiyorsa sıcaklık 5 °C arttırılarak deney tekrarlanabilmektedir. Numune kopana veya istenilen uzama miktarına kadar deneye devam edilir. Kopma anındaki uzama miktarı hesaplandıktan sonra yük uzama eğrisi çizilir ve bu eğri sayesinde deformasyon enerjisi de hesaplanır (Orhan, 2005; URL-4, 2023). Düktilometrede üç numune aynı anda test edilebilmektedir. Üç numunenin düktilite değerlerinin ortalaması bağlayıcının düktilitesi olarak kabul edilmektedir. Şekil 7'de düktilite cihazı ve deney numuneleri görülmektedir.



Şekil 7. Düktilite cihazı ve deney için hazırlanan numuneler

Elastik geri dönme davranışı, saf ve modifiyeli bağlayıcıların maruz kaldığı yük kaldırılınca elastik davranışı sayesinde geri dönebilmesidir (Gedik, 2021). TS EN 13398 standardına göre, düktilite cihazında asfalt numuneler 25 °C sıcaklıkta ve 50 mm/dk hızla 200 mm uzama miktarına kadar uzatılır. Uzayan asfalt numuneleri tam orta noktadan kesilir ve 30 dk asfalt numunelerinin geri dönmesi için beklenir (Şekil 8). Kopan uçları arasındaki

mesafe mm cinsinden ölçülür ve elastik geri dönme oranı hesabında kullanılır. Elastik geri dönme yüzdesi aşağıdaki Formül 2 yardımıyla bulunur.

$$RE = d/L * 100 \quad (2)$$

Burada; RE= elastik geri dönme (%), d = Kopan uçlar arasındaki uzaklık (mm),
L = Toplam uzama uzunluğu (200 mm)'dur.



Şekil 8. Elastik geri dönme deneyinde kesilen bağlayıcı numuneleri

1.5.1.6. Özgül Ağırlık Deneyi

Asfalt bağlayıcıların özgül ağırlığı çoğunlukla kılcal tıpalı piknometre yöntemi ile belirlenmektedir. Bu yöntemde öncelikle kapağı ile piknometrenin darası tartılır (a). Sonrasında piknometre 25 °C’de bulunan damıtılmış su ile doldurulur ve tekrar tartılır (b). Asfalt numunelerin sıcaklığı 25 °C’ye getirilir ve boş piknometrenin dörtte üçü asfalt numunesi ile doldurulup tartılır (c). Son olarak da piknometrede kalan kısma su doldurulur ve tekrar tartım yapılır (d). Elde edilen tartım değerleri Formül 3’te yazılarak asfalt bağlayıcının özgül ağırlığı hesaplanır (Orhan, 2005).

$$d_{25/25} = \frac{c-a}{(b-a)-(d-c)} \quad (3)$$

1.5.1.7. Fraass Kırılma Noktası Deneyi

Fraass kırılma noktası, asfalt bağlayıcıların düşük sıcaklıklardaki (sıfırın altı) kırılma noktasının ölçülmesini sağlar (Orhan, 2005). TS EN 12593 ye göre, 0.40 g asfalt bağlayıcı çelik bir sac üzerine her tarafı eşit kalınlıkta olacak şekilde konulur ve sac, sabit hızla soğutulur. Üzerinde numune bulunan sac plaka cihaz içerisine yerleştirilir ve kuru buzlarla beraber istenilen düşük sıcaklıklar elde edilince numune belirli aralıklarla esnetilir. Numune yüzeyinde ilk çatlamanın başladığı sıcaklık, bağlayıcının Fraass kırılma noktası olarak belirlenir. Deney, özellikle soğuk bölgelerde kullanılacak asfalt bağlayıcının tipini belirlemek için uygulanmaktadır. Şekil 9'da Fraass kırılma noktası cihazı ve deney sonrası kırılan numune gösterilmiştir.



Şekil 9. Fraass kırılma noktası cihazı ve deney sonrası kırılan numune

1.5.1.8. Trikloroetilende Çözünürlük Deneyi

Çözünürlük deneyi, asfalt bağlayıcının organik çözücü (trikloroetilen, karbon disülfid, karbon tetra klorit, toluen vb. çözücüler) içerisindeki yüzdesinin belirlenmesi amacıyla yapılır. Deney, bağlayıcı belirli bir miktar çözücü içerisinde çözülür ve daha sonra karışım süzgeç kâğıdı yardımıyla süzülür. Süzgeç kâğıdı üzerinde kalan maddeler tartılır ve çözücüde ne kadar asfalt bağlayıcının çözüldüğü yüzdelik olarak hesaplanır. Asfalt bağlayıcıların trikloroetilende en az % 99 çözülmesi beklenir (Orhan, 2005; Yılmaz, 2016; Yüknü, Öztürk., & Komut, 2020).

1.5.1.9. Nicholson Soyulma Deneyi

Nicholson soyulma deneyiyle, bağlayıcının agregadan ayrılmasına karşı direnç ile su ve sıcaklık etkisiyle agrega ve bağlayıcı arasındaki adezyon ve belirlenir. Deney için, kırılmış agrega numunesinin 9.5-4.75 mm veya 4.75-3.35 mm'lik elekler arasında kalan kısmından 200 gr alınır. Alınan numune saf su ile birkaç defa yıkanır ve 110°C'lik etüvde kurutulur. 100 gr yıkanıp kurutulmuş agrega 1 saat 140°C-150°C'lik etüvde ısıtılır. Etüvde ısıtılmış saf bağlayıcıdan da 5 gr alınarak agrega tanelerinin üzeri homojen bitüm filmiyle kaplanıncaya kadar cam çubuk yardımıyla karıştırılır. Karışım iki cam petri kabına boşaltılır ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Su dolu beher içerisine yerleştirilen petri kapları kür işlemine tabi tutulmak üzere 24 saat 60 °C'lik etüvde bekletilir. Belirlenen süre sonunda beher içerisinden numuneler çıkarılır ve ışık altında numunelerin üst kısımları incelenir. Numunelerin soyulmamış yüzeylerinin, karışımdaki bütün yüzeye oranı soyulmaya karşı direnci vermektedir. Soyulma miktarı kullanılan agrega cinsine ve bağlayıcı tipine bağlıdır. Karayolları teknik şartnamesine göre deney sonunda numunelerin en az %50'sinin soyulmaması gerekmektedir (Yılmaz, 2016; Gürer, Korkmaz, Ş., & Rahmany, 2019; Gürer & Karaşahin, Sathi kaplama agregalarının adezyon özelliklerinin araştırılması, 2014).

1.5.1.10. İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (Thin Film Oven Test, TFOT)

İnce film halinde ısıtma deneyi (TFOT) ile Asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklıkta buharlaşma ve yaşlanma karakteristiklerinin belirlenir. Deneyde, 50 ml. bağlayıcı 140 mm çapında düz silindir bir kaba konulur ve 3,2 mm. kalınlığında bir tabakanın oluşması sağlanır. Numuneler, etüv içerisinde 5-6 devir/dk. hızda dönen askıya yerleştirilerek 163 °C'de 5 saat boyunca bekletilir. Etüv içerisinde yaşlandırılan numuneler çıkarılarak tartılır ve yaşlandırma sonrasındaki ağırlık kayıpları belirlenir (Yılmaz, 2016; Ahmedzade, Yılmaz, & Yılmaz, Bitümlü Bağlayıcıların Yaşlandırılmasında Kullanılan Deney Yöntemlerinin Karşılaştırılması, 2007). Ancak, TFOT deneyi, bazı modifiye asfalt bağlayıcılarda deney sırasında yaşlanmayı engelleyen bir yüzey kaplaması olduğu için arazi koşullarındaki oksidasyonu tam olarak temsil edememektedir (McGennis, Shuler, & Bahia, 1994).

1.5.2. Reolojik Bağlayıcı Deneyleri

Asfalt bağlayıcıların sınıflandırılmasında uygulanan geleneksel deneylerin yetersiz olduğunun anlaşılması üzerine, Stratejik Yol Araştırmaları Programı (Strategic Highway Research Program-SHRP) tarafından Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement) olarak isimlendirilen “Yüksek performanslı kaplama” yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, bağlayıcıların kullanılacağı iklime göre sıcaklık değerleri esas alınmakta ve her bağlayıcı için performans sınıfı belirlenmektedir (Güngör, 2009; Kaya & Topal, 2016; Namli & Kuloğlu, 2007).

Superpave bağlayıcı deneyleri ile üstyapının maruz kaldığı düşük, orta ve yüksek sıcaklıktaki bozulmalar analiz edilmekte ve sıcak karışım imalatından servis ömrü boyunca oluşabilecek kısa ve uzun süreli yaşlanma da performans deneyleri ile test edilmektedir (Baykara, 2021).

Superpave şartnamesinde, yüksek sıcaklıklarda meydana gelen tekerlek izi için uygulanan deneyler, saf (yaşlandırılmamış) ve RTFOT ile kısa dönemli yaşlandırılmış bağlayıcılara yapılırken, yorulma ve düşük ısı çatlağı için uygulanan deneyler PAV ile uzun dönemli yaşlandırılmış bağlayıcılara yapılmaktadır. Aynı zamanda, asfalt bağlayıcının taşıma sırasında pompalanabilirliğinin ve asfalt karışımın üretimi sırasında işlenebilirliğinin belirlenmesi için dönel viskozite deneyi de uygulanmaktadır (Güngör, 2009). Superpave bağlayıcı deneyleri, kullanım amaçları ve deneylerin uygulandığı bağlayıcı türleri Tablo 1’de özet şeklinde verilmiştir.

Tablo 1. Superpave bağlayıcı deneyleri ve deneylerle ilgili bilgiler (Al-maamori & H., 2014)

Deneyin adı	Deneyin amacı	Deneyde kullanılan bağlayıcı türü
Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT)	Sıcak asfalt karışımların üretim ve serim sırasındaki kısa süreli yaşlanmasını laboratuvar ortamında simüle etmek	Yaşlanmamış bağlayıcı
Basınçlı Yaşlandırma kabı (PAV) deneyi	Sıcak asfalt karışımların servis ömrünce meydana gelen uzun süreli yaşlanmayı laboratuvar ortamında simüle etmek	RTFOT kalıntısı
Dönel viskozimetre (RV) deneyi	Asfalt bağlayıcının yüksek sıcaklıklardaki viskozitesini ve sıcak karışımın işlenebilirlik özelliklerini belirlemek	Yaşlanmamış bağlayıcı

Tablo 1'in devamı

Deneyin adı	Deneyin amacı	Deneyde kullanılan bağlayıcı türü
Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi	Yüksek ve orta servis sıcaklıklarında bağlayıcının tekerlek izi ve yorulmaya karşı dayanımları ile yüksek sıcaklık bağlayıcı performans sınıfını belirlemek	Yaşlanmamış bağlayıcı RTFOT kalıntısı PAV kalıntısı
Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi	Düşük servis sıcaklıklarında bağlayıcının termal çatlaklara karşı dayanımlarını belirlemek	PAV kalıntısı
Doğrudan çekme deneyi (DTT)	Düşük servis sıcaklıklarında bağlayıcının termal çatlaklara karşı dayanımını belirlemek	PAV kalıntısı

1.5.2.1. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT)

Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) ile, sıcak asfalt karışımların üretim ve yapım aşaması sırasında meydana gelen kısa süreli yaşlanması laboratuvar ortamında simüle edilir. Deney, EN 12607-1, ASTM D 2872 veya AASHTO T240 şartnamelerine göre yapılabilir.

Deneyde, 8 adet özel cam şişeler kullanılır ve her birinin içerisi 35 gram asfalt bağlayıcı ile doldurulur. Asfalt bağlayıcı ile dolu şişeler 163 °C sıcaklıktaki etüve yatay olarak yerleştirilir. Şişeler etüv içinde 75 (EN 12607-1) veya 85 dakika (ASTM D2872, AASHTO T240) boyunca döndürülür. Aynı zamanda, numuneler dönme sırasında etüv içinde bulunan bir hava üfleyiciden 4000 ml/dk olacak şekilde hava akışına maruz kalır. Sıcaklık ve dönmenin etkisiyle asfalt bağlayıcı şişelerin bütün yüzeylerini kaplayarak ince bir film tabakası oluşturur. Bu film tabakası üzerinde ısı ve havanın birleşik etkisi kısa süreli yaşlanmayı arazi koşullarında daha iyi temsil etmektedir (Zaniewski & Pumphrey, 2004; Geçkil, Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, 2008; Southern, 2015; Yılmaz, 2016). Şekil 10'da dönel ince film halinde ısıtma deneyi ve aşamaları gösterilmiştir. Deney sırasında, bağlayıcı numunesi içindeki daha hafif maddeler uçabilir veya bağlayıcının atmosferik oksijen ile reaksiyona girerek kütlede artış meydana gelebilir. Bu sebeple, deney sonrasında 2 şişedeki asfalt bağlayıcı miktarları ölçülerek kütle kayıpları hesaplanır (Southern, 2015). Diğer şişelerde olan asfalt numuneleri de sonraki superpave deneylerinde kullanılmak üzere saklanır. Asfalt bağlayıcıdaki kütle kaybı Denklem 4'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = \frac{(M1-M2)}{M1 \cdot 100} \quad (4)$$

Burada; M1= İlk Kütle, M2=Son kütle'dir.



Şekil 10. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi ve aşamaları

1.5.2.2. Basınçlı Yaşlandırma Kabini (Pressure Aging Vessel, PAV) deneyi

Asfalt bağlayıcıların orta ve düşük sıcaklıklardaki yorulma ve termal çatlaklara karşı dayanımın belirlenebilmesi amacıyla basınçlı yaşlandırma deneyi yapılmaktadır. Deneyde, kaplamanın servis ömrü (7-10 yıl) boyunca maruz kalacağı oksidasyon nedeniyle yaşlanması, ısı ve basınca maruz bırakılarak simüle edilmektedir. Deneyde RTFOT ile yaşlandırılmış asfalt numuneleri kullanılmaktadır.

AASHTO PP1 standardına göre paslanmaz silindirik numune kaplarına 50 gram asfalt bağlayıcı konulur ve deney 20 saat süreyle belirli bir sıcaklıkta 2.1 MPa (305 psi) basınç altında gerçekleşir. Deney sıcaklığı asfalt bağlayıcının sınıfına göre 90-100 ve 100 °C olacak

şekilde değişkenlik gösterebilir (Şekil 11). Deney sonunda, yüksek sıcaklık ve basınç nedeniyle numuneler üzerinde hava kabarcıkları oluşur ve bu hava kabarcıkları numunelerin, gaz alma cihazında 30 dakika 170°C sıcaklıkta kalmasıyla kaybolur (Şekil 11). Gaz alma işleminin bitmesiyle numuneler deneylerde kullanılmak üzere hazır hale gelir.



Şekil 11. PAV ve Gaz alma cihazları

1.5.2.3. Dönel Viskozimetre (Rotational Viscosimeter, RV) deneyi

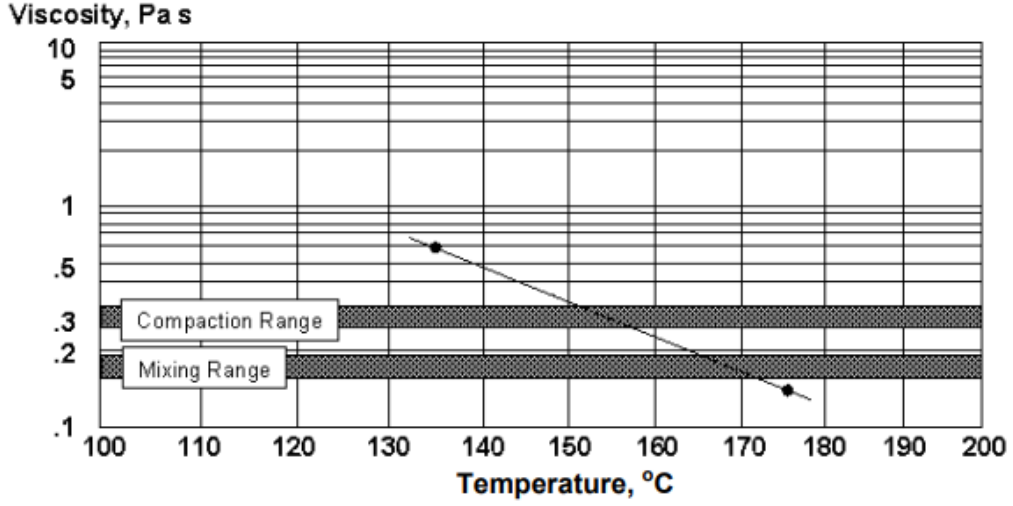
Asfalt bağlayıcıların sıcak karışım (plent) tesisinde işlenebilir olması için yüksek sıcaklıklarda yeterince akışkanlığa sahip olması gerekmektedir. Dönel viskozite deneyi ile asfalt bağlayıcıların hangi derecede pompalanabilirlik ve işlenebilirliğe sahip olduğunun tespiti yapılarak bağlayıcıların akış karakteristikleri belirlenmektedir. Viskozite değeri, sabit bir sıcaklıkta silindirik bir milin asfalt bağlayıcı numune içinde kendi etrafında sabit bir dönüş hızını korumak için gereken tork değerinin ölçülmesiyle belirlenir. AASHTO T 316'ya göre 135°C'de ve 120°C'de (genellikle ılık karışım asfalt için uygulanan karıştırma sıcaklığı) her bir asfalt bağlayıcının viskozitesinin belirlenmesi için Brookfield dönel viskozimetre kullanılır. Deney, yaşlandırılmamış saf veya modifiyeli bağlayıcılara uygulanmakta olup 135°C'de bağlayıcının viskozite değerinin 3,0 Pa.s'yi (3000 cP) aşmaması beklenir. Deneyde, akışkan haldeki 11 gr asfalt bağlayıcı numune tüpüne dökülür ve tüp cihaza yerleştirilir. Ölçüm için cihaza mil (spindle) takılarak tüpün içine dengeli bir

şekilde daldırılır ve istenilen sıcaklığa erişmesi numune cihaz içinde belli bir süre (15-30 dk.) bekletilir. Milin dönme hızı 20 rpm.'dir. Birbirinden farklı boyutlara sahip miller (No.21, No.27, No.29) bağlayıcı sınıfına göre seçilmektedir. Deney sırasında cihazın ekranından üç viskozite değeri okuması yapılır ve bu üç değerin ortalaması alınarak bağlayıcının viskozite değeri belirlenmiş olur (McGennis, Shuler, & Bahia, 1994; Zaniwski & Pumphrey, 2004; Yılmaz, 2016). Dönel viskozimetre cihazı Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12. Dönel viskozimetre cihazı

Sıcak asfalt karışımların tasarımında kullanılacak ideal karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları viskozite değerleri kullanılarak logaritmik viskozite-sıcaklık grafiklerinden belirlenebilir. Bu amaçla dönel viskozimetre deneyi, 135°C ve 165°C sıcaklık değerlerinde uygulanır. Şekil 13'te tipik örneği verilen grafikteki gibi belirlenen sıcaklıklardaki viskozite değerleri grafik üzerine işaretlenir ve bu iki nokta düz bir çizgiyle birleştirilir. Buradan, karıştırma sıcaklığını hesaplamak için 0.17 ± 0.02 Pa.s (170 ± 20 cP) ve sıkıştırma sıcaklığını hesaplamak için 0.280 ± 0.030 Pa.s (280 ± 30 cP) kullanarak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları kolaylıkla bulunabilir (McGennis, Shuler, & Bahia, 1994; Zaniwski & Pumphrey, 2004).



Şekil 13. Tipik viskozite-sıcaklık grafiği (Zaniewski & Pumphrey, 2004)

Asfalt bağlayıcılar genellikle termal ve ultraviyole oksidasyona maruz kaldığı için performans açısından bağlayıcıların sıcaklığa karşı duyarlılığının düşük olması istenmektedir. Sıcaklık duyarlılığı, bağlayıcı özelliklerinin sıcaklıkla ne kadar hızlı değiştiğini gösteren bir indeks olarak tanımlanmaktadır. Asfalt bağlayıcıların 135°C ve 165°C sıcaklık değerlerindeki viskozite değerleri ile viskozite-sıcaklık duyarlılığı parametresi hesaplanabilmektedir. Viskozite-sıcaklık duyarlılığı (VTS) parametresi, Denklem 5'teki hesaplanmaktadır (Mirzaiyan, Ameri, Amini, Sabouri, & Norouzi, 2019; Amini, Ziari, Saadatjoo, Hashemifar., & Goli, 2021; Yeşilçiçek, Oruç, & Bozdemir, 2022).

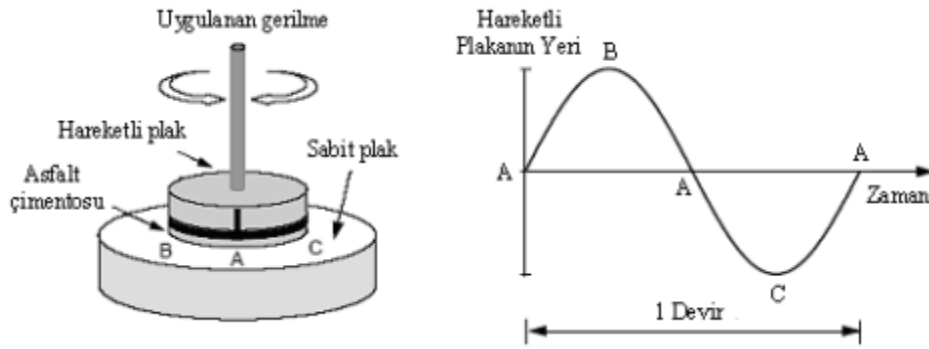
$$VTS = \frac{\log \log(V1) - \log \log(V2)}{\log(T2) - \log(T1)} \quad (5)$$

Burada; V1: 135°C'deki viskozite değeri (cP), V2: 165°C'deki viskozite değeri (cP), T2: V2'deki sıcaklık değeri (Kelvin), T1: V1'deki sıcaklık değeri (Kelvin)'dir.

VTS değeri, bağlayıcının sıcaklık duyarlılığı ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Düşük VTS değerlerinde, bağlayıcının sıcaklığa karşı duyarlılığı düşer ve bağlayıcı sıcaklık değişimlerine karşı daha dirençli hale (Mirzaiyan, Ameri, Amini, Sabouri, & Norouzi, 2019; Amini, Ziari, Saadatjoo, Hashemifar, & Goli, 2021; Yeşilçiçek, Oruç, & Bozdemir, 2022).

1.5.2.4. Dinamik Kayma Reometresi (Dynamic Shear Rheometer, DSR) deneyi

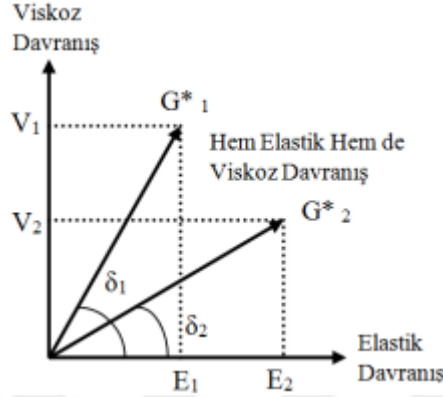
Dinamik kesme reometresi deneyi belli bir sıcaklık ve kesme gerilmesi altında asfalt bağlayıcının viskoz ve elastik davranışını karakterize etmek için yapılır. DSR deneyi AASHTO T 315 standardına göre yapılmaktadır. Deney ile asfalt bağlayıcının tekerlek izi ve yorulmaya karşı dirençleri belirlenir. Asfalt bağlayıcıların performans sınıfının ve tekerlek izine karşı dayanımının belirlenmesi amacıyla yaşlandırılmamış (saf) ve RTFOT sonrası kısa süreli yaşlandırılmış numuneler kullanılırken, bağlayıcıların yorulmaya karşı direncinin belirlenmesinde ise RTFOT+PAV sonrası uzun süreli yaşlandırılmış numuneler kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılacak asfalt numunelerinin boyutları farklı olup tekerlek izi dayanımı için 25 mm çapında, 1mm yüksekliğinde ve yorulma dayanımı için 8 mm çapında, 2 mm yüksekliğinde olmalıdır. Numuneler iki dairesel plaka arasında yerleştirilir ve alt tabaka sabitlenirken deney süresince üst plaka ileri geri salınım hareketi yapar (Şekil 14). Numuneye uygulanan salınımlı kesme kuvvetinin frekansı 10 rad/sn (1,59 Hz)'dir. Bu frekans değeri, kaplamada 100 km/saat trafik hızına eşdeğer olarak kabul edilmektedir bulunabilir (McGennis, Shuler, & Bahia, 1994; Zaniwski & Pumphrey, 2004).



Şekil 14. DSR cihazı salınım hareketi bulunabilir (McGennis, Shuler, & Bahia, 1994; Zaniwski & Pumphrey, 2004; Geçkil, 2008)

Deneyde belirlenen sıcaklık değerlerine göre numunenin kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) belirlenerek bağlayıcının reolojik davranışı karakterize edilir. Kompleks kayma modülü (G^*) bağlayıcının tekerrür eden kesme gerilmelerine maruz bırakılmasıyla deformasyona karşı gösterdiği direnç kabiliyetidir. Faz açısı (δ) ise uygulanan kesme gerilmesi ile meydana gelen deformasyon arasındaki gecikme süresi olup viskoz ve elastik deformasyonun bağıl miktarlarının göstergesidir. Kompleks kayma modülü ve faz açısı

değerleri sıcaklık ve yükleme hızına göre değişkenlik göstermektedir. Faz açısı değeri tamamen elastik malzemeler için 0'a, tamamen viskoz malzemeler için 90°'ye karşılık gelir (Şekil 15). Dolayısıyla daha yüksek faz açısının daha viskoz malzemeyi doğruladığını söylemek mümkündür (Airey, 2011).



Şekil 15. Asfalt bağlayıcının viskoelastik davranışı (Tunç, 2007)

DSR deneyi ile yüksek sıcaklıklarda meydana gelen tekerlek izi parametresi $G^*/\sin\delta$ değeri ve orta sıcaklıklarda meydana gelen yorulma direnci parametresi $G^* \cdot \sin(\delta)$ elde edilir. Tekerlek izi parametresinin asfalt bağlayıcıya uygulanan sıcaklıkta yaşlanmamış bağlayıcılar için minimum 1 kPa ve RTFOT ile kısa süreli yaşlandırılmış bağlayıcılar için ise minimum 2.2 kPa olması gerekmektedir. Yorulma direnci parametresinin ise RTFOT+PAV ile uzun süreli yaşlandırılmış bağlayıcılarda maksimum 5000 kPa sağlaması beklenmektedir. Superpave şartnamesine göre, $G^*/\sin\delta$ değerinin minimum 1 kPa'ı sağladığı sıcaklık asfalt bağlayıcının performans sınıfının belirlenmesinde kullanılmaktadır. $G^* \cdot \sin(\delta)$ değerinin yüksek olması asfalt bağlayıcının yorulma çatlağı potansiyelini göstermektedir (Yılmaz M., Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, 2011; (Oruç, Yılmaz, & Sancak, Effect of Boron-Containing Additives on Rheological Properties of Asphalt Binder, 2015; Yılmaz B., 2016).

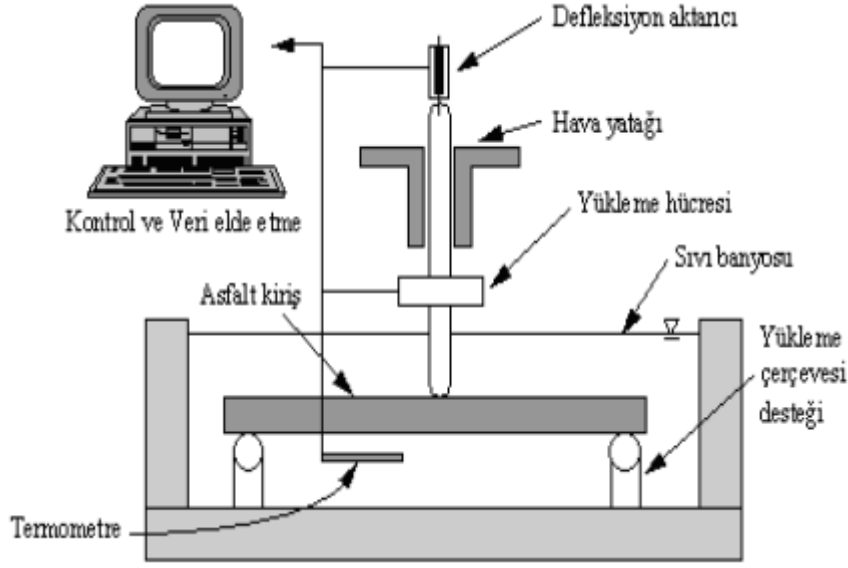
1.5.2.5. Kiriş Eğme Reometresi (Bending Beam Rheometer, BBR) deneyi

Termoplastik bir malzeme olan asfalt bağlayıcı, soğuk iklimlerde rijit özellik göstermekte ve bu rijit davranıştan dolayı kaplama üzerinde termal çatlaklar meydana gelmektedir. BBR deneyi ile belirli bir sıcaklıkta sabit yük altında düşük sıcaklıklarda bağlayıcının defleksiyon miktarı ve sünme karakteristiği belirlenir. Bu deney için RTFOT+PAV deneyinden elde edilen uzun süreli yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. BBR deney aleti Şekil 16'da görülmektedir.



Şekil 16. BBR deney aleti

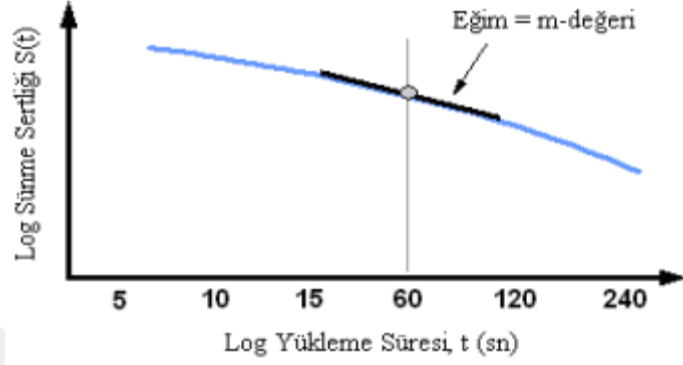
AASHTO T313 standardına göre, BBR deneyinde standart ölçülerdeki (12.5x25x6.25 mm) kiriş şeklinde bulunan asfalt çubuklar hazırlanır ve etilen glikol, metanol ve sudan oluşan sıvının bulunduğu BBR cihazının içine yerleştirilir. Asfalt çubuğun orta noktasından sabit 100 gr tekil yük (980 ± 5 mN) 240 saniye boyunca uygulanır ve kirişte meydana gelen defleksiyon ölçülür. Bu süre boyunca asfalt kirişin defleksiyonu Şekil 17'deki gibi kaydedilir.



Şekil 17. BBR cihazının şematik görünüşü (Kennedy ve diğerleri, 1994)

Deney sırasındaki yükleme, düşük sıcaklıklarda asfalt kaplamalarda meydana gelen termal gerilmeleri temsil etmektedir. Deneyde defleksiyon değerinin ölçülmesiyle bağlayıcının sünme sertliği ve sünme değeri hesaplanır. Sünme sertliği (S), asfalt bağlayıcının sünme gerilmelerine karşı gösterdiği dirençken, sünme oranı (m değeri) ise yükün yükleme süresince asfalt bağlayıcının sertliğindeki değişimdir. Düşük kaplama sıcaklığındaki sünme sertliğine iki saatlik yükleme sonunda ulaşılmasına rağmen, SHRP araştırmacıları, deney sıcaklığının 10°C düşürülmesi ile 60 saniye sonra aynı sünme sertliği sonucun elde edilebileceğini ve deney sayesinde çok kısa zamanda istenilen bilgiye ulaşılabileceğini belirtmişlerdir (Şekil 18). Deneyde, farklı yükleme zamanlarındaki (8, 15, 30, 60, 120 ve 240 sn.) sertlik değeri ölçülerek elde edilen sertlik-zaman eğrisinde 60. sn'deki teğetin eğimi sünme oranı (m değeri) olarak alınır. Düşük sıcaklıklarda meydana gelen termal çatlakların oluşumun azalması için düşük sünme sertliği ve yüksek sünme oranı istenmektedir. Çünkü, sünme sertliği arttıkça bağlayıcı sertleşecek ve gevrek hareket edip çatlama eğilimde olacaktır. Aynı şekilde sünme oranı düştükçe de bağlayıcının sertliği artacak ve kaplama üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleriyle beraber termal çatlaklara karşı daha hassas olacaktır. Düşük sıcaklıkta çatlamayı en aza indirmek için maksimum 300 MPa sertlik ve minimum m değeri 0,300 gereklidir. Bu kriterlerin her ikisi de karşılanırsa, ek testlere gerek yoktur. Maksimum sertlik 300 ve 600 MPa arasındaysa ve m değeri 0,300'den büyükse, o derecedeki asfalt çimentosu için PG spesifikasyonlarına uygunluğu kontrol etmek için doğrudan çekme testi yapılabilir (McGennis, Shuler, & Bahia, 1994;

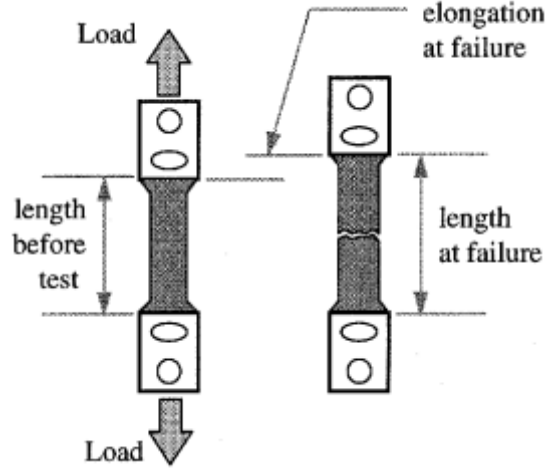
Kennedy, ve diğerleri, 1994; Geçkil, Alataş, & Ahmedzade, Superpave Sisteminde Bölge Meteorolojik Hava Verileri Kullanılarak Performans Dereceli (PG) bağlayıcı sınıfı seçimi, 2011).



Şekil 18. Sünme oranının grafikte belirlenmesi

1.5.2.6. Doğrudan Çekme Deneyi (Direct Tension Tester, DDT)

Doğrudan çekme deneyi, asfalt bağlayıcıların düşük sıcaklıklardaki davranışının belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Deney, asfalt bağlayıcının kırılma davranış sergilediği sıcaklık aralığı olan 0° ila -36° C arasındaki düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Bu deney için RTFOT+PAV deneyinden elde edilen uzun süreli yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. Doğrudan çekme deneyinde, küçük bir "köpek kemiği" şeklindeki asfalt bağlayıcı numunesi, kırılana kadar sabit, yavaş bir hızda çekilir (Şekil 19). Kopma anındaki uzama miktarı, bağlayıcının düşük test sıcaklığında kırılma mı yoksa sünek mi davranacağını bir göstergesi olan kopma anındaki gerinmeyi hesaplamak için kullanılır. Numune kırılmadan önce meydana gelen gerinim miktarı kaydedilir ve spesifikasyonda izin verilen yüzde 1,0 minimum değerle karşılaştırılır.



Şekil 19. Doğrudan Çekme Deneyi şeması

Bağlayıcıların düşük sıcaklıklardaki davranışı BBR deneyiyle belirlenmektedir. Ancak, BBR ile ölçülen sünme sertliği, bazı asfalt bağlayıcıların kırılana kadar esneme yeteneğini tam olarak karakterize etmek için yeterli değildir. Örneğin, bazı bağlayıcılar yüksek sünme sertliği göstermesine rağmen diğer bağlayıcılarla kıyaslandığında kırılmadan önce daha fazla esneyebilir. Bu bağlamda, deney, BBR deneyinden elde edilen sünme sertlik değerleri 300 ve 600 MPa arasında olan bağlayıcılara uygulanmaktadır (McGennis, Shuler, & Bahia, 1994).

1.5.2.7. Depolama Stabilitesi Deneyi

Asfalt bağlayıcının modifikasyonu sırasında bağlayıcı ile katkı arasında kimyasal veya fiziksel bağ oluşmaktadır. Özellikle polimer modifiyeli asfalt bağlayıcılarda fiziksel bağ oluşmaktadır. Bu bağ, depolama, pompalama ve yapım sürecinde zayıflayabilmekte ve bağlayıcı içinde faz ayrımlarına sebep olmaktadır. Modifiye asfalt bağlayıcıların gelişmiş reolojik özelliklerine rağmen depolama stabiliteleri zayıftır. Asfalt bağlayıcıların depolamaya karşı dayanımlarının belirlenmesi amacıyla TS EN 13399 standardına göre, depolama stabilitesi deneyi yapılmaktadır (Han, Tian, Ding, Shu., & Ni, 2022).

Deneyde kullanılan numune kabı, ince cilasız alüminyumdan yapılmış, minimum 160 mm boyunda 25 ile 40 mm çapında ve bir tarafından kapalı bir tüptür. Modifiye asfalt bağlayıcılar, tüpün içerisine 100-120 mm yüksekliğinde olacak şekilde konulur ve tüpün kapağı kapatılır. Tüpler, $180 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde 3 gün boyunca bekletilir. Tüpler

etüvden çıkarılarak ortam sıcaklığına gelene kadar beklenir ve sonrasında numuneler alüminyum kaptan çıkarılır. Silindirik numune yatay pozisyonda üç eşit parçaya bölünür ve kesilen alt ve üst parçalar deney için ayrılır. Asfalt bağlayıcıların depolamam stabilitesinin belirlenmesi yönteminde, alt ve üst numunelerin yumuşama noktası değerlerinin karşılaştırılıp değerlendirilmesi yapılır. Ayrıca, alt ve üst numunelere penetrasyon, dönel viskozimetre ve DSR deneyleri de uygulanabilmektedir (EN-13399, 2018; Han, Tian, Ding, Shu, & Ni, 2022)

1.5.2.8. Çoklu Gerilim Sünme-Geri Kurtarma Deneyi (Multi Stress Creep Recovery, MSCR)

AASHTO T350 ve AASHTO M332 standartları ile tanımlanmış çoklu gerilim sünme geri kurtarma deneyi, asfalt bağlayıcının tekerlek izi deformasyon potansiyelinin belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Yapılan hızlandırılmış yol testlerinden, MSCR deneyindeki J_{nr} parametresinin, standart Superpave deneyindeki $G^*/\sin \delta$ parametresine göre gerçek tekerlek izi değerleriyle daha iyi bir korelasyon sağladığı tespit edilmiştir. Modifiyeli ve saf bağlayıcıların tekerlek izi potansiyeli, belirlenen sıcaklıktaki trafik hacmine göre değişkenlik göstermektedir. MSCR deneyi, 20 döngü 0,1 kPa (ilk 10 döngü numuneyi şartlandırmak içindir ve herhangi bir veri toplanmaz), 10 döngü 3,2 kPa gerilme uygulanarak yapılmaktadır. Her iki gerilme seviyesinde de kayma gerilmesi 1 saniye uygulanmakta ve kalan 9 saniye boyunca şekil değiştirmelerin geri dönmesine izin verilmektedir. Deneyde, asfalt bağlayıcının lineer viskoelastik ve lineer olmayan viskoelastik bölgedeki davranışını karakterize etmek için ikli farklı gerilim seviyesi uygulanmaktadır. 0,1 kPa gerilim seviyesi, bir bağlayıcının davranışının lineer bölgesi içindedir, 3,2 kPa gerilim seviyesi ise lineer olmayan viskoelastik bölgededir (URL-5, 2023; URL-6, 2023).

MSCR testinde AASHTO M332'ye göre iki parametre elde edilmektedir. Bunlar, yüzde geri dönme (R) ve kalıcı sünme uyumu (J_{nr}) değerleridir. Asfalt bağlayıcılar için ortalama R değerleri sırasıyla 0.1 kPa (R0.1) ve 3.2(R3.2) kPa kayma gerilmeleri seviyesinde Denklem 6 ve 7'e göre hesaplanmaktadır (AASHTO M332, 2015).

$$R_{0.1} = \frac{\sum_{N=1}^{20} [\varepsilon_r(0.1, N)]}{10} \quad (6)$$

$$R_{3.2} = \frac{\sum_{N=1}^{10} [\varepsilon_r(3.2, N)]}{10} \quad (7)$$

Burada;

$\varepsilon_r(0.1, N)$: N döngü sayısında 0.1 gerilme seviyesindeki yüzde geri dönme

$\varepsilon_r(3.2, N)$: N döngü sayısında 3.2 kPa gerilme seviyesindeki yüzde geri dönme

N: Her bir gerilme seviyesindeki döngü sayısını ifade etmektedir.

AASHTO M332 standardında yüzde geri dönme (R) parametresi bağlayıcı sınıflandırılmasında kullanılmamakta ama polimer modifikasyonunun etkinliği ve elastik davranış standart olarak verilen minimum R değerleri ile değerlendirilmektedir (Tablo 2) (Behnood & Olek, 2017).

Tablo 2. Ölçülen Jnr değerleri için Minimum % R

Jnr @ 3.2 kPa	Mnimum % Geri Dönme
2.0-1.01	% 30
1.0-0.51	%35
0.50-0.251	%45
0.25-0.125	% 50

Asfalt bağlayıcıların sınıflandırmasında, (a) belirli bir trafik seviyesi için 3.2 kPa’da kalıcı sünme uyumu değerinin ortalaması (b) maksimum değeri %75 olan 0.1 kPa ile 3.2 kPa gerilmesindeki kalıcı sünme uyumu arasındaki fark (Jnr_{diff}) olarak tanımlanmaktadır. Standartta ele alınan çeşitli trafik yükü kategorileri normal (S), ağır (H), çok ağır (V) ve çok ağır (E) olarak belirlenmiştir (Çeloğlu, 2020). 0.1 kPa ($Jnr_{0.1}$) ve 3.2 kPa ($Jnr_{3.2}$) için kalıcı sünme uyumu değerlerinin hesaplanması Denklem 8 ve 9’da, Jnr_{diff} değerinin hesaplanması ise Denklem 10’da verilmiştir.

$$Jnr_{0.1} = \frac{\sum_{N=1}^{20} [Jnr(0.1, N)]}{10} \quad (8)$$

$$Jnr_{3.2} = \frac{\sum_{N=1}^{10} [Jnr(3.2, N)]}{10} \quad (9)$$

$$Jnr_{diff} = \frac{(Jnr_{3.2} - Jnr_{0.1})}{Jnr_{0.1}} * 100 \leq 75 \quad (10)$$

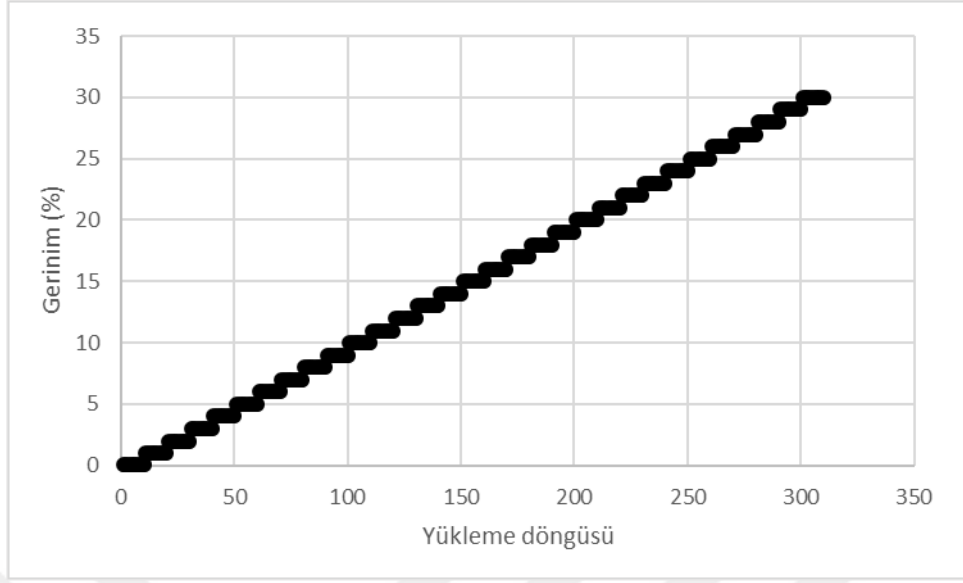
1.5.2.9. Lineer Genlik Taraması Deneyi (Linear Amplitude Sweep, LAS)

Bitümlü bağlayıcıların yorulma ömrü DSR cihazıyla $|G^*|$.sind parametresinin şartname ölçütleri kullanılarak bulunmaktadır. Ancak, mevcut yöntem daha yüksek gerilimleri veya uygulanan yükün farklı frekans seviyelerini tam olarak karşılayamamakta ve gerçek yorulma olgusunu tanımlayamamaktadır. Bu sebeple, bağlayıcıların yorulma ömrünün test edilmesi için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. LAS deneyi birbirini takip eden iki testi içermektedir. Birinci test, bağlayıcının reolojik özelliklerini belirlemek için frekans taramasını ikinci test ise bağlayıcının yorulma hasarını ve ömrünü belirlemek için genlik taramasını ifade etmektedir (TP101-14, 200).

Frekans tarama testi verileri, hasar aalizi “alfa (α)” parametresini belirlemek için kullanılır. Frekans tarama testi seçilen sıcaklıkta gerçekleştirilir ve bir dizi yükleme frekansı boyunca sabit genlikte salınımlı kayma yüklemesi uygulanır. Bu test yöntemi için, frekans tarama testi DSR üreticisinin kontrol yazılımından seçilir ve 0,2 ila 30 Hz arasında bir frekans aralığında yüzde 0,1 gerinim (şekil değiştirme) uygulanan bir yük kullanılır. Veriler 12 frekansta (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30) gerçekleştirilmektedir.

İkinci test, seçilen sıcaklıkta 10 Hz frekansta gerinim kontrol modunda salınımlı kesme kullanılarak gerçekleştirilir. Yükleme şeması (Şekil 20), sabit gerinim genliğine sahip 10 sn'lik aralıklardan oluşur ve her aralığı aşağıdaki gibi artan gerinim genliğine sahip başka bir aralık takip eder: %0.1 ve %1.0-%30 (%1 arttırılarak).

Faz açısı ve dinamik kayma modülü ile her 10 yük döngüsünde (1 sn) tepe kayma gerinimi ve tepe kayma gerilmesi kaydedilir.



Şekil 20. Lineer genlik taraması için temsili yükleme şeması

LAS testinin analiz şeması viskoelastik sürekli hasar (VECD) mekaniği kavramlarına dayanmaktadır ve yorulma ömrünü Denklem (11)'e göre hesaplamaktadır:

$$N_f = A \times (\gamma_{\max})^{-B} \quad (11)$$

Burada; N_f yorulma ömrü veya bozulmaya kadar olan döngü sayısıdır, $\gamma_{\max}$ belirli bir kaplama yapısı için beklenen maksimum asfalt bağlayıcı gerinimidir (örneğin: asfalt tabakası > 4": %2,5 gerinim kullanın, asfalt tabakası < 4": %5 gerinim kullanılmalıdır), ve A ve B parametreleri VECD model katsayılarıdır. Yükleme döngüleri sırasında depolama modülü ile doğrudan ilişkisi olan A parametresi, bağlayıcının bütünlüğünü koruma yeteneğini tanımlar. Depolama modülündeki bir azalma, bağlayıcının bütünlüğünü korumada daha düşük direncinin bir göstergesi olan A parametresini azaltacaktır. B parametresi, bağlayıcının gerilme seviyesi değişimine karşı hassasiyetini temsil eder. B parametresinin daha yüksek bir mutlak değeri, gerinim seviyesi genliği arttığında yorulma ömrünün daha yüksek oranda azaldığının bir göstergesidir. Daha yüksek A değerleri ve daha düşük mutlak B değerleri, daha yüksek yorulma direncine sahip bağlayıcılarla ilişkilidir (Ameri, Nowbakht, Molayem, & Mirabimoghaddam, 2016; Sabouri, Mirzaian, & Moniri, 2018; Hassanpour-Kasanagh, Ahmedzade, Fainleib, & Behnood, 2020).

Frekans tarama verileri, alfa hasar elemanını türetmek için kullanılmıştır. Alfa, G' (depolama modülleri) ve ω eğiminin bir fonksiyonudur, G' ise Denklem (12)'den hesaplanabilir:

$$\log G'(\omega) = |G^*|(\omega) \times \cos \delta(\omega) \quad (12)$$

Daha sonra alfa parametresi, log G' ile log ω grafiğinin eğiminin tersinden Denklem (13) ve Denklem (14) temel alınarak elde edilmiştir:

$$\log G'(\omega) = m \log(\omega) + b \quad (13)$$

$$\alpha = 1 + \frac{1}{m} \quad (14)$$

Kırılma noktasındaki hasar yoğunluğu (Df), tepe kesme gerinimindeki (Cf) malzeme bütünlüğü kullanılarak aşağıdaki Denklem 15'teki gibi hesaplanır:

$$D_f = (0.35) \left(\frac{C_0}{C_1} \right)^{\frac{1}{C_2}} \quad (15)$$

Burada C1 ve C2 eğri uydurma katsayılarıdır ve C0 değeri $G^* \cdot \sin \delta$ 'nın %0.1 gerinim aralığındaki ortalama değerini ifade etmektedir.

Son olarak, A ve B parametreleri şu şekilde tanımlanır:

$$A = \frac{f \cdot D_f^{1+(1-C_2)\alpha}}{[1 + \alpha(1-C_2)](\pi I_d C_1 C_2)^\alpha}$$

$$B = 2\alpha$$

burada f yükleme frekansıdır (10 Hz).

1.6. Sıcak Asfalt Karışımlar

Sıcak asfalt karışımlar (Hot mix Asphalt-HMA), bir asfalt plentinde, belirli gradasyona sahip agregalar ile asfalt çimentosunun üniform bir şekilde bir araya getirilerek sıcak olarak karıştırılması ile elde edilmektedir. Oluşan karışımlarda, ağırlıkça % 93- 95 agrega, %5- 7 ise asfalt çimentosu kullanılmaktadır. Sıcak asfalt karışımların plentte karışım sürecini tamamlandıktan sonra yol yüzeyine serilerek sıkıştırılması ile esnek yol kaplama tabakası oluşturulur. Sıcak asfalt karışımlar, yüksek standartlı karayolları, otoyollar ve havaalanları gibi yerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002; Tunç, 2007; Kök & Kuloğlu, 2008).

1.6.1. Sıcak Asfalt Karışımların Özellikleri

Sıcak asfalt kaplamaların servis ömürleri boyunca istenilen performansı göstermesi için tasarımı yapılırken göz önünde bulundurulması gereken özellikler vardır. Bunlar; stabilite, rijitlik, dayanıklılık (durabilite), esneklik (fleksibilite), geçirimsizlik, işlenebilirlik, yorulmaya ve kaymaya karşı dirençtir.

- Stabilite

Stabilite, sıcak asfalt karışımlardan imal edilmiş kaplamaların trafik yükleri altında meydana gelebilecek deformasyonlara karşı gösterdiği dirençtir. Kaplama için çok yüksek veya düşük stabilite değerleri istenen bir durum değildir. Çünkü, kaplamaların stabilitesi düşük olduğunda, kaplama yüzeyinde tekerlek izi ve ondülasyon gibi bozulmalar oluşurken, yüksek stabilite değerinde ise, maruz kalınan yükten dolayı kaplama esnek davranış sergileyemez ve kaplama yüzeyinde çatlaklar meydana gelir. Bu sebeple, karışımların belli bir stabilite değerine sahip olması gerekmektedir. Ayrıca, kaplamaların stabilitesi hem içsel sürtünmeye hem de kohezyona bağlıdır. Karışımda fazla asfalt bağlayıcının bulunması içsel sürtünmeyi ve kohezyonu azaltarak kaplamanın stabilitesinin düşmesine neden olmaktadır (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002, Tunç, 2007; Bostancıoğlu M., 2012; Oruç, Torul Kalker Taşocağı Agregalarının Asfalt Betonu İçerisindeki Performansının Araştırılması, 1997).

- Rijitlik

Viskoelastik ve termoplastik özelliğe sahip olan asfalt bağlayıcı, ısı ve yükleme süresi karşısında farklı davranış göstermektedir. Bağlayıcının bu özelliği karışımın rijitliğini

etkilemektedir. Kaplamanın rijitliği, sıcak asfalt karışımların yükleme süresi ve ısı ile meydana gelen gerilme ve deformasyonların arasındaki ilişkiye bağlıdır. Rijitliği yüksek olan kaplamalarda trafik yükü altında meydana gelen deformasyon miktarı daha az olmaktadır. Rijitlik, yükleme süresi, ısı ve bağlayıcının penetrasyon değeri azaldıkça ve karışımın yoğunluğu arttıkça artmaktadır. Sıcak asfalt karışımların rijitlik değeri, sünme, esneklik modülü ve dolaylı çekme vb. deneyler ile belirlenebilmektedir (Tunç, 2007; Kizirgil, 201; Yılmaz B., 2016).

- Dayanıklılık (Durabilite)

Dayanıklılık, sıcak asfalt karışımlardan imal edilmiş kaplamaların iklim ve trafiğin zarar verici etkilerine karşı gösterdiği dayanımdır. Dayanıklılık, asfalt kaplamaların, su etkisine, oksidasyona, kaplama ve agrega üzerinde meydana gelen değişimlere karşı dayanıklı olmasıdır. Yüksek asfalt bağlayıcı içeriği, yoğun (iyi derecelendirilmiş) gradasyon ve iyi sıkıştırılmış, geçirimsiz karışımlar sayesinde kaplamaların durabilitesi yüksek olmaktadır. Karışım içindeki asfalt miktarının artmasıyla birlikte karışım içindeki boşluklar azalacak, agrega ve bağlayıcı arasındaki kohezyon artacak ve asfalt film tabakasının kalın olmasıyla yapıda daha az sertleşme meydana gelecektir. Ancak, yüksek asfalt içeriği kaplamanın stabilitesinin düşmesine sebep olabilmektedir. Bu bağlamda, yeterli bir stabilite değeri için optimum bağlayıcı miktarı ile karışımlar hazırlanmalıdır (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002; Tunç, 2007; Yılmaz B., 2016).

- Esneklik (Fleksibilite)

Esneklik, asfalt kaplamaların çatlama olmadan eğilebilme ve alt temel ve temel tabakalarında zamanla oluşan oturmalarına uyabilme yeteneğidir. Esneklik, asfalt bağlayıcı içeriği arttıkça ve nispeten açık gradasyonlu karışıma sahip olundukça artmaktadır. Düşük fleksibiliteli karışımlarda kaplama yüzeyinde çok sayıda çatlak oluşurken, yüksek fleksibiliteli karışımlarda ise, yorulma çatlakları meydana gelebilmektedir. Ayrıca, kaplamanın esnekliğinin artışı ile stabilitenin azalacağı ve yorulma mukavemetinin artacağı da göz önünde bulundurulmalıdır (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002; Geçkil, Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, 2008; Tunç, 2007; Yılmaz B., 2016).

- Geçirimsizlik

Geçirimsizlik, sıcak asfalt karışımlardan elde edilmiş kaplamaların hava ve su geçişine karşı gösterdiği dirençtir. Geçirimsizlik, asfalt bağlayıcı miktarı, agrega gradasyonu ve sıkıştırma miktarı arttıkça artmaktadır. Kaplamanın geçirimsizliği karışımlardaki minimum

boşluk oranıyla sağlanabilmektedir. Ancak, sıcak havalarda kaplamanın stabilite değerinin korunabilmesi için karışım içerisinde belirli bir miktarda boşluk oranı olmalıdır [64,66,69].

- İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, karışımın serilmesi ve sıkıştırılması sırasında gösterdiği kolaylığın ölçüsü olarak ifade edilmektedir. İşlenebilirliği düşük olan karışımlarda tabaka kalınlığınca homojen bir sıkıştırma elde edilememekte ve yüzeyde daha az sıkışma olmaktadır. Bu durum, trafik yükleri etkisiyle yüzeyde çok çabuk kopmalar oluşturarak kaplamanın bozulmasında sebep olmaktadır. İşlenebilirliği yüksek olan karışımlarda ise, karışımında kullanılan dere malzemesi agrega ve yüksek penetrasyonlu bağlayıcıdan dolayı içsel sürtünme azalmakta ve kaplamanın stabilitesi düşük olmaktadır. İşlenebilirlik, karışım tasarımı sırasında agrega kökeni veya gradasyonunda yapılacak değişikliklerle arttırılabilir (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002; Tunç, 2007; Kurtis, 2003).

- Yorulmaya karşı direnç

Yorulma mukavemeti, asfalt kaplamada çatlamlar oluşmadan tekrarlanan yüklerin etkisiyle ortaya çıkan gerilmelere karşı, kalıcı olmayan deformasyonların oluşmasına imkân verebilme yeteneğidir. Yorulma mukavemeti; rijitlik, asfalt bağlayıcı miktarı, kaplama kalınlığı arttıkça ve eğilme gerilmesi azaldıkça artış göstermektedir. Yorulma çatlakları, trafik yüklerinin belirli bir tekerrür sayısından sonra meydana gelmektedir. Yorulma çatlaklarını önlemek için, çekme mukavemeti yüksek malzemeler kullanılmalıdır. Bu bağlamda, yumuşak asfalt bağlayıcının katı olana göre yorulmaya karşı direncinin daha yüksek olduğu söylenebilmektedir (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi,, 2002; Tunç, 2007).

- Kaymaya karşı direnç

Kayma direnci, sıcak asfalt karışımlardan elde edilmiş kaplama üzerinden geçen araçların frenleme esnasında güvenle durabilmesi ve tekerlek ile asfalt kaplama arasında bulunması gereken sürtünme kuvvetini ifade etmektedir. Kayma direnci, düşük asfalt bağlayıcı miktarı, kırmataş ve pürüzlü yüzeyli agrega, cilalanma direnci yüksek agrega ve açık ve kaba gradasyonlu karışım ile artmaktadır. Ancak, asfalt kaplamanın yüzey pürüzlülüğü azaldıkça kayma direnci de önemli ölçüde azalmaktadır. Farklı aşınma özelliklerine sahip ve cilalanmayan malzemeler içeren agregalar kaymaya karşı dirençli bir yüzey oluşturmaktadır (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002; Tunç, 2007). Sıcak asfalt karışımların özelliklerini etkileyen parametreler Tablo 3'te verilmiştir (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002).

Tablo 3. Sıcak asfalt karışımların özelliklerini etkileyen parametreler

Karışım Özellği	Bağlayıcı				Agrega				Yoğunluk (Sıkışma)		Isı		Yükleme Hızı		Kaplama Kalınlığı	
	Miktar		Katılık		Yoğunluk		Agrega Tipi		Çok	Az	Çok	Az	Yüksek	Düşük	Çok	
	Fazla	Az	Katı	Yumuşak	Çok Yoğun	Az Yoğun	Köşeli Pürüzlü Poroz	Yuvarlak Cilalı Az Poroz								
Stabilite	Opt.	(1)	X		X		X		X			X	X			X
Rijitlik	(2)		X		X		X		X			X	X			X
Dayanıklılık	X		X		X		X		X			X	X			X
Yorulma Mukavemeti	X			X	X		X		X		(6)		X			X
Esneklik				X		X		X		X	X		-	-		X
Geçirgenlik	X		X		X			(5)	X			X	-	-		X
Kayma Direnci		X	X			X		X	X			X	-	-		-
İşlenebilirlik		(3)		X		X		X		-	X	-	-	-		X

Notlar:

1. Asfalt yüzdesi optimum civarında ancak optimumdan daha az ise yüksek stabilite, aksi takdirde düşük stabilite elde edilir
2. Asfalt katı ve ısı düşük ise fazla asfalt yüzdesinde, aksi halde az asfalt yüzdesinde oluşur.
3. Genel olarak az asfalt yüzdesinde oluşur.
4. Isının dayanıklılık üzerindeki etkisi; ısı çok yüksek ise soyulma, ısı çok düşük ise büzülme çatlakları artar.
5. Genel olarak geçirimsizlik yoğunluk ile artar.
6. Isının yorulma mukavemeti üzerinde direkt etkisi yoktur.
7. Düşük ısıda karışımın boşluk oranı, tasarım boşluk oranı civarındadır.

1.6.2. Sıcak Asfalt Kaplamalarda Oluşan Bozulmalar

Asfalt kaplamalar inşa edildiği zaman çok iyi performans gösterse de zamanla trafik yüklerinin, iklim ve çevre şartlarının olumsuz etkisiyle beraber kaplamalarda birtakım kusurlar meydana gelmektedir. Yol üstyapılarında oluşan bu kusurların başlıca nedenleri; agrega ve bağlayıcının yanlış seçimi ve sıcak asfalt karışımı sırasındaki hatalar, serim ve sıkıştırma sırasındaki hatalar, trafik yüklerinin artışı ve bakım-onarım eksiklikleridir. Asfalt kaplamalarda meydana gelen kusurlar (bozulmalar), deformasyonlar, çatlaklar ve ayrışmalar olmak üzere üç başlık altında sınıflandırılabilir (Geçkil, Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, 2008; Tunç, 2007; Yılmaz B., 2016; Ilıcalı, Tayfur, Özen, Sönmez, & Eren).

1.6.2.1. Deformasyonlar

Deformasyonlar, asfalt kaplamaların seriminden belli bir süre sonra görülen yapısal bozukluklar olup sürüş konforu ve emniyetini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu kusurlar kaplamanın performansını düşürdüğünden dolayı gerek bölgesel tamir, onarım gerekse takviye tabakası yapılarak kusurların giderilmesi gerekmektedir. Yol üstyapısında meydana gelen deformasyonlar genel olarak stabilitesi düşük sıcak karışımların üretiminden kaynaklansa da tabakaların yetersiz sıkışması ve yanlış malzeme kullanımının da kaplama üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır (Tunç, 2007).

- Tekerlek izi

Tekerlek izi, özellikle ağır trafik yükünün fazla olduğu yerlerde yol eksenine boyunca meydana gelen kalıcı deformasyonlardır. Bu deformasyon, trafik yükü ve tekerrür sayısının fazlalığı, yüksek hava sıcaklığı, yüksek penetrasyonlu bağlayıcı, kaplamanın yetersiz sıkıştırılması gibi nedenler bağlı olarak oluşur. Asfalt kaplamalarda meydana gelen tekerlek izi kaplama üzerinde meydana gelen küçük kalıcı deformasyonların sonucu oluşmaktadır. Bu deformasyonları önlemenin yolu asfalt karışımının kayma mukavemetinin arttırmaktır. Karışım kayma mukavemeti, düşük penetrasyonlu ve yüksek sıcaklıklarda elastik davranış gösteren bir asfalt bağlayıcı ile artmaktadır. Bu durumda, yük uygulandığında kaplama elastik davranışı sayesinde ilk pozisyonuna geri dönebilecek ve kalıcı deformasyona sebep olmayacaktır. Ayrıca, yüksek içsel sürtünme mukavemetine sahip agregalarla yapılan karışım sayesinde agregaların birbirine kenetlenmesi artacak ve yük uygulandığında

agregalar elastik bir bant gibi davranıp kaplama yüzeyinde kalıcı deformasyonlar oluşmayacaktır. Kaplama üzerinde tekerlek izinde oturma deformasyonu Şekil 21’de gösterilmiştir.



Şekil 21. Tekerlek izi deformasyonu (URL-8, 2023)(URL-7, 2023)

- Oturmalar ve Çökmeler

Bölgesel oturma veya çökmeler, kaplama altındaki tabakalarda meydana gelen bozulmaların yol sathına yansması sonucu oluşan 0,5–2 m yarıçaplı dairesel yüzeysel deformasyonlardır. Yetersiz veya üniform olmayan sıkıştırma, yetersiz gradasyon, kaplamada su miktarının artması, aşınma tabakasında oluşan parçalanmaların artışı ile drenaj ve zemin problemlerinde oturma ve çökmeler meydana gelmektedir. Oturma ve çökmeler bölgesel deformasyonlar olup tamiri mümkündür. Deformasyona uğrayan kısım kazılıp atılır ve yerine uygun karışım dökülerek yenilenmesi sağlanmaktadır (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002; Tunç, 2007; Yılmaz B., 2016). Kaplamada meydana gelen oturma ve çökme deformasyonlarının bir örneği Şekil 22’de verilmiştir.,



Şekil 22. Kaplamada meydana gelen (a) oturma ve (b) çökme deformasyonu (URL-8, 2023; URL-9, 2023)

- Ondülasyonlar (Dalgalanmalar veya Yığılmalar) ve Kabarmalar

Ondülasyonlar genellikle yaya geçişleri, otobüs durakları, aşırı eğimli kesimlerde meydana gelmektedir. Ondülasyonlar, düşük stabiliteli karışımlar, karışımda fazla asfalt bağlayıcı kullanımı ve yetersiz aşınma tabakası kalınlığı vb. nedenlerden dolayı oluşur (Umar & Ağar, 1991; Tunç, 2007). Kaplamada meydana gelen ondülasyon deformasyonunun bir örneği Şekil 23'te verilmiştir.



Şekil 23. Kaplamada meydana gelen ondülasyonlar (URL-9, 2023)

Kabarmalar ise, zeminin veya üstyapının şişmesi sonucu oluşmaktadır. Genellikle don etkisi sebebiyle oluşan deformasyonlar, zemin stabilizasyonu ve drenaj gibi tekniklerle giderilebilmektedir (Umar & Ağar, 1991; Tunç, 2007).

1.6.2.2. Çatlaklar

Çatlaklar, yolun üst yüzeyinde trafik, iklim ve çevrenin etkileri ile farklı genişlikte ve derinlikte meydana gelen bozulmalardır. Genel olarak çatlaklar;

- Stabilitate çatlakları
- Yorulma çatlakları
- Yansıma çatlakları şeklinde üç gruba ayrılmaktadır.

Stabilitate çatlakları, asfalt kaplamaların altında oluşan ve trafiğin etkisiyle zamanla yol yüzeyine doğru ilerleyen yapısal çatlaklardır. Yorulma çatlakları, ağır dingil yüklerinin çok sayıda geçişi ile kaplamanın yorulma mukavemetinin aşılması sonucu oluşmaktadır. Yansıma çatlakları ise, trafik ve iklimin etkisiyle asfalt kaplama altındaki tabakalarda oluşmuş çatlakların en üstteki tabakaya ilerleyip yansıması sonucu oluşmaktadır (Umar & Ağıar, 1991; Tunç, 2007; Sönmez, Taştan, Yıldız, & Bayraklı, 2018).

- Timsah Sırtı Çatlaklar (Yorulma Çatlakları)

Birbirleriyle irtibatlı olup timsah sırtı-bal peteğı görünümde bloklar halinde ortaya çıkan ve kaplamanın belirli kesiminde veya tümünde meydana gelen çatlaklardır (Şekil 24). Timsah sırtı çatlaklar oturmadan veya yorulma mukavemetinin aşılması sonucu oluşmaktadır. Yorulma çatlakları kaplama yüzeyinde boyuna kılcal çatlaklar oluşturmakta ve trafiğın etkisiyle bu çatlaklar büyüyerek enine oluşan çatlaklarla birleşmektedir. Böylece, kaplama yüzeyinde bal peteğine benzer çatlaklar meydana gelmektedir. Oturma deformasyonundan dolayı oluşan çatlaklar ise büyük, sivri köşeli olup timsah sırtına benzer şekilde oluşmaktadır (Tunç, 2007; Sönmez, Taştan, Yıldız, & Bayraklı, 2018).



Şekil 24. Kaplamada meydana gelen timsah sırtı çatlaklar (URL-9, 2023)

- Düşük Isı Çatlakları

Asfalt kaplamaların, soğuk havalarda büzülmesiyle oluşmakta ve yolun enine şeklinde meydana gelen çatlaklardır (Şekil 25). Düşük ısı çatlakları, kaplamanın yüzeyinde oluşabileceği gibi kaplamanın bütün kalınlığı boyunca da oluşabilmektedir. Düşük ısı çatlaklarının oluşumunu, düşük ısı duyarlılığı ve yüksek penetrasyon indeksi değerine sahip bağlayıcılar ile azaltmak mümkündür.



Şekil 25. Kaplamada meydana gelen düşük ısı çatlakları (URL-9, 2023)

1.6.2.3. Ayrışmalar

Ayrışmalar, trafik ve iklimin mekanik etkisiyle aşınma tabakasının küçük parçalar halinde ayrılıp kopması ve parçalanması şeklinde görülmektedir. Ayrışmalar genel olarak; yapım hataları, üniform olmayan karışım, kirli ve ıslak agreganın kullanımı ve yüksek penetrasyonlu bağlayıcı vb. nedenlerden oluşmaktadır.

- Sökülmeler

Sökülmeler, aşınma tabakasının yüzeyinden malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Agreganın zamanla üst tabakadan alta doğru kopması ile oluşmaktadır (Şekil 26). Öncelikle kaplama yüzeyinden ince malzemeler kopmakta ve kaplamada çok küçük çukurlar oluşmaktadır. Sonrasında, trafik yükünün aşındırıcı etkisiyle kaplamadan daha büyük boyutta parçalar kopmakta ve kaplama yüzeyinde sökülmeler meydana gelmektedir.



Şekil 26. Kaplamada meydana gelen sökülmeler (URL-9, 2023)

- Soyulmalar

Agreganın tanelerini saran asfalt bağlayıcı filminin su ve trafiğin mekanik etkisi ile agreganın yüzeyinden ayrılmasıyla meydana gelen bozulmalardır (Şekil 27). Kuru ve temiz agregalar, bağlayıcılık özelliği yüksek asfalt ve yoğun gradasyonlu karışımlar ile kaplamalarda meydana gelen soyulmalar azaltılabilmektedir.



Şekil 27. Kaplamada meydana gelen soyulmalar (URL-9, 2023)

1.7. Sıcak Asfalt Karışımlarda Kullanılan Agregalar

Asfalt karışımların iki esas malzemesinden biri agregalardır. Agregalar; kum, çakıl, kırma taş, cüruf ve diğer mineral bileşiklerin bağlayıcı bir ortamda (asfalt karışımı, çimento beton karışımı vb.) veya bağlayıcı olmaksızın (demir yollarında kullanılan balast malzeme vb.) kullanılmak üzere bir araya getirilmiş şeklidir. Alt temel ve asfalt bağlayıcısız temel tabakalarının tamamı agregalardan oluşmaktadır. Sıcak asfalt karışımlarda ise, agregalar karışımların ağırlıkça %90-95'ini ve hacimce de %80-85'ini oluşturmaktadır (Tunç, 2007) (Keçeciler & Akkol, 1990).

Agregalar sıcak asfalt karışımlarda, kaplamanın stabilitesi açısından önemli bir role sahiptir. Agregadan beklenen performansı yerine getirebilmesi için, yapım sırasında segregasyon olmaması, kolaylıkla yerleştirilip sıkıştırılması ve bağlayıcı ile yeterince karıştırılması gibi hususlara dikkat edilmelidir. Asfalt kaplamalarda kullanılan agregaların; yeterli içsel sürtünmeye sahip, aşındırmalara karşı dayanıklı, trafik yükleri altında kırılmaya karşı dirençli, asfalt bağlayıcı ile güçlü adezyon oluşturabilecek, pürüzlü yapıda, yüksek kayma ve sürtünme direncine sahip olması gerekmektedir (Tunç, 2007).

Yol üst yapısında kullanılan agregaların özellikleri fiziksel ve mekanik olarak iki gruba ayrılmıştır.

1.7.1. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agregalar fiziksel olarak,

- Mineralojik
- Boyut
- Gradasyon
- Biçim
- Yüzey yapısı
- Porozite
- Yüzey alanı ve boşluk oranı
- Özgül ağırlık

olmak üzere sınıflandırılabilir. Fiziksel özelliklere göre sınıflandırılma ile agregaların özellikleri daha iyi belirlenebilmekte ve birbirleriyle ilişkileri daha iyi anlaşılabilmektedir (Tunç, 2007).

- Mineralojik Sınıflandırma

Agregalar, dere malzemesi, kırmataş ve yapay agrega olmak üzere elde edilme şekillerine göre sınıflandırılabilir. Dere malzemeleri, bünyesindeki su içeriği vb. nedenlerden dolayı alt temel yol kaplamaları dışında kullanılmazken, konkasörde kırım sonrasında kırma çakıl ve kırma kum olarak yol üst yapısında kullanılabilir. Kırmataş, kayaların kırılması ile elde edilmektedir. Ayrıca, yol kaplamalarında kullanılması istenilen agregalar kırmataş şeklinde olanlardır. Yapay agregalar ise, cüruf, klinker ve çimentodan elde edilmektedir (Umar & Ağar, 1991; Tunç, 2007).

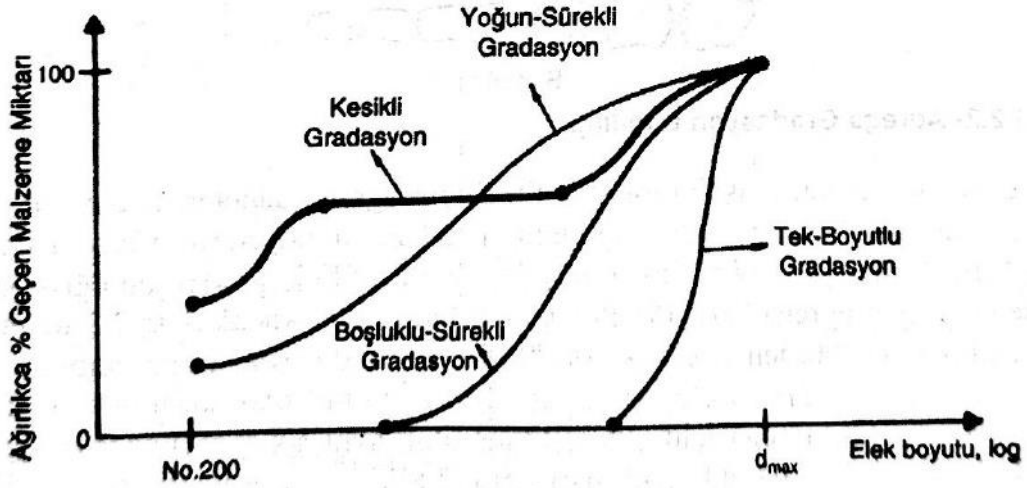
Kırmataşlar kökenlerine göre; püskürük, tortul ve metamorfik olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda eriyen magmanın soğuması sonucu oluşan püskürük kayalar, çok sert bir yapı ve düşük porozluluğa sahiptirler. Püskürük kayalara örnek olarak, bazalt, andezit ve granit verilebilir. Tortul kayalar, dış etkilerle kayaların aşındırılmasıyla meydana gelen parçaların, göl ve denizlere taşınıp birikmesi ile oluşurlar. Kumtaşı, kalker ve konglomera bu sınıfa aittir. Metamorfik kayalar ise, kayaların (püskürük veya tortul) yüksek ısı veya basınç altında değişime uğraması sonucu oluşmaktadır. Metamorfik kayalara örnek olarak, mermer, kuvarsit ve şist verilebilir (Umar & Ağar, 1991; Tunç, 2007).

- Boyut Sınıflandırması

Asfalt kaplamalarda kullanılacak agregalar, belirli bir elek setinden geçirilerek kaba, ince ve filler agrega olarak üç sınıfa ayrılmaktadır.

- Kaba agregat: No. 4 (4.76 mm) eleğin üzerinde kalan agregayı
- İnce agregat: No.4 elekten geçip no.200 (0.075 mm) elek üzerinde kalan agregayı
- Filler agregat: No.200 elekten geçen agregayı temsil etmektedir (Keçeciler & Akkol, 1990; Tunç, 2007).
- Gradasyon Sınıflandırması

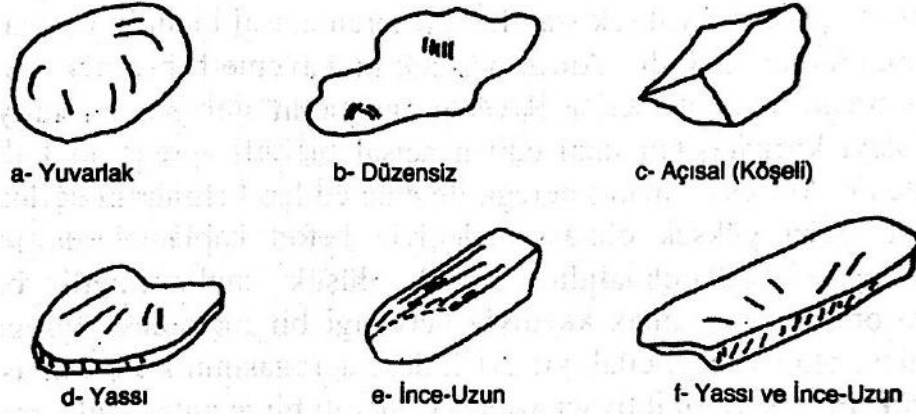
Agrega gradasyonu, agregat karışımını oluşturan danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade etmektedir. Agregat gradasyonu, karışımın işlenebilirlik ve stabilite özelliklerini etkilemektedir. Agregalar gradasyon yönünden; kesikli gradasyon, yoğun-sürekli gradasyon, boşluklu-sürekli gradasyon ve tek-boyutlu gradasyon şeklinde dört gruba ayrılmıştır. bu gradasyon tiplerinin, düşeyde ağırlıkça % geçen malzeme miktarı, yatayda logaritmik ölçekte dane boyutu veya elek çapı olacak şekilde grafik gösterimi Şekil 28’de verilmiştir.



Şekil 28. Agregat gradasyon tipleri (Tunç, 2007)

- Biçim ve Yüzey Yapısı Sınıflandırması

Agregat danelerinin biçimleri, karışımların sıkışma direnci, stabilite, içsel sürtünme ve işlenebilirlik gibi özelliklerini etkiler. Agregat dane biçimleri Şekil 29’da gösterilmiştir. Esnek yol kaplamalarında kırılmışlık yüzdesi fazla, yassılık ve ince-uzunluk indeksinin az olduğu agregalar tercih edilmektedir (Tunç, 2007).



Şekil 29. Agregaların biçimsel sınıflandırılması (Tunç, 2007)

Agrega danelerinin yüzey yapısı, agregaların pürüzlülüğünü ifade etmektedir. Asfalt kaplamalarda, pürüzlü yüzeyli agregaların kullanılması stabiliteyi ve asfalt bağlayıcı ile agrega arasındaki adezyonu olumlu yönde etkilemektedir. Pürüzlü yüzeye sahip asfalt karışımlarla yapılan kaplamalarda yüksek sürtünme kuvveti sayesinde kayma direnci de artmaktadır. Ancak, buna karşın pürüzlü yüzeye sahip agregalar karışımın sıkışmaya karşı direncini ve işlenebilirliğini olumsuz olarak etkilemektedirler (Umar & Ağar, 1991; Tunç, 2007).

- Porozite, Yüzey Alanı ve Boşluk Oranı Sınıflandırması

Asfalt karışımlarda, bağlayıcının emilebilmesi için agrega danelerinin belli bir poroziteye (gözeneklilik) sahip olması gerekir. Asfalt bağlayıcı ile yeterli poroziteye sahip agregalar arasında kuvvetli bir adezyon oluşmasıyla, bağlayıcının agrega yüzeyinden soyulması azalmakta ve karışımın stabilitesi artmaktadır. Porozite sınıflandırması Şekil 30'da gösterilmiştir.



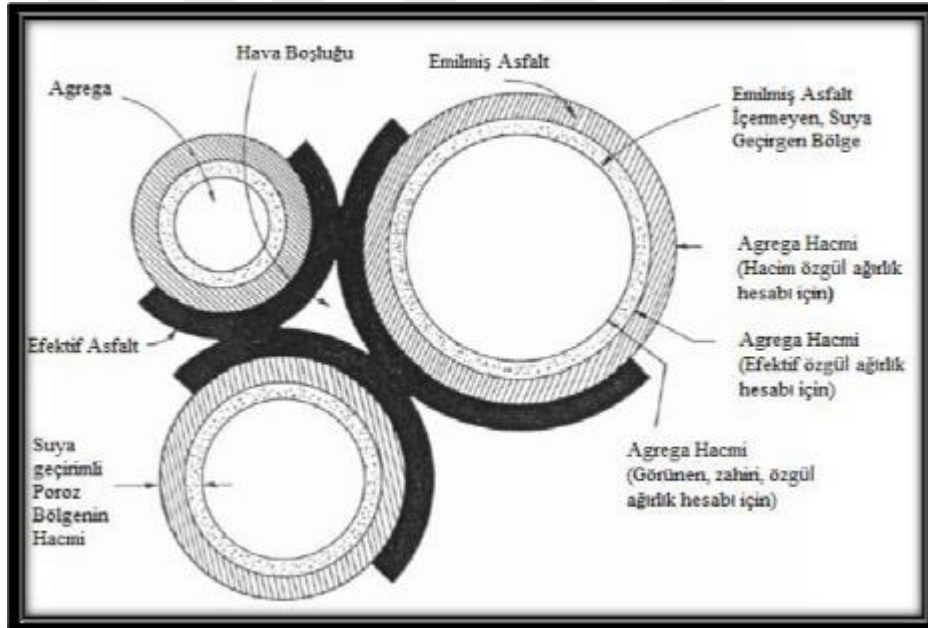
Şekil 30. Porozite sınıflandırması (Tunç, 2007)

Agrega danelerinin sahip olduğu yüzey alanları ve daneler arasındaki boşluk miktarları, asfalt karışımını etkileyen önemli faktörlerdir. Toplam yüzey alanı ile boşluk hacmi gradasyona, dane çapı ve biçimine bağlıdır (Tunç, 2007).

- Özgül Ağırlık Sınıflandırması

Agreganın özgül ağırlığı, agreganın birim hacimdeki ağırlığının aynı hacimde ve 25 °C'deki suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanmaktadır. Asfalt karışımlarda hesapların yapılabilmesi için agregaların özgül ağırlık değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Agregada danelerinin hacim içeriğine bağlı olarak üç farklı özgül ağırlığa sahiptir. Bunlar,

- Zahiri özgül ağırlık
- Hacim özgül ağırlık (kuru özgül ağırlık)
- Doygun-kuru yüzey özgül ağırlık (Efektif özgül ağırlık)'tır (Şekil 31).



Şekil 31. Agreganın hacim içeriğine göre özgül ağırlıkları (Yılmaz B., 2016)

1.7.1. Agregaların Mekanik Özellikleri

Agrega danelerinin stabilitesi, durabilitesi ve adezyonu yol kaplamalarının performansını etkileyen parametrelerdir. Agregada danelerinin stabilitesi, kaplama üzerine gelen trafik yüklerine karşı oluşacak deformasyona karşı direnç olarak tanımlanmaktadır. Agregaların stabilitesi, kayma mukavemeti, CBR veya esneklik modülü ile ölçülmektedir.

Agregaların durabilitesi ise, trafik ve çevrenin etkisiyle agregaların aşınma, kırılma ve parçalanmaya karşı gösterdiği dirençtir. Agregaların durabilitesi, Los Angeles aşınma, don dayanımı ve darbe testleri ile belirlenebilmektedir. Asfalt kaplamaların yüzeyi su ile temas halindedir ve bu durum asfalt filmiyle sarılı agrega danelerinin soyulmasına sebep olmaktadır. Agrega daneleri ile asfalt bağlayıcı arasındaki adezyon ne kadar güçlüyse kaplamanın da stabilitesi ve durabilitesi o denli yüksek olacaktır. Agregaların adezyon yeteneği, yüzeyin pürüzlülüğüne, poroziteye, yüzey alanına ve agreganın temizliğine bağlıdır (Yılmaz B., 2016; Tunç, 2007).

1.8. Sıcak Asfalt Karışımlarda Kullanılan Tasarım Yöntemleri

İdeal sıcak asfalt karışım tasarımı, iyi planlanmış bir laboratuvar tasarım prosedürü ile gerçekleşmektedir. Bu nedenle, karışım tasarımı titizlikle hazırlanmalı ve kaplamadan beklenen performansı sağlaması için gerekli yöntemler kullanılmalıdır. Sıcak asfalt karışım tasarımları, Marshall, Hveem veya Superpave tasarım yöntemlerinden biri kullanılarak yapılmaktadır (Buncher & Anderson, 2014).

1.8.1. Marshall Tasarım Yöntemi

Ülkemizde ve dünyada yaygın olarak kullanılan Marshall tasarım yöntemi, 1930'larda Mississippi Otoyol Departmanındaki Bruce Marshall tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, yoğun gradasyonlu karışımlar için kullanılmaktadır. Orijinal Marshall yöntemi yalnızca maksimum boyutları 25 mm (1 inç) veya daha küçük olan agregalar içeren sıcak karışım asfalt kaplama karışımlarına uygulanabilir. Seçilen tek bir agrega gradasyonu ile optimum asfalt bağlayıcı içeriğini seçmek için beş farklı asfalt içeriğine sahip numuneler test edilir. Numuneler, yüksekliği 63,5 mm ve çapı 101,6 mm olan silindir bir kabın içinde Marshall tokmağı ile sıkıştırılarak hazırlanır ve üretilen briket numuneleri bir seri laboratuvar deneylerine tabi tutulur. Deneyler, her zaman üç sıkıştırılmış, özdeş örneğin ortalaması alınarak yapılmalıdır. Deney sonuçlarına göre altı farklı grafik çizilmektedir. Grafiklerden, stabilite ve yoğunluk değerlerinin max. değerleri, %4 hava boşluğu ve %70 asfaltla dolu boşluk yüzdelere denk gelen asfalt yüzdeleri toplanarak ortalaması alınır ve nihai optimum asfalt bağlayıcı içeriği belirlenmiş olur (Buncher & Anderson, 2014; Aksağan, 2021).

Kaplama karışımlarını tasarlamaya yönelik Hveem yönteminin kavramları, Kaliforniya Ulaştırma Departmanında eski bir mühendisi olan Francis N. Hveem'in yönetimi altında geliştirilmiştir. Hveem karışım tasarımı çok sıcak iklime sahip bölgelerde tekerlek izinde oturmaya karşı dayanıklı asfalt karışımların tasarımı oldukça faydalı olan bir yöntem olup, Marshall tasarımından farklı olarak sıkıştırılmış karışım içerisindeki agrega yapısının stabilitesi için daha fazla teste ihtiyaç duyulmaktadır. Hveem tasarım metodunda, Marshall numune kalıpları kullanılmaktadır. Ancak, Marshall yöntemindeki tokmak yerine California yoğurma kompaktörü kullanılarak briketler hazırlanmaktadır. Seçilen bir agrega gradasyonunda ve dört farklı asfalt bağlayıcı içeriğinde karışım numuneleri hazırlanarak farklı kriterler için laboratuvar deneyleri yapılır. Karar piramidi yardımıyla her defasında istenen kriterleri karşılayan en yüksek asfalt içeriği seçilerek üç adımda optimum asfalt bağlayıcı içeriği belirlenir. Genellikle, Marshall yönteminde belirlenen optimum asfalt içeriğinden yaklaşık % 0,3 daha az olmaktadır (Buncher & Anderson, 2014; M., ve diğerleri, 2021).

1.8.2. Superpave Tasarım Yöntemi

Superpave tasarım yöntemi, yüksek performans gösteren bir asfalt kaplama karışımı üretmek için geliştirilmiş bir yöntem olup Üstün Performanslı Asfalt Kaplama (Superior Performing Asphalt Pavement) olarak isimlendirilmiştir. Yöntem, yüksek sıcaklıklar ve ağır dingil yükleri için Marshall tasarım yönteminin geliştirilmesiyle oluşturulmuştur. Yöntemde, agrega ve bağlayıcı seçiminde kaplamanın yapılacağı bölgenin sıcaklık değerleri ve trafik yükü dikkate alınmaktadır. Superpave yönteminde, yoğun gradasyonlu agrega kullanılmaktadır. Ancak, Marshall'dan farklı olarak agrega gradasyon sınırlarını oluşturan kontrol noktaları ve yasak bölge bulunmaktadır. Agrega gradasyonu, gradasyon limitleri, kontrol noktaları ve yasak bölgeye göre seçilmektedir. Superpave tasarımında, asfalt bağlayıcı için performans derecelendirmesi bulunmaktadır. Bağlayıcı kaplamanın minimum ve maksimum sıcaklıklarına göre seçilmektedir. Marshall'dan farklı olarak, briket numuneleri sahadaki sıkıştırmayı temsilen yoğurmalı pres altında sıkıştırılır. Seçilen gradasyon ile en az dört farklı asfalt içeriğine sahip numuneler elde edilir. Numuneler, %4 hava boşluğuna denk gelen bağlayıcı miktarı ile Superpave sınır koşullarının sağlanması sonucu optimum asfalt bağlayıcı içeriği belirlenir (Buncher & Anderson, 2014; Kaya &

Topal, Marshall ve Superpave Tasarım Yöntemleri Arasındaki Farklılıkların Ilık Karışım Asfaltlar Açısından İncelenmesi, 2016).

1.9. Sıcak Asfalt Karışımlara Uygulanan Deneyler

Sıcak asfalt karışımların tasarımı yapılırken kaplama performansının belirlenebilmesi için asfalt karışımlara bir dizi laboratuvar deneyleri uygulanmaktadır. Genel olarak bunlar; Marshall stabilite ve akma, dolaylı çekme mukavemeti (ITS), Modifiye Lottman, dinamik sünme, dolaylı çekme esneklik (rijitlik) modülü (ITSM), dolaylı çekme yorulma deneyleri yapılmaktadır.

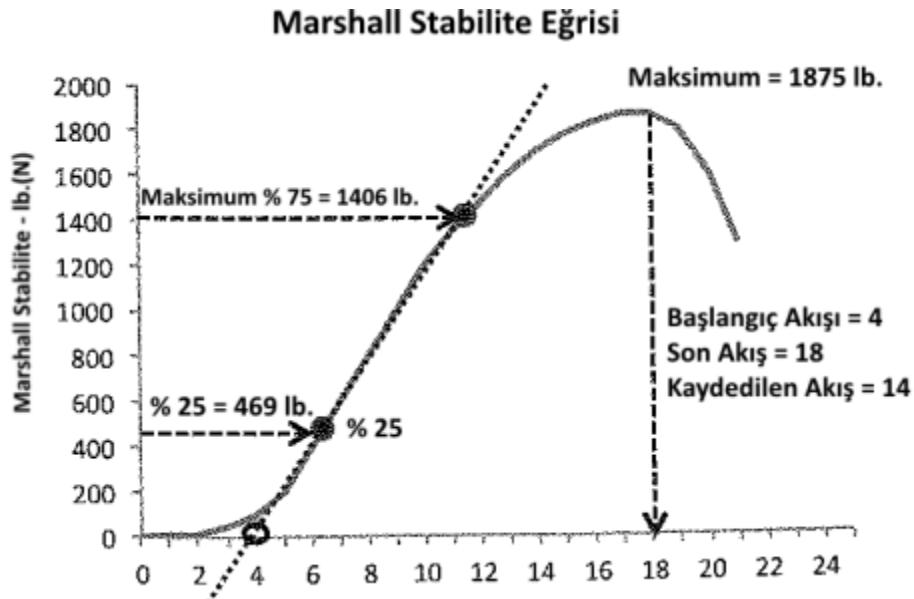
1.9.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

Marshall numuneleri ve cihazın kırma çenesi, deneyden önce 30-40 dk. süre ile $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki suda bekletilir. Süre sonunda çıkarılan numuneler havlu yardımıyla kurulanıp sırayla kırma çenesinin ortasına yerleştirilir ve cihazın yük hücresi ve akma değerini ölçen LVDT'nin pozisyonu ayarlanır. Briket numunelerine 50 ± 2 mm/dk hızla yükleme yapılır. Deneyden doğru sonuçların elde edilebilmesi için, deneyin 30 sn içinde tamamlanması gerekmektedir. Deney sonunda, cihazdan briketlere ait stabilite ve akma değerleri okunarak kaydedilir. Şekil 32'de Marshall stabilitesi ve akma deney cihazı gösterilmiştir.



Şekil 32. Marshall stabilitesi ve akma deney cihazı

Marshall stabilitesi; sabit deformasyona karşı elde edilen maksimum dayanımdır. Akma değeri ise; brikette oluşmuş elastik ve plastik deformasyonların ölçümüdür. Deney maksimum yükün olduğu noktaya kadar devam eder ve maksimum yük değeri, brikeye ait stabilite değerini verir. Deneyde çizilen yük-deplasman grafiği üzerindeki lineer bölgede, maksimum yük değerinin % 25'i ile % 75' inin karşılık geldiği noktalardan çizilen doğrunun yatay (deplasman) eksenini kestiği yerdeki deformasyon ile maksimum yükün olduğu deformasyon arasındaki fark değeri, akma değerini vermektedir (Şekil 33).



Şekil 33. Marshall stabilite deneyinde akmanın belirlenmesi örneği (M., ve diğerleri, 2021)

Deney sonucunda elde edilen stabilite ve akma değerlerinin birbirine oranlanmasıyla Marshall oranı (MQ) (stabilite/akma kg/mm) hesaplanmaktadır. Marshall oranı, karışımın servis ömrü boyunca deformasyonlara karşı direncinin bir göstergesidir (Yılmaz B., 2016; İnce, 2019).

1.9.2. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi

Dolaylı çekme mukavemeti deneyi, asfalt karışım numunelerinin kohezyon kuvveti ile orta sıcaklıklardaki sertlik ve durabilitesinin tespit edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Deney gerekli ekipman ile Marshall stabilite cihazında gerçekleştirilir (Şekil 34). Aparatın içine yerleştirilen numuneye 50 mm/dk hızda sabit bir basınç uygulanır ve deney numune kırılıncaya kadar devam ettirilir. Numunenin kırıldığı andaki en büyük yük değeri kaydedilir (Geçkil, Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, 2008; Yılmaz B., 2016; İnce, 2019).



Şekil 34. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi

Dolaylı çekme mukavemeti deneyi sonrasında Denklem 16 ile numunelere ait ITS değerleri hesaplanır.

$$ITS = [(2P_{max} / \pi h d) \times 100] \quad (16)$$

ITS : Dolaylı çekme mukavemeti (kPa)

P_{maks} : Maximum yük (kN)

h : Numune yüksekliği (mm)

d : Numune çapı (mm) şeklindedir.

Asfalt bağlayıcının kohezyon özelliği ITS değerlerini etkilemektedir. Bu sebeple, ITS değeri arttıkça kohezyon kuvveti artar. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi ile sıcak asfalt karışımların çekme mukavemeti özellikleri ve yorulma çatlaklarının oluşma potansiyeli de belirlenebilmektedir (Geçkil, Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, 2008; İnce, 2019).

1.9.3. Modifiye Lottman Deneyi

Modifiye Lottman deneyi, asfalt karışım numunelerinin suya karşı hassasiyetinin belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. AASHTO T-283 standardına göre yapılan deneyde, briketlerin sudan dolayı meydana gelen ‘dayanım kaybı’ tespit edilmektedir (Geçkil, Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, 2008; Cansever, 2016; İnce, 2019).

Modifiye Lottman deneyinde, Marshall sıkıştırma yöntemine göre altı adet briket hazırlanır ve bunlar koşulsuz ve koşullu olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Suyun karışım üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi için 3 adet numune vakum aracılığıyla damıtılmış suya doygun hale getirilir. Ardından, doygun numuneler 16 saat süreyle -18 °C sıcaklıktaki soğutucuya bırakılır. Soğutucudan çıkarılan numuneler, 60 °C’deki su banyosunda 24 saat süreyle bekletilir. Koşullandırılmamış 3 adet numune ve koşullandırılan numuneler 25 °C’deki su banyosunda 2 saat bekletilir ve numuneler dolaylı çekme mukavemeti deneyine tabi tutulur. Koşullandırılmış (yaş) numunelerin dolaylı çekme mukavemeti ($ITS_{yaş}$), koşullandırılmayan (kuru) numunelerin dolaylı çekme mukavemetine (ITS_{kuru}) oranı Denklem 17 ile hesaplanmaktadır.

$$ITSR = (ITS_{yaş} / ITS_{kuru}) \times 100 \quad (17)$$

ITSR: Dolaylı çekme mukavemeti oranı (%),

$ITS_{yaş}$: Koşullandırılmış (yaş) numunelerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa)

ITS_{kuru} : Koşullandırılmamış (kuru) numunelerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa)

Deneyden elde edilen ITSR değerlerinin en az %70 olması beklenir. Bu değerden düşük ITSR değerine sahip karışımların suyun olumsuz etkilerine karşı istenen dayanımı gösteremeyeceği ve suya karşı direncin arttırılması gerektiği söylenebilir (Geçkil, Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, 2008; İnce, 2019).

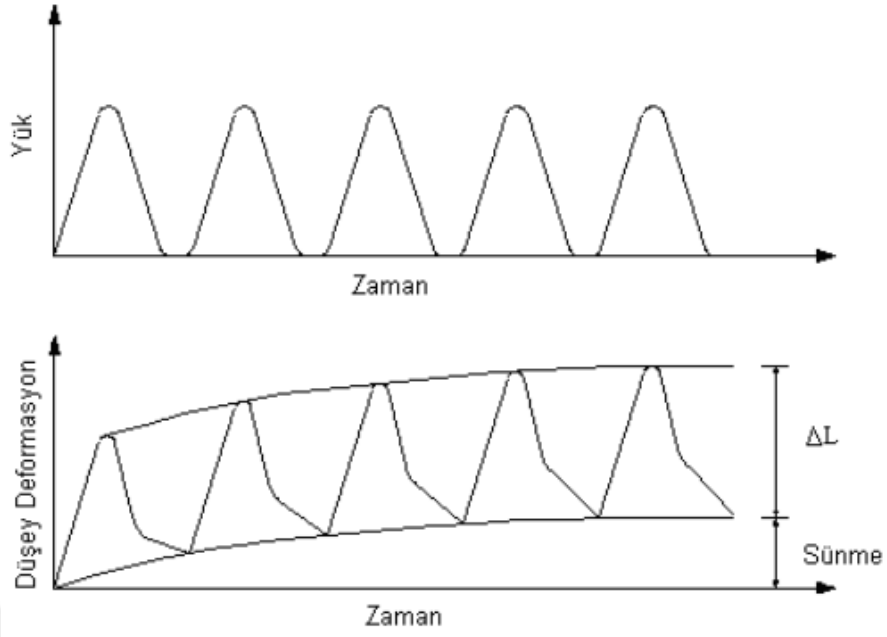
1.9.4. Dinamik (tekrarlı yük altında) Sünme

Dinamik sünme deneyi, sıcak asfalt karışımların dinamik (tekrarlı) yükler altındaki dayanımın belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Deneyde, tek eksenli sabit basınç yükünün, numunelere belirli bir vuruş periyodu içerisinde uygulanarak numunelerde oluşan kalıcı deformasyon ölçülür. Deneyde, asfalt tester cihazı kullanılmaktadır. Sünme deneyleri belirlenen yük altında numunede oluşan kalıcı deformasyonu ölçerek kaplamanın tekerlek izi dayanımı ile ilgili bilgi vermektedir. Dinamik sünme deneyi, hareketli trafik yükünü temsilen tekrarlı yükler altında gerçekleştirilmektedir (Oruç, Yoğun Granülometrilili Emülsifiye Asfalt Betonunda Çimentonun Karışım Performansı Üzerindeki Etkisi, 2002;Kök, Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni Bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, 2007; Geçkil, Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, 2008).

Dinamik sünme deneyinde, numuneler belirlenen deney sıcaklığında en az 3 saat bekletilir. Ardından, numuneler asfalt tester cihazına yerleştirilerek LVDT sensörlerinin ayarlaması yapılır (Şekil 35). Cihaz içindeki referans numunenin istenilen sıcaklığı gösterdiği an deneye başlanır. Numunelere ilk olarak ön yükleme yapılır ve sonrasında belirlenen basınç yükü tekrarlı olarak numunelere uygulanır. Uygulanan yük ile numunede meydana gelen deformasyonların zamana göre değişimi Şekil 36'da gösterilmiştir.



Şekil 35. Dinamik sünme deneyi uygulanan numune



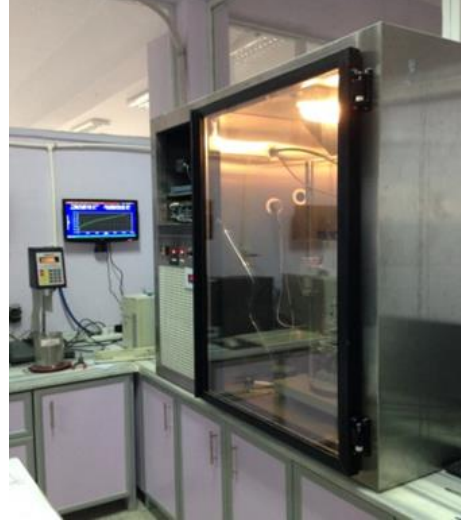
Şekil 36. Yük-zaman ve yük-deformasyon ilişkisi

1.9.5. Dolaylı Çekme Yorulma Deneyi

Asfalt kaplamalarda meydana gelen yorulma çatlakları iki farklı şekilde meydana gelmektedir. Bunlardan ilki, trafik etkisiyle asfalt kaplamaların altında oluşan ve yukarıya doğru yayılan çekme gerilmelerinin sebebiyle olurken diğeri de asfalt kaplamaların üstünden altına doğru yayılan ağır taşıtların dingil yükü sebebiyle meydana gelmektedir (Mackiewicz, 2013).

Kaplamalardaki yorulma dayanımlarının belirlenmesi için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar, numune geometrisine, yükleme şekline ve numunede oluşan gerilme durumuna göre farklılık göstermektedir. Yorulma deneyleri genel olarak, deformasyon veya gerilme kontrollü olarak yapılmaktadır (Yılmaz B., 2016; Baykara, 2021; İnce, 2019).

Deney öncesinde, numuneler en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilir. Ardından, cihaz yazılımına numune ve yükle ilgili bilgiler eklenerek numune cihaza yerleştirilir (Şekil 37). Deney numune kırılıncaya kadar devam eder ve deney sonunda numuneye ait yük tekrür sayısı-deformasyon grafiği çizilmiş olur.



Şekil 37. Dolaylı çekme yorulma deneyi uygulanan numune

1.10. Asfalt Modifikasyonu

Esnek üstyapıda; uygun tasarım, kaliteli malzeme kullanımı, üniform serim, yeterli sıkıştırma ve gerekli bakım-onarım çalışmaları servis ömrü boyunca kaplamalardan beklenen performansı sağlanmaktadır. Ancak, trafik yüklerindeki artış ile iklim ve çevre etkileri kaplamanın performansını olumsuz yönde etkilemekte ve üstyapıda istenmeyen, yol sathını bozan kusurlar meydana gelmektedir. Kaplamalarda oluşan bu kusurların önlenmesi, kaplamanın performansının daha üst seviyelere çıkarılması ve kaplama servis ömrünün uzaması için asfalt bağlayıcıya ve/veya karışıma çeşitli tip ve oranlarda katkı maddeleri ilave edilerek bağlayıcı modifiye edilmektedir. Modifikasyon işlemi;

- katkı maddesinin asfalt bağlayıcıya ilave edilmesiyle ‘modifiye asfalt bağlayıcı’
- katkı maddesinin asfalt plentinde doğrudan karışıma ilave edilmesiyle ‘modifiye karışım’ olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır.

Modifiye asfalt ve/veya modifiye karışım içeren kaplamalardan, kalıcı deformasyonlara karşı yeterli rijitliğe, termal çatlaklara karşı yeterli esnekliğe ve çevresel etki nedeniyle oluşan soyulmalara karşı yeterli dirence sahip olması beklenmektedir. Ayrıca, kayma direnci yüksek kaplama yüzeyleri elde etmek, karışımların stabilitesini, mukavemetini ve yorulma direncini arttırmak, kusmayı veya terlemeyi azaltmak, yaşlanmaya karşı bağlayıcının direncini arttırmak, karışımın işlenebilirliğini ve sıkışmasını geliştirmek, düşük kaliteli agregaları kullanılır hale getirebilmek, düşük kaliteli bağlayıcıların verimini arttırmak, yansıma çatlaklarını geciktirmek, kaplamanın her

bakımdan performansını yükseltmek ve kaplamanın uzun vadede ekonomik olmasını sağlamak vb. birçok sebepten dolayı asfalt bağlayıcılar modifiye edilmektedir (Birliker, 1998).

Asfalt modifikasyonunda kullanılan katkı maddelerinin belirli özelliklere sahip olması gerekmektedir. Kullanılacak katkının,

- Kolay ve ucuz elde edilebilmesi,
- Asfalt karışım sıcaklığında özelliklerini kaybetmemesi ve karışım içinde homojen olarak dağılabilmesi,
- Asfalt karışımın serme ve sıkıştırma sıcaklığında yeterince viskoz olması,
- Yüksek hava sıcaklıklarında bağlayıcının kalıcı deformasyonlara karşı dayanıklı olmasını sağlaması,
- Düşük hava sıcaklıklarında bağlayıcının rijit ve kırılgan olmamasını sağlaması,
- Düşük maliyetli olması gerekmektedir (Whiteoak, 2004).

Ayrıca, modifiye asfalt bağlayıcıların, depolama, serim ve hizmet sırasında sahip oldukları özelliklerini koruması, fiziksel ve kimyasal olarak stabil kalması ve uygulama sırasında püskürtülebilme akışkanlığına sahip olması gerekmektedir (Whiteoak, 2004).

Asfalt bağlayıcıya ilave edilen katkılar farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Katkılara ait genel bir sınıflandırma Tablo 4'te verilmiştir. Ayrıca, yaygın olarak kullanılan asfalt modifiyerlerin bozulmalar üzerindeki olumlu etkileri Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Katkıların genel sınıflandırması (İlcalı, Tayfur, Özen, Sönmez, & Eren)

Tip	Örnek Katkı Maddeleri	Asfalt Kıvamına Etkisi
1. Filler	- Sulfür - Karbon siyahı - Mineral filler: - Taş tozu - Kireç - Portland çimentosu	Sertleştirme
2. Ekstender (Genleştirici)	- Sulfür - Lignin (Odun özütü)	Sertleştirme
3. Kauçuk a. Doğal lateks b. Yapay lateks c. Blok kopolimer d. İşlenmiş kauçuk	POLİMERLER - Doğal kauçuk - Dönüştürülmüş kauçuk - Stiren-Butadien-Stiren (SBS) - Stiren-Butadien-Rubber (SBR)	-
4. Plastik	- Polietilen - Polipropilen - Polivinil-Klorid (PVC) - Etilen-Vinil-Asetat (EVA)	Sertleştirme
5. Bileşim	3 ve 4 deki polimerlerin karışımı	-
6. Fiber	- Doğal fiber - Asbest - Taş yünü - Yapay - Fiberglas - Polyester - Polipropilen	Sertleştirme
7. Oksidan	Manganez tuzu	Sertleştirme
8. Antioksidan	- Karbon - Kalsiyum tuzu - Kurşun karışımları	Yumuşatma
9. Hidrokarbon	- Sertleştirme ve doğal asfaltlar - Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları	Yumuşatma veya sertleştirme
10. Soyulma önleyici	- Kireç - Aminler	Yumuşatma

Tablo 5. Yaygın olarak kullanılan asfalt modifiyerlerin bozulmalar üzerindeki olumlu etkileri (Yılmaz B., 2016)

Sınıfı	Modifiyer Tipi	Bozulmalara Etkisi				
		Kalıcı Deformasyon	Yorulma Çatlakları	Düşük Isı Çatlakları	Nem Hasarı	Yaşlanma
Fillerler	Siyah karbon	x				x
	Mineral: Sönmüş kireç	x			x	x
	Uçucu kül	x				
	Portland çimentosu	x				
	Kiremit tozu	x				
Ekstenderler (Genleştiriciler)	Sülfür	x	x	x		
	Odun lignini				x	
Polimerler-Elastomerler	Stiren-Butadien di-block (SB)	x		x	x	
	Stiren-Butadien-Stiren (SBS)	x	x	x		
	Stiren-Butadien-Rubber (SBR)	x		x		
	Polychlorophene lateks	x	x			
	Doğal kauçuk	x				
	Acrylonite-Butadien-Stiren (ABS)	x				
Polimerler-Plastomerler	Etilen-Vinil-Asetat (EVA)	x	x			
	Etilen-Propilen-Diene-Monomer (EPDM)	x				
	Etilen-Acrylate (EA)	x				
	Polyisobutylene	x				
	Polietilen (Düşük ve yüksek yoğunluklu)	x		x		
	Polipropilen	x				
Ufalanmış kauçuk	Farklı boyutlar, iyileştirmeler, işlemler	x	x	x		
Oksidanlar	Manganez bileşikler	x				
Hidrokarbonlar	Aromatikler			x		
	Naftenik					
	Parafiniks/mum			x		
	Vakum gaz yağı			x		
	Asfaltenler: Yüksek işlem reçineler	x				
	SDA asfaltenler	x				
	Asfaltenler: DEMEX asfaltenler	x				
	Shale oil				x	x
	Doğal asfaltlar: Trinidad	x	x	x	x	
Soyulma önleyiciler	Gilsonit	x			x	
	Aminler: Amidoaminler				x	
	Poliaminler				x	
	Poliamidler				x	
Fiberler	Organo-metalikler				x	
	Polipropilen	x	x	x		
	Polyester	x				
	Fiberglas					
	Çelik	x	x	x		
	Güçlendiriciler	x	x	x		
	Doğal: Selüloz	x				
Antioksidanlar	Mineral	x				
	Karbamatlar: Kurşun			x		x
	Çinko			x		x
	Siyah karbon	x				x
	Kalsiyum tuzlar					x
	Fenoller					x
	Aminler				x	x

1.11. Yapısal Analiz Yöntemleri

Bu bölümde, bor esaslı reçine bileşiğinin ve/veya modifiye asfalt bağlayıcıların kimyasal ve mikro yapısı ile termal karakterizasyonunun belirlenmesi amacıyla kullanılan SEM, FTIR, TGA/DSC ve XRD analiz yöntemleri açıklanmıştır.

1.11.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM)

SEM, heterojen organik ve inorganik malzemelerin mikro metreden nanometre ölçeğine kadar gözlemlenmesine ve analizine izin veren çok yönlü bir karakterizasyon aracıdır. SEM ile çok çeşitli malzemelerin yüzeylerinin üç boyutlu benzer görüntüleri elde edilebilmektedir. Asfalt bağlayıcıların ve karışımların mikro morfolojisinin araştırılmasında SEM cihazı kullanılmaktadır. Cihaz ile numunenin mikro yapısı, kırılma morfolojisi, dispersiyon ve faz dağılımı hakkında bilgi sağlanabilmektedir (Mazumder, Ahmed, Ali, & Lee).

1.11.2. Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (Fourier Transform Infrared-FT-IR)

Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi hızlı, kolay ve tahribatsız bir kantitatif analitik yöntemdir (Petit & Madejova, 2013). FTIR spektroskopisinde, bir numunedeki moleküller kızılötesi radyasyonla uyarılır ve absorbe edilen radyasyonun yoğunluğuna ve frekansına bağlı olarak, bir molekülün yüzeye nasıl bağlandığını ve moleküler bağdaki yapısal değişiklikleri belirlenebilir (Peak, 2013; Binish, Binu, Gopikrishna, & Mohan, 2022). Asfalt bağlayıcılar genel olarak, FTIR spektrumlarında bağlayıcı ve/veya modifiyerlere ait piklerin varlığı veya yokluğu ile niteliksel olarak analiz edilebilmektedir. Karmaşık yapısı nedeniyle, asfalt bağlayıcının spektrumu, parmak izi niteliğinde geniş aralıkta ($600-1500\text{ cm}^{-1}$) örtüşen çok sayıda pik değerine sahiptir. Bu sayede, bağlayıcının içindeki katkı maddeleri kolaylıkla tanımlanabilmektedir (Weigel, Wetekam, & Mollenhauer, 2023).

1.11.3. Eşzamanlı Termal Analiz (Thermogravimetric Analysis/Differential Scanning Calorimetry-TGA/DSC)

Termogravimetrik analiz (TGA), belirli ısıtma hızı ve sıcaklık koşulları altında malzemelerin termal kararlılığını ölçmek için kullanılan bir tekniktir (Ebnesajjad, 2006; Loganathan, Valapa, Mishra,, Pugazhenth, & Thomas, 2017). Bu yöntemde, sıcaklık artışı ile numune ağırlığındaki değişim ölçülerek termal olaylar belirlenir (Ebnesajjad, 2006). Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), polimerik malzemelerin fiziksel özelliklerini ve termal geçişlerini zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlamak için kullanılan analitik bir araçtır (Goel, ve diğerleri, 2022; Kumar Singh & Singh, 2022). Malzemelerin termal analizi DSC cihazı ile ısı akış yöntemine göre yapılmaktadır. TGA, ısı işlem sırasında kütle miktarındaki değişiklikleri belirlerken, DSC, malzemenin ısı kapasitesindeki değişimin sıcaklık ile ilişkisini belirler (Sorolla-Rosario, Llorca-Porcel,, Pérez-Martínez, Lozano-Castelló, & Bueno-López, 2022). DSC analizi, faz geçişi, erime ve camsı geçiş sıcaklığı, oksidatif stabilite, kristalleşme sıcaklığı ve süresi gibi malzeme ile ilgili fiziksel ve kimyasal değişime odaklanır. TGA analizi ise malzemenin bozunma hızı, yükseltgenme, indirgenme vb. özelliklerine odaklanır (Sai Revanth, ve diğerleri, 2020). TGA/DSC analizleri ile katkı maddelerinin, bağlayıcıların belirli sıcaklık aralığındaki fiziksel özellikleri belirlenebilmektedir.

1.11.4. X-Işını Difraksiyonu (X-Ray Diffraction Analysis-XRD)

X-ışını kırınımı (XRD), malzemelerin doğasını kristal veya amorf olarak belirlemek için araştırma ve endüstride yaygın olarak kullanılan bir cihazdır (Vishwakarma & Uthaman, 2020; Gonon, 2021). Özellikle kristal malzemeler için kullanılan yöntem, kristal boyutu ve şekli, kristallik, farklı seviyelerde iç elastik gerilmeler, kristal kusurları ve yüzeye yakın karakterizasyon gibi diğer yapısal parametreler hakkında bilgi sağlar (El Bourakadi, Bouhfid, & El Kacem Qaiss, 2021; Gonon, 2021). XRD yöntemi, tahribatsız bir analitik tekniktir. Atom saçılmasından üretilen kırınım modeli, malzemenin içindeki atomik düzenleme hakkında bilgi vermektedir (Azahar, Jaya, Hainin, Hasan, & Shaffie, 2019).

1.12. Kolofan Reçine

Reçine, iğne yapraklı ağaç türlerinden salgılanan, katı veya yarı katı olan, suda çözünmeyen, ısıtılınca eriyen doğal bir karışımdır. Reçineler, genel olarak reçine asitlerinden ve terpenlerden oluşmaktadır. Reçineler, üretim teknikleri ve ağaç türlerine göre farklılık göstermektedir. Reçineler, çam türevi ağaçlardan üç farklı teknikle elde edilmektedir (Şekil 38). Bu yöntemler; akma reçine, sülfat reçinesi ve ekstraksiyon reçine yöntemi olarak gruplanmaktadır. Akma reçine yöntemi bilinen en eski yöntemdir. Bu yöntemde, farklı tekniklerle dikili çam ağaçlarının gövdesinde yaralar açılarak elde edilen akma reçinedir. İkinci yöntem olan sülfat reçinesi yönteminde, kraft yöntemiyle (sülfat yöntemi) kâğıt üretimi sırasında yan ürün olarak elde edilen sülfat reçinesidir. Bu yöntemle; sülfat reçinesi, tall oil ve yağ asitleri elde edilmektedir. Son yöntem olan ekstraksiyon reçine yönteminde ise, ormanda üretim artığı olarak bırakılan dip kütük ve köklerinden ekstraksiyon yöntemiyle reçinenin elde edilmesidir. Bu yöntemle; ekstraksiyon terebentin, ekstraksiyon kolofan, dipenten ve doğal pine oil elde edilmektedir. 1-10 yıl arası toprakta beklemiş dip kütüklerdeki ortalama reçine miktarı % 14.44, köklerdeki ise % 13.55'dir (Öz, Deniz, Yaşar, Komut, & Fidan, 2010; Huş, 1997; Reçine Eylem Planı, 2017; Angın, 2020).



Şekil 38. Çam ağacından reçine üretim teknikleri ve elde edilen ürünler (Angın, 2020)

Endüstriyel reçine üretimi için fıstık çamı, kızılçam ve sarıçam ağaçları kullanılmaktadır. Fıstık çamı, reçine üretimi için uygundur ancak reçine üretimi ile kozalaklardaki tohum azalmaktadır. Bu nedenle, ülkemizde fıstık çamlarının reçineden ziyade çam fıstığı üretiminde değerlendirilmesinin daha uygun olduğu belirtilmiştir. Karaçamlar, hava sıcaklığı düşük, rakımı yüksek ve yamaçlarda yetiştiği için reçine üretiminde uygun görülmemektedir. Ancak, kuzey ülkelerinde karaçamlardan da reçine üretimi yapıldığı belirtilmiştir. Sarıçamlar, kuzey yamaçlarda yayılış gösteren bir tür olup reçine üretimi için uygun görülmemektedir. Kızılçamlar, akma reçine ve kâğıt sanayi için kağıtlık odun üretimi için uygun ağaç türleridir. Genel olarak maki alanlarda, Akdeniz ve Ege kıyıları boyunca yayılış gösteren kızılçamlar ülkemizde 5.255.544 ha'lık alana sahiptir (URL-10, 2023). Ülkemizdeki reçineli çam türlerinin ağaç kısımlarına göre elde edilen reçine miktarları Tablo 6'da verilmiştir (Reçine Eylem Planı, 2017).

Tablo 6. Çam ağacı türlerine göre ortalama üretilen reçine miktarları

Çam Türleri	Kanal Genişliği	1cm ² 'deki Sayıları	Reçine miktarı, %		
			Diri Odun	Öz Odun	Gövde
Fıstık Çamı (P.pinea)	126.0	33	3,47	14,16	7,75
Karaçam (P.nigra)	124.0	59	3,21	10,25	4,68
Kızılçam (P.brutia)	100.0	50	2,74	18,96	7,32
Sarıçam (P.silvestris)	93.3	---	4,19	9,17	6,81

Reçine temel olarak, kolofan ve terebentinden oluşmaktadır. Reçine distilasyon işlemine tabi tutularak iki kısma ayrılmaktadır. Terebentin reçinenin uçucu kısmı olup içerisinde terpenler bulunur. Reçine asitlerini içeren diğer kısım ise kolofan reçinesidir. Akma reçinenin içerisinde ortalama %70 kolofan reçinesi sahip olduğu bilinmektedir (Huş, 1997; Reçine Eylem Planı, 2017).

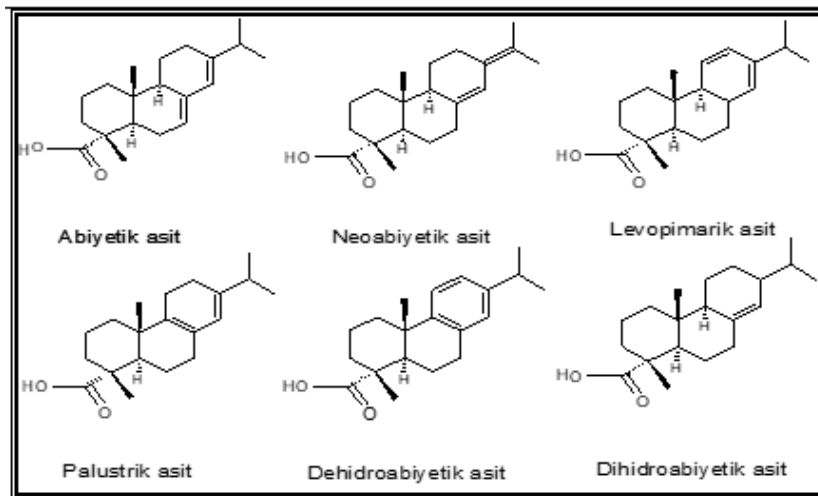
Kolofan reçinesi, kozalaklı ağaçlardan ve çoğunlukla çam ağaçlarından elde edilen katı bir doğal reçinedir. Genellikle akma reçineden elde edilse de sülfat ve ekstraksiyon yöntemiyle elde edilen reçinelerden de kolofan reçinesi üretimi yapılmaktadır. Bu sebeple, kolofan reçinesi literatürde 'rosin' olarak geçmektedir (Reçine Eylem Planı, 2017; Angın, 2020; Soltes, J. Zinkel, & Zinkel, 1989). Kolofan reçinesi, ağaç türüne, üretim tekniğine ve

ağacın coğrafi konumuna göre kimyasal bileşimi farklılık göstermektedir. Ancak, Kimyasal formülü $C_{19}H_{29}COOH$ olan kolofan reçinesi genel olarak %90 reçine asidi ve %10 nötral maddelerden oluşur (Şekil 39).



Şekil 39. Farklı kolofan reçineleri

Kolofan reçinesi, hidrokarbon reçinelerin aksine bir polimer değildir, farklı moleküllerin karışımıdır. Tek bir karboksilli asit grubu ile karakterize olan kolofan reçine, abiyetik asit ve 4 farklı abiyetik asit izomerinden (neoabiyetik, levopimarik, palustrik ve dehidroabiyetikasit) oluşmaktadır. Abiyetik asit ve izomerlerinin kimyasal gösterimi Şekil 40'dadır (Abdel-Raouf & Abdul-Raheim, 2018). Reçine asitleri hemen hemen bütün polimerlerle geniş bir uyumluluğa sahiptir. Alkol, benzen, karbon tetraklorür, alifatik, aromatik ve klorlu hidrokarbonlar içerisinde çözünebilir. Kolofan reçine, başta ilaç sektörü olmak üzere, yapıştırıcı, boya, mürekkep üretimleri gibi, birçok endüstriyel ürün üretimlerinde kullanılmaktadır (URL-11, 2023).



Şekil 40. Abietat tipi reçine asitlerinin kimyasal yapısı

Kolofan reçinesi, kolofanın rengine ve yumuşama noktasına göre çeşitli sınıflara ayrılır. Yumuşama noktası, kolofanın basınç altında bozulabileceği sıcaklıktır ve kolofanın yumuşamam noktası düştükçe rengi koyulaşmaktadır. Tablo 7’de reçinelerin dereceleri ve özellikleri gösterilmektedir (Abdel-Raouf & Abdul-Raheim, 2018).

Tablo 7. Derecelerine göre reçinelerin fiziksel özellikleri

Öge	X	WW	ÇG	N	M	K
Renk	Biraz sarı	Solgun sarı	Sarı	Derin sarı	Sarı kahverengi	Sarı kırmızı
	Standart cam rengi rosin parçasına denk gelir					
Dış görünüş	Şeffaf katı					
Yumuşama noktası (top&yüzük)	76 °C		75 °C		74 °C	
Asit no. (mg KOH/g)	166 dk.		165 dk.		164 dk.	
Sabunlaşmaz madde	% 5 maks.				% 6 maks.	
Alkol çözünmez malzeme	% 0,03 maks.				% 0,04 maks.	
Kül (%), maks.	0,02		0,03		0,04	

1.13. Bor

Bor, periyodik tabloda B simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 olan, yarı metal ve yarı iletken özelliğe sahip periyodik cetvelin 3A grubunda yer alan bir elementtir. Borun, element olarak doğada B10 ve B11 olan iki ayrı kararlı izotopu bulunmaktadır. B10 izotopunun doğada bulunma oranı %19,1-20,3, B11’in ise %79,7-80,9’dur (URL-12, 2023; Yakıncı & Kök, 2016). Bor cevherinin görüntüsü Şekil 41’de verilmiştir.



Şekil 41. Bor cevheri görünümü

Doğada elementel halde bulunmayan bor, diğer elementlerle farklı özellikler gösteren bileşikler oluşturmaktadır. Bor elementi en çok oksijenle bağ kurduğu için çok fazla bor-oksijen bileşiği bulunmaktadır ve bu bileşiklere borat denir. Boratlar, genelde kalsiyum, sodyum ve magnezyum gibi metallerle bileşik halinde bulunurlar (URL-12, 2023; URL-13, 2023, 2023; Kuru & Yarat, 2017).

Bor mineralleri yapılarında farklı oranlarda bor oksit içeren doğal bileşiklerdir ve doğada 230'dan farklı bor minerali bulunmaktadır. Ticari açıdan en önemli bor mineralleri; Tinkal, Kolemanit, Kernit, Üleksit, Pandemit, Borasit, Szaybelit ve Hidroborasit'tir. Türkiye'de yaygın olarak bulunan bor mineralleri ise; tinkal, kolemanit ve üleksittir. Bor madenlerinin değeri genellikle içindeki bor oksit (B_2O_3) ile ölçülmekte, yüksek oranda B_2O_3 bileşiğine sahip olanlar daha değerli kabul edilmektedir (Tombal, Özkan, Ünver, & Osmanlıoğlu, 2016; URL-12, 2023).

Dünyadaki önemli bor yatakları Türkiye, Rusya ve Amerika'da olup dünya ticari bor rezervleri 4 bölgede toplanmaktadır. Bunlar; ABD Kaliforniya Eyaletinin güneyinde yer alan "Mojave Çölü", Güney Amerika'da yer alan "And Kemer", Türkiye'nin de yer aldığı "Güney-Orta Asya Orojenik Kemer" ve Doğu Rusya'dır. Ekonomik boyutlardaki bor yatakları ise, daha çok Türkiye ve ABD'nin kural, volkanik hidrotermal aktivitesinin yüksek olduğu bölgelerde bulunmaktadır (URL-14, 2023; URL-15, 2023). Dünyadaki toplam bor rezervi Tablo 8'de gösterilmiştir (URL-15, 2023).

Tablo 8. Dünyadaki bor rezervi

ÜLKE	TOPLAM REZERV (Bin Ton B ₂ O ₃)	TOPLAM REZERV (%B ₂ O ₃)
Türkiye	948.712	73,4
Rusya	100.000	7,7
A.B.D.	80.000	6,2
Şili	41.000	3,2
Çin	36.000	2,8
Peru	22.000	1,7
Sırbistan	21.000	1,6
Bolivya	19.000	1,5
Kazakistan	15.000	1,2
Arjantin	9.000	0,7
TOPLAM	1.310.300	100

Dünya bor rezervlerinin %73'üne sahip olan Türkiye'de bilinen bor yatakları; Eskişehir – Kırka, Kütahya- Emet, Balıkesir Bigadiç, Bursa-Kestelek'te bulunmaktadır. Türkiye'de rezerv açısından en çok bulunan bor mineralleri Tinkal ve Kolemanittir. Türkiye'de Tinkal yatakları Eskişehir – Kırka'da, kolemanit yatakları ise Kütahya – Emet, Balıkesir – Bigadiç ve Bursa – Kestelek'te bulunmaktadır. Ayrıca, Balıkesir – Bigadiç'te üleksit rezervi mevcut olup Bursa – Kestelek'te bazen üleksit yan ürün olarak elde edilmektedir (URL-15, 2023; URL-16, 2023). Türkiye bor rezervlerinin dağılımı Tablo 9'da verilmiştir (URL-15, 2023).

Tablo 9. Türkiye'deki bor rezervleri dağılımı

BÖLGE	CEVHER CİNSİ	TOPLAM (TON)
EMET	Kolemanti-Üleksit-Probertit	1.811.072.520
KIRKA	Tinkal	824.720.950
BİGADIÇ	Kolemanit-Üleksit	628.350.480
KESTELEK	Kolemanit	5.254.920
	TOPLAM	3.269.398.870

Bor bileşiklerinin kullanım alanları geniş bir yelpazeye sahiptir. Bor bileşikleri; cam, seramik, temizlik, tarım, kozmetik, metalürji ve sağlık alanlarında kullanılmaktadır (URL-12, 2023; URL-17, 2023; Pişkin, 2016).

Bor oksit (dibor trioksit), amorf camsı halde ve iki farklı forma sahip kristal yapıda bulunabilir (Şekil 42). Amorf formu renksiz, kokusuz, sert, camsı yapıya sahip bir katıdır ve genellikle borik asidin dehidrasyonu yöntemiyle üretilir. Bor oksit, yarı iletken malzeme ve bor kimyasalları üretimi ile cam ve seramik yapımı gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Töre & Ay, 2004; URL-18, 2023).



Şekil 42. Bor oksit

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bor oksit ve kolofan reçinesinden yeni bir katkı maddesi sentezleyerek asfaltın modifiye edilmesi ve katkının asfalt kaplamalar üzerindeki fiziksel, reolojik ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yapılan bu çalışmada kullanılan malzemeler, uygulanan analiz ve deneyler kapsamında izlenen yöntem aşağıdaki gibidir.

Kullanılan malzemeler:

- Sentezlenen BOR esaslı reçine Bileşiği (BORB)
- B50/70 penetrasyon asfalt çimentosu (bitüm)
- Agregat

İzlenen yöntem,

- Bor esaslı reçine bileşiğinin laboratuvar ortamında sentezlenmesi,
- Katkının mikro yapısının incelenerek asfalt modifiyeri olarak uygunluğunun analizlenmesi,
- Katkının asfaltın reolojik özellikleri üzerine etkisinin belirlenmesi,
- Katkının asfalt kaplama performansı üzerine etkisinin araştırılması ve optimum katkı oranıyla ticari modifiyerin maliyet açısından karşılaştırılmasını içermektedir.

a) Yapısal Analiz İçin Uygulanan Deneyler

- SEM
- FT-IR
- TGA/DSC
- XRD

b) Fiziksel Özellikler İçin Uygulanan Deneyler

- Penetrasyon
- Yumuşama Noktası
- Düktilite-Kuvvet ölçümlü düktilite
- Elastik Geri Dönme
- Parlama ve Yanma Noktası
- Fraass Kırılma Noktası
- Özgül Ağırlık

- Trikloretilende Çözünürlük
- Nicholson Soyulma

c) Reolojik Özellikler İçin Uygulanan Deneyler

- RTFOT
- PAV
- RV
- DSR
- BBR
- Depolama Stabilitesi
- MSCR
- LAS

d) Asfalt Karışımlara Uygulanan Deneyler

- Marshall Stabilitesi ve Akma
- Dolaylı Çekme Mukavemeti
- Modifiye Lottman
- Dinamik (Tekrarlı) Sünme
- İndirekt Çekme Yorulma, şeklindedir.

2.1. Kullanılan Malzemeler

Kolofan reçinesi (rosin), genellikle taze sıvı reçine içindeki terpen bileşenlerinin buharlaştırılmasıyla çam ağaçlarından elde edilen doğal bir reçinedir (Wang, Liu, Liu, Zhang, & Xian, 2009). Karbon (C), oksijen (O) ve hidrojen (H) atomlarından oluşan rosin, doğal ve sürdürülebilir bir maddedir (Zhang J. , 2012). Bu çalışmada kullanılan kolofan Belpas Ankara Termoplastik ve Bakım Onarım Hizmetleri AŞ'den temin edilmiş olup, özellikleri Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Kolofan reçinenin özellikleri

Safılık	% 95-97 min.
Molar kütle	302,45 gr/mol
Erime sıcaklığı	72-75 °C
Özgül ağırlık	1,06-1,07 gr/cm ³

Bor oksit, borik asidin dehidrasyonu ile elde edilen kokusuz, sert, camsı bir kimyasal maddedir (Töre & Ay, 2004). Bu çalışmada kullanılan bor oksit, Balıkesir/Bandırma'da bulunan ve Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'ne bağlı bir işletmeden temin edilmiştir. Bor oksidin özellikleri Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. Bor oksidin özellikleri

Özellikler	Değer	Bileşenler	Miktarı
Özgül ağırlık	2.17 gr/cm ³	B ₂ O ₃	% 98.00min.
Moleküler ağırlık	69.62 gr/mol	SO ₄	500 ppm max
Erime noktası	450 °C	Cl	10 ppm max.
Kaynama noktası	1860 °C	Fe	35 ppm max.
pH	4.64	+0.315 mm	%75.00 min.

Bu çalışmada, Türkiye Petrolleri Rafinerisi'nden (İzmit) temin edilen PG 64-16 asfalt çimentosu (penetrasyon derecesi 50/70) kullanılmıştır. Saf asfalt bağlayıcının özelliklerini belirlemek için Tablo 12'de verilen geleneksel testler yapılmıştır.

Tablo 12. Saf asfalt bağlayıcının fiziksel özellikleri

Özellikler	Değer	Standart	Sınır değerler	
Penetrasyon (25 °C, dmm)	56	ASTM D5/D5M-13	50–70	
Yumuşama noktası (°C)	50	ASTM D36/D36M-14	46–54	
Düktilite (25 °C, cm)	100 +	ASTM D113-17	100+	
Parlama noktası (°C)	249	ASTM D92-18	≥230	
Özgül ağırlık (g/cm³)	1.028	ASTM D70M-21	1.0–1.1	
Viskozite (135 °C, cP)	500	ASTM D4402M-15	≤300	
Viskozite (165 °C, cP)	100	ASTM D4402M-15	–	
Viskozite (180 °C, cP)	50	ASTM D4402M-15	–	
SARA analizi	Kütle fraksiyonları (%)			
	Doygunlar	Aromatikler	Reçineler	Asfaltenler
	8.8	42	25	10

2.2. Katkı Maddesinin Sentezlenmesi

Hedeflenen katkı maddesinin elde edilmesi için, laboratuvar ortamında bor oksit ve kolofan reçinesi içeren birçok sentez katkı maddesi üretilmiştir. Sentezlenen her maddenin asfalt bağlayıcıya uygunluğu gerek fiziksel-reolojik deneylerle gerekse yapısal analizlerle

araştırılmıştır. Asfalt bağlayıcı matrisinde homojen dağılım gösterecek, adezyon özelliği yüksek, bağlayıcının temel özelliklerini iyileştirecek ve maliyeti diğer asfalt modifiyerlerine göre düşük olabilecek yeni katkı, uzun soluklu bir çalışmanın neticesinde elde edilmiştir. Katkının prototip olabilecek küçük oranlarda elde edilmesi için üretim prosesi belirlenmiştir.

Bor esaslı reçine bileşiği katkısı, önceki çalışmalarda kullanılan yöntemler göz önünde bulundurularak laboratuvar ortamında sentezlenmiştir (Gao, Liu, & Yang, 1999; Zhang, Liu, Ying, & Dong, 2010; Arslan D. , Gürü, Çubuk, & Çubuk, Improvement of bitumen and bituminous mixtures performances by triethylene glycol based synthetic polyboron, 2011; Arslan, Gürü, & Çubuk, Performance Assessment of Organic-Based Synthetic Calcium And Boric Acid Modified Bitumens, 2012; Deng, Shi, Liu, Liu, & Wang, 2018). Kolofan reçinesindeki olası safsızlıkları ortamdaki uzaklaştırarak saf reçine asitleri elde etmek amacıyla katkı oluşturulmadan önce kolofan reçine, aseton içinde çözülmüştür. Aseton berrak, keskin kokulu ve oldukça yanıcı sıvı bir madde olup, endüstriyel ve evsel ürünlerde çözücü olarak kullanılmaktadır (Bradbeery, 2012). Asetonun buharlaştırılmasından sonra ısıtıcı üzerindeki cam behere 30,2 g kütleye sahip 302,45 g/mol abiyetik asit ve/veya türevi reçine ile eşdeğer oranda 6,96 g/mol bor oksit (MA: 69,6 g/mol) eklenmiş ve malzemeler bir süre cam çubuk mikser ile karıştırılmıştır. Görsel olarak karışımda homojen sağlandığı anda katalizör olarak yaklaşık 5 ml konsantre H_2SO_4 eklenmiş ve karıştırma işlemine devam edilmiştir. Yarım saatlik karıştırma süresi sonrasında cam beherden reçine asitlerine ait uçucu olan maddeler buharlaşmaya başlamıştır. Yaklaşık 1 saat devam eden reaksiyonda reaksiyona girmeyen bor oksit soğukta aseton ile çözülerek çözünmeyen kısım ortamdaki uzaklaştırılmıştır. Aseton çözeltilisi, oda sıcaklığında buharlaştırılmış ve yaklaşık 3.3 g olan çözünmeyen kısımlar, kalın filtre kâğıdı ile karışımdan çıkarılmıştır. Sonuç olarak, istenilen kıvamda ve homojenite yeni katkı elde edilmiştir. Katkı koyu renkli ve ortam sıcaklığında katıdır. Bu sentez katkı maddesi endüstriyel olarak kısa bir üretim süreci ile üretilmektedir. Bor esaslı reçine bileşiği (BORB) sentez katkısı maddesinin genel görünümü Şekil 43'de verilmiştir.



Şekil 43. Katkının genel görüntüsü

Elde edilen sentez katkı maddesinin kimyasal yapısı, FT-IR, DSC/TG ve XRD analizleriyle belirlenirken mikro yapısı SEM cihazıyla görüntülenmiştir. Analizlerin yapılışı detaylı olarak Bölüm 2.4’te anlatılmıştır.

2.3. Modifiye Asfalt Bağlayıcıların Hazırlanması

PG 64-16 performans sınıfı saf asfalt bağlayıcının 150 ± 5 °C sıcaklıkta etüvde ısıtılarak akışkan hale gelmesi sağlanmıştır. Etüvde karıştırma kapları ve katkı da aynı sıcaklık değerinde yaklaşık yarım saat bekletilmiştir. Karıştırma kaplarına 1000 gr saf asfalt bağlayıcı ağırlığına göre hesaplanan %0,5, %1, %1,5 ve %3 oranlarında sentez katkı maddesi ayrı ayrı eklenmiştir. Modifiyeli asfaltlar, 150 ± 5 °C’de 2000 rpm’de 30 dakika boyunca yüksek parçalayıcı bir karıştırıcı (high shear mixer) kullanılarak üretilmiştir (Şekil 44). Çalışma kapsamında kullanılan bağlayıcılar ve gösterimleri Tablo 13’te verilmiştir. Yapılan ön çalışmalarda %2 BORB modifiyeli asfaltın test sonuçlarının %1,5 BORB modifiyeli asfalta yakın değerlere sahip olduğu ve katkının etkisinin tam olarak belirlenemediği görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada %3 BORB miktarı kullanılmıştır. Ayrıca, modifikasyon sırasında meydana gelen yaşlanmanın deney sonuçlarını etkilememesi adına saf asfalt bağlayıcı da aynı karışım prosedürüne tabi tutulmuştur.



Şekil 44. Modifiye asfalt bağlayıcıların üretilmesi (Yüksek Parçalayıcı Karıştırıcı)

Tablo 13. Çalışmalarda kullanılan bağlayıcılar ve gösterimleri

Katkı (BORB)İçeriği	Gösterim
50/70 Asfalt bağlayıcı	BA
50/70 Asfalt bağlayıcı + % 0.5 BORB	BA0.5
50/70 Asfalt bağlayıcı + % 1.0 BORB	BA1.0
50/70 Asfalt bağlayıcı + % 1.5 BORB	BA1.5
50/70 Asfalt bağlayıcı + % 3.0 BORB	BA3.0

2.4. Asfalt Bağlayıcıların Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi

Bor esaslı reçine bileşiğinin kimyasal yapısı ve yapıdaki değişimler FTIR ve XRD analizleri ile belirlenmiştir. Sentez katkı maddesinin mikro yapısı SEM cihazı ile detaylı bir şekilde incelenmiş ve termal karakterizasyonu TGA/DSC analizi ile belirlenmiştir. Ayrıca sentezlenen katkının saf asfalttaki dağılımı ve morfolojik yapısı SEM cihazı ile analiz edilirken, FTIR analizi ile asfalt bağlayıcı içinde katkının varlığı incelenmiştir.

2.4.1. SEM Analizi

BORB katkı maddesi ve %3 BORB modifiyeli asfaltın mikro morfolojisini araştırmak için SEM cihazı kullanılmıştır. Numuneler çok ince bir altın tabakası ile kaplanmış ve iletken bir karbon bandı üzerine yerleştirilmiştir. Elektron yüksek voltajı (EHT) 5 kW olup farklı büyütme oranları kullanılmıştır. Her örnek için 5 farklı bölgeden alınan SEM görüntülemesi yarım saat süreyle yapılmıştır. Numunelerin mikro yapısındaki kırılma morfolojisi, dağılımı ve yapı morfolojisi incelenmiştir. Kullanılan SEM cihazı Sigma 300 VP (Zeiss, Almanya) modelidir (şekil 45).



şekil 45. SEM cihazı

2.4.2. FT-IR Analizi

Saf ve %3 BORB modifiyeli asfalt bağlayıcı ile kolofan reçinesinin kimyasal yapısı FTIR yöntemi ile belirlenmiştir. Spektral analiz 2 cm^{-1} çözünürlükte ve 600 cm^{-1} ile 4000 cm^{-1} arasında değişen bir dalga boyunda gerçekteştirilmiştir. FTIR ölçümleri $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 'de yapılmış olup kullanılan FTIR cihazı 1600 FTIR (Perkin Elmer, ABD) modelidir (şekil 46).



Şekil 46. FTIR spektrometresi

2.4.3. TGA/DSC Analizleri

Sıcaklık artışına bağlı olarak malzemenin kütlesindeki değişimler TGA cihazı kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz 20 °C - 400 °C sıcaklık aralığında 7 °C/dk sıcaklık artışı ile yapılmıştır. Kullanılan TGA cihazı Exstar SII 6300 (Seiko Instruments Inc., Japonya) modeldir (Şekil 47a).

Malzemenin termal analizi DSC cihazı ile ısı akış yöntemine göre yapılmıştır. Termal analiz -20 °C ile 300 °C sıcaklık aralığında 15 °C/dk sıcaklık artışı ile yapılmıştır. Kullanılan DSC cihazı DSC-141 (Setaram Kep Technologies, ABD) modeldir (Şekil 47b). BORB katkı maddesine bir kez DSC ve TGA analizleri uygulanmıştır.



Şekil 47. TGA/DSC cihazı

2.4.4. XRD Analizi

Sentez katkı maddesinin XRD analizi, Cu K α 1 yöntemine göre yapılmıştır ve difraktogramlar, 0.0013°'lik bir adım boyutu kullanılarak 10° ila 90° arasındaki 2° aralığında taranmıştır. BORB katkısı üzerinde iki kez XRD analizi yapılmıştır ve XRD kırınım dosyası veri tabanındaki standart modellerle karşılaştırılmıştır. Kullanılan XRD cihazı Empyrean difraktometre (Malvern Panalytical, Birleşik Krallık) modelidir (Şekil 48).



Şekil 48. XRD cihazı

2.5. Asfalt Bağlayıcıların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Saf ve modifiye asfaltlara konvansiyonel deneylerden; penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, kuvvet ölçümlü duktilite, elastik geri dönme, parlama noktası, trikloretilende çözünürlük, özgül ağırlık, Fraass kırılma noktası deneyleri yapılmıştır. Nicholson soyulma deneyi ise, saf ve modifiye asfaltların belirlenen miktar ve özellikteki agregayla karıştırılarak yapılmıştır.

2.6. Asfalt Bağlayıcıların Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında saf ve modifiye asfalt bağlayıcıların reolojik karakterizasyonların belirlenmesi amacıyla Superpave deneylerinden dinamik kayma reometresi (DSR), dönel ince film halinde ısıtma (RTFO), basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) ve kırılgan eğme reometresi (BBR) deneyleri uygulanmıştır.

2.6.1. RTFOT Deneyi Uygulaması

Saf ve modifiye asfalt bağlayıcıların kısa süreli yaşlandırma sonrasındaki kütle kaybı ile fiziksel ve reolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla RTFOT deneyi yapılmıştır. Deneyde 8 adet cam şişenin darası alınarak her birine akışkan haldeki asfalt bağlayıcıdan 35 ± 0.5 gr ayrı ayrı dökülmüştür. Numuneler önceden ısıtılmış 163°C 'deki cihazın içine yerleştirilmiş ve cihaz, numuneler istenilen sıcaklığa erişebilmesi için 10 dakikaya ayarlanarak dönmeye başlamıştır. Burada, deney sonucunun etkilenmemesi için kullanılmayan şişelerde cihazdaki yuvalarına yerleştirilmiştir. 10 dakikalık süreden sonra numuneler 75 dakika boyunca dönme hareketi ile hava akışı ve yüksek ısıya maruz bırakılmıştır. Deney bittiğinde 2 adet şişedeki bağlayıcı miktarları ölçülerek bağlayıcının kütle kaybı belirlenirken kalan şişelerdeki asfalt bağlayıcılarda bir penetrasyon kabına aktarılmıştır. Kütle kaybı için numuneler 0,001 g hassasiyetle tartılmıştır. Yaşlandırılmamış numunelere uygulanan fiziksel deneylerden penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite deneyleri yaşlandırılmış numunelere de uygulanarak yaşlanmanın etkileri belirlenmiştir. Ayrıca, RTFOT ile yaşlandırılan numunelere tekerlek izi dayanımı için DSR deneyi de uygulanmıştır.

2.6.2. PAV Deneyi Uygulaması

Saf ve modifiye asfalt bağlayıcıların uzun süreli yaşlandırılması basınçlı bir yaşlandırma kabı (PAV) kullanılarak simüle edilir. Deneyde, kaplamanın uzun süre kullanımı sırasında yaşlanmayı simüle etmek için bağlayıcı numuneleri ısı ve basınca maruz bırakır. Deneyde, üretim ve kullanım sırasında kısa süreli yaşlanmaya maruz kalmış (RTFOT) numuneler kullanılmaktadır. RTFO tortusu, akışkan hale gelene kadar etüvde

ısıtılır ve homojenlik sağlanabilmesi için karıştırılır. Deney numuneleri, 100°C sıcaklıkta, 2.1 ± 0.1 MPa basınç altında, 20 saat boyunca ısı ve basınca maruz bırakılmıştır. Deney sıcaklık değeri performans sınıfına göre 90°C ile 110°C arasında değişmektedir. Performans sınıfı PG 46 ve PG 52 olan bağlayıcılar için deney sıcaklığının 90°C, PG 58, PG 64 olan bağlayıcılar için 100°C ve PG 70, PG 76, PG 80 olan bağlayıcılar için ise 100- 110°C olması gerekmektedir (ASTM D6521, 2013). Deney sonunda numunelerde oluşan hava kabarcıklarının giderilmesi için numuneler 170°C sıcaklıkta, 30 dakika boyunca gaz alma cihazında bekletilmiştir. PAV ile yaşlandırılmış numunelere BBR ve DSR deneyleri uygulanmıştır.

2.6.3. RV Deneyi Uygulaması

BORB katkı maddesinin saf bağlayıcının işlenebilirliği üzerine etkisinin belirlenmesi amacıyla RV deneyi yapılmıştır. Akışkan hale gelen asfalt bağlayıcıdan yaklaşık 11 gr alınarak silindirik numune kabına dökülmüştür. Asfalt bağlayıcının miktarı kullanılan mil boyutuna göre değişmektedir. Deneyde kullanılan mil boyutu No.29'dur. Saf ve modifiyeli asfalt bağlayıcıların 90°C, 105°C, 135°C, 165°C ve 180°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri Brookfield DV2T marka viskozimetre yardımıyla belirlenmiştir. Aynı zamanda, değer sonuçlarından karışımında kullanılması gereken karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları belirlenmiştir.

2.6.4. DSR Deneyi Uygulaması

Saf ve modifiye asfalt bağlayıcıların tekerlek izine ve yorulmaya karşı dayanımın belirlenmesi amacıyla DSR deneyi yapılmıştır. Kullanılan DSR cihazı Kinexus model reometredir. Tekerlek izi dayanımı için yaşlandırılmamış ve RTFO deneyi ile kısa süreli yaşlandırılmış numuneler kullanılmıştır. Deney, 120 Pa sabit gerilme altında, 1.59 Hz (10 rad/sn) frekansta her bağlayıcıya 58°C, 64°C ve 70°C sıcaklıklarda ayrı ayrı uygulanmıştır. Yorulma dayanımı için ise PAV deneyi ile uzun süreli yaşlandırılmış numuneler kullanılmıştır. Deney, yüksek sıcaklık performans sınıfına göre, her numuneye 22°C, 25°C ve 28°C sıcaklıklarda uygulanmıştır. Ayrıca, bağlayıcıların farklı şartlardaki reolojik davranışının belirlenmesi amacıyla yaşlandırılmamış (saf) bağlayıcılara 40, 50, 60 ve 70°C

sıcaklıkta 0,1-100 rad/sn. frekans aralığında 31 farklı frekansta DSR cihazı ile frekans analizi yapılarak 40 C referans sıcaklıktaki ana eğriler (master curve) çizilmiştir.

2.6.5. BBR Deneyi Uygulaması

Asfalt bağlayıcıların düşük sıcaklık çatlaklarına karşı dayanımın belirlenmesi amacıyla BBR deneyi yapılmıştır. Deney, ATS marka reometre ile -6 ve -12 °C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneyde PAV ile uzun süreli yaşlandırılmış numuneler, kalıplarına dökülmüştür (Şekil 49). Spatula yardımıyla yüzeyi düzeltilen numuneler kalıptan çıkarılarak cihaza yerleştirilmiştir. Belli bir süre cihaz içinde bekletilen numunelere asfalt numunenin orta noktasına 980 ± 50 mN kuvvetindeki yük 240 saniye boyunca uygulanmıştır. Deney sonunda, bağlayıcılara ait sünme rijitliği ve sünme oranı değerleri belirlenmiştir.



Şekil 49. BBR deneyi için hazırlanan numuneler

2.6.6. Depolama Stabilitesi Deneyi Uygulaması

Asfalt bağlayıcıların faz ayrılmalarına ve depolamaya karşı dayanımlarının belirlenmesi amacıyla depolama stabilitesi deneyi yapılmıştır. Akışkan hale gelen bağlayıcılar alüminyum tüplerin içine doldurularak ağızları sıkıca kapatılmıştır. Numuneler, önceden ısıtılmış etüve dik olacak şekilde yerleştirilmiş ve $180 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıkta, 72 ± 1 saat boyunca etüvde muhafaza edilmişlerdir. Süre sonunda, numuneler etüvden çıkarılarak soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan numuneler tüplerden çıkarılmış ve silindirik numuneler yatay zemin üzerinde 3 eşit parçaya bölünmüştür. Alt ve üst parçalar yapılacak deneyler için

ayrı ayrı saklanırken orta parça kullanılmayarak atılmıştır. Deneyle ilgili görseller Şekil 50-51’de verilmiştir.



Şekil 50. Deney için hazırlanan numuneler ve etüve yerleştirilmesi



Şekil 51. Etüvden çıkarılıp kesilen alt ve üst parçaların görünümü

2.6.7. MSCR Deneyi Uygulaması

Asfalt bağlayıcıların tekerlek izine karşı dayanımının ve trafik hacmine göre yüksek sıcaklık performans derecesinin belirlenmesi amacıyla çoklu gerilim sünme geri kurtarma

deneyi yapılmıştır. MSCR deneyi, AASHTO T350 (AASHTO T350, 2012) standardına uygun olarak AASHTO T315 standardına göre hazırlanmış saf ve modifiye bağlayıcılara 25 mm paralel plaka 1 mm boşluk geometrisinde 64 °C sıcaklıkta RTFOT kalıntısı üzerine yapılmıştır.

Numuneye, 1,0 saniye boyunca 0,1 kPa'lık sabit bir kayma gerilimi uygulanır ve ardından numunenin 9,0 saniye boyunca geri dönmesine izin verilir. Bu işlem 20 döngü boyunca tekrarlanır. İlk 10 döngü, numune koşullandırma için kullanılırken sonraki 10 döngü kurtarma verilerinin toplanması için kullanılmaktadır. Daha sonra numuneye, 1,0 saniye boyunca 3,2 kPa'lık sabit bir kayma gerilimi uygulanır ve yine numunenin 9,0 saniye boyunca geri dönmesine izin verilir. Bu işlemde 10 döngü boyunca tekrarlanır. Deney sonunda, numunelere ait sünme uyumu (Jnr) değerleri ve yüzdesel geri dönme miktarları belirlenmiştir.

2.6.8. LAS Deneyi Uygulaması

LAS testi AASHTO T 391-20 standardına göre RTFOT+PAV kalıntısı üzerine 8mm çapında paralel plaka ve 2mm boşluk geometresinde 25 °C'de yapılmıştır. Numuneler üzerinde sırasıyla frekans ve genlik taraması yapılmıştır. Frekans taramasından hasar analizi için kullanılacak α (alfa) parametresi belirlenmiştir. Genlik taraması, 25 °C sıcaklıkta 10 Hz frekansta gerinim kontrol modunda salınımlı kesme kullanılarak uygulanmıştır. Deney verilerinden, bağlayıcıların yorulma ömürleri belirlenmiştir.

2.7. Sıcak Asfalt Karışımların Hazırlanması

Tez çalışmasında kullanılan agrega Gümüşhane İli Bağışlı Taşocağından temin edilmiş olup, fiziksel özellikleri Tablo 14'te verilmiştir.

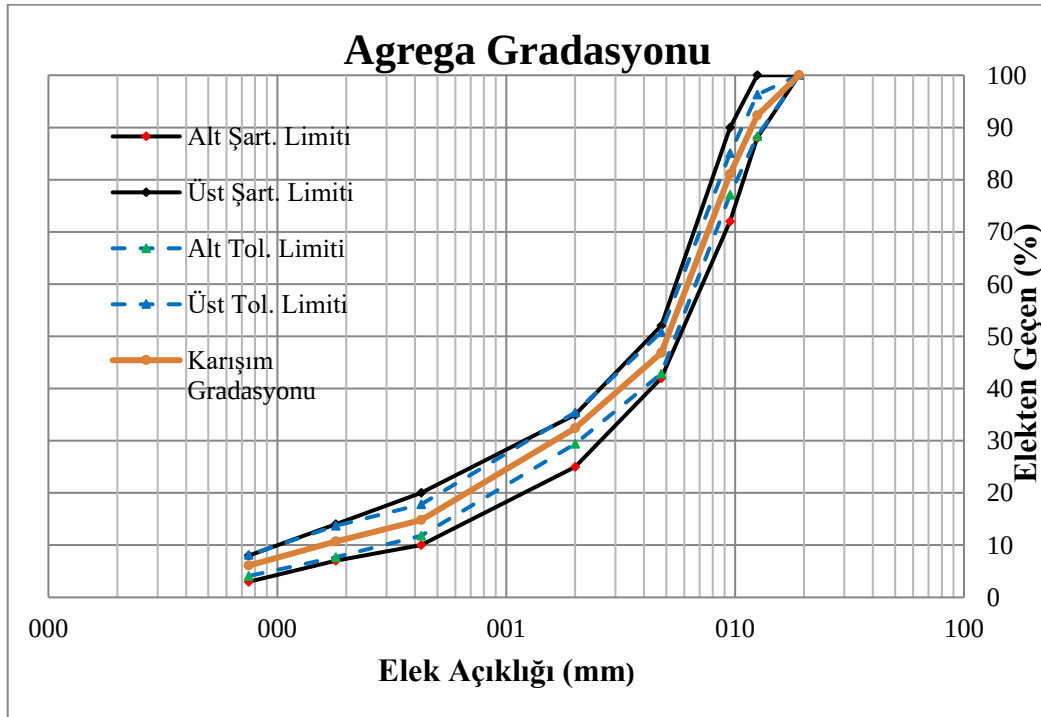
Tablo 14. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Özellikler	Standart	Kaba Agrega	İnce Agrega	Filler
Aşınma Kaybı (%) (Los Angeles)	ASTM C131	15	-	-
Donma Kaybı (%) (Mg ₂ SO ₄)	ASTM C88	2	-	-

Tablo 14'ün devamı

Özellikler	Standart	Kaba Agregası	İnce Agregası	Filler
Özgöl Ağırlık (gr/cm ³) Hacim özgöl ağırlık Zahiri özgöl ağırlık	ASTM C127	2.684 2.760	-	-
Özgöl Ağırlık (gr/cm ³) Hacim özgöl ağırlık Zahiri özgöl ağırlık	ASTM C128	-	2.621 2.737	-
Özgöl Ağırlık (gr/cm ³) Zahiri özgöl ağırlık	ASTM D854	-	-	2.831
Su Emme (%)	ASTM C127	1.02	1.85	-
Yassılık İndeksi (%)	BS 812	4	5	-

Sıcak asfalt karışımlar için Karayolları Teknik Şartnamesi'nden (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013) aşınma tabakası Tip-1 gradasyon limitleri seçilerek ideal gradasyon eğrisine göre agrega gradasyonu oluşturulmuştur. Karışımlarda kullanılacak agrega granülometrisi Şekil 52'de gösterilmiştir. Karışımlarda kullanılan agrega granülometrisi de şartname sınırları ile Tablo 15'te verilmiştir.



Şekil 52. Karışımlarda kullanılan agrega granülometrisi

Tablo 15. Karışımlarda kullanılan agrega granülometrisi ve şartname sınırları

Elek Çapları (inç)	Elek Çapları (mm)	Tip -1 Aşınma Tabakası (% Geçen)		Tolerans Limitleri (%Geçen)		İdeal Geçen (%)	İdeal Kalan (%)	Karışım Geçen (%)	Karışım Kalan (%)	Karışım Kalan (gr-1150)
3/4"	19.00	100	100	100.00	100.00	100	0	100	0	0
1/2"	12.50	88	100	88.30	96.30	94	6	92.3	7.7	88.55
3/8"	9.50	72	90	77.10	85.10	81	19	81.1	18.9	217.35
No:4	4.75	42	52	42.80	50.80	47	53	46.8	53.2	611.8
No:10	2.00	25	35	29.40	35.40	30	70	32.4	67.6	777.4
No:40	0.425	10	20	11.80	17.80	15	85	14.8	85.2	979.8
No:80	0.180	7	14	7.70	13.70	10.5	89.5	10.7	89.3	1026.95
No:200	0.075	3	8	4.10	8.10	5.5	94.5	6.1	93.9	1079.85
Tava	Tava					0.0	100	0.0	100	1150

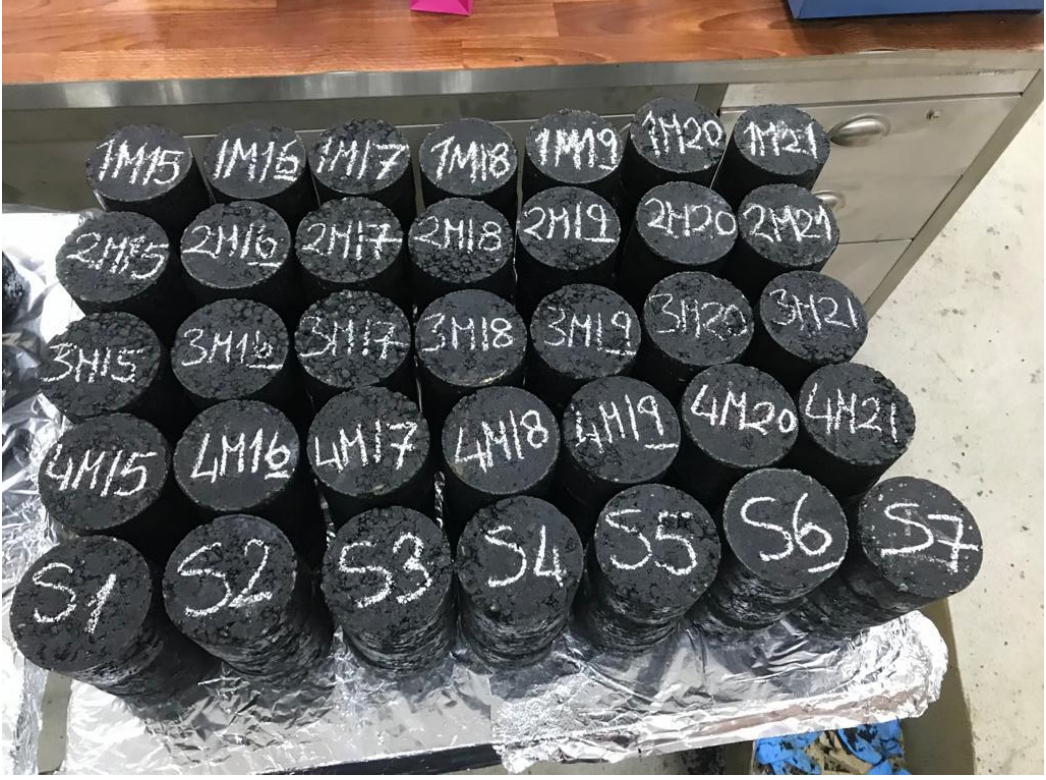
2.8. Sıcak Asfalt Karışımların Özelliklerinin Belirlenmesi

Çalışma kapsamında; karışımların özelliklerinin belirlenmesi için saf bağlayıcı üzerinde optimum bağlayıcı içeriği belirlenerek saf bağlayıcı ve her bir katkı oranı için yirmi bir adet, toplamda 105 adet Marshall briketi hazırlanmıştır (Şekil 53). Üretilen bu briketlerden saf bağlayıcı ve her bir katkı oranı için üçer adet kullanılarak; Marshall Stabilitate ve Akma, Dolaylı Çekme Mukavemeti, Dolaylı Çekme, Dinamik Sünme ve Dolaylı Çekme Yorulma deneyleri yapılmıştır. Hazırlanan tüm briketlerin yoğunluk-boşluk analizleri yapılarak boşluk, asfaltla dolu boşluk ve agregalar arası boşluk değerleri hesaplanmıştır.

2.8.1. Marshall Tasarımı

Optimum asfalt içeriğinin belirlenebilmesi için saf asfalt bağlayıcı ile oluşturulan agrega gradasyonundan Marshall briketleri üretilmiştir. Marshall briketleri, altı farklı asfalt bağlayıcı içeriğinde (tahmini asfalt içeriğinin %0,5 altında ve üstündeki yüzdelerde) ve her asfalt içeriği için üç numune olmak üzere toplam 18 adet hazırlanmıştır. Karışım tasarımı asfalt içeriği % 4.0, % 4.5, % 5.0, % 5.5, % 6.0 ve % 6.5'tir. Hazırlanan briketlere ait ağırlık ve hacim özellikleri belirlenerek gerekli yoğunluk-boşluk analizleri yapılmıştır. Numunelere ait boşluk, asfaltla dolu boşluk ve agregalar arası boşluk değerleri hesaplanmıştır. Marshall stabilite cihazında kırılan numunelerin stabilite ve akma değerleri de belirlenmiştir.

Numunelere ait, boşluk değerleri, özgül ağırlık, stabilite ve akma değerlerinden grafikler elde edilmiştir. Bu grafiklerden optimum asfalt içeriğine karar verilmiştir.



Şekil 53. Üretilen Marshall briketleri

2.8.2. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi Uygulaması

Karışım briketlerinin çekme dayanımlarının belirlenmesi amacıyla dolaylı çekme mukavemeti deneyi yapılmıştır. Deney için, saf asfalt ve her katkı oranından üretilen üç adet Marshall briketleri 25°C'lik su banyosunda 2 saat bekletilmiştir. Su banyosundan çıkarılan her briket Marshall stabilite cihazında çizgisel yüke maruz bırakılmış ve 50 mm/dk hız ile kırılmıştır.

2.8.3. Modifiye Lottman Deneyi Uygulaması

Sıcak asfalt karışımların su hasarına karşı duyarlılığının belirlenmesi amacıyla modifiye Lottman deneyi yapılmıştır. Deneyde, karışımlar üzerinde suyun etkisinin

anlaşılabilmesi için saf asfalt ve her katkı oranından üretilen üç adet Marshall briketlerine koşullandırma şartları uygulanmıştır. Numuneler, 5 dk. süreyle vakum cihazında suya doygun hale getirilmiştir. Doygun hale gelen briketler, streçle sarılarak içinde 10 ml su bulunan kilitli poşetlere konulmuştur. Poşetlere konulan numuneler -18°C sıcaklıkta, 16 saat boyunca derin dondurucuda bekletilmiştir. Derin dondurucudan alınan numuneler poşetten çıkarılıp 60°C sıcaklıktaki su banyosunda 24 saat bekletilmiştir (Şekil 54). Daha sonra numuneler, 25°C 'deki su banyosunda 2 saat boyunca bekletilmiş ve süre sonunda her brikeye dolaylı çekme mukavemeti deneyi uygulanmıştır.



Şekil 54. Su hasarına maruz bırakılan numunelerin koşullandırma aşamaları

2.8.4. Dinamik Sünme Deneyi Uygulaması

Dinamik (tekrarlı) sünme deneyi için saf asfalt ve her katkı oranından üretilen üç adet Marshall numuneleri, 40°C sıcaklıkta en az 3 saat bekletilmiştir. Deneyde, 100 kPa'lık tek eksenli basınç yükü, 1000 ms vuruş periyodu boyunca 500 ms yüklü, 500 ms yüksüz olmak üzere numunelere uygulanmıştır. Deneyde, numuneler 12.5 saat (45000 yük tekrarı) boyunca basınç yüküne maruz bırakılmıştır. Her numunede oluşan kalıcı deformasyon ölçülmüş ve sünme modülleri hesaplanmıştır.

2.8.5. Dolaylı Çekme Yorulma Deneyi Uygulaması

İndirekt çekme yorulma deneyi için saf asfalt ve her katkı oranından üretilen üç adet Marshall numuneleri, 25°C sıcaklıkta en az 3 saat bekletilmiştir. Deney, 300 kPa'lık gerilme altında gerilme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme periyodu 1500 ms (1.5 sn) olarak alınmış ve numuneye bu sürenin 124 ms'si (0.124 sn.) boyunca yük etkirken geriye kalan 1376 ms (1.376 sn) boyunca yük etkimeyerek dinlenme süresi (rest time) olarak ayarlanmıştır. Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam ettirilmiş ve kırılma anındaki yük tekrar sayıları belirlenmiştir.



3. BULGULAR VE İRDELEME

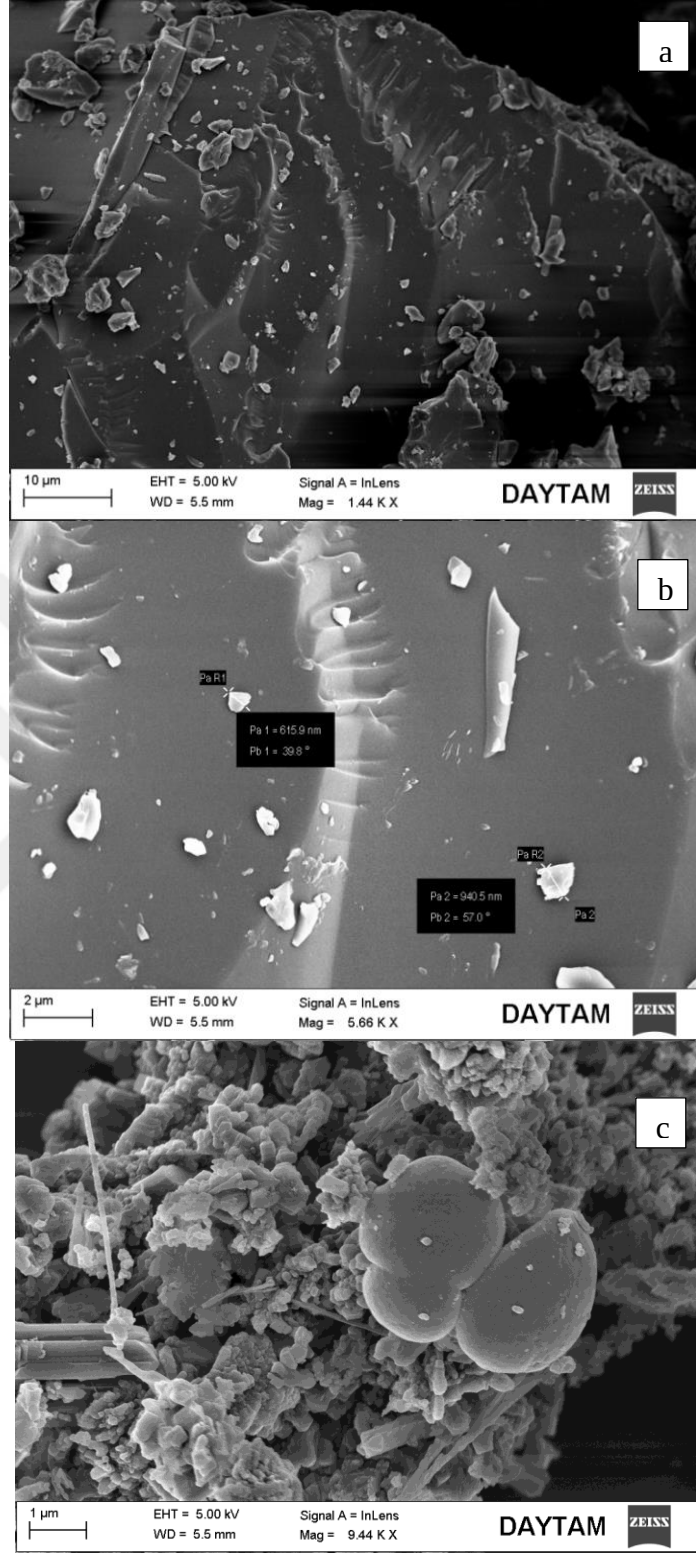
Bu bölümde, çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerin sonuçları iki ayrı başlık altında sunulmuştur. Çalışmanın ilk kısmında, sentez katkı maddesinin mikro yapı analizine ilişkin bulgular ile elde edilen verilerin irdelenerek yorumlanması yapılmaktadır. Çalışmanın büyük bir kısmını oluşturan ikinci kısımda ise, saf ve modifiye asfaltlara uygulanan fiziksel, reolojik deneyler ve asfalt karışımlarına uygulanan performans deneylerden elde edilen bulgular ile grafikleri verilmekte ve bu grafikler doğrultusunda deney sonuçlarına dair irdeleme ve değerlendirmeler yapılmaktadır.

3.1. Bor Esaslı Reçine Bileşiğinin Mikro Yapısı

Bor esaslı reçine bileşiğinin kimyasal yapısı FTIR ve XRD ile, morfolojik yapısı ise SEM ile incelenmiştir. Katkının termal karakterizasyonu DSC/TG analizleriyle belirlenmiştir. Ayrıca sentezlenen katkının saf asfalt matrisindeki dağılımı ve morfolojik yapısı SEM cihazı ile analiz edilirken, FTIR analizi asfaltta katkı varlığını göstermiştir.

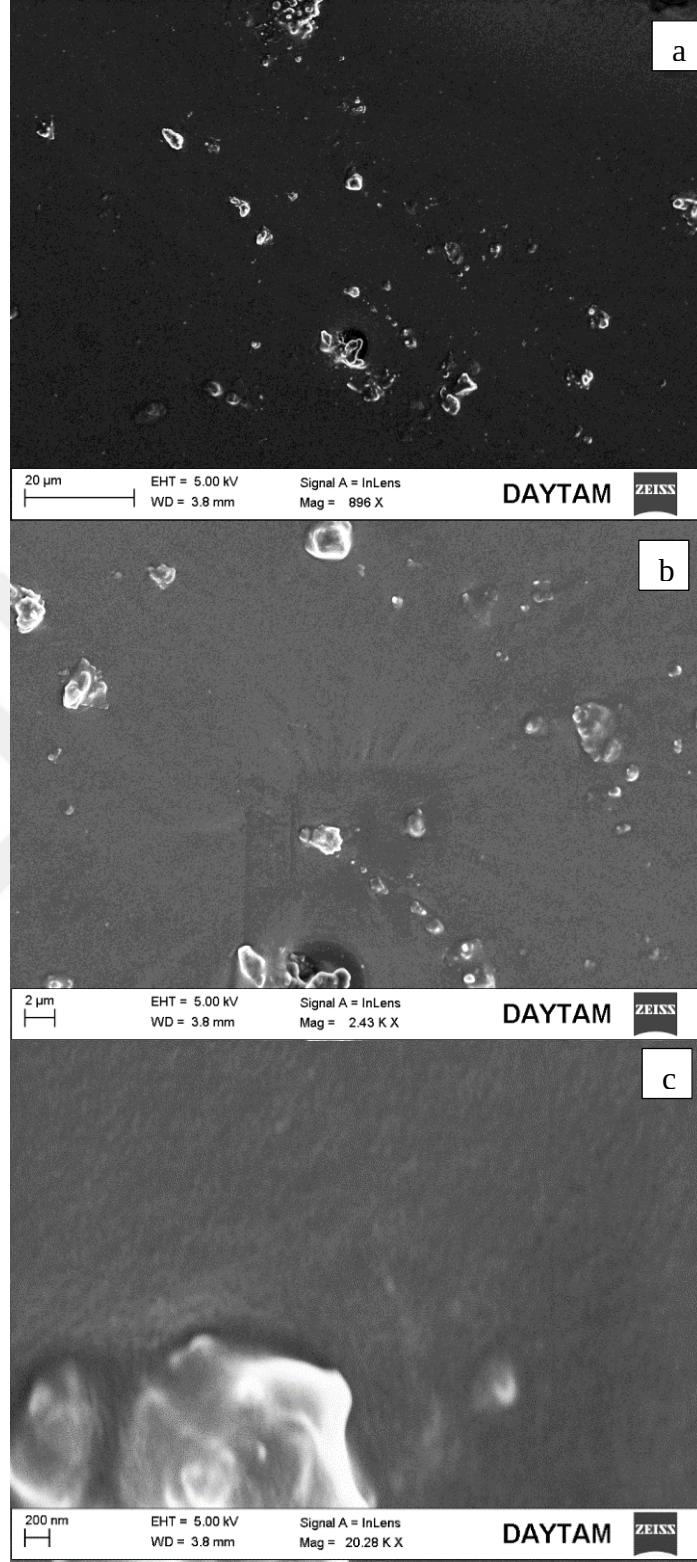
3.1.1. SEM Analizi

Bor esaslı reçine bileşiğinin farklı büyütmelerdeki genel morfolojik görüntüleri ve katkı üzerindeki partikül boyutları Şekil 55'te verilmiştir. Ancak bu yapıya yapışık olan ve kimyasal olarak ona benzediği düşünülen parçacıklarda bulunur. Yapı üzerindeki parçacıklar yakından incelendiğinde (Şekil 55c), küçük dörtgen bölgelerin bor oksit olduğu (Janmohammadi, Pornour, Javanmard, & Sabaghnia, 2016; Taşgın, 2018) ve büyük balon benzeri şekillerin ise reçine olduğu düşünülmektedir (Lee, ve diğerleri, 2021). Ayrıca kolofan reçinesinin kompleks yapısının katkı içeriğinde farklı oluşumlara neden olduğu gözlenmiştir.



Şekil 55. Sentez katkı maddesinin genel morfolojik görüntüleri; (1a) 10 µm büyütme, (1b) 2 µm büyütme, (1c) 1 µm büyütme

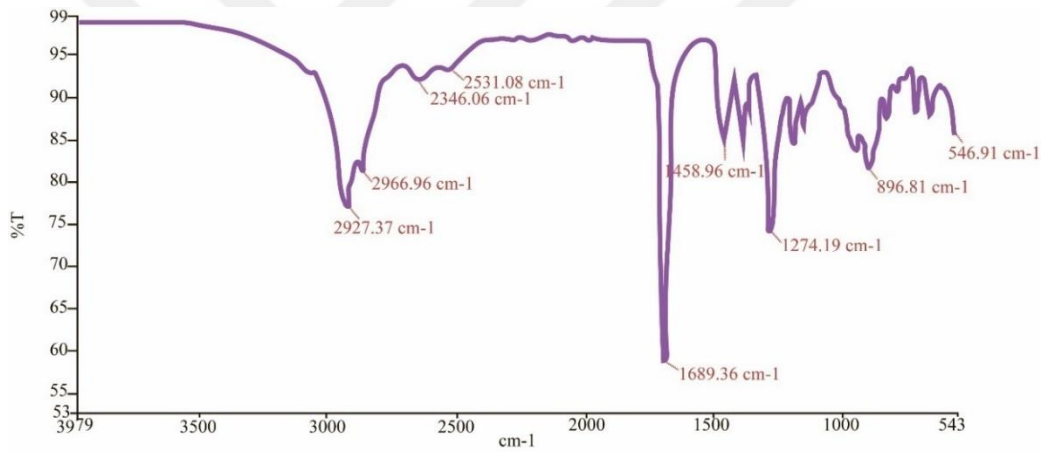
Sentez katkı maddesinin asfalt bağlayıcı içerisindeki farklı büyütme oranlarındaki görüntüleri Şekil 56'da verilmiştir. BORB katkısının asfalt matrisi içerisindeki dağılımını net bir şekilde ortaya koyabilmek için modifiye asfalt bağlayıcılar arasında katkı oranı en yüksek olan %3 BORB modifiye asfalt kullanılmıştır. Küçük büyütme görüntüsüne bakıldığında makro anlamda homojen ancak mikro anlamda belirli bölgelerde kümelenmiş yapılar belirlenmiştir. Modifiye asfalt bağlayıcının yapısı yakından incelendiğinde (Şekil 56b) parçacıkların 0,3-2 μm arasında değiştiği ve çok fazla algomerya (yapıda kümelenme) oluşturmadığı belirlenmiştir. Ancak dağılım homojenliğinin nispeten eksik olduğu ve sentez katkı maddesinin asfalt matrisinin her noktasında aynı dağılıma sahip olmadığı görülmüştür. Sentez katkı maddesinin asfalttaki durumuna daha yakından bakıldığında ise (Şekil 56c), parçacığın yaklaşık 1 μm 'sinin fiziksel olarak asfalt yapısına gömülü olduğu, parçacık ile asfalt matris arayüzü arasında herhangi bir ayrışma veya kırılma olmadığı düşünülmektedir. Böylece modifikasyon sırasında BORB katkısı ile asfaltın makro boyutta iyi uyum sağladığı ve gömülü yapıdan adezyonun karışım içinde gerçekleştiği düşünülmektedir.



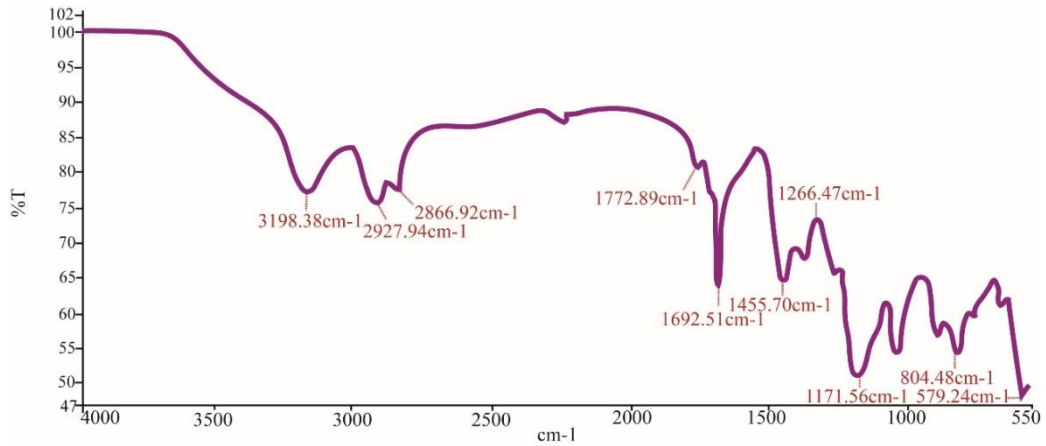
Şekil 56. %3 Modifiye asfalt bağlayıcının SEM görüntüleri; (2a) 20 μm büyütme, (2b) 2 μm büyütme, (2c) 200 nm büyütme

3.1.2. FTIR Analizi

Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile kızılötesi aktif moleküler özellikler kullanılarak malzemelerin yapılarındaki bağların durumu, konumu ve yapısı belirlenir (Laçın & Dönmez, 2021). Kimyasal olarak elde edilen bor esaslı reçine bileşiğinin fonksiyonel gruplarındaki değişim FTIR analizi ile belirlendi. Kolofanın kimyasal yapı spektrumu Şekil 56'da verilmiştir. Bor oksit ve kolofandan elde edilen yeni sentez katkı maddesinin FTIR spektrum sonuçları ise Şekil 57'de gösterilmiştir. Reçinenin içerisinde 2927 cm^{-1} 'de vinik C=C-H bağları, 2866 cm^{-1} 'de alifatik C-H gerilim bandı ile 1689 cm^{-1} 'de C=O bağına sahip karboksilik asitten kaynaklanan keskin ve oldukça büyük bir pik olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 57).

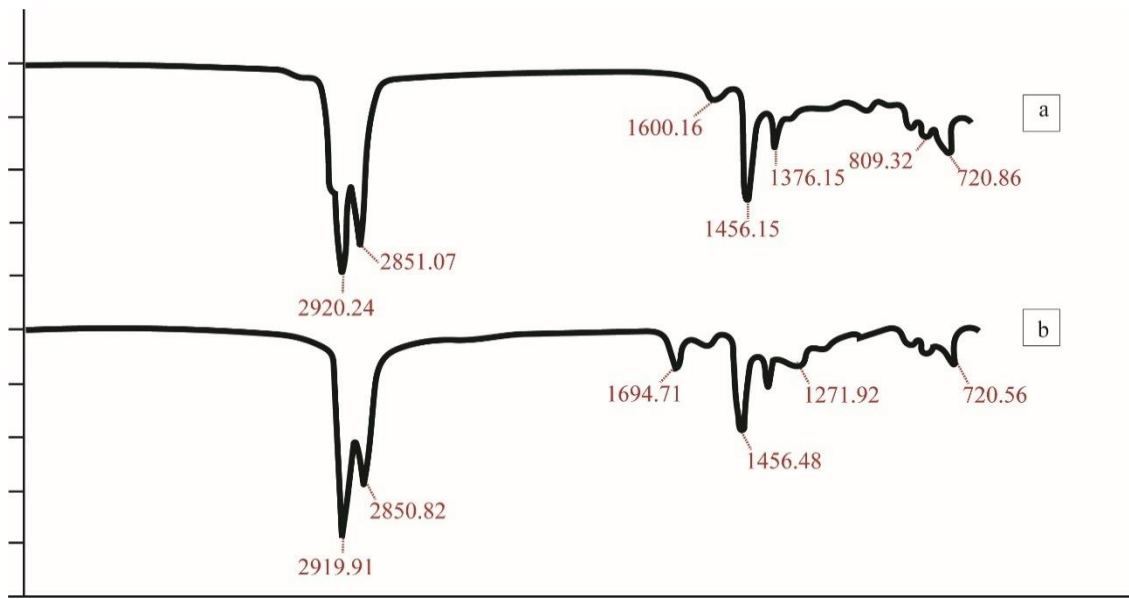


Şekil 57. Kolofan reçinesinin FTIR spektrumu



Şekil 58. BORB katkısının FTIR spektrumu

Kolofana bor oksit ilave edilerek oluşturulan yeni katkıda vinik C=CH bağları ve alifatik C-H gerilim bandının aynı seviyede kaldığı ve C=O bağı pik değerinde yaklaşık 7 cm-1 kayma olduğu gözlemlenmiştir. Bu pik değerini ise 1692 cm-1 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca karboksil grubundaki O=C-OH bağı kolofanda 1274 cm-1'de ortaya çıkarken, sentez katkı maddesinde bu değerin 1266 cm-1'e kaydığı belirlenmiştir. Bunlara ek olarak, reçine yapısındaki bor oksidin varlığı pikini 1190 cm-1'de kaybolması veya 1171 cm-1 gibi bir alana kaymasından tespit edilmiştir (Şekil 58). FTIR analizi sonucunda bor esaslı reçine bileşiğinin pik kaymaları ve yeni pik değerleri ile elde edildiği doğrulanmıştır.



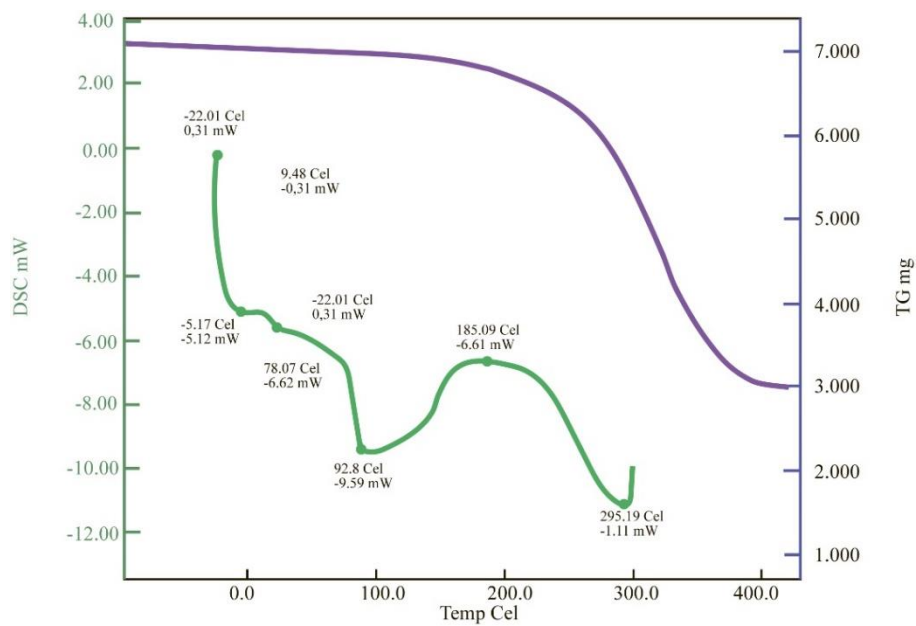
Şekil 59. Saf asfaltın (a) ve %3 sentez katkı maddesiyle modifiye edilmiş asfaltın (b) FTIR spektrumları

Çalışmada kullanılan saf asfalt ve %3 katkılı modifiye asfalt bağlayıcıların FTIR spektrumları Şekil 59'da verilmiştir. Her iki spektrum tepe noktası incelendiğinde saf asfaltın alifatik hidrokarbon zincir içeriğinden gelen CH gerilme bantlarının 2920 ve 2851 cm-1 pik değerlerinde olduğu, CH₃ ve CH₂ grupları için deformasyon bantlarının ise 1456-1376cm-1 aralığında çıktığı görülmüştür. Şekil 59 (b)'de incelendiğinde, saf asfalta BORB katkısının eklenmesinin etkisi spektrumda iki farklı tepe değerinin varlığıyla belirlenmiştir. Bunlar, sentez katkı maddesine ilişkin özgül 1694 cm-1'de C=O gerilim frekansı ve 1271 cm-1'de karboksil grubundaki O=C-OH bağıdır. Spektrumlar karşılaştırıldığında bu pik değerlerin BORB katkı maddesine ait olduğu ve BORB katkı maddesinin asfaltın kimyasal yapısını

değiştirmedeği anlamına gelmektedir. Ayrıca modifiye asfaltta hidrokarbon gerilim frekanslarının tepe noktalarında küçük değişimler gözlenmiştir. Dolayısıyla asfaltta sentez katkı maddesi ile hidrokarbon zincirleri arasında belirli bir miktarda Van Der Waals etkileşimi olduğu düşünülebilmektedir.

3.1.3. DSC ve TG Analizleri

TG, ısıtma işlemi sırasında kütle miktarındaki değişiklikleri belirlerken, DSC, malzemenin ısı kapasitesindeki değişimin sıcaklık ile ilişkisini belirler (Sorolla-Rosario, Llorca-Porcel, Pérez-Martínez, Lozano-Castelló, & Bueno-López, 2022). DSC analizi, faz geçişi, erime ve camsı geçiş sıcaklığı, oksidatif stabilite, kristalleşme sıcaklığı ve süresi gibi malzeme ile ilgili fiziksel ve kimyasal değişime odaklanır. TG analizi ise malzemenin bozunma hızı, yükseltgenme, indirgenme vb. özelliklerine odaklanır (Sai Revanth, ve diğerleri, 2020). Isıtma işlemi sırasında bor esaslı reçinenin izotermal olmayan DSC ve TG eğrileri Şekil 60'da verilmiştir. DSC analizinde kolofan içerisinde çok sayıda abietat ve izomer bulunması nedeniyle çoklu endotermik pikler gözlenmiştir. Şekil 9'dan görüleceği gibi, katkıda kristalleşmenin meydana geldiği camsı geçiş sıcaklığı $-5,17^{\circ}\text{C}$, erimenin gerçekleştiği sıcaklık $92,8^{\circ}\text{C}$ ve oksidasyon sıcaklığı $185,09^{\circ}\text{C}$ olarak bulunmuştur. Ayrıca sentez katkı maddesinin $295,19^{\circ}\text{C}$ 'de ayrışmaya başladığı gözlenmiştir.

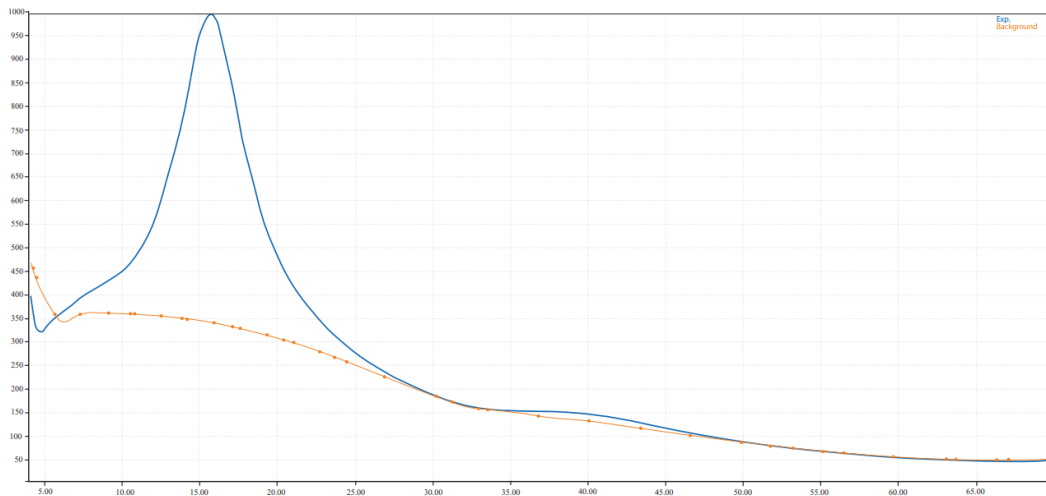


Şekil 60. Bor esaslı reçine bileşiğinin DSC/TG eğrileri.

Şekil 59'daki TG grafiği incelendiğinde bozunma sıcaklığının 295,19 °C 'den düşük bir sıcaklıkta başladığı görülmektedir. Bunun nedeni TG analizindeki ısıtma hızıdır. TG analizinde ısıtma hızı 7 °C/dk. iken DSC analizinde ısıtma hızı 15 °C/dk'dır. TG analizinde ısıtma hızının artmasıyla birlikte grafikteki bozunma sıcaklığının daha yüksek sıcaklık bölgelerine kaydığı belirtilmiştir (Wei, Dub, & Z.Chen, 2006; Özsin, 2018). Bu kapsamda DSC ve TG analizlerinde bozunma sıcaklık değerlerinde farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. TG analizi incelendiğinde 185 °C'den sonra oksidasyon ile malzemede ayrışmanın meydana geldiği ve 400 °C'ye kadar malzemenin %60'ının bozulduğu görülmüştür.

3.1.4. XRD Analizi

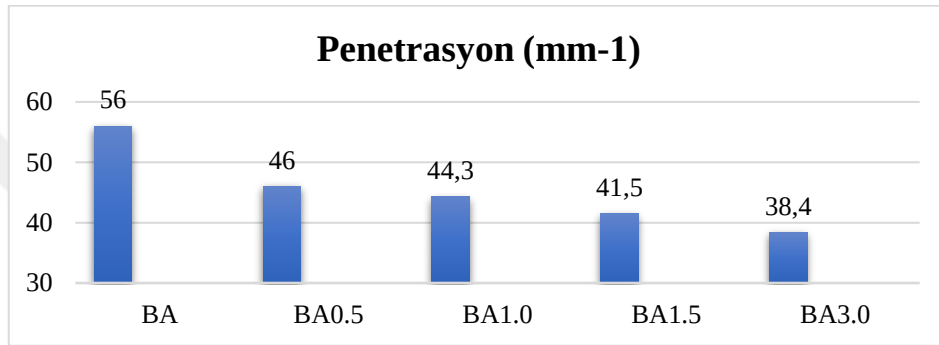
Bor esaslı reçinenin XRD grafiği Şekil 61'de verilmiştir. Sentez katkı maddesinin üst konumundan elde edilen kırınım tepe noktaları (d_{001} -yansıma) $2\theta = 15.422$ ve $2\theta = 41.081$ 'de gözlenmiştir. Bragg formülüne göre $n\lambda = 2d\sin\theta$ X ışınlarının dalga boyları $n = 1$ için $\lambda = 0,154$ nm iken, hesaplanan katman aralıkları 0,574 nm ($\theta = 7,71$ için) ve 2,194 nm ($\theta = 20,54$ için) olarak hesaplanmıştır. Sentez katkı maddesinin ana bileşeni olan kolofan farklı abietat ve izomerlerden oluştuğu için, Şekil 63'te verilen XRD sonucuna göre kimyasal bileşeninin yapısında kristal yapı oluşturmadığı görülmüştür. Ayrıca Match! programında (kristal yapı çözümü veri tabanı) sentez katkı maddesinin XRD grafiği tarandığında kristal bileşen yapısı ile benzerlik göstermediği ancak belirgin bir pik varlığı olmadığı için amorf bir büyüme gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 61. Bor esaslı reçine bileşiğinin XRD grafiği

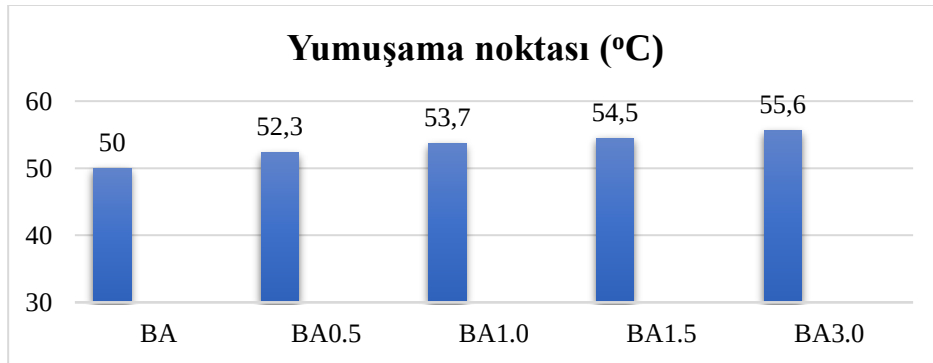
3.2. Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

BORB katkısı ile modifiye edilen asfalt bağlayıcıların penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları Şekil 62 ve 63'te görülmektedir. Asfalt ile modifiye edilen katkı içeriği (miktarı) arttıkça penetrasyon değerlerinin düştüğü, katkının asfaltın kıvamını arttırdığı ve asfaltı sertleştirdiği görülmektedir. %3 sentez katkı maddesiyle modifiye edilen asfaltın penetrasyon değeri saf asfalta göre %31,4 oranında azalmıştır.



Şekil 62. Penetrasyon deney sonuçları

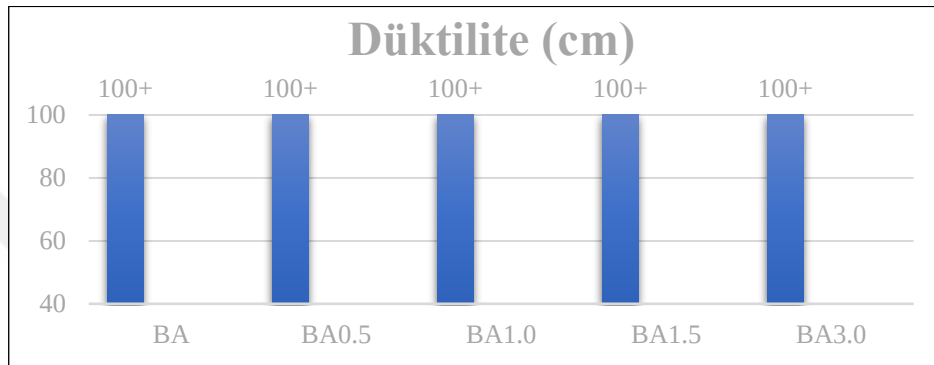
Sentez katkı miktarının artmasıyla modifiye asfaltların yumuşama noktası değerleri yükselmektedir. Katkı içeriği ağırlıkça %3 olduğunda yumuşama noktası değerinin saf asfalta göre %11.2 oranında arttığı ve 55.6 °C'ye ulaştığı görülmektedir. Katkının asfaltın yumuşama sıcaklığını arttırdığı ve böylece bağlayıcıların yüksek sıcaklık stabilitesini artırdığı sonucuna varılabilmektedir.



Şekil 63. Yumuşama noktası deney sonuçları

3.3. Düktilite Deney Sonuçları

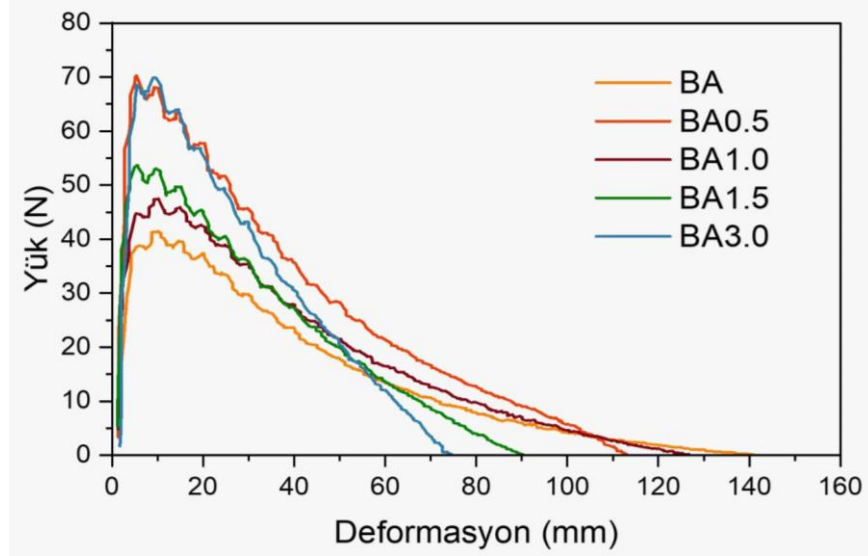
Saf ve modifiyeli asfalt bağlayıcılara, 25 °C sıcaklıkta asfaltın uzama miktarını veren düktilite deneyi yapılmış ve deney sonuçları Şekil 64'te verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, sentez katkı maddesinin asfalt bağlayıcının kohezyon özelliklerini olumsuz yönde etkilemediği söylenebilir.



Şekil 64. Düktilite deney sonuçları

3.4. Kuvvet Ölçümlü Düktilite ve Elastik Geri Dönme Deneyi Sonuçları

Saf ve modifiyeli asfalt bağlayıcılar, kuvvet ölçümlü düktilite ve elastik geri dönme deneylerine tabi tutulmuştur. Asfalt bağlayıcıların uzama sırasında gösterdikleri dirençteki değişim Şekil 65'te verilmiştir. Saf asfalt bağlayıcı 530 mm, BA0.5, BA1, BA1.5 ve BA3 modifiye bağlayıcılar sırasıyla 403 mm, 460 mm, 330 mm ve 300 mm deformasyon seviyesine kadar yük almış ve sonrasında kopmuşlardır. En yüksek yük-deformasyon ilişkisini BA0.5 modifiye bağlayıcı vermiştir.



Şekil 65. Asfalt bağlayıcıların yük-deformasyon ilişkisi

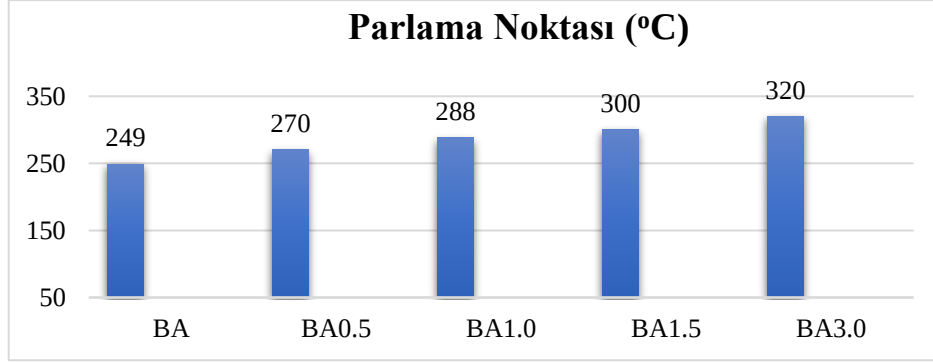
Yük-deformasyon eğrisinin altında kalan alan bağlayıcıların deformasyon enerjilerini vermektedir [TS EN 13589]. Tablo 16’da asfalt bağlayıcıların elastik geri dönme yüzdeleri ve alanları verilmiştir. BA0.5 modifiyeli bağlayıcı en fazla deformasyon enerjisine sahiptir. Katkı kullanımı ile birlikte elastik geri dönme yüzdeleri modifiyeli bağlayıcılar için saf bağlayıcıya göre sırasıyla %50, %30, %46 oranında daha yüksek elastik geri dönme değeri verdiği belirlenmiştir.

Tablo 16. Asfalt bağlayıcıların kuvvet ölçüm düktilite alanları ve elastik geri dönme yüzdeleri

Bağlayıcı tipi	Force düktilite alanı (N.mm) (%)	Elastik geri dönme
BA	1975.5	%15
BA0.5	3146.3	%30
BA1.0	2358.4	%20
BA1.5	2188.4	%18
BA3.0	2188.4	%22

3.5. Parlama ve Fraass Kırılma Noktası Deney Sonuçları

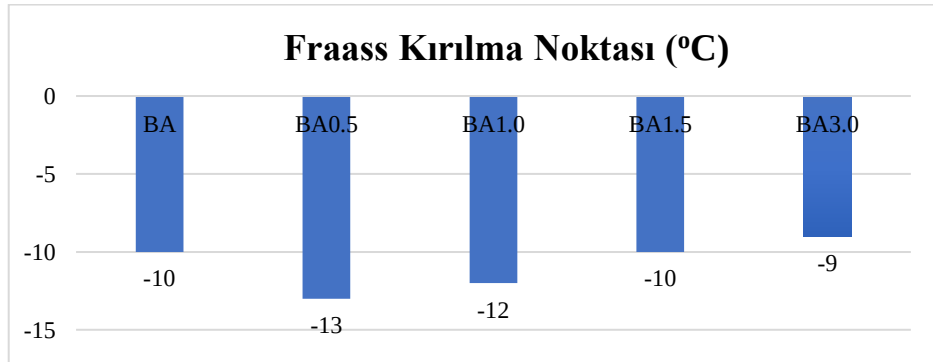
Asfalt bağlayıcılara Cleveland açık kap yöntemi kullanılarak yapılan parlama noktası deney sonuçları Şekil 66’da gösterilmiştir.



Şekil 66. Parlama noktası deney sonuçları

Modifiye asfaltlarda, saf asfalta göre parlama noktası değerinin katkı miktarına paralel olarak arttığı gözlenmiştir. Saf asfalta göre parlama noktası değeri, BA0.5 ve BA3.0 asfalt bağlayıcılarda sırasıyla 1.08 ve 1.28 kat artmıştır. Modifiye asfaltlardaki parlama noktası değerleri daha geniş bir sıcaklık aralığında çalışma imkânı vermektedir.

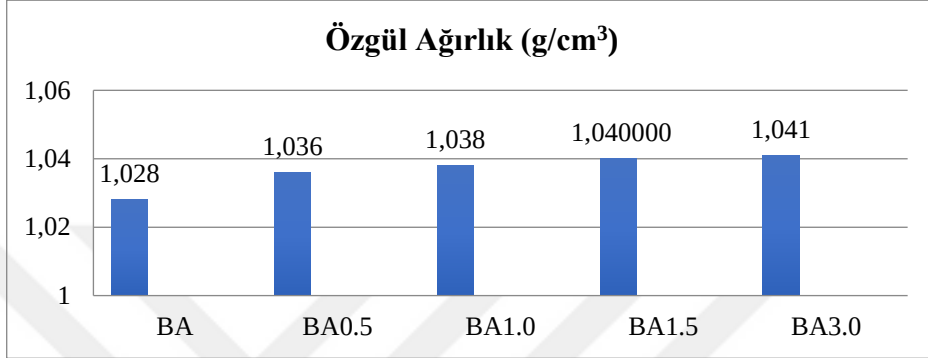
Saf ve modifiye asfaltlara ait Fraass kırılma noktası deney sonuçları Şekil 67’de verilmiştir. Deney verilerine bakıldığında, sentez katkı maddesi sayesinde saf asfaltın düşük sıcaklıklardaki çatlamaya karşı direncin genel olarak arttığı söylenebilir. Ayrıca, BA0.5 modifiye asfaltta kırılma sıcaklığının %30 oranında düştüğü görülmektedir.



Şekil 67. Fraass kırılma noktası deney sonuçları

3.6. Trikloretilende Çözünürlük ve Özgül Ağırlık Deney Sonuçları

Saf asfalt bağlayıcıya eklenen bor esaslı reçine bileşiğinin miktarının artmasıyla modifiye asfaltların özgül ağırlık değerleri yükselmiştir. Bağlayıcılara ait özgül ağırlık deney sonuçları Şekil 68’de gösterilmiştir.



Şekil 68. Özgül ağırlık deney sonuçları

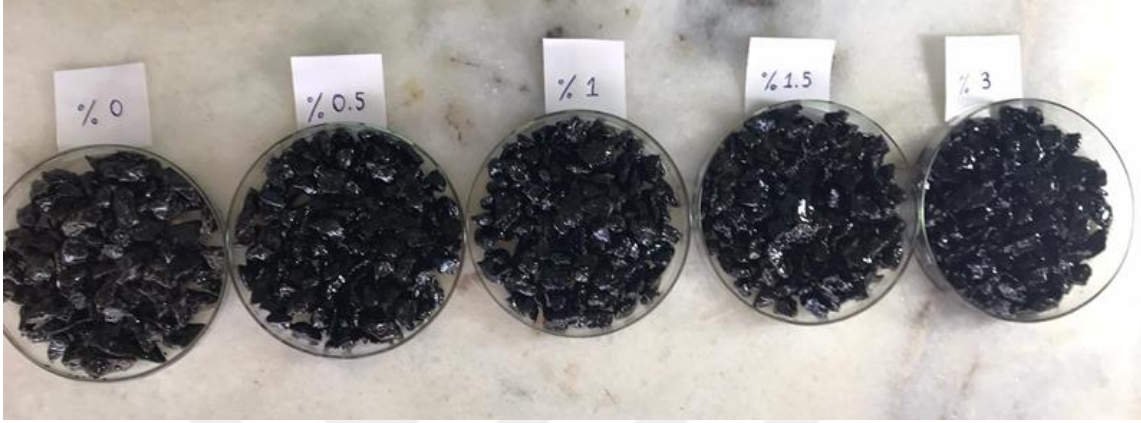
Asfalt bağlayıcının organik çözücüler içinde en az %99 oranında çözünmesi gerekmektedir [65]. Saf asfalt ve BA3.0 modifiye asfalt bağlayıcılar trikloretilende %99.9 oranında çözünmüştür. Şekil 69’da BA3.0 modifiye asfaltın trikloretilende çözündükten sonra yapılan süzme işlemi sonrasında filtre kağıdında herhangi bir kalıntının olmadığı görülmektedir. Bu bağlamda, sentez katkı maddesinin asfalt bağlayıcının yapısına uyum sağladığı sonucuna varılabilmektedir.



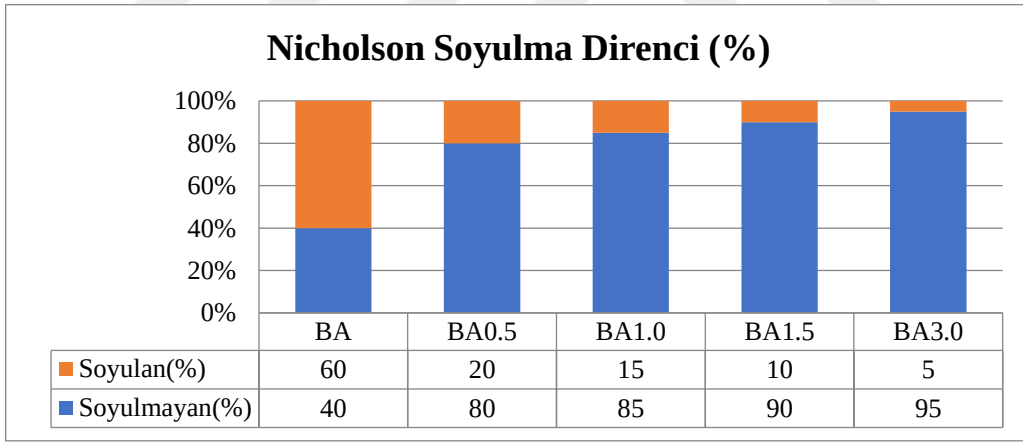
Şekil 69. BA3.0 modifiyeli asfalt bağlayıcının trikloretilende çözünmesi

3.7. Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları

Saf ve modifiyeli asfalt bağlayıcılara ait Nicholson soyulma deneyinin görsel ve sayısal değerleri sırasıyla Şekil 70 ve Şekil 71’de verilmiştir.



Şekil 70. Nicholson soyulma deneyi sonrası sıkıştırılmamış karışımların görüntüsü



Şekil 71. Asfalt bağlayıcı karışımların soyulma direnci değerleri

Deney sonuçları incelendiğinde, modifiye asfalt bağlayıcılarla yapılan karışımların soyulma dirençleri, saf asfalt bağlayıcı göre BA0.5, BA1.0, BA1.5 ve BA3.0 modifiye asfalt bağlayıcılarda sırasıyla %100, %112,5, %125 ve %137,5 oranlarında artışın olduğu görülmüştür. Sonuçlara göre, katkının saf asfalt bağlayıcı ile agrega arasındaki adezyon kuvvetini güçlendirerek asfalt karışımının soyulmaya karşı direncini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

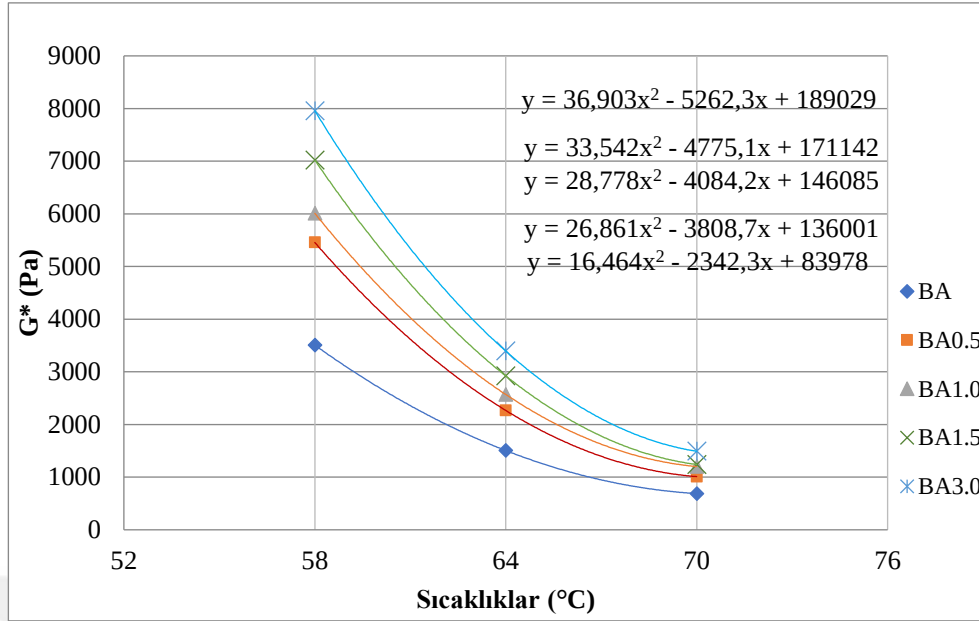
3.8. Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deney Sonuçları

Yaşlandırılmamış saf ve modifiye asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki performans seviyeleri DSR deneyi ile belirlenmiştir. Asfalt bağlayıcılar, 3 farklı sıcaklıkta (58, 64 ve 70°C), 1.59 Hz (10 rad/s) frekansta ve kontrollü gerilme (120 Pa) altında deneye tabi tutulmuştur. Deney numunesi, 25 mm paralel plakalar arasına 1 mm boşluk bırakılarak cihaza yerleştirilmiştir. Deney sonucunda, G' , G'' , G^* , δ ve $G^*/\sin\delta$ parametre değerleri bulunmuş ve elde edilen deney sonuçları Tablo 17’de verilmiştir.

Tablo 17. Bağlayıcılara ait DSR deney sonuçları

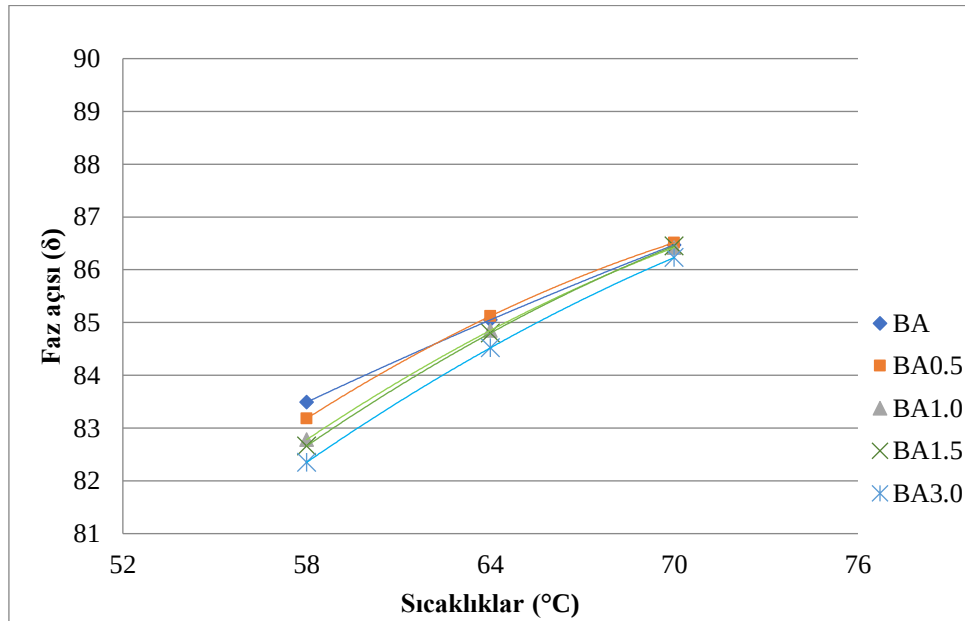
Numune Adı	Sıcaklık (°C)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G^* (Pa)	δ (°C)	$G^*/\sin\delta$ (Pa)	Şartname Limiti (Pa) (AASHTO T5)
BA (67,7 °C)	58	397,6	3484,8	3507,2	83,49	3530,4	1000 min.
	64	126,1	1499,2	1504,8	85,05	1510,4	
	70	42,8	686,5	687,8	86,47	689,1	
BA0.5 (70,1 °C)	58	647,6	5417	5456	83,18	5495	
	64	192,9	2258	2266	85,12	2274	
	70	61,49	1008	1010	86,51	1012	
BA1.0 (71,3 °C)	58	755,2	5962	6009	82,78	6057	
	64	230,6	2558	2569	84,85	2579	
	70	75,05	1199	1201	86,42	1203	
BA1.5 (71,5 °C)	58	896,8	6963	7021	82,66	7079	
	64	265	2911	2923	84,80	2935	
	70	76,74	1238	1240	86,45	1243	
BA3.0 (73,6°C)	58	1059	7885	7956	82,35	8027	
	64	324,3	3380	3395	84,52	3411	
	70	98,06	1487	1491	86,23	1494	

DSR deneyi ile elde edilen kompleks modül (G^*), faz açısı (δ°) ve tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin \delta$) değerlerinin katkı miktarıyla değişimi Şekil 71-73’te grafik olarak gösterilmiştir.



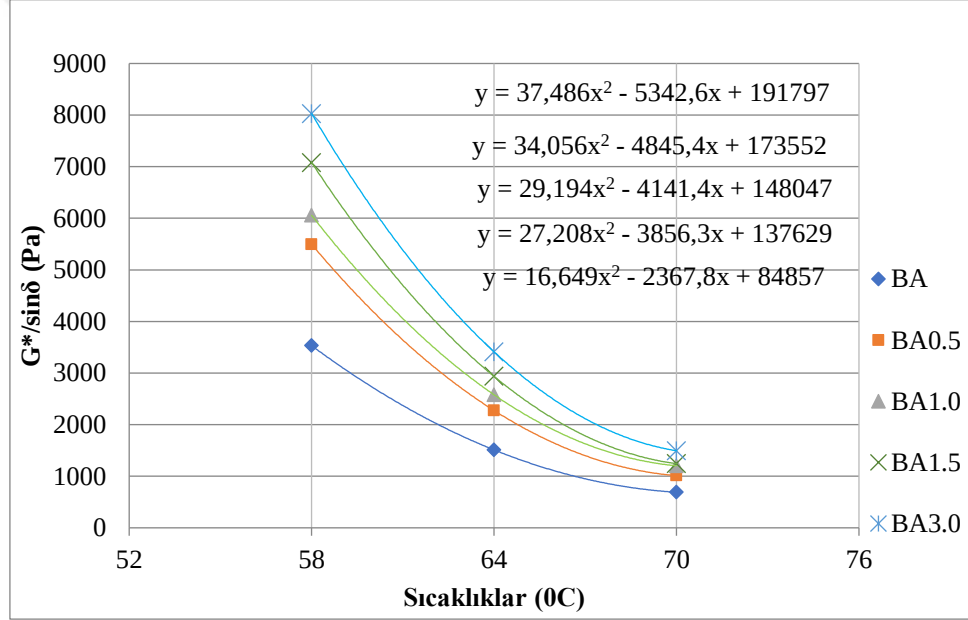
Şekil 72. Bağlayıcılara ait kompleks modül (G*) değerleri

Şekil 72’de kompleks kayma modülü değerleri incelendiğinde, sıcaklığın artması ile G* değerlerinin azaldığı ve katkı ile beraber verilen sıcaklıklarda kompleks modül değerlerinin arttığı görülmüştür. Bu bağlamda, katkı kullanımı ile kaymaya karşı direnç açısından fayda sağlanabileceği söylenebilir.



Şekil 73. Bağlayıcılara ait faz açısı (δ°) değerleri

Faz açısı değeri, 0° ile 90° arasında değişmektedir. Faz açısının 0° olması malzemenin tamamen elastik davranış gösterdiğini, 90° olması tamamen viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir. Şekil 72 incelendiğinde, katkı miktarının artışı ile birlikte bütün sıcaklıklarda belirlenen sıcaklıklarda saf bağlayıcıya oranla faz açısı değerlerinin düştüğü görülmektedir. Dolayısıyla modifiye bağlayıcıların saf asfalta göre daha elastik davranış sergilediği belirlenmiştir. Şekil 72 ve 73'ten BA0.5 modifiyeli asfaltın saf asfalt bağlayıcının kompleks kayma modülü değerini %50,5 oranında arttırdığı ve faz açısı değerinin %2,2 oranında azalttığı görülmektedir. Sentez katkı maddesinin düşük oranda kullanımının bile asfaltın reolojik özelliklerini etkilediği ve bağlayıcıya elastikiyet kazandırdığı görülmektedir.



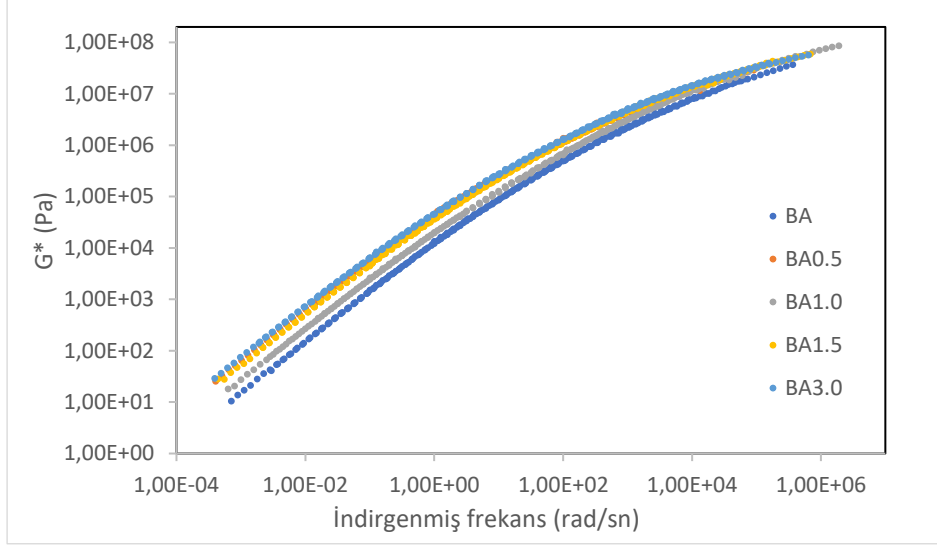
Şekil 74. Bağlayıcılara ait tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin \delta$) değerleri

Şekil 74'te tekerlek izi dayanım parametreleri ($G^*/\sin \delta$) incelendiğinde ise, 64°C sıcaklıkta katkı miktarı arttıkça katkı oranına bağlı olarak tekerlek izi direncinin arttığı görülmektedir. Superpave yöntemine göre saf asfalt bağlayıcılar için 1000 Pa tekerlek izi dayanımı şartname limit değerini saf asfaltın 64°C 'de ve modifiyeli asfalt bağlayıcılarında 70°C 'de sağladığı belirlenmiştir. Katkı kullanımıyla birlikte miktarına bağlı olarak, saf asfalt bağlayıcının tekerlek izi dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

3.9. Frekans Taraması Deney Sonuçları

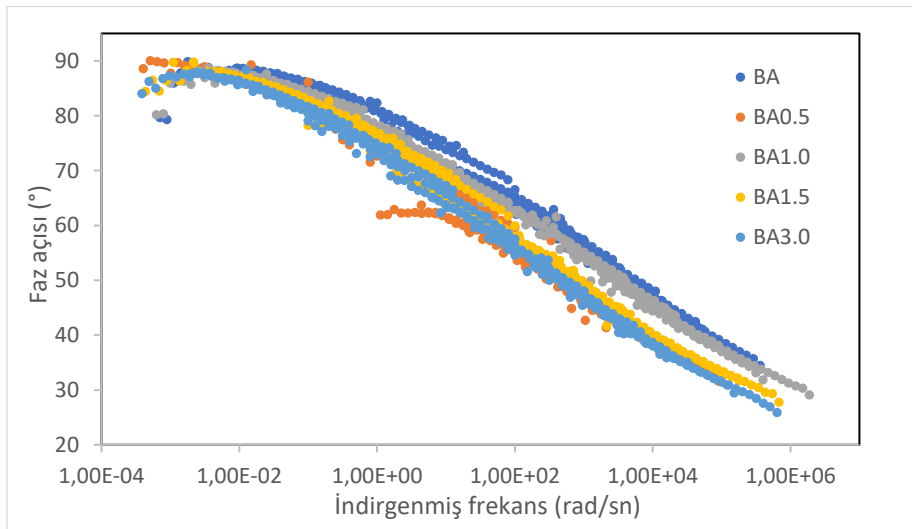
Frekans tarama testi, Malvern DSR+ reometre cihazı ile saf ve modifiye bağlayıcılara 10-30 °C sıcaklık aralığında 5 °C arttırılarak, 40-70 °C sıcaklık aralığında ise 10 °C arttırılarak yapılmıştır. Deney, 10-30 °C sıcaklık aralığında 8mm paralel plaka 2 mm boşluk geometrisinde yapılırken 40-70 °C sıcaklık aralığında 25 mm paralel plaka ve 1 mm boşluk geometrisinde yapılmıştır (Airey G. D., 2002). Test, bağlayıcının doğrusal viskoelastik (LVE) bölgesinde kalacak şekilde %0.01 yükleme (strain) değerinde gerçekleştirilmiştir. Test sırasında frekans, 0.1-100 rad/sn aralığına ayarlanmıştır. 40 °C referans sıcaklığında daha geniş bir frekans aralığındaki viskoelastik davranışı belirlemek için elde edilen kompleks modül (G^*) ve faz açısı (δ) değerlerin ana eğrileri (master curve) zaman sıcaklık süperpozisyon prensibi (TTSP)' ne göre Malvern DSR+ yazılımı yardımıyla elde edilmiştir.

Şekil 75'te saf ve modifiye bağlayıcıların 40 °C referans sıcaklıktaki kompleks modül değerlerinin ana eğrileri verilmiştir. Frekans değeri arttıkça (yükleme hızı) kompleks modül değerlerinde artış görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere bütün frekans değerlerinde en düşük kompleks modül değerlerini saf bağlayıcı vermiştir. Düşük frekanslarda en yüksek G^* değerlerini %3 modifiyeli bağlayıcılar verirken yüksek frekanslarda bütün modifiye bağlayıcılar benzer G^* değerleri vermektedir. Düşük frekanslarda katkının etkisi saf bağlayıcıya göre daha belirgin olurken yüksek frekanslarda katkının bağlayıcı içerisindeki etkisi giderek azalmıştır. Düşük frekanslarda saf bağlayıcıdan sonra en düşük G^* değerlerini %1 katkılı bağlayıcı vermektedir. Yüksek frekanslarda katkılı bağlayıcılar benzer performans sergilemişlerdir.



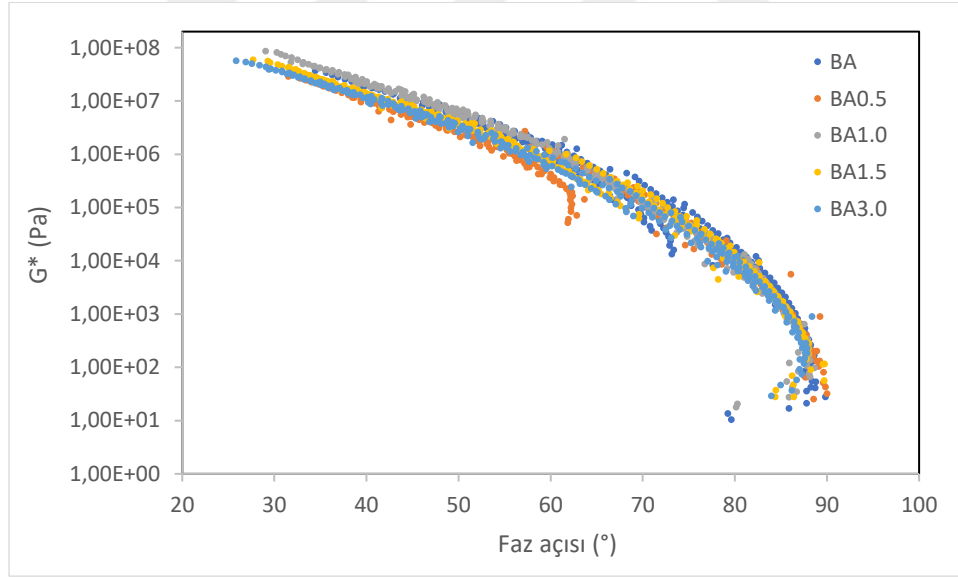
Şekil 75. Saf ve modifiye bağlayıcıların 40 °C referans sıcaklıktaki G^* ana eğrileri

Şekil 76’da saf ve modifiye bağlayıcıların faz açılarının frekansla değişimi görülmektedir. Şekil 76’da görüldüğü üzere düşük frekanslarda (10^{-3} rad/sn) bütün bağlayıcılar benzer faz açısı değerleri vermektedir. Ancak 0.01 rad/sn frekanstan sonra modifiye bağlayıcıların faz açısındaki düşüş saf bağlayıcıya göre daha fazla artarak daha elastik bir davranış sergilemeye başlamıştır. Burada BA0.5 ve BA3.0 katkılı bağlayıcıların daha düşük faz açısı değerleri verdiği görülmektedir. Yüksek frekanslarda B0.5, BA1.5 ve BA3.0 katkılı bağlayıcıların faz açısı değerleri birbirine yaklaşmaktadır.



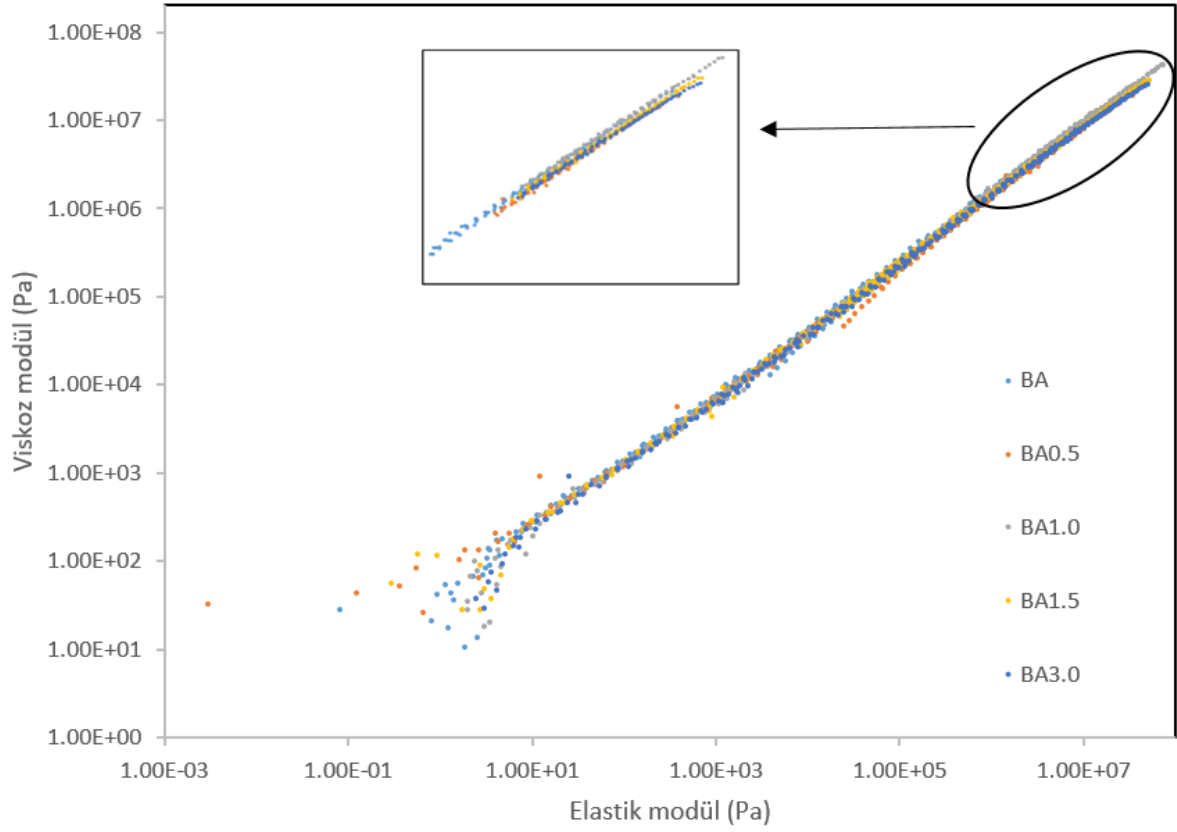
Şekil 76. Saf ve modifiye bağlayıcıların 40 °C referans sıcaklıktaki faz açısı ana eğrileri

Siyah alan (Black space) diyagram (Şekil 77), reolojik verilerden gelen kompleks kayma modülüne karşılık gelen faz açısını ifade etmektedir. Çizimin tipik olarak zaman-sıcaklık süperpozisyonunun ve termoreolojik basitliğin geçerliliğini ölçmek için kullanıldığı ifade edilmektedir (Qin, Farrar, Turner, & Planche, 2015). Genel olarak düşük kompleks modül değerine karşılık daha düşük faz açısı değeri, bağlayıcının esnekliğinin artmasına işaret etmektedir. Siyah diyagram, modifiye bitümlerin reolojik özelliklerinin tanımlanmasını sağlar. Saf bitümle karşılaştırıldığında, her modifiye bitümlerin reolojik verilerinin daha düşük faz açısına doğru kaymasıyla gösterilen katkı-bitüm karışımı içinde bir ağırlık varlığını göstermektedir (daha büyük elastik davranış). Şekilde görüldüğü üzere BA ve BA1.0 bağlayıcıları aynı kompleks modülü değerlerinde benzer faz açısı değerleri vermektedir. Ancak BA0.5, BA1.5 ve BA3.0 bağlayıcılarının yüksek kompleks modül değerlerinde daha düşük faz açısı değerleri vererek daha elastik davranış sergilediği belirlenmiştir.



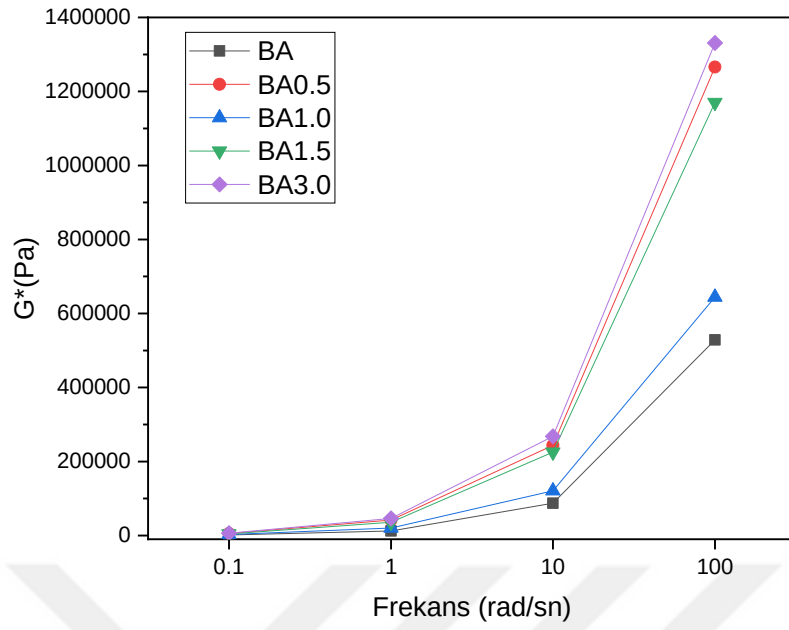
Şekil 77. Siyah (Black) diyagram

Şekil 78'de saf ve modifiye bağlayıcıların elastik ve viskoz modüldeki değişim (Cole-Cole diyagram) verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere düşük frekanslarda saf ve modifiye bağlayıcıların elastik ve viskoz modülleri benzer çıkarken frekans değeri arttıkça katkılı bağlayıcıların elastik modül tarafına kaydığı ve daha elastik davranış sergilediği görülmektedir.



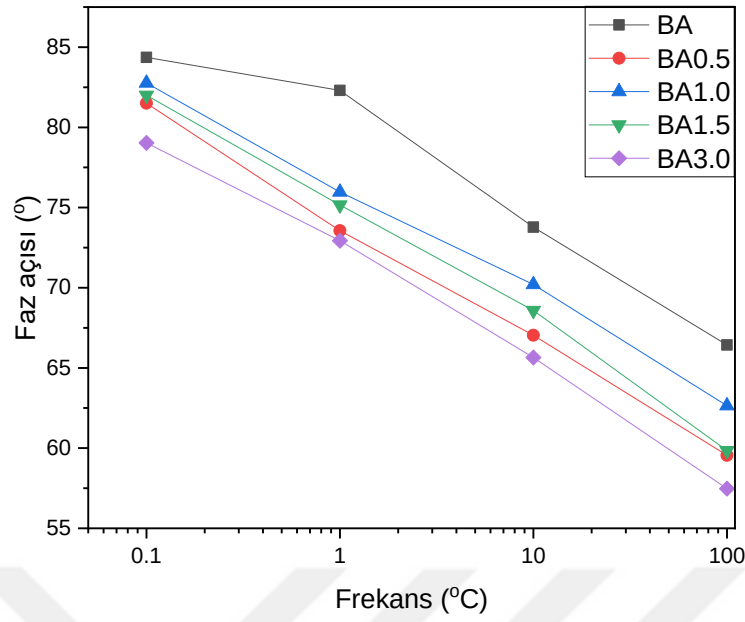
Şekil 78. Cole-cole diyagram

Şekil 79’de saf ve modifiyeli bağlayıcıların 40 °C’de farklı frekanslardaki kompleks modül değişimi verilmiştir. Şekle göre bütün frekanslarda en düşük G^* değerlerini saf bağlayıcı verirken en yüksek G^* değerlerini %3 katkılı bağlayıcı vermektedir. BA3.0 bağlayıcısından sonra en yüksek kompleks modül değerlerini sırasıyla BA0.5, BA1.5 ve BA1.0 bağlayıcıları vermektedir.



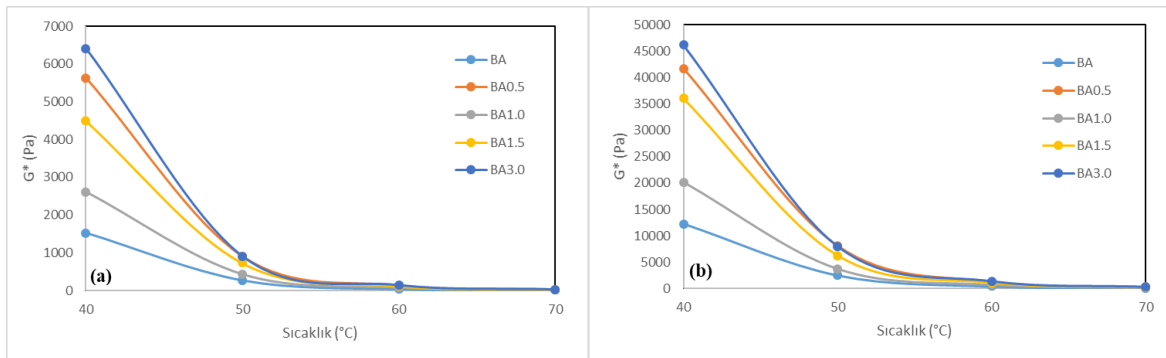
Şekil 79. Saf ve modifiyeli bağlayıcıların 40 °C'deki kompleks modül değerlerinin frekansla değişimi

Şekil 80'de saf ve modifiye bağlayıcıların 40 °C sıcaklıktaki faz açısı değerlerinin frekansla değişimi verilmiştir. Frekans arttıkça bütün bağlayıcıların faz açısı değerlerinde düşüş olduğu görülmektedir. Bütün frekans değerlerinde en yüksek faz açısı değerlerine saf bağlayıcı sahipken en düşük faz açısı değerlerine ise %3 katkılı bağlayıcılar sahip olmuştur. Bu durum, en esnek davranışın BA3.0 bağlayıcısının olduğuna işaret etmektedir. BA3.0 bağlayıcısından sonra en düşük faz açısı değerlerine sırasıyla BA0.5, BA1.5 ve BA1.0 bağlayıcıları sahiptir.



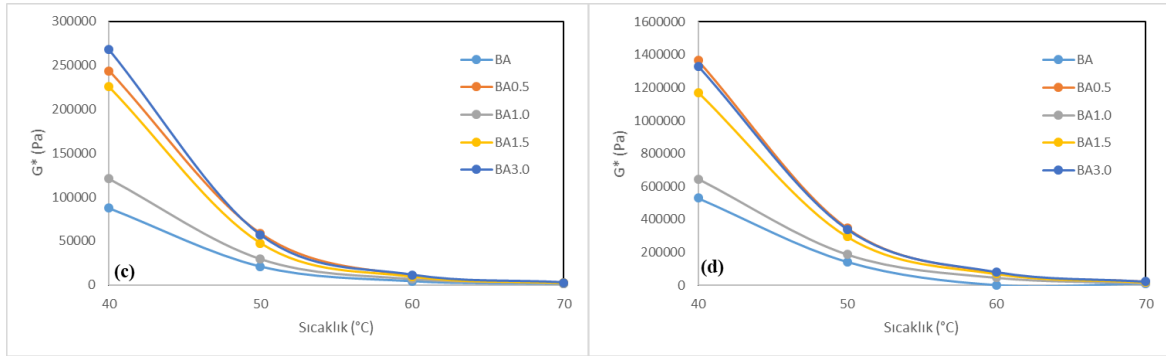
Şekil 80. Saf ve modifiyeli bağlayıcıların 40 °C'deki faz açısı değerlerinin frekansla değişimi

Şekil 81'de bütün bağlayıcıların farklı frekanslar için kompleks modül (G^*)-sıcaklık ilişkisi verilmiştir. Şekil 81'de görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça kompleks modül değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Şekil 81(a)'da 0.1 rad/sn frekanstaki değişime göre en yüksek G^* değerini BA30 bağlayıcısı vermiştir. Saf bağlayıcıya göre BA0.5, BA1.0, BA1.5 ve BA3.0 bağlayıcıları sırasıyla 3.71, 1.72, 2.95 ve 4.22 kat daha fazla G^* değeri vermiştir. Bu oranlar 1 rad/sn frekans değerinde 3.41, 1.65, 2.95 ve 3.77 kat olmaktadır. Bu oranlar 10 rad/sn ve 100 rad/sn frekanslarda giderek düşmektedir. Buda modifiye bağlayıcıların G^* değerlerinin sıcaklık arttıkça saf bağlayıcının G^* değerlerine yaklaştığını ifade etmektedir.

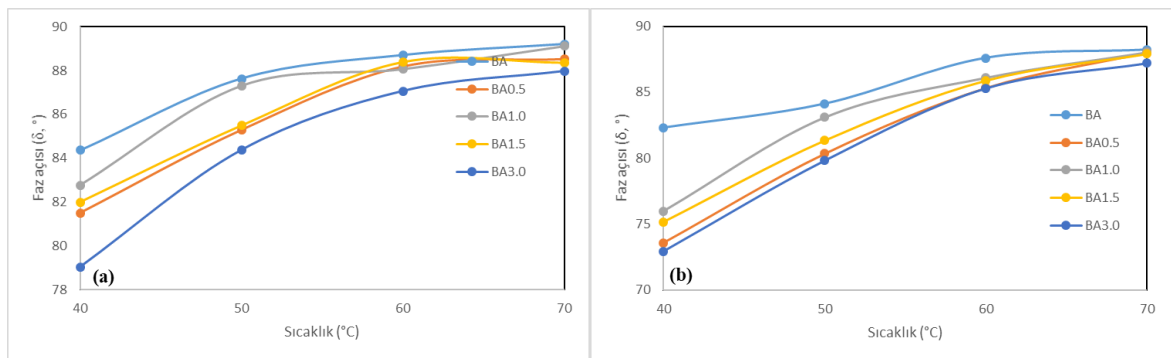


Şekil 81. Saf ve modifiyeli bağlayıcıların G^* -sıcaklık ilişkisi a) 0.1 rad/sn b) 1 rad/sn c) 10 rad/sn d) 100 rad/sn

Şekil 81'in devamı

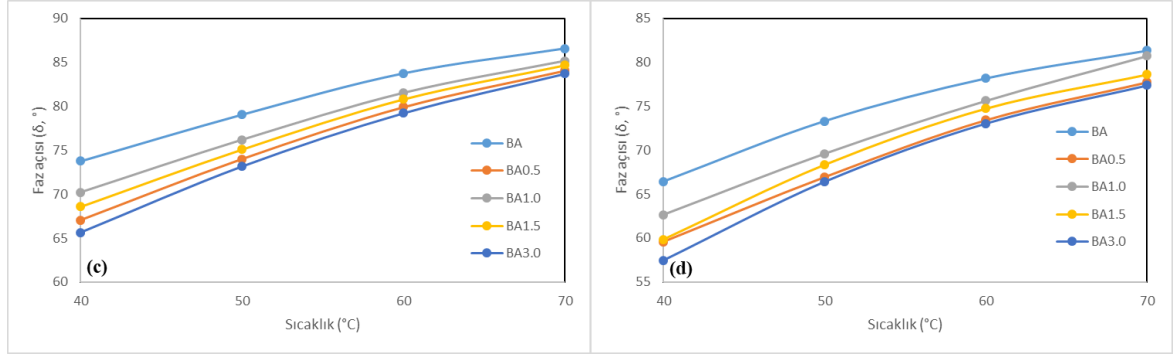


Şekil 82’de bütün bağlayıcıların farklı frekanslar için faz açısı (δ)-sıcaklık ilişkisi verilmiştir. Şekil 82’de görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça faz açısı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Şekil 82 (a)’da 0.1 rad/sn frekanstaki değişime göre en düşük δ değerini BA3.0 bağlayıcısı vererek daha elastik davranış sergilediği görülmektedir. Saf bağlayıcıya göre BA0.5, BA1.0, BA1.5 ve BA3.0 bağlayıcıları sırasıyla %3.39, %1.90, %7.34 ve %6.32 kat daha az faz açısı değeri vermiştir. Bu oranlar 1 rad/sn, 10 rad/sn ve 100 rad/sn frekans değerlerinde yaklaşık olarak sırasıyla %10, %6, %8 ve %10 olmaktadır. Bu durum, modifiye bağlayıcıların sıcaklık arttıkça faz açısı değerlerinin saf bağlayıcının faz açısı değerlerine göre daha az arttığı ve bu nedenle daha elastik davranış sergileyerek tekerlek izi oluşumuna karşı daha dirençli olacağını ifade etmektedir.



Şekil 82. Saf ve modifiyeli bağlayıcıların faz açısı-sıcaklık ilişkisi a) 0.1 rad/sn b) 1 rad/sn c) 10 rad/sn d) 100 rad/sn

Şekil 82'nin devamı



3.10. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deney (RTFOT) Sonuçları

Asfalt bağlayıcıların kısa süreli yaşlanmasını temsilen saf ve modifiye asfalt bağlayıcılar RTFOT deneyine tabi tutulmuşlardır. RTFOT uygulanan asfalt numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite ve DSR deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, numunelere ait kütle kayıpları da belirlenmiştir. Deneylere ilişkin veriler Tablo 18'dedir. Yaşlandırma işlemi sonrasında yapılan deneylerde artan katkı oranına bağlı olarak penetrasyon değerlerinin düştüğü ve yumuşama noktası değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Aynı şekilde, ΔS değerleri incelendiğinde yumuşama noktası sıcaklık farklarının, saf asfalt bağlayıcıya göre azaldığı görülmektedir. Bu durum, yaşlandırma sırasında belirli ısıya maruz kalan asfaltın yapısal değişime uğradığını göstermektedir.

Tablo 18. RTFOT sonrası bağlayıcıların fiziksel özellikleri

Deneyler	BA	BA0.5	BA1.0	BA1.5	BA3.0
Yumuşama Nok. (°C)	54.5	56.2	56.8	57.3	57.8
ΔS (°C)	4.5	3.9	3.1	2.8	2.2
Penetrasyon (dmm)	39	35	33	30	27
Kalıcı Penetrasyon (%)	69.64	76.09	74.49	72.29	70.31
Düktilite (cm)	100+	100+	100+	100+	100+
Kütle Kaybı (%)	0.055	0.041	0.043	0.047	0.049

Saf asfalta göre modifiye asfalt bağlayıcıların kütle kayıplarında düşüş olduğu belirlenmiştir. RTFOT deneyi sonucunda AASHTO T240 standardına göre bağlayıcı için

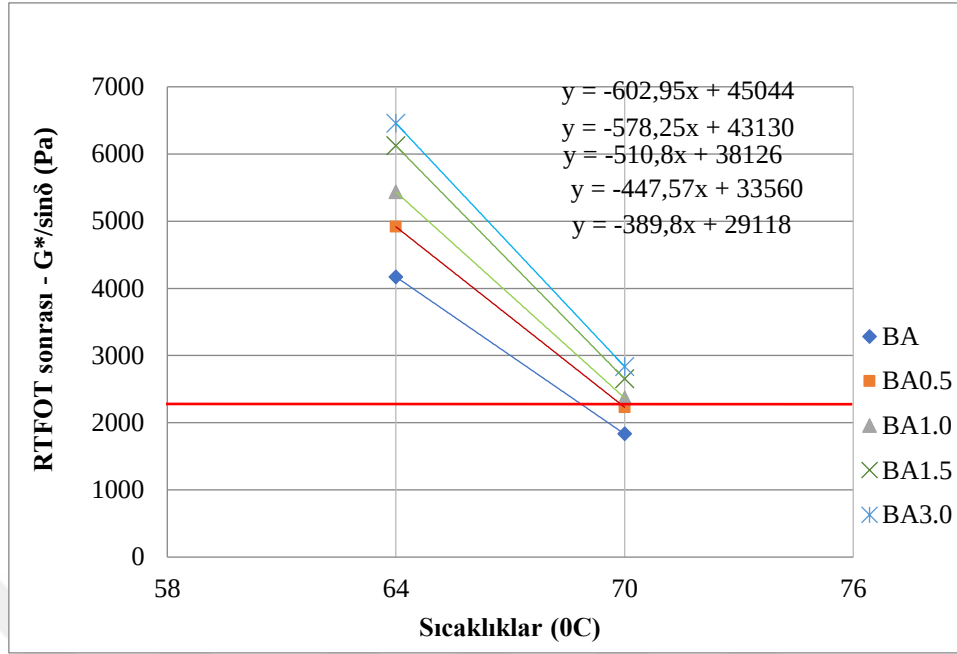
kütle kaybı %1.00 den fazla olmamalıdır. Bütün bağlayıcılar şartname sınırını sağlamaktadır.

RTFOT deneyi sonrası bağlayıcılar DSR deneyine tabi tutularak G' , G'' , G^* , δ ve $G^*/\sin \delta$ parametre değerleri belirlenmiştir. Deney, 64°C ve 70°C’de kontrollü gerilme (120 Pa) altında, 1.59 Hz (10 rad/s) frekansta yapılmıştır. Kısa süreli yaşlandırılmış deney numunesi, 25 mm paralel plakalar arasına 1 mm boşluk bırakılarak cihaza yerleştirilmiştir. Deney sıcaklıkları, yaşlandırılmamış numunelere uygulanan DSR deneyinde şartnamenin sağladığı sıcaklık değerleri esas alınarak seçilmiştir. Deney sonuçlarıyla ilgili veriler Tablo 19’da verilmiştir.

Tablo 19. RTFOT sonrası DSR deney sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G^* (Pa)	Δ (°C)	$G^*/\sin \delta$ (Pa)	Şartname Limiti (Pa)
BA	64	624,8	4074,4	4122,4	81,25	4170,9	2200 min.
	70	201,9	1809,6	1820,8	83,64	1832,1	
BA0.5	64	739,7	4802,5	4859,1	81,24	4916,1	
	70	242,7	2203,9	2217,3	83,71	2230,7	
BA1.0	64	778,9	5320,1	5376,8	81,67	5434,3	
	70	244,6	2340,3	2356,7	84,03	2369,5	
BA1.5	64	914,3	5982,2	6051,6	81,31	6121,9	
	70	289,8	2620,3	2636,3	83,68	2652,4	
BA3.0	64	973,9	6314,7	6389,4	81,23	6454,9	
	70	312,1	2802,4	2819,7	83,64	2837,2	

Tablo 19 incelendiğinde, deneyin yapıldığı sıcaklıklarda saf asfalt bağlayıcıya göre modifiye asfalt bağlayıcıların kayma kompleks modülü değerlerinin arttığı ve faz açısı değerlerinin de düştüğü görülmektedir.



Şekil 83. RTFOT sonrası tekerlek izi ($G^*/\sin\delta$) değerleri

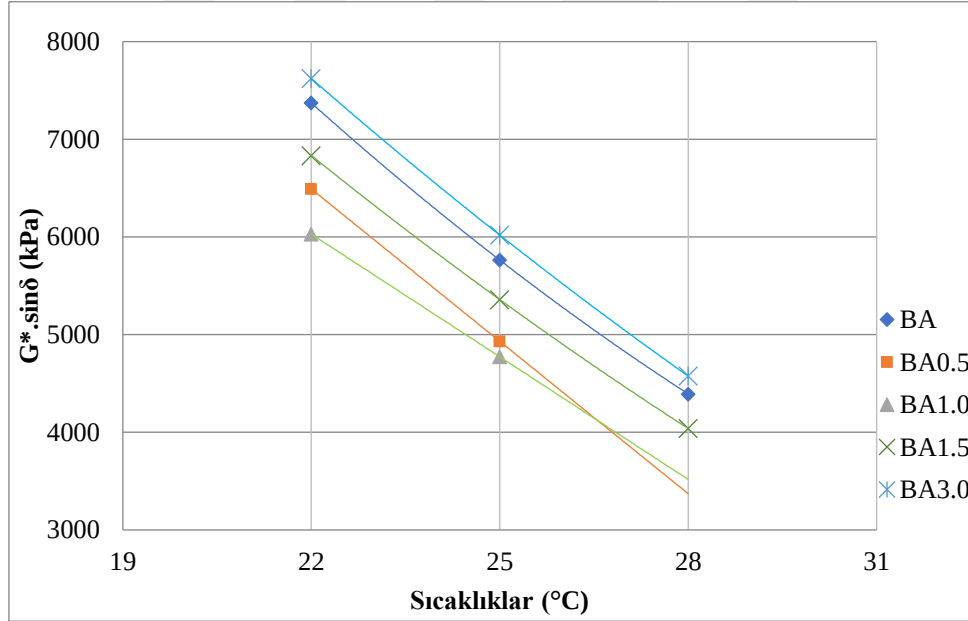
Şekil 83'te, saf asfalt bağlayıcı dışında bütün modifiye asfalt bağlayıcıların RTFOT sonrası 2200 Pa şartname limitini karşıladığı görülmektedir. Superpave yöntemine göre asfalt bağlayıcıların performans sınıfının belirlenmesi için, yaşlanmamış ve kısa dönem yaşlanmış bağlayıcıların aynı sıcaklıkta gerekli şartname limitlerini karşılaması gerekmektedir. Bu durumda, saf asfalt bağlayıcısının performans sınıfının PG 64-X ve bütün katkı oranlarındaki modifiye asfalt bağlayıcıların performans sınıflarının ise PG 70-X olduğu belirlenmiştir. Katkı kullanımı ile saf asfalt bağlayıcısının performans sınıfının bir üst seviye taşındığı ve katkı miktarındaki artışa paralel olarak asfalt bağlayıcısının tekerlek izine karşı dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

3.11. Basınçlı Yaşlandırma Kabini (PAV) Deney Sonuçları

RTFOT yöntemi ile yaşlandırılmış asfalt bağlayıcılar uzun süreli yaşlanmayı temsilen PAV deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda uzun süre yaşlandırılmış numunelere DSR deneyi yapılmıştır. DSR deneyi 8 mm çap ve 2 mm numune yüksekliği geometrisinde uygulanmış olup asfalt bağlayıcıların yorulma parametrelerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Deney verileri Tablo 20'de verilmiştir. Ayrıca, Şekil 84'te yorulma parametresinin sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir.

Tablo 20. PAV sonrası DSR deney sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	G' (kPa)	G'' (kPa)	G* (kPa)	δ (°C)	G*.sin δ (kPa)	Şartname Limiti (Pa) (AASHTO T5)
BA (26,6°C)	22	11170	7372	13390	33,42	7372	5000 maks.
	25	8222	5763	10040	35,03	5763	
	28	5870	4392	7331	36,80	4392	
BA0.5 (24,9°C)	22	9036	6491	11125	35,69	6491	
	25	6329	4931	8023	37,92	4931	
	28	-	-	-	-	-	
BA1.0 (24,5°C)	22	8768	6037	10645	34,55	6029	
	25	6523	4773	8083	36,20	4773	
	28	-	-	-	-	-	
BA1.5 (25,8°C)	22	10051	6836	12150	34,23	6834	
	25	7383	5359	9124	35,97	5359	
	28	5177	4039	6567	37,96	4039	
BA3.0 (27 °C)	22	11540	7622	13830	33,45	7622	
	25	8527	6019	10440	35,22	6019	
	28	6019	4576	7561	37,24	4576	

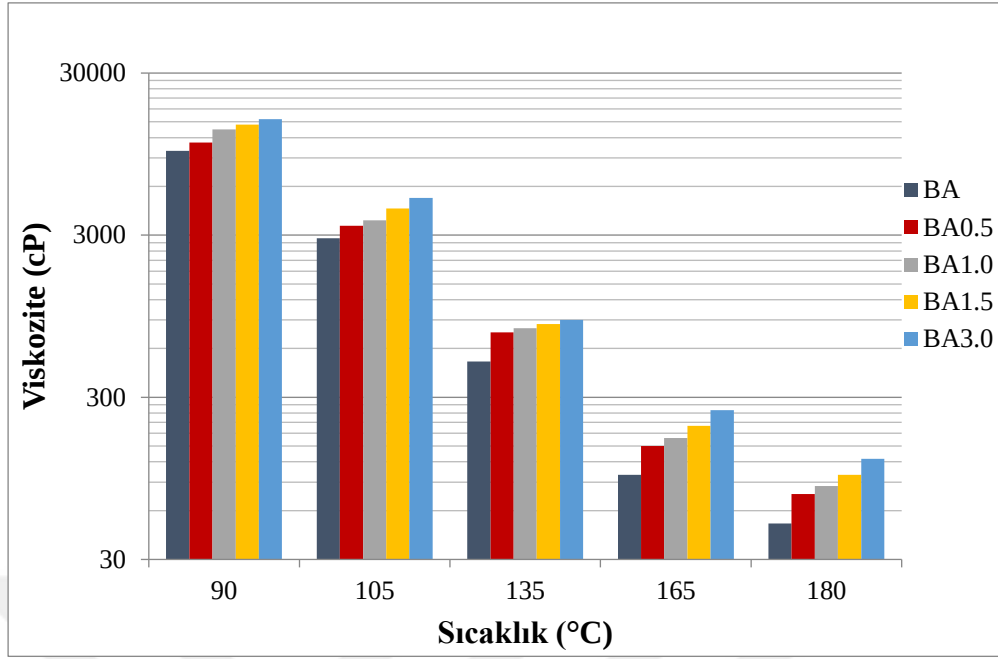
Şekil 84. PAV sonrası yorulma parametresi (G*. Sin δ) değerleri

PAV sonrası yapılan DSR deneyinde dikkate alınan yorulma parametresinin değeri, Superpave şartname sınırı olan 5000 kPa'yı aşmamalıdır. Deneyin yapıldığı sıcaklıkta G*.sin δ (yorulma parametresi) değerinin düşük olması, bağlayıcının uzun süre yaşlanma sonrası meydana gelebilecek yorulma çatlaklarına karşı daha dirençli olduğunu

göstermektedir. Bu bağlamda, Tablo 20 ve Şekil 84 incelendiğinde, deney 28°C sıcaklıkta başlatılmış ve şartname sınırına kadar devam ettirilmiştir. Saf asfalta göre, %3 katkılı modifiye asfalt dışında diğer modifiye asfaltlar şartname kriteri olan maks. 5000 kPa değerini daha düşük sıcaklıklarda sağlamıştır. Deney verileri incelendiğinde, sentez katkı maddesinin saf asfaltın yorulma direncini belirli katkı oranına kadar arttırdığı ancak yüksek katkı miktarlarında olumsuz etkilediği görülmektedir. Bu durumun, katkı miktarının artışına paralel olarak, sentez katkı içeriğindeki bor oksit miktarının artmasıyla bağlayıcıyı sertleştirdiği sebebiyle olabileceği düşünülmektedir. Saf asfalta göre en yüksek yorulma direncini %1 katkılı asfaltın verdiği ve şartname sınırının 24,5°C’te sağlandığı sonucuna varılmaktadır.

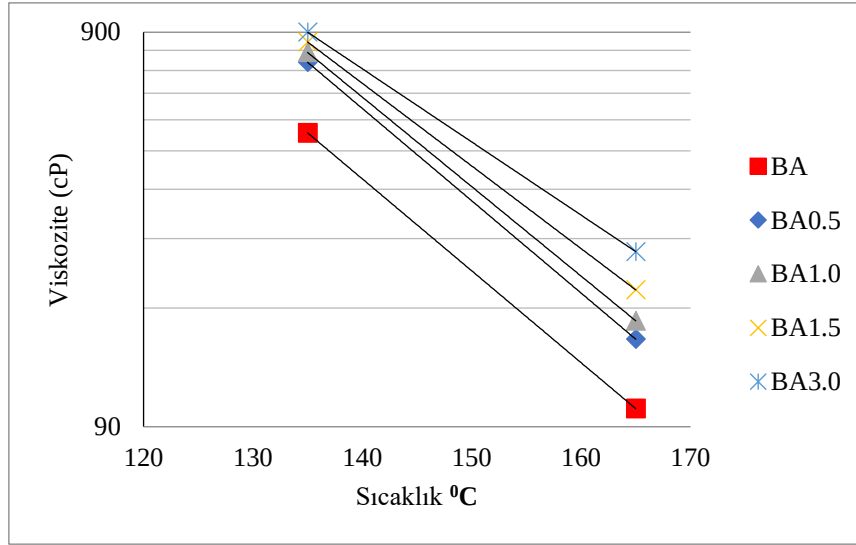
3.12. Dönel Viskozimetre (RV) Deney Sonuçları

Saf ve modifiye asfalt bağlayıcıların 90°C, 105°C, 135°C, 165°C ve 180°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri Şekil 85’te verilmiştir. Deneyin yapıldığı her sıcaklıkta saf asfaltın viskozite değeri sentez katkı maddesi miktarına paralel olarak artmıştır. Superpave şartnamesine göre işlenebilirlik açısından asfalt bağlayıcıların 135°C’deki viskozite değerlerinin 3000 cP sınırını geçmemesi gerekmektedir. Şekilden görüldüğü üzere katkı miktarına bağlı olarak RV değerlerinde beklendiği üzere bir miktar artış olduğu gözlenirse de bütün modifiye asfalt bağlayıcıların 135°C sıcaklıktaki viskozite değerlerinin şartname değerinden düşük olduğu ve işlenebilirlik açısından herhangi bir olumsuzluk olmadığı görülmektedir.



Şekil 85. Dönel viskozimetre (RV) deney sonuçları, cP

Asfalt bağlayıcıların agregayla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının hesaplanmasında bağlayıcıların 135°C ve 165°C'deki viskozite değerlerinden yararlanılmaktadır. Belirlenen sıcaklıklardaki viskozite değerleriyle logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği çizilir (Şekil 86) ve grafik üzerinden 170 ± 20 cP ve 280 ± 30 cP değerlerine karşılık sıcaklık aralığı hesaplanır. Grafikteki 170 ± 20 cP değer aralığı karıştırma sıcaklığını, 280 ± 30 cP değer aralığı da sıkıştırma sıcaklığını temsil etmektedir. Bağlayıcılara ait karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları Tablo 21'de verilmiştir.



Şekil 86. Logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği

Tablo 21. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Numune adı	Karıştırma Sıcaklık Aralığı (°C)		Sıkıştırma Sıcaklık Aralığı (°C)	
BA	148	151	140	142
BA0.5	158	163	150	153
BA1.0	156	160	148	150
BA1.5	158	163	150	153
BA3.0	163	166	153	155

Tablo 21 incelendiğinde sentez katkı maddesinin kullanılması ile karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Bu durum, karışım için daha yüksek sıcaklıklara ve dolayısıyla daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulacağını göstermektedir. Özellikle BA3.0 modifiyeli asfalt bağlayıcının, agrega ile karışması için saf bağlayıcıya göre yaklaşık 15°C daha yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulacağı tespit edilmiştir.

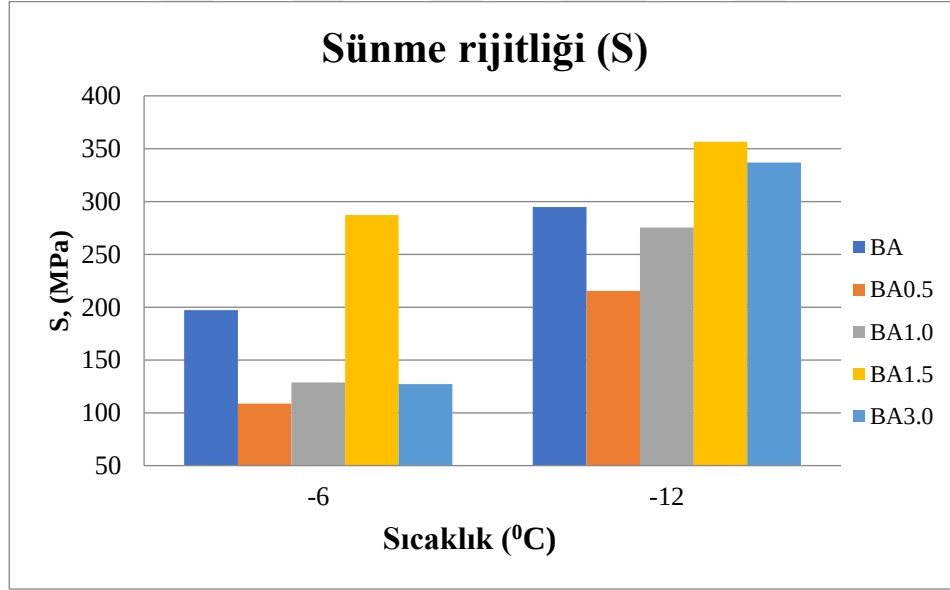
3.13. Eğilme Kirişi Reometresi (BBR) Deney Sonuçları

PAV deneyiyle uzun süre yaşlandırılan bağlayıcılara eğilme kirişi reometresi (BBR) deneyi uygulanmış ve deneyden elde edilen sonuçlar Tablo 22’de verilmiştir. Bağlayıcılara, -6°C ve -12 °C sıcaklıklarda BBR deneyi uygulanarak bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda

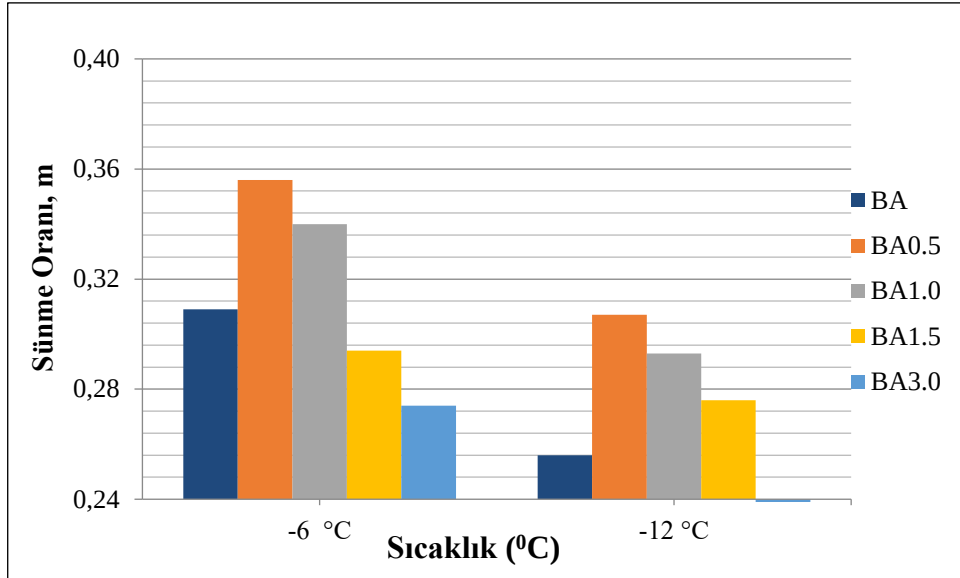
meydana gelen çatlamalara karşı dirençleri belirlenmiştir. Deney sonuçları Şekil 87 ve Şekil 88’de grafiksel olarak ifade edilmiştir.

Tablo 22. Eğilme kirişi reometresi (BBR) deney sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	Sünme Rijitliği S (MPa) ≤ 300 olmalı	Sünme oranı, $m \geq 0.300$ olmalı	Defleksiyon (mm)
BA	-6	197,160	0,309	0,354
	-12	294,772	0,256	0,243
BA0.5	-6	108,848	0,356	0,682
	-12	215,277	0,307	0,435
BA1.0	-6	128,764	0,340	0,550
	-12	275,506	0,293	0,376
BA1.5	-6	287,129	0,294	0,468
	-12	356,706	0,276	0,326
BA3.0	-6	127,141	0,274	0,359
	-12	336,820	0,199	0,210



Şekil 87. Sünme rijitliği (S) değerlerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 88. Sünme oranı (m) değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Superpave şartnamesinde sünme rijitliği değerinin 300 MPa'dan küçük ve sünme oranı değerinin de en az 0.3 olması gerekmektedir. Sünme rijitliği değerinin yüksek olması ile bağlayıcı gevrek davranış göstererek kaplamalarda çatlamlara neden olmaktadır. Aynı şekilde sünme oranının belirlenen değerden düşük olmasıyla asfalt bağlayıcının sertliği artmakta ve kaplamalarda çatlaklar meydana gelmektedir. Bu sebeple, bağlayıcıdan beklenen performans düşük sıcaklıklarda bağlayıcının sünek davranış gösterip çatlamların oluşmamasıdır. Şekil 87 ve 88 incelendiğinde, -6°C sıcaklıkta bütün bağlayıcıların sünme rijitliği ve sünme oranı değerlerinin şartname sınırlarını karşıladığı ancak, %1.5 ve %3 katkılı modifiye bağlayıcıların sünme oranı şartını sağlayamadığı görülmüştür. %0.5 ve %1 oranında sentez katkı maddesinin saf bağlayıcının düşük sıcaklıktaki reolojik özelliklerini olumsuz etkilemediği tespit edilmiştir. Yüksek oranlardaki sentez katkı maddesinin (%1.5 ve %3) bağlayıcının sertliğini arttırdığı ve bu sebeple düşük sıcaklıklarda çatlamaya karşı direncinin düşük olabileceği sonucuna varılmıştır. Düşük sıcaklıklarda en iyi sonucu BA0.5 modifiyeli bağlayıcının verdiği tespit edilmiştir.

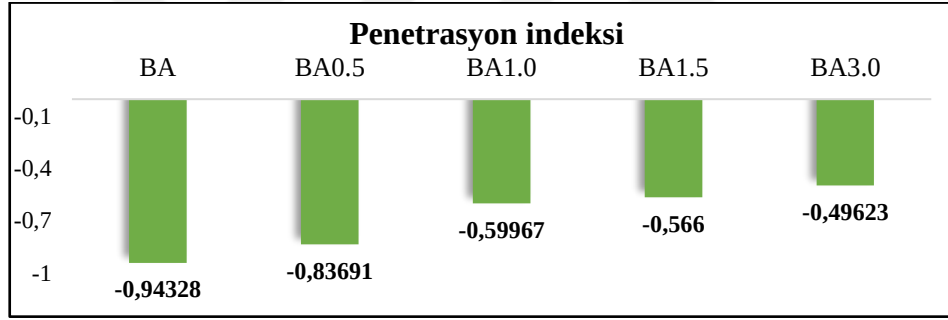
BBR deneyi ile bağlayıcıların düşük sıcaklıklardaki performans sınıfı belirlenmektedir. DSR ve BBR deneylerinin sonuçlarından faydalanılarak saf ve BORB modifiyeli asfalt bağlayıcıların performans sınıfları tespit edilmiş ve Tablo 23'te gösterilmiştir.

Tablo 23. Bağlayıcılara ait performans sınıfları

Numune Adı	Performans Sınıfı
BA	PG 64-16
BA0.5	PG 70-22
BA1.0	PG 70-16
BA1.5	PG 70-10
BA3.0	PG 70-10

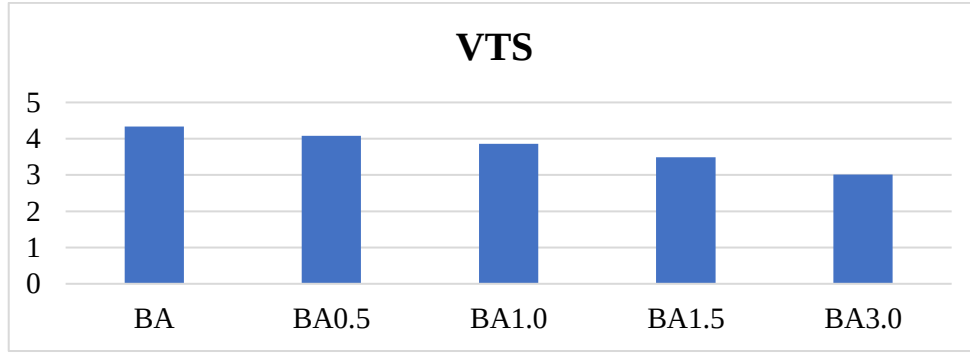
3.14. Bağlayıcının Sıcaklık Duyarlılığı Sonuçları

Saf ve BORB modifiyeli asfalt bağlayıcıların sıcaklık duyarlılığı, penetrasyon ve viskozite-sıcaklık duyarlılığı indeksleri ile hesaplanmıştır. Şekil 89’da penetrasyon indeksi ve Şekil 90’da viskozite-sıcaklık duyarlılığı (VTS) parametresi sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 89. Bağlayıcılara ait penetrasyon indeksi değerleri

Şekil 89’da, bağlayıcıların sıcaklık duyarlılığının katkı içeriğinin artmasıyla azaldığı gözlenmiştir. BORB modifiyeli asfalt bağlayıcıların saf asfalt bağlayıcının sıcaklık hassasiyetini azalttığı ve BA3.0 modifiyeli asfaltın saf asfalta göre sıcaklık hassasiyetini %48 oranında iyileştirdiği görülmüştür.



Şekil 90. Bağlayıcılara ait VTS parametre değerleri

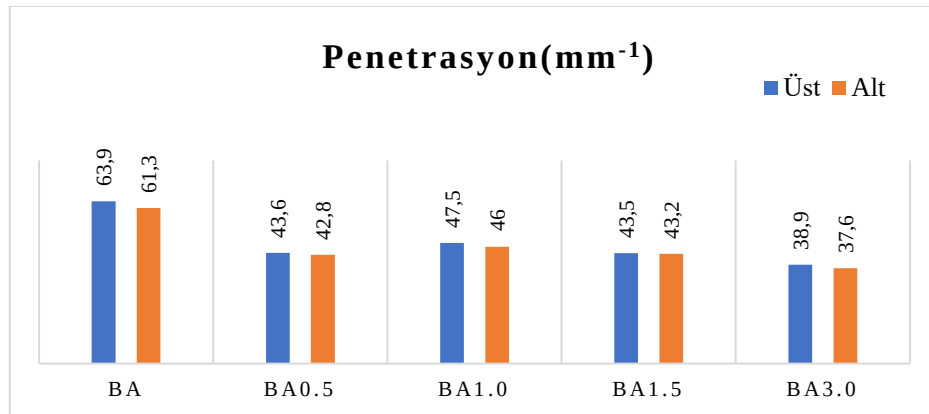
Şekil 90'da VTS değerleri, 135°C ve 165°C'deki viskozite değerlerine göre hesaplanmıştır. Katkı oranı arttıkça, saf asfalt bağlayıcıya göre VTS değerlerinde azalma olmaktadır. VTS değerlerindeki düşüş, modifiye asfalt bağlayıcıların sıcaklığa karşı duyarlılığının daha az olduğunu ve sıcaklık değişimlerine karşı daha dayanımlı olduğunu göstermektedir.

3.15. Depolama Stabilitesi Deney Sonuçları

Depolama stabilitesi deneyi sonrası elde edilen bağlayıcılar penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite ve dinamik kayma reometresi deneylerine tabi tutulmuşlardır.

➤ Depolama stabilitesi sonrası penetrasyon deneyi sonuçları

Depolama stabilitesi deneyi sonrası elde edilen numunelerin penetrasyon deney sonuçları Şekil 91'de verilmiştir.



Şekil 91. Depolama stabilitesi sonrası penetrasyon deneyi sonuçları

Şekil 91’de görüldüğü üzere, BORB katkı maddesinin katkı oranının artması ile asfalt bağlayıcının penetrasyon değerleri azalmış ve bağlayıcının kıvamı artmıştır. Alüminyum tüplerin üst kısmından alınan numunelerin penetrasyon değerlerinin tüplerin alt kısmından alınan numunelere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeninin sentez katkı maddesinin bir kısmının tüpün alt kısmına çökmesi olduğu düşünülmektedir.

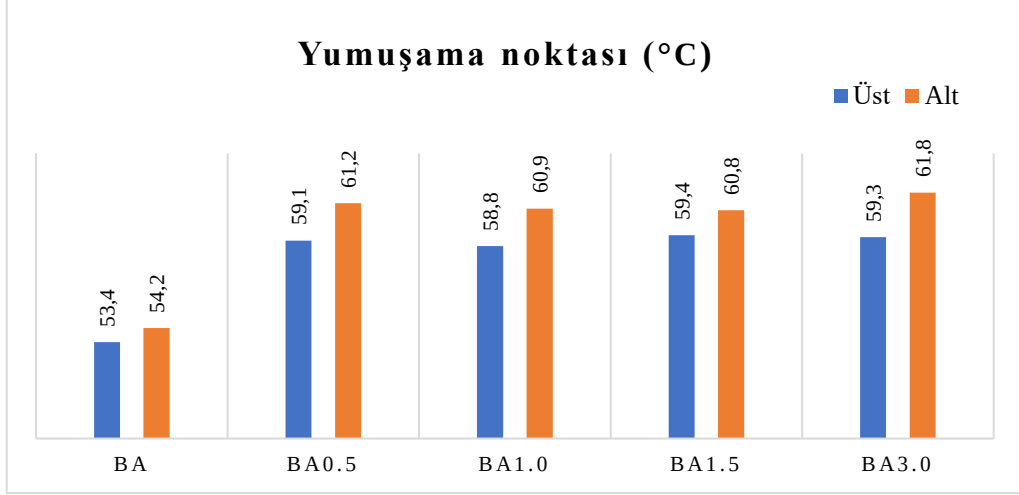
Tüplerin üst kısmından elde edilen numuneler arasında en yüksek penetrasyon değerine saf bağlayıcı sahipken en düşük penetrasyon değeri ise BA3.0 modifiyeli asfalt bağdayıcıda görülmüştür. Tüplerin alt kısmından elde edilen numuneler arasında en yüksek penetrasyon değerini saf bağlayıcı verirken en düşük penetrasyon değerini BA3.0 modifiyeli asfalt bağdayıcıya ait olduğu tespit edilmiştir. Depolama stabilitesi sonrası penetrasyon sonuçlarına bakıldığında, sentez katkı maddesinin katkı oranına bağlı olarak kıvamı arttırdığı görülmektedir.

Alt ve üst kısımlardan alınan numunelerin penetrasyon değerleri karşılaştırıldığında depolama stabilitesi açısından en kararlı bağlayıcının BA1.5 modifiyeli asfalt bağlayıcı olduğu, en kararsız ve olumsuz sonuçlara sahip bağlayıcının ise saf bağlayıcıya ait olduğu görülmektedir. Saf bağlayıcının modifiyeli bağlayıcılardan daha olumsuz sonuca sahip olmasının nedeni, yüksek sıcaklıklarda saf bağlayıcının yaşlanması ve modifiyeli bağlayıcıların reçine bileşiği ile yüksek sıcaklıklarda daha kararlı yapıya sahip olabileceği sonucuna varılmıştır.

EN 14023 standardına göre, depolama stabilitesi sonrası tüplerden elde edilen alt ve üst numunelere ait penetrasyon değerleri farkının en fazla 13 mm^{-1} olması gerekmektedir. Elde edilen sonuçlardan, modifiye edilen bağlayıcıların penetrasyon değerleri açısından şartname ölçütlerine göre herhangi bir olumsuzluğa neden olmadığı görülmektedir.

➤ Depolama stabilitesi sonrası yumuşama noktası deney sonuçları

Depolama stabilitesi deneyi sonrası elde edilen numunelerin yumuşama noktası deney sonuçları Şekil 92’de verilmiştir.



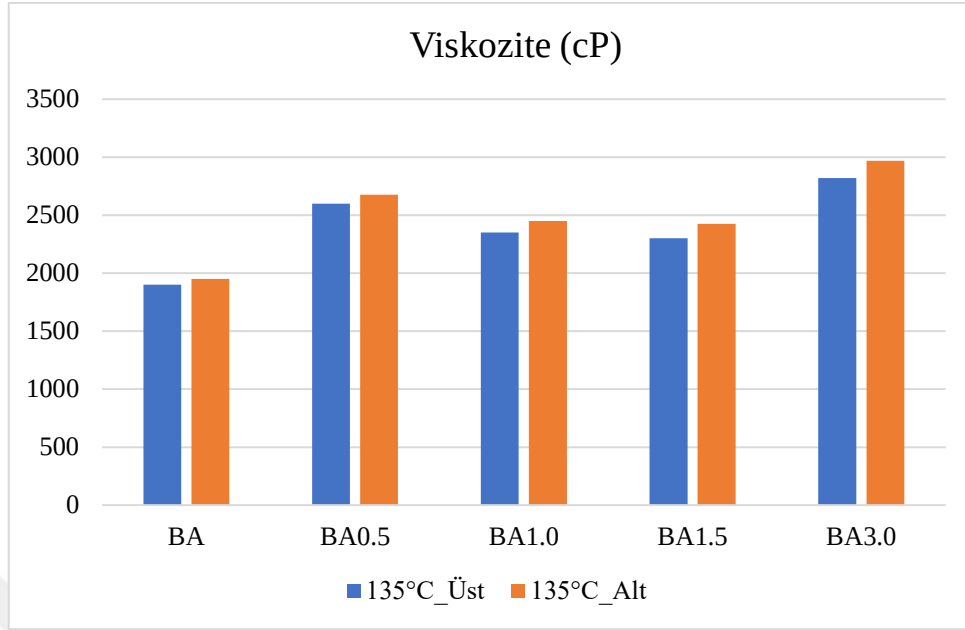
Şekil 92. Depolama stabilitesi sonrası yumuşama noktası deneyi sonuçları

Şekil 92 incelendiğinde, depolama stabilitesi penetrasyon değerlerine paralel sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Penetrasyon değeri yüksek olan tüpün üst kısımlarda yumuşama noktası değerleri de düşerken, penetrasyon değeri düşük olan alt kısımlarda yumuşama noktası değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

EN 14023 standardına göre, depolama stabilitesi sonrası tüplerden elde edilen alt ve üst numunelere ait yumuşama noktası değerleri farkının en fazla 5°C olması gerekmektedir. Alt ve üst kısımlardan elde edilen numunelere ait yumuşama noktası değerleri arasında en yüksek sıcaklık farkının 2.5 °C olduğu ve bunun BA3.0 modifiyeli asfalt bağlayıcıya ait olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, modifiye edilen bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerinin şartname ölçütlerini sağladığı ve katkının depolama sonrası yumuşama noktası değerleri açısından herhangi bir olumsuzluğa neden olmadığı görülmektedir.

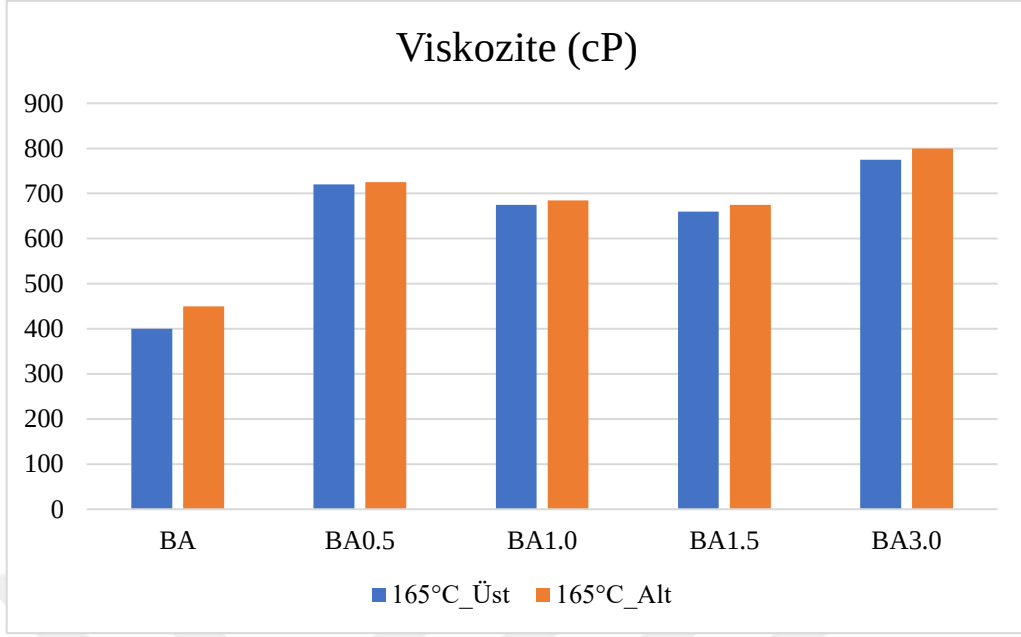
➤ Depolama stabilitesi sonrası RV deney sonuçları

Depolama stabilitesi deneyi sonrası elde edilen numunelerin 135 ve 165°C'deki dönel viskozite deney sonuçları sırasıyla Şekil 93 ve 94'te verilmiştir.



Şekil 93. Depolama stabilitesi sonrası bağlayıcıların 135°C'deki viskozite sonuçları

Şekil 93'ten görüleceği gibi depolama stabilitesi deneyi sonrası tüpün altından elde edilen numunelerin viskozite değerleri üstünden elde edilen numunelerden daha yüksek değerlere sahiptir. Depolama stabilitesi öncesi RV deney sonuçlarıyla kıyaslandığında, depolama sonrası RV deney sonuçlarının uyumlu olduğu belirlenmiştir. Katkı, saf bağlayıcının viskozite değerlerini arttırmıştır ancak tüplerin alt ve üst kısımları arasındaki fark işlenebilirlik açısından herhangi bir olumsuzluğa neden olacak kadar yüksek değildir. Ayrıca, 135°C'de viskozite değeri olarak şartname sınırı olan 3000 cP'nin bütün modifiyeli bağlayıcılar tarafından sağlandığı tespit edilmiştir.



Şekil 94. Depolama stabilitesi sonrası bağlayıcıların 165°C’deki viskozite sonuçları

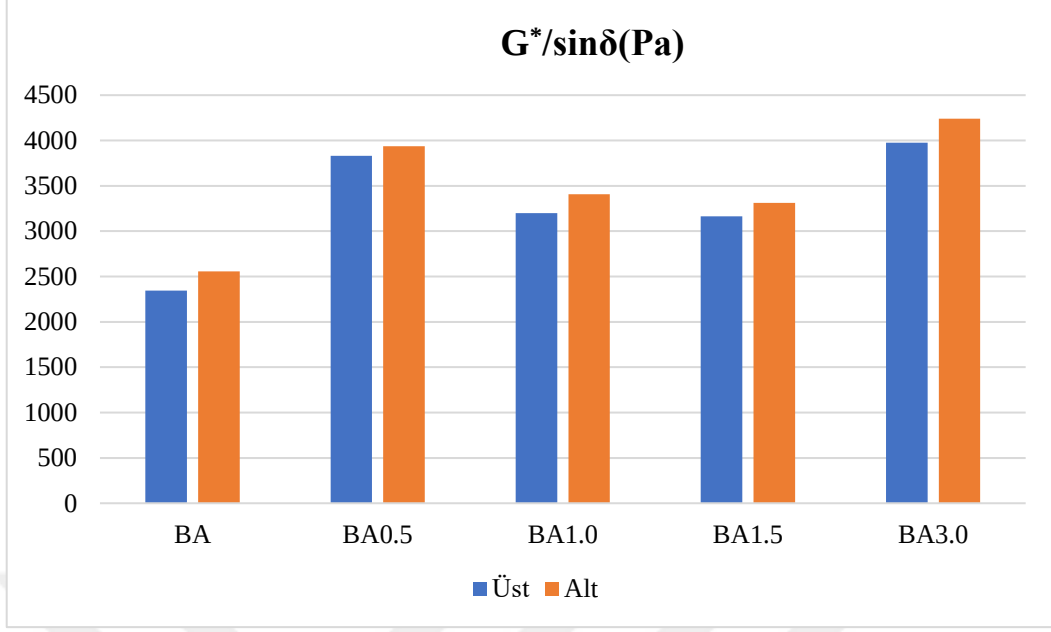
Şekil 94 incelendiğinde en yüksek viskozite değerine BA3.0 modifiyeli bağlayıcının alt kısım numunenin ve en düşük viskozite değerine ise saf bağlayıcının üst kısım numunenin sahip olduğu belirlenmiştir. Şekilden genel olarak, 135°C’deki viskozite sonuçları ile 165°C’deki viskozite sonuçlarının uyumlu olduğu görülmektedir. Bağlayıcıların tümünde tüpün alt kısmından elde edilen numunelerin üst kısma göre viskozite değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Her iki sıcaklıktaki viskozite değerleri beraber değerlendirildiğinde, sentez katkı maddesinin saf bağlayıcı ile yüksek uyuma sahip olduğu ve tüplerin alt ve üst kısımlarından elde edilen numunelerin viskozite değerleri arasında belirgin bir fark olmadığı belirlenmiştir.

➤ Depolama stabilitesi sonrası DSR deney sonuçları

Depolama stabilitesi sonrası tüplerin alt ve üst kısımlarından elde edilen bağlayıcı numuneleri üzerinde 3 farklı sıcaklıkta (58, 64 ve 70°C), kontrollü gerilme (120 Pa) altında ve 1,59 Hz (10 rad/s) frekansta DSR deneyi uygulanmıştır. Deney numunesi, 25 mm paralel plakalar arasına 1 mm boşluk bırakılarak cihaza yerleştirilmiştir. Deney sonucunda, G' , G'' , G^* , δ ve $G^*/\sin\delta$ parametre değerleri bulunmuş ve ilgili veriler Tablo 24’te verilmiştir.

Tablo 24. Depolama stabilitesi sonrası DSR deney sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G* (Pa)	δ (°C)	G*/sin δ (Pa)
BA-ÜST	58	668,4	5470	5510	83,0	5551
	64	202,2	2326	2335	85,0	2344
	70	62,96	1034	1035	86,5	1037
BA-ALT	58	812,4	6227	6280	82,6	6333
	64	237,1	2533	2544	84,6	2555
	70	74,57	1128	1130	86,2	1133
BA0.5-ÜST	58	1505	8990	9115	80,5	9242
	64	462,5	3775	3803	83,0	3831
	70	146,8	1691	1697	85,0	1704
BA0.5-ALT	58	1636	9740	9876	80,5	10010
	64	472,2	3879	3908	83	3937
	70	145,8	1702	1708	85	1714
BA1.0-ÜST	58	1150	7500	7587	81,3	7676
	64	348,7	3160	3179	83,7	3199
	70	105,5	1371	1375	85,6	1379
BA1.0-ALT	58	1283	7847	7951	80,7	8057
	64	409,3	3359	3384	83,0	3409
	70	135,6	1052	1509	84,9	1515
BA1.5-ÜST	58	1093	7426	7506	81,6	7587
	64	337,8	3127	3145	83,8	3163
	70	102,9	1351	1355	85,6	1359
BA1.5-ALT	58	1225	7866	7961	81,1	8057
	64	367,7	3272	3293	83,6	3313
	70	111,8	1431	1435	85,5	1440
BA3.0-ÜST	58	1654	10190	10320	80,8	10460
	64	455	3925	3951	83,3	3977
	70	134,4	1670	1676	85,4	1681
BA3.0-ALT	58	1788	10750	10890	80,5	11040
	64	502,5	4181	4211	83,1	4241
	70	148,5	1777	1783	85,2	1790



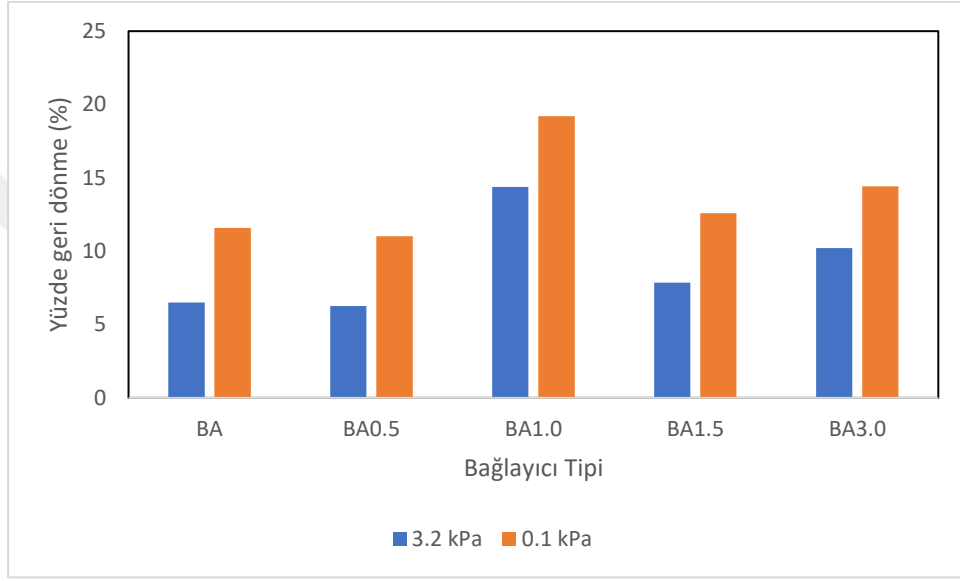
Şekil 95. Depolama stabilitesi sonrası tekerlek izi parametreleri

Depolama sonrası tekerlek izi parametrelerine bakıldığında, tüplerin alt ve üst kısımlarından elde edilen numuneler arasında belirgin bir olmadığı görülmüştür (Şekil 95). Modifiyeli bağlayıcıların saf asfalt bağlayıcıya göre tekerlek izine karşı dayanımının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Depolama stabilitesi sonrası elde edilen deney sonuçlarından, genel olarak katkının asfalt bağlayıcıyla iyi uyum sağladığı ve depolama açısından herhangi bir olumsuzluğa neden olmadığı sonucuna varılmıştır.

3.16. MSCR Deney Sonuçları

MSCR deney sonuçlarından elde edilen verilerden, Şekil 96’da saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların 3.2 kPa ve 0.1 kPa gerilme seviyesindeki sünme uyumu (J_{nr}) değerleri ve Şekil 97’de bu iki gerilme seviyeleri arasındaki yüzdesel farklar verilmiştir. Şekil 97’de görüldüğü üzere her iki yük seviyesinde en düşük sünme uyumunu BA1.0 bağlayıcısı, en yüksek sünme uyumu değerini ise BA bağlayıcısı vermektedir. Sünme uyumu değerleri kıyaslandığında bağlayıcılar arasında $BA1.0 < BA3.0 < BA1.5 < BA0.5 < BA$ ilişkisi bulunmaktadır. 3.2 kPa gerilme seviyesinde BA, BA0.5, BA1.0, BA1.5 ve BA3.0 bağlayıcıları saf bağlayıcıya göre sırasıyla %6, %56, %22 ve %29 daha düşük J_{nr} değeri vererek tekerlek izi oluşumuna karşı daha dirençli olacağı belirlenmiştir. Buradan da

Şekil 98’de saf ve modifiyeli bağlayıcıların 3.2kPa ve 0.1 kPa gerilme seviyelerindeki ortalama yüzde geri dönemleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre her iki gerilme seviyesinde de en yüksek geri dönme yüzdesine %1 katkılı bağlayıcı sahiptir. Saf ve %0.5 katkılı bağlayıcılar benzer performans göstermiştir. Buradan anlaşılabacağı üzere BA1.0 bağlayıcısı daha elastik bir davranış sergilemektedir. Buda yukarıda belirtildiği üzere tekerlek izine karşı daha dirençli olacağına işaret etmektedir.



Şekil 98. Saf ve modifiye bağlayıcılar 0.1 kPa ve 3.2 kPa gerilme seviyelerinde yüzdesel geri dönme değerleri

Tablo 25’te PG ve MSCR test sonuçlarına göre bağlayıcıların performans seviyeleri verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere MSCR testine göre BA1.0 bağlayıcısının 64 °C’de aşırı ağır taşıt trafiğinde kullanımı uygun iken diğer bağlayıcıların 64 °C’de ağır taşıt trafiğinde kullanımı uygundur.

Tablo 25. PG ve MSCR test sonuçlarına göre bağlayıcı performans seviyeleri

Bağlayıcı Tipi	PG	MSCR
BA	PG64-16	PG64V-16
BA0.5	PG70-16	PG64V-16
BA1.0	PG70-16	PG64E-16
BA1.5	PG70-10	PG64V-10
BA3.0	PG70-10	PG64V-10

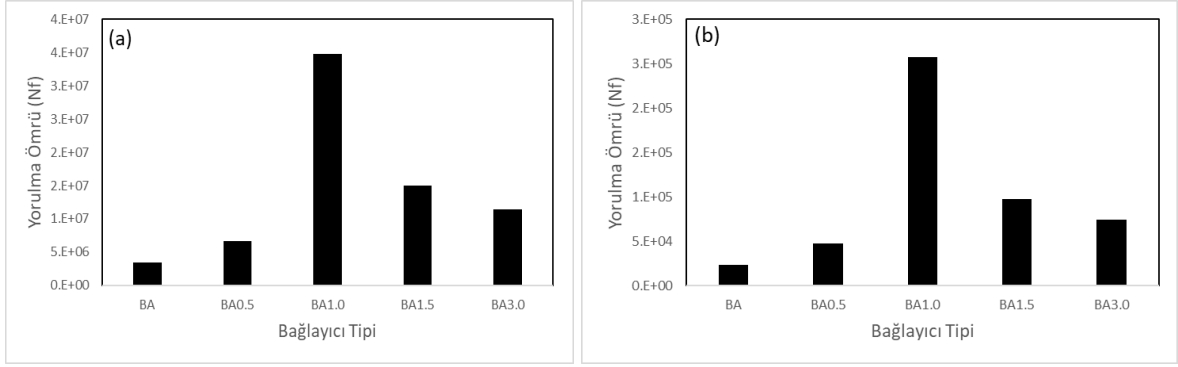
3.17. LAS Deney Sonuçları

LAS deney sonuçlarından VECD teorisine göre hesaplanan yorulma parametreleri Tablo 25’te verilmiştir. Tablo 26’ya göre tüm modifiye bağlayıcılar saf bağlayıcıya göre daha yüksek A parametresi ve daha düşük B parametresi vererek katkı kullanımının bağlayıcı bütünlüğüne ve değişen gerilme seviyelerindeki yorulma direncine karşı olumlu bir etki yaptığı belirlenmiştir. Burada en yüksek A en düşük B parametresini BA1.0 bağlayıcısı vermiştir. %1 katkılı bağlayıcının en yüksek yorulma ömrünü vereceği görülmektedir.

Tablo 26. VECD yorulma parametreleri

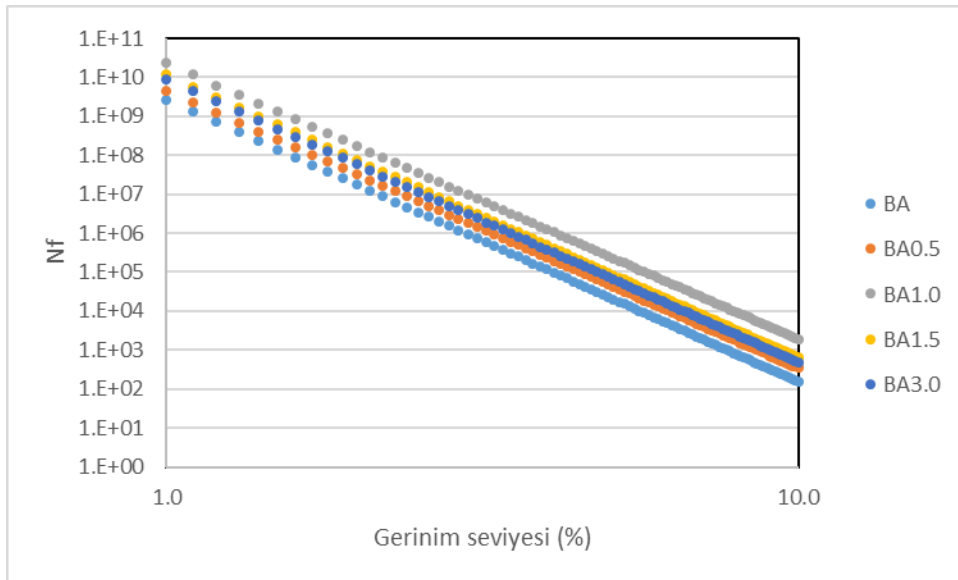
Bağlayıcı Tipi	A	B	C ₀	C ₁	C ₂	α
BA	2.658E+09	7.240	18.494	0.230	0.420	3.620
BA0.5	4.504E+09	7.118	16.902	0.289	0.391	3.559
BA1.0	2.280E+10	7.078	6.836	0.095	0.453	3.539
BA1.5	1.161E+10	7.264	9.701	0.140	0.435	3.632
BA3.0	8.935E+09	7.267	8.855	0.125	0.446	3.633

Şekil 99’da bağlayıcıların %2.5 ve %5 gerinim seviyelerindeki yorulma ömürlerindeki değişimler verilmiştir. Şekle göre bütün katkı oranlarında modifiye bağlayıcılar saf bağlayıcıya göre her iki gerinim seviyesinde daha yüksek yorulma ömrü vermiştir. %2.5 gerinim seviyesinde %0.5, %1, %1.5 ve %3 katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre sırasıyla 1.9, 9.95, 4.28 ve 3.28 kat daha fazla yorulma ömrü verdiği belirlenmiştir. Bu oran %5 gerinim seviyesinde saf bağlayıcıya göre sırasıyla 2.06, 11.13, 4.21 ve 3.22 kat olmaktadır. Burada her iki gerinim seviyesinde en yüksek yorulma ömrünü BA1.0 bağlayıcısının verdiği görülmektedir. Bütün bağlayıcıların yorulma ömürleri değerlendirildiğinde %1 katkı kullanımının optimum oran olduğu belirlenmiştir.



Şekil 99. Saf ve modifiye bağlayıcıların (a) %2.5 ve (b) %5 gerinim seviyelerindeki yorulma ömürleri

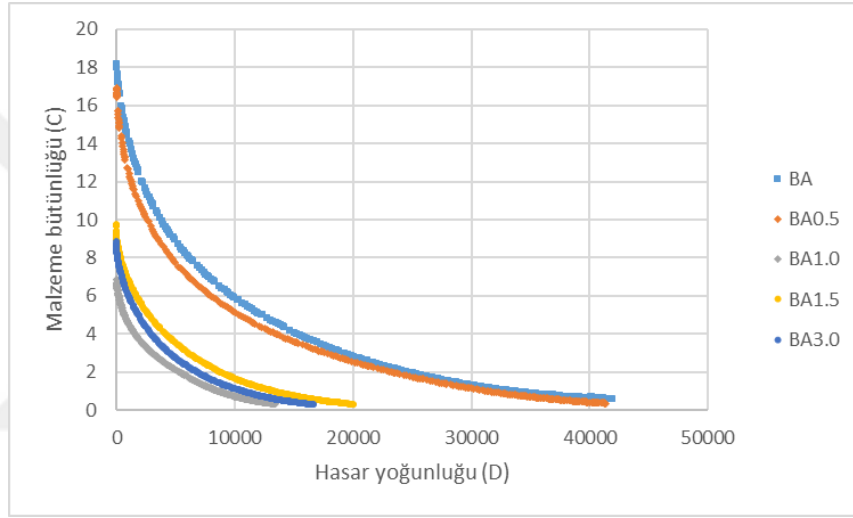
Şekil 100’de saf ve modifiye bağlayıcıların farklı gerinim seviyelerindeki yorulma ömürleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere gerinim seviyesi arttıkça bütün bağlayıcıların yorulma ömürleri azalmaktadır. Bütün gerinim seviyelerinde en yüksek yorulma ömrünü %1 katkılı bağlayıcı, en düşük yorulma ömrünü saf bağlayıcı vermiştir. Gerinim seviyesi arttıkça yorulma ömürleri açısından bağlayıcılar arasındaki ilişki değişmemiş olup modifiye bağlayıcıların gerinim seviyesi değişimine karşı kararlı bir davranış sergilediği görülmüştür.



Şekil 100. Farklı gerinim seviyelerindeki yorulma ömürleri

Şekil 101’de saf ve modifiye bağlayıcıların malzeme bütünlüğü ve hasar yoğunluğu ilişkisi verilmiştir. Hasar yoğunluğu arttıkça malzeme bütünlüğü azalmaktadır. BA ve

BA0.5 bağlayıcılarının malzeme bütünlüğündeki düşüş oranı BA1.0, BA1.5 ve BA3.0 bağlayıcılarından çok daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca saf ve %0.5 katkılı bağlayıcı en yüksek hasar yoğunluğuna sahiptir. Şekilde görüldüğü üzere sabit hasar yoğunluğunda en yüksek malzeme bütünlüğünü saf bağlayıcı en düşük malzeme bütünlüğünü ise BA1.0 bağlayıcısı vermektedir. Sabit malzeme bütünlüğünde ise en fazla hasar yoğunluğu saf bağlayıcıdayken en düşük hasar yoğunluğu %1 katkılı modifiye bağlayıcıdadır. %1 katkılı bağlayıcıdan sonra en düşük hasar yoğunluğuna sırasıyla %3, %1.5 ve %0.5 katkılı bağlayıcılar sahiptir.



Şekil 101. Saf ve modifiye bağlayıcıların malzeme bütünlüğü ve hasar yoğunluğu ilişkisi

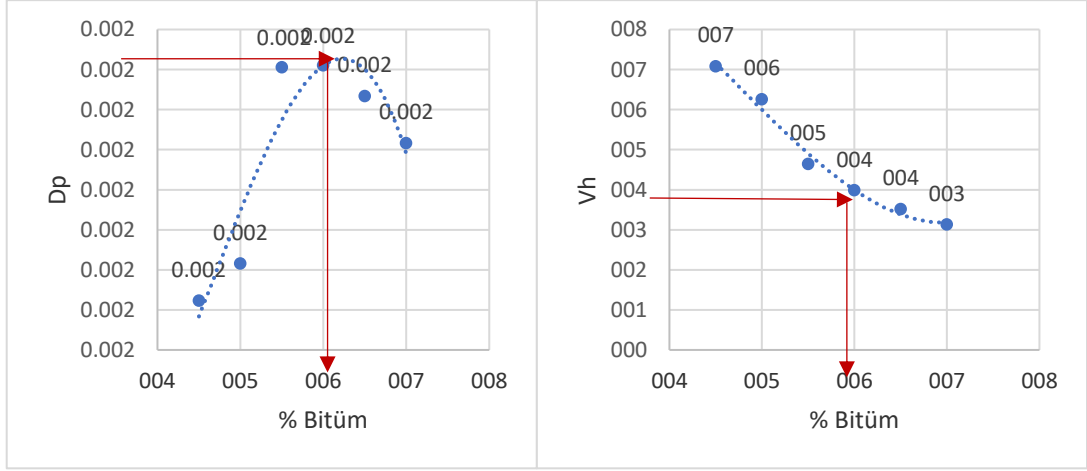
3.16. Marshall Tasarımına Göre Karışımın Optimum Asfalt İçeriğinin Belirlenmesi

Sıcak karışımın optimum asfalt içeriğinin belirlenebilmesi amacıyla Marshall tasarımı yapılmıştır. Numuneler, belirlenen agregada gradasyonu ile %4, 4.5, 5, 5.5, 6 oranlarındaki saf asfalt bağlayıcı kullanılarak her bağlayıcı yüzdesi için 3 adet Marshall briketi olacak şekilde hazırlanmıştır. Bütün numunelerin ağırlık hesapları yapılarak hacim özgül ağırlıkları (D_p), boşluk oranları (V_h), agregalar arası boşluk oranları (VMA) ve asfaltla dolu boşluk oranları (V_f) belirlenmiştir. Ayrıca, numunelere Marshall stabilite deneyi uygulanmıştır. Elde edilen veriler tüm sonuçlar Tablo 27’de verilmiştir.

Tablo 27. Saf asfalt bağlayıcıyla yapılan karışımların tasarım sonuçları ve şartname limitleri

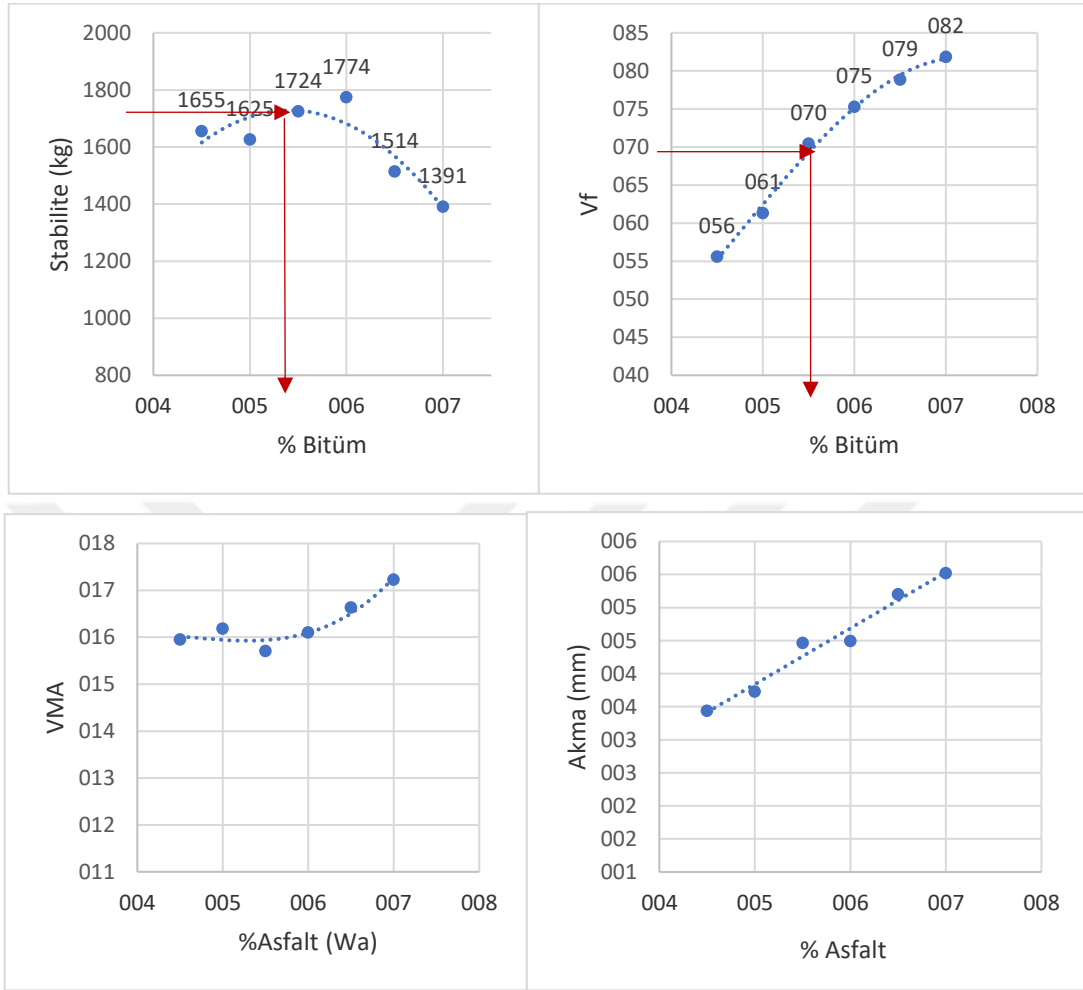
Karışım özelliği	Şartname Ölçütleri		Asfalt İçeriği (%)					
	Min.	Maks.	4	4.5	5	5.5	6	6.5
Hacim özgül ağırlık (Dp - g/cm ³)	---	---	2.331	2.336	2.360	2.361	2.357	2.351
Hava Boşluğu (Vh-%)	3	5	7.08	6.26	4.65	3.99	3.52	3.13
Asfaltla Dolu Boşluk (Vf-%)	65	75	55.58	61.31	70.41	75.24	78.83	81.82
Agregalar Arası Boşluk (VMA-%)	14	16	15.95	16.18	15.7	16.1	16.63	17.23
Stabilite (kg)	900		1655	1625	1724	1774	1514	1391
Akma (mm)	2	4	3.44	3.73	4.47	4.5	5.2	5.52
Marshall Oranı (kg/mm)			481.1	435.7	385.7	394.2	291.2	252

Elde edilen tüm sonuçlar yardımıyla stabilite, akma, Dp, Vh, Vf, VMA değerlerinin asfalt yüzdesiyle değişimini veren grafikler çizilmiş ve Şekil 102’de gösterilmiştir.



Şekil 102. Stabilite, akma, Dp, Vh, Vf, VMA değerlerini gösteren grafik

Şekil 102'nin devamı



Dp, Vh, Vf ve stabilite grafiklerinden optimum asphalt içeriğinin belirlenmesi için karayolları teknik şartnamesi aşınma tabakası tasarım ölçütlerini karşılayan asphalt yüzdeleri belirlenmiştir. Belirlenen 4 farklı asphalt yüzdesinin ortalaması alınarak karışımın optimum asphalt içeriği belirlenmiştir. Grafiklere göre belirlenen asphalt içerikleri Tablo 28'de gösterilmiştir. Elde edilen asphalt içeriklerinin aritmetik ortalaması sonucu optimum asphalt içeriği **%5.3** olarak belirlenmiştir. Marshall tasarımına ait Marshall föyü Ek Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 28. Optimum bağlayıcı içeriğinde kullanılan değerler

Kriterler	Asfalt içeriği
Max. Dp	%5.75
Max Stabilite	%5.00
%4 Vh	%5.50
%70 Vf	%5.05

3.17. Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları

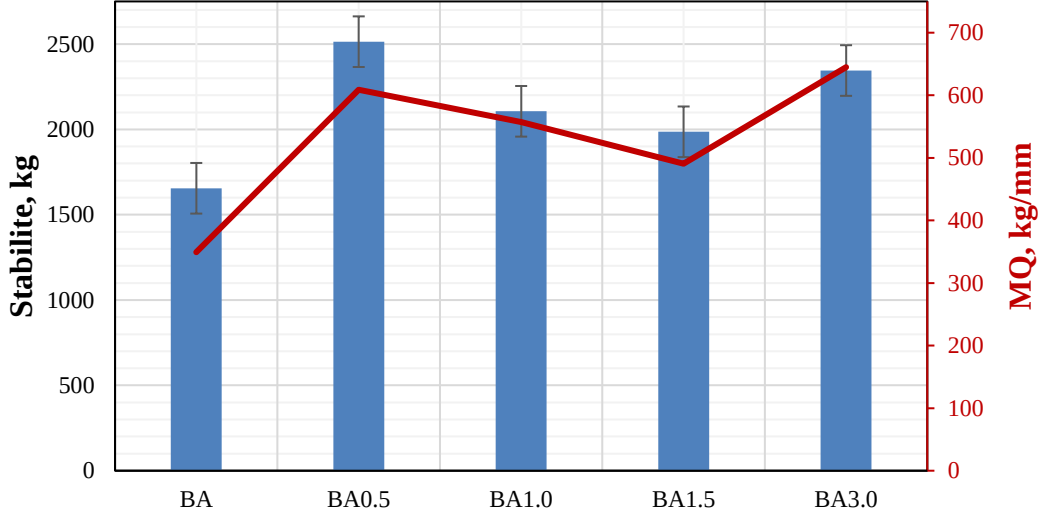
Saf ve %0.5, %1.0, %1.5 ve %3.0 BORB modifiyeli asfalt bağlayıcılar %5.3 optimum asfalt içeriğinde belirlenen gradasyona uygun agregalarla karıştırılarak Marshall briketleri üretilmiştir. Her bir briketin havada, suda ve kuru ağırlıkları hesaplanarak ilgili formüller yardımıyla gerekli hesaplar yapılmıştır. Saf ve 4 farklı katkı içeriğine sahip briketlerden 3'er adet alınarak toplamda 15 numuneye Marshall stabilite deneyi yapılmıştır. Deney verileri Tablo 29'da gösterilmiştir.

Tablo 29. Bağlayıcılara ait Marshall stabilite deney sonuçları

Karışım özelliği	Numune Adı				
	BA	BA0.5	BA1.0	BA1.5	BA3.0
Bağlayıcı Özgül Ağırlığı (G_b -g/cm ³)	1.028	1.036	1.038	1.040	1.041
Optimum Bitüm İçeriği (%)	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
Hacim özgül ağırlık (D_p -g/cm ³)	2.371	2.372	2.374	2.377	2.373
Hava Boşluğu (Vh-%)	3.80	3.81	3.81	3.69	3.89
Asfaltla Dolu Boşluk (Vf-%)	75.52	75.42	75.36	74.98	74.91
Agregalar Arası Boşluk (VMA-%)	15.54	15.51	15.46	15.35	15.50
Stabilite (kg)	1655	2514	2106	1986	2341
Akma (mm)	4.74	4.13	3.78	4.05	3.63
Marshall Oranı (kg/mm)	349.2	608.7	557.14	490.4	644.9

Tablo 29 incelendiğinde, saf asfalt bağlayıcıya sentez katkı maddesinin eklenmesiyle elde edilen karışımların saf asfalta göre stabilite değerlerin arttığı ve en yüksek stabilite değerinin BA0.5 modifiyeli karışımın verdiği görülmüştür. En düşük stabilite değerini ise saf asfalt ile hazırlanan briketler vermiştir. Bu bağlamda, sıcak asfalt karışımında katkı kullanımı ile trafik yükleri altında meydana gelebilecek deformasyonlara karşı kaplamaların daha dirençli olacağı sonucuna varılmaktadır.

Marshall stabilitesi değerinin akma değerine bölünmesi ile Marshall oranı ($MQ = \text{stabilite} / \text{akma}$ kg/mm) belirlenmektedir. Marshall oranı, karışımın servis ömrü boyunca deformasyonlara karşı direncinin bir göstergesidir. Marshall stabilite ve Marshall oranı (MQ) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi Şekil 103'te verilmiştir.

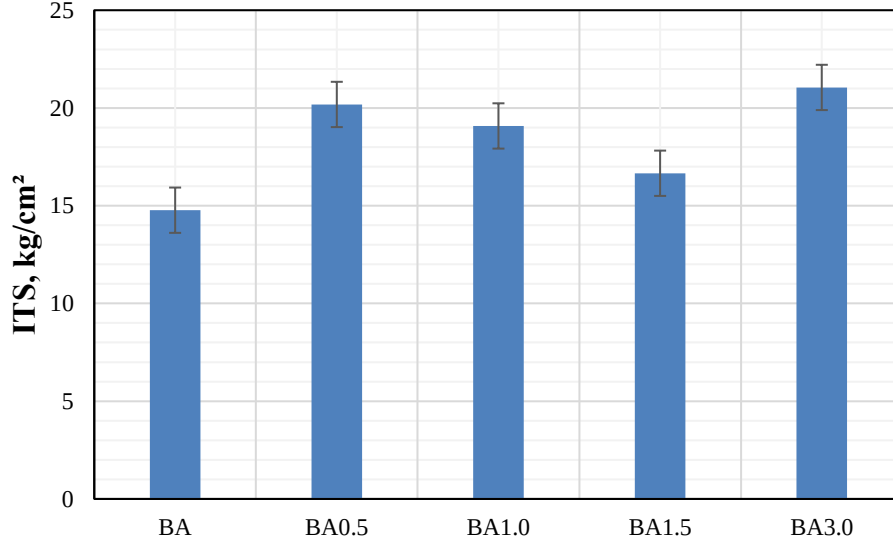


Şekil 103. Karışımlarının stabilite ve MQ değerlerinin katkı oranı ile değişimi.

Şekil 103'ten görüldüğü üzere, modifiyeli karışımların MQ değerlerinin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlara göre arttığı ve en yüksek MQ değerine BA3.0 ile hazırlanan karışımda ulaşıldığı tespit edilmiştir.

3.18. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Sonuçları

Saf ve modifiyeli karışımların çekme mukavemetlerin bulunması amacıyla her bir karışımdan 3 adet olmak üzere 15 adet briket deneye tabi tutulmuştur. Deney sonuçları Şekil 103'te grafik olarak gösterilmiştir.

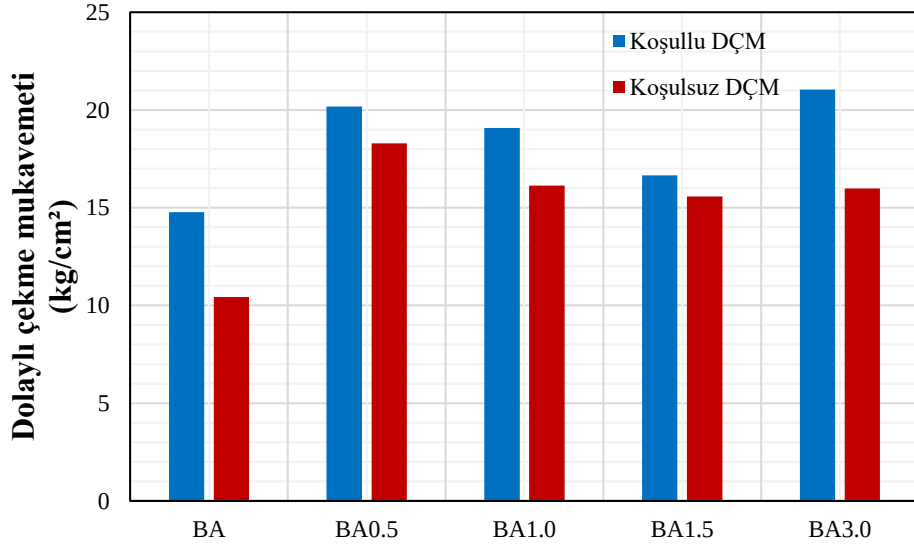


Şekil 104. Dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları

Şekil 104’te verilen sonuçlardan modifiyeli karışımların saf karışıma göre, dolaylı çekme mukavemeti değerlerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu artış, saf asfalta göre %0.5, %1, %1.5 ve %3 oranında katkı içeren karışımlar için sırasıyla %36.62, %29.18, %12.79 ve %42.51 oranlarında olmuştur. Sentez katkı maddesi modifikasyonu ile beraber asfalt kaplamalarda trafik yükleri altında oluşan çekme gerilemelerine karşı direncin artacağı belirlenmiştir. Asfalt bağlayıcının kohezyon özelliğini doğrudan etkileyen ITS değeri, katkı kullanımı ile artmaktadır. ITS değerinin artması bağlayıcının kohezyonun arttığının bir göstergesi olup en yüksek ITS değerine BA3.0 ile yapılan karışımın ulaştığı tespit edilmiştir.

3.19. Modifiye Lottman Deney Sonuçları

Bor esaslı reçine bileşiğinin sıcak karışımların nem hasarı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla, Marshall stabilite deneyinden elde edilen optimum bitüm içeriklerinde her bir karışım için üçer adet koşullu ve üçer adet koşulsuz olmak üzere toplam altı adet briket üretilmiştir. Briketlere ait koşullu ve koşulsuz dolaylı çekme mukavemeti değerleri hesaplanmış ve her karışıma ait değerlerinin ortalaması esas alınmıştır. Hesaplanan değerlere göre koşullu ve koşulsuz dolaylı çekme mukavemeti değerleri (ITS değerleri) (Şekil 105) ve dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR) grafikleri çizilmiştir (Şekil 106).



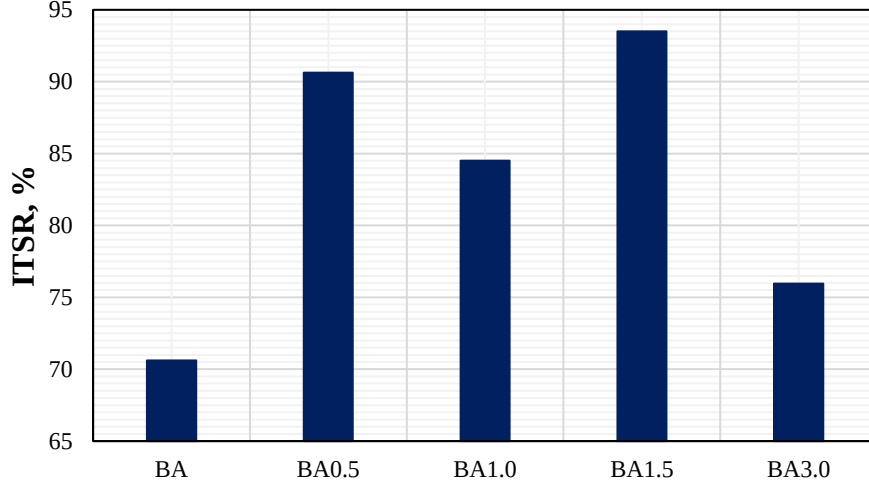
Şekil 105. Koşullu ve koşulsuz briketlerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri

Şekil 105'te görüldüğü üzere katkı kullanımı ile hem koşullandırılmamış hem de koşullandırılmış karışımlarda çekme mukavemeti değerleri saf asfalta göre artmıştır.

Koşullandırmadan önce modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların çekme mukavemeti değerlerinin birbirine yakın olduğu, bunun yanı sıra en yüksek değere BA0.5 modifiye bitümle hazırlanan karışımların, en düşük çekme mukavemeti değerine ise saf asfalt bağlayıcı ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Modifiye bağlayıcı karışımların çekme mukavemeti değerleri üzerindeki etkinlikleri değerlendirildiğinde, koşullandırma öncesinde $BA3.0 > BA0.5 > BA1.0 > BA1.5 > BA$ şeklinde bir sıralama meydana gelmiştir.

Koşullandırma işlemi dolayısıyla karışımların çekme dayanımı değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Koşullandırma sonrasında da modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların çekme mukavemeti değerlerinin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Koşullandırma sonrasında modifiye bağlayıcıların çekme mukavemeti değerleri üzerindeki etkinlikleri $BA0.5 > BA1.0 > BA3.0 > BA1.5 > BA$ şeklinde bir sıralama olarak kaydedilmiştir. Koşullandırma sonrasında bor esaslı reçine bileşiği ile modifiye edilen asfalt bağlayıcılarla hazırlanan karışımların çekme mukavemeti değerlerinin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların çekme mukavemeti değerlerine göre sırasıyla %74.85, %54.20, %48.94 ve %52.86 oranlarında arttığı görülmüştür. Elde edilen değerlerden koşullandırma nedeniyle karışımların dayanımlarının azaldığı ve en fazla azalmanın saf bağlayıcıyla hazırlanan karışımda meydana geldiği tespit edilmiştir.

Karışımlarda BORB katkısının kullanılmasıyla, kaplamaların trafik yükü altında meydana gelen gerilmelere karşı direncinin arttığı ve yorulma çatlaklarının oluşma potansiyelinin azaldığı sonucuna varılmıştır.



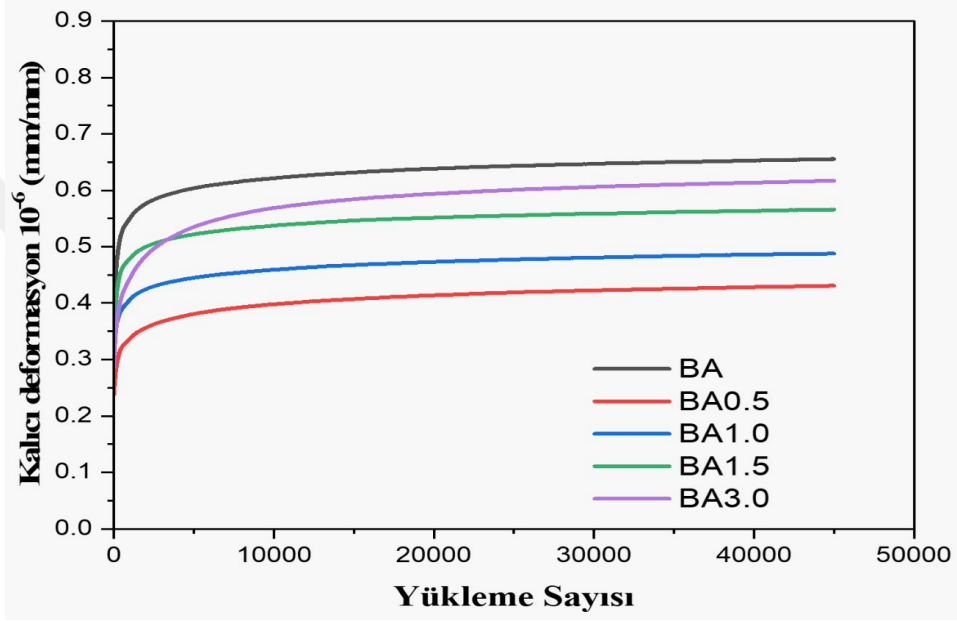
Şekil 106. Dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR değerleri)

Koşullu ve koşulsuz numunelerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri oranlanarak karışımlara ait ITSR değerleri elde edilmiştir. Karışımın su hasarına karşı dirençli olması için, ITSR değerinin %80'den büyük olması önerilmektedir. Ancak, orijinal Lottman metodunda bu değer en az %70 olması yeterli görülmektedir (Geçkil, Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, 2008; İskender, 2017; Geçkil, Y., & B, Atık PET ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Sıcak Karışımların Nem Direnci, 2021).

Şekil 106 incelendiğinde BORB katkısı ile modifiye edilmiş karışımların dolaylı çekme mukavemeti oranlarının saf karışıma oranla arttığı ve ITSR değerlerinin %80'nin üstünde (BA ve BA3.0 hariç) olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre modifiye sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımda %1.5 katkı oranından sonra önemli bir azalma meydana gelmiştir. En yüksek ITSR değeri, BA1.5 karışımlarda görülmüştür. Genel olarak, saf karışıma göre katkı kullanımı ile hazırlanan karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

3.20. Dinamik Sünme Deney Sonuçları

Saf ve BORB modifiyeli asfalt karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımın belirlenmesi amacıyla yapılan dinamik sünme deneyinde, numuneler 40°C sıcaklıkta, tek eksenli dinamik (tekrarlı) sünme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda elde edilen verilerin yükleme sayısına göre değişimleri Şekil 107’de verilmiştir.



Şekil 107. Karışımların 40°C sıcaklıktaki deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

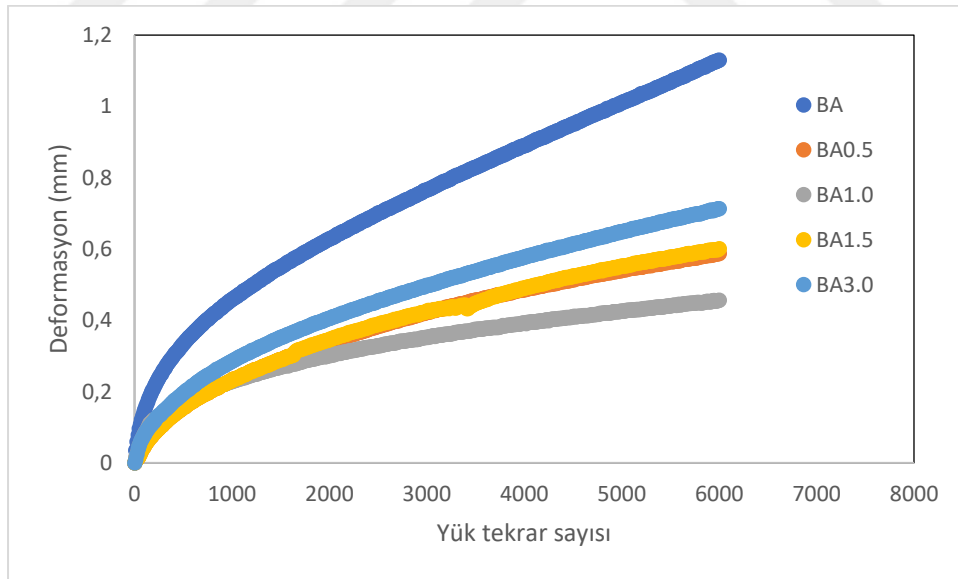
Şekil 107’de, modifiyeli asfalt karışımların saf karışıma göre kalıcı deformasyon değerlerinin azaldığı ve en düşük deformasyona sahip bağlayıcının BA0.5 olduğu belirlenmiştir. Buradan, katkının saf bağlayıcının yorulma direncini arttırdığı ve karışımların kalıcı deformasyonlarını azalttığı sonucuna varılmaktadır. Katkı miktarının artmasıyla kalıcı deformasyon değerlerinin arttığı ancak yine de saf karışıma oranla modifiyeli karışımların düşük deformasyon değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

3.21. Dolaylı Çekme Yorulma Deney Sonuçları

Dolaylı çekme yorulma deneyi, gerilme kontrollü (450 kPa) bütün numunelerde 6000 yük tekrarı olacak şekilde uygulanmış ve her bir numuneye ait yük tekrar sayısı-

deformasyon grafiği çizilmiştir. Yük tekrar sayısı-deformasyon grafikleri 3 adet numune ortalama değerleri alınarak çizilmiştir.

Şekil 108’de saf ve BORB modifiyeli bağlayıcıların 6000 yük tekrarındaki deformasyon değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere en yüksek deformasyonu saf bağlayıcı verirken en düşük deformasyonu %1 katkıli karışım vermektedir. BA0.5 ve BA1.5 katkıli karışımların benzer yük tekrarı deformasyon ilişkisi verdiği belirlenmiştir. BA0.5, BA1.0, BA1.5 ve BA3.0 karışımları 6000 yük tekrarı sonrası saf bağlayıcıya göre sırasıyla %49.1, %60.4, %47.8 ve %38.1 daha düşük deformasyon değeri vermiştir. Bu oran 3000 yük tekrarı sonrası sırasıyla %44.9, %54.1, %44.5 ve %35.1 olmaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere yük tekrar sayısı arttıkça saf bağlayıcılı karışımların deformasyon artışı modifiye bağlayıcılı karışımların deformasyon artışından çok daha fazla olmaktadır. Orta sıcaklık DSR deney sonuçlarındaki yorulma parametreleri de dikkate alındığında dolaylı çekme yorulma deney sonuçları arasında benzer bir ilişkinin olduğu ve en iyi yorulma direnci değerlerini BA1.0 katkı oranına sahip bağlayıcı ile elde edilen karışımın verdiği belirlenmiştir.



Şekil 108. Saf ve modifiye bağlayıcıların deformasyon-yük tekrar sayıları arasındaki ilişki

3.22. Sentezlenen BORB Katkısıyla Ticari Asfalt Modifiyerinin Mali Kıyaslaması

Yapılan deneyler sonunda elde edilen bulgulardan, %1 oranında elde ettiğimiz sentez BORB katkı ile daha önce literatürde var olan, tüm özellikleri bilinen, tekerlek izine karşın Karayolları Genel Müdürlüğünün kullandığı ve asfalt bağlayıcıya yaklaşık %4,5 oranında katılan SBS polimer katkı maliyet açısından karşılaştırılmıştır. Çalışmada, değerlendirme için 1 km uzunluğunda yol için (4 cm kalınlığında, 7 m genişliğinde) aşınma tabakasına (Tip-1) göre maliyet analizi yapılmıştır.

- 1 km yol için;

$$\text{Hacim (V)} = 1000\text{m} \times 7\text{m} \times 0.04\text{m} = 280 \text{ m}^3$$

Asfaltın özgül ağırlığı $\gamma = 2.4 \text{ t/m}^3$ (KGM poz no: KGM/6404-M) kabul edilerek

$$\text{Toplam ağırlık} = 280 * 2.4 = 672\text{t olur.}$$

- Katkısız asfalt için;

Agrega; 1150 gr

Asfalt; % 5.3 (60.95 gr)

Toplam asfalt betonu numunesi; 1210.95 gr olur.

- %1 BORB sentez katkılı asfalt için;

Agrega; 1150 gr

Asfalt; % 5.3 (60.95 gr)

%1 BORB katkısı; 0.6095 gr

Toplam asfalt betonu numunesi; 1211.56 gr olur.

- % 4.5 SBS katkılı asfalt için;

Agrega; 1150 gr

Asfalt; % 5.3 (60.95 gr)

% 4.5 SBS katkısı; 2.33 gr

Toplam asfalt betonu numunesi; 1213.28 gr olur.

- 672t katkısız asfalt betonu için;

$$\text{Agrega; } 1150 * (672 / 1210.95) = 638.18 \text{ ton}$$

$$\text{Asfalt; } 60.95 * (672 / 1210.95) = 33.82 \text{ ton}$$

- 672t %1 BORB sentez katkılı asfalt betonu için;
Agrega; $1150 * (672 / 1211.56) = 637.86$ ton
Asfalt; $60.95 * (672 / 1211.56) = 33.81$ ton
BORB katkısı; $0.6095 * (672 / 1211.56) = 0,34$ ton

- 672t %4.5 SBS katkılı asfalt betonu için;
Agrega; $1150 * (672 / 1213.28) = 636.95$ ton
Asfalt; $60.95 * (672 / 1213.28) = 33.76$ ton
SBS polimer katkı; $2,33 * (672 / 1213.28) = 1,29$ ton

Asfalt betonu aşınma tabakası malzemelerinin temini (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile) (Tip-1) (KGM poz no: KGM/6400-1); 103.77 TL/ton (Nakliye ücreti hariçtir.)

İzmit rafineri asfalt fiyatı = 6 840 TL/ton

SBS polimer katkının özel plantte hazırlanması (KGM poz no: KGM/4300/PMB); 551.41 TL/ton

Katkının maliyeti; 214 TL/kg (ortalama), SBS polimerin fiyatı; 116.64 TL/kg (4 euro)

Katkısız asfalt betonu için maliyet;

$[638.18 * 103.77] + [33.82 * 6840] = 297\ 552.738$ TL olarak bulunur.

%1 katkılı asfalt betonu için maliyet;

$[637.86 * 103.77] + [33.81 * 6840] + [0.34 * 214000] = 370\ 211.13$ TL olarak bulunur.

%4,5 SBS katkılı asfalt betonu için maliyet;

$[636.95 * 103.77] + [33.76 * (6840 + 551.41)] + [1.29 * 116640] = 464\ 617.62$ TL olarak bulunur.

Asfalt kaplamanın maliyeti dikkate alındığında, çalışmanın sonunda laboratuvar şartlarında üretilen BORB sentez katkısının, karışım için özel ekipman gerektirmemesi ve SBS polimerine oranla daha düşük oranlarda asfaltla modifiye edilmesi özelliği ile daha düşük maliyete sahip olduğu görülmüştür.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bor esaslı reçine bileşiği (BORB) laboratuvar ortamında kimyasal olarak sentezlenmiş ve sentezlenen yeni sentez katkı maddesinin çeşitli analiz yöntemleriyle yapısal karakterizasyonu belirlenmiştir. Sentez katkı maddesi olarak kullanılan bor esaslı reçine bileşiğinin bağlayıcı ve karışım üzerindeki etkisi araştırılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Bor esaslı reçine bileşiğinin yapısal karakterizasyonu; SEM, FT-IR, TGA/DSC ve XRD analiz yöntemleriyle belirlenmiştir. Elde edilen verilerden, söz konusu bileşiğin sentezlenebildiği ve asfalt bağlayıcı için uygun bir modifiyer olabileceği sonucuna varılmıştır.
- Bor esaslı reçine bileşiğinin, mikro anlamda morfolojik görüntüsü SEM cihazı ile elde edilmiş ve sentez katkısı (BORB) oluşturan ana maddeler belirlenerek sentezin gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. BORB modifiyeli asfalta ait SEM görüntülerinden, katkının gözenek veya çatlak özelliği taşımadığı, sürekli bir forma sahip olduğu, makro anlamda asfalt matrisi içinde iyi difüze olduğu ve asfalt yapısı ile tam uyum içinde olup iyi adezyon gösterdiği tespit edilmiştir.
- FT-IR analizinde, sentez katkı maddesi (BORB) ve kolofan reçineye ait spektrumlar karşılaştırıldığında, O=C-OH bağı ve C=O bağındaki değişimlerden sentez katkı maddesinin kimyasal olarak sentezlenebildiği görülmüştür. Katkının saf asfalt asfalttaki hidrokarbon piklerinde küçük değişiklikler yarattığı ve katkı ile asfalt arasında etkileşim olduğu belirlenmiştir.
- TGA eğrisi, DSC eğrisindeki oksidasyon sıcaklığı ile çakışmış ve madde miktarındaki değişimlerin gözlendiği sıcaklık doğrulanmıştır. Asfalt modifikasyonunun belirli sıcaklıklarda gerçekleşmesi gerekmektedir ve katkı maddesinin bu sıcaklık aralığını kolaylıkla karşıladığı görülmüştür. Modifikasyon sırasındaki sıcaklık aralığının sentez katkının kimyasal yapısında herhangi bir bozulmaya neden olmayacağı belirlenmiştir.
- XRD analizi sonuçlarından, sentez katkının yapısının kristalize bir yapıya sahip olmadığı ve SEM görüntülerindeki görece homojenliğe karşılık gelen amorf yönde büyüdüğü görülmüştür. SEM ve XRD analizleri, elde edilen bileşiğin sıralı bir

diziye sahip olmadığını ve bunun kolofan reçinesi içerisindeki birçok farklı bileşikten kaynaklandığını doğrulamıştır.

- Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri sonucundan, BORB katkı oranının artmasıyla asfaltın penetrasyon değerleri azalırken, yumuşama noktası değerleri artmaktadır. Sentez katkı maddesi saf asfalt bağlayıcının kıvamlılığını arttırarak, sıcaklık duyarlılığını azaltmıştır.
- Düktilite deney sonuçlarından, sentez katkının saf bağlayıcının düktilite değerlerinde herhangi bir değişiklik oluşturmadığı ve sentez katkı maddesinin asfalt bağlayıcının kohezyon özelliklerini olumsuz yönde etkilemediği görülmüştür.
- Kuvvet ölçümlü düktilite deneyi sonucunda, sentez katkı kullanımı ile bağlayıcının deformasyon enerjisinin arttığı ve bunun bağlayıcının kohezyon özelliklerini geliştirdiği belirtilmiştir. Elastik geri dönme deneyinden ise, katkıyla bağlayıcının düşük sıcaklıklarda daha elastik olduğu görülmüştür. Deneylerin sonucunda, en yüksek deformasyon enerjisi ve geri dönme yüzdesi BA0.5 modifiye bağlayıcının sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Parlama noktası deney sonuçlarından, sentez katkı oranının artışı ile saf bağlayıcının parlama noktası değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir. Katkının, saf bağlayıcının güvenli çalışma sıcaklık aralığını genişlettiği ve iş güvenliği açısından olumlu olduğu belirlenmiştir.
- Fraass kırılma noktası deneyinde, sentez katkı maddesinin, saf asfaltın düşük sıcaklıklardaki çatlamaya karşı direncini arttığı ve BA0.5 modifiye asfalt bağlayıcının kırılma sıcaklığının %20 oranında düştüğü belirlenmiştir.
- Saf asfalt bağlayıcı içerisindeki katkı miktarının artışıyla bağlayıcıların özgül ağırlık değerleri de artmıştır. Sentez katkı maddesinin bağlayıcının kıvamını arttığı ve kıvama bağlı olarak penetrasyon ile yumuşama noktası değerlerindeki değişimlerin birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.
- Modifiye asfalt bağlayıcılar içinde en yüksek orana sahip BA3.0 bağlayıcı, trikloretilende çözündürüldüğünde filtre kağıdında herhangi bir kalıntının olmadığı görülmüştür. Sentez katkının asfalt bağlayıcının yapısına iyi uyum sağladığı sonucuna varılmıştır. Bu uyum, SEM analizleriyle de desteklenmektedir.
- Nicholson soyulma direnci deneyinden, sentez katkı maddesinin saf bağlayıcı içerisinde var oluşuyla bağlayıcı ve agrega arasındaki adezyon kuvvetinin güçlendiği ve bağlayıcının agregayı daha iyi sardığı görülmüştür. Bunun nedeninin

sentez katkı maddesinin içindeki kolofan reçinesinin kimyasal yapısıyla ilgili olduğu sonucuna varılmıştır.

- Yaşlandırılmamış saf ve modifiyeli bağlayıcılara uygulanan DSR deneyi sonuçlarından, tekerlek izi dayanım parametre değerlerinin sentez katkı miktarıyla doğru orantılı olarak arttığı ve sentez katkının bağlayıcının elastik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Kısa süreli yaşlandırmadan sonra elde edilen tekerlek izi dayanım parametre değerlerinin de saf bağlayıcıya göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Yaşlanmamış ve RTFOT sonrası numunelerin şartname sınırı göz önünde bulundurulduğunda, sentez katkı kullanımı ile saf bağlayıcının yüksek sıcaklık performans seviyesinin PG64-Y'den PG 70-Y'ye yükseldiği görülmüştür.
- Uzun süreli yaşlandırma sonrası bağlayıcılara 22°C, 25°C ve 28°C sıcaklıklarında DSR deneyi yapılarak yorulma parametre değerleri elde edilmiştir. Deney sonuçlarından, 5000 kPa şartname sınırını BA0.5 ve BA1.0 BORB modifiyeli bağlayıcılar 25°C sıcaklıkta sağlarken diğer bağlayıcılar ise 28°C sıcaklıkta sağlanmışlardır. Sentez katkının orta sıcaklıklarda, bağlayıcının yorulma performansını iyileştirdiği ancak katkı oranının yükselmesiyle bu parametre üzerinde olumsuz etki oluşturduğu sonucuna varılmıştır.
- Dönel viskozite deney sonuçlarından, sentez katkı miktarının artmasına paralel olarak bağlayıcının viskozite değerlerinin arttırdığı ancak işlenebilirlik açısından herhangi bir olumsuzluğun olmadığı görülmüştür. BORB modifiyeli bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre kıvamının, özgül ağırlığının, yumuşama noktasının ve viskozite değerlerinin artması diğer fiziksel deney sonuçları ile desteklenmektedir. Ayrıca, RV deneyinden katkı kullanımı ile saf bağlayıcıya göre karışımda daha yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığına ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir.
- BBR sonuçlarından, sentez katkı miktarının artması ile düşük sıcaklıklardaki performansın olumsuz etkilendiği ve termal çatlak oluşum potansiyelin arttığı belirlenmiştir. Ancak, %0.5 ve %1 oranında sentez katkı maddesinin saf bağlayıcının düşük sıcaklıktaki reolojik özelliklerini olumsuz etkilemediği ve düşük sıcaklıkta saf bağlayıcıya göre daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. %1.5 ve %3 oranlarındaki sentez katkı maddesinin bağlayıcının sertliğini arttırdığı ve bu sebeple düşük sıcaklıklarda çatlamaya eğilimli olabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, BBR deneyi sonuçları, Frass kırılma noktası deneyi

sonuçlarıyla birbirini destekler nitelikte olup, yüksek miktardaki katkının bağlayıcının sertliğini arttırdığı ve sünekliğini azalttığını göstermektedir.

- Saf bağlayıcının sıcaklık duyarlılığı sentez katkı maddesinin eklenmesiyle azalmış ve bağlayıcının sıcaklık değişimlerine karşı daha dayanımlı olduğu belirlenmiştir.
- Depolama stabilitesi penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, sentez katkı maddesinin penetrasyon değerlerini düşürdüğü ve yumuşama noktası değerlerini yükselttiği görülmüştür. Tüplerin alt ve üst kısımları arasındaki penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri farkı şartname ölçütlerini sağlamaktadır. Bu da sentez katkı maddesinin saf bağlayıcı içinde ciddi çökelmelere sebep olmadığına kanıtı olarak değerlendirilmiştir.
- Depolama stabilitesi deneyi sonrası yapılan RV deneyinden, sentez katkı maddesinin saf asfalt bağlayıcı ile uyum sağladığı ve işlenebilirlik açısından herhangi bir olumsuzluğun olmadığı belirlenmiştir.
- Depolama stabilitesi deneyi sonrası yapılan DSR deneyinden, BORB modifiyeli bağlayıcıların tekerlek izi parametrelerinin saf bağlayıcıya göre daha iyi olduğu ve asfalt matriksi içinde belirgin bir ayrışmanın olmadığı belirlenmiştir.
- MSCR deney sonuçlarından, sentez katkı maddesinin saf bağlayıcının tekerlek izine karşı direncini arttırdığı ve en iyi sonucu %1 katkı oranının verdiği belirlenmiştir. 64°C’de BA1.0 modifiyeli bağlayıcının aşırı ağır taşıt trafiğinde kullanımı uygun olurken diğer bağlayıcıların ağır taşıt trafiğinde kullanıma uygun olduğu belirlenmiştir. Bütün bağlayıcıların maksimum %75 Jnr diff şartname ölçütünü karşıladığı tespit edilmiştir.
- LAS deney sonuçlarından, sentez katkı maddesinin saf bağlayıcının yorulma ömrünü arttırdığı ve hasar yoğunluğunu azalttığı belirlenmiştir. Bütün gerinim seviyelerinde en yüksek yorulma ömrünü BA1.0 modifiyeli bağlayıcının verdiği tespit edilmiştir.
- Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçlarına göre, sentez katkı maddesi ile karışımın stabilite değerinin arttığı ve akma değerlerinde düştüğü görülmüştür. En yüksek stabilite değerini BA0.5 modifiyeli karışım verirken, en düşük akma değerine ise BA3.0 modifiyeli karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. karışımın servis ömrü boyunca deformasyonlara karşı direncinin göstergesi olan Marshall oranı (MQ) değerlerine bakıldığında, sentez katkının, saf bağlayıcıya göre Marshall

oranlarında ciddi artış sağladığı, en yüksek MQ değerinin %3 katkı oranına sahip bağlayıcı ile hazırlanan karışımdan elde edildiği tespit edilmiştir.

- Dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçlarından, sentez katkı maddesi modifikasyonu ile beraber asfalt kaplamalarda trafik yükleri altında oluşan çekme gerilemelerine karşı direnç ile bağlayıcının kohezyon özelliğinin artacağı belirlenirken, en yüksek ITS değerine %3 sentez katkı ile hazırlanan karışımın (BA3.0) ulaştığı tespit edilmiştir.
- Koşullandırma yapıldıktan sonra dolaylı çekme mukavemeti deneyine tabi tutulan numunelerin, su hasarı nedeniyle çekme dayanımı değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Koşullandırma sonrası dayanım kaybının en çok saf karışımda olduğu ve sentez katkı maddesinin saf bağlayıcının yük altında meydana gelen gerilmelere karşı direnci arttırdığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, sentez katkı maddesinin kullanımı ile ITSR değerlerini arttırdığı ve en yüksek ITSR değerini BA1.5 karışımın verdiği belirlenmiştir.
- Dinamik sünme deneyi sonuçlarından, sentez katkı maddesinin, karışımın kalıcı deformasyon değerlerini azalttığı, dolayısıyla tekerlek izi oluşumuna karşı direnç sağladığı tespit edilmiştir.
- Dolaylı çekme yorulma deney sonuçlarından, sentez katkı kullanımı ile karışımların yorulma dayanımlarının arttığı ve %1 katkı oranında %60.4 gibi yüksek oranda iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Bu durum, orta sıcaklıklardaki yorulma parametre değerleriyle de desteklenmektedir.

Yapılan deney ve analizler bir bütün olarak düşünüldüğünde, ülkemiz için milli servet olan borun doğada var olan kolofan reçinesi ile birlikte sentezlenmesi sonucunda yeni bir asfalt modifiyeri olarak elde edilebildiği, bu sentez katkı maddesinin, saf bağlayıcının fiziksel özelliklerini iyileştirdiği ve reolojik olarak saf bağlayıcının performansını geliştirdiği görülmüştür. BORB modifiyeli bağlayıcılardan yüksek sıcaklıkta en iyi performansı BA3.0 bağlayıcı verirken orta ve düşük sıcaklıkta en iyi performans ise BA1.0 bağlayıcı vermiştir.

Yeni bir asfalt modifiyeri olarak sentezlenen katkı maddesinin, bağlayıcı ve karışım üzerindeki etkisinin araştırıldığı bu tez çalışması esas alınarak ileride yapılması düşünülen çalışmalar için aşağıdaki öneriler verilebilir;

- Çalışmada kullanılan bor esaslı reçine bileşigi ile beraber düşük sıcaklık performansını geliştirecek SBS benzeri polimer ile kombinasyonu yapılarak bağlayıcı üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- Çalışmada kullanılan sentez katkı maddesinin taş mastik ve ılık asfalt karışımlar üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- Çalışmada kullanılan agrega gradasyonu tipinde ve agrega türünde değişiklikler yapılarak sentez katkının farklı granülometriye sahip karışımlar üzerindeki etkisi araştırılabilir.



5. KAYNAKLAR

- AASHTO. (2010). Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling. Washington, DC,
- Abdel-Raouf, M., & Abdul-Raheim, A. (2018). Rosin: Chemistry, Derivatives, and Applications: a review. *gyptian Petroleum research institute, Nasrcity, Cairo, Egypt, BAOJ Chem*, 4(1), s. 4: 039.
- Adeboje, A., Kupolati, W., Sadiku, E., & Ndambuki, J. (2020). Characterization of Modified Crumb Rubber Concrete. *International Journal of Sustainable Development and Planning, IIETA*, 15(3).
- Aguiar-Moya, J., & Loria-Salazar, L. (2013). Use of WasteProducts as Bitumen Modifiers in Costa Rica. *EATA*.
- Ahmedzade, P., & Yılmaz, M. (2008). Effect of Polyester Resin Additive on The Properties of Asphalt Binders and Mixtures. *Construction and Building Materials*, 22, s. 481-486.
- Ahmedzade, P., Yılmaz, M., & Yılmaz, M. (2007). Bitümlü Bağlayıcıların Yaşlandırılmasında Kullanılan Deney Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23((1-2)), s. 112 – 126.
- Ahmedzade, P., Yılmaz, M., & Yılmaz, M. (2008). Polyester Reçinenin Bitümlü Bağlayıcıların Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesi Üzerindeki Etkisi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24((1-2)), s. 227-240.
- Airey, G. (2011). 8 - Factors affecting the rheology of polymer modified bitumen (PMB). *Editor(s): Tony McNally, In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Polymer Modified Bitumen, Woodhead Publishing*, s. 238-263.
- Airey, G. D. (2002). Use of Black Diagrams to Identify Inconsistencies in Rheological Data. *Road Materials and Pavement Design*, 3(4), s. 403–424.
- Aksağan, Z. (2021). *Atık Lastiklerden Elde Edilen Siyah Karbonun Bitüm Ve Bitümlü Sıcak Karışımlara Etkisi*. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Al-maamori, M., & H., H. M. (2014). Use of Crumb Rubber as a Way to Improve Performancegrade For Asphalt Cement. *Academic Research International*, 5(1).
- Ameri, M., Nowbakht, S., Molayem, M., & Mirabimoghaddam, M. H. (2016). A study on fatigue modeling of hot mix asphalt mixtures based on the viscoelastic

continuum damage properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 106, s. 243–252.

- Amini, A., Ziari, H., Saadatjoo, S. A., H. N., & Goli, A. (2021). Rutting resistance, fatigue properties and temperature susceptibility of nano clay modified asphalt rubber binder. *Construction and Building Materials*, 267, s. 120946.
- Angın, N. (2020). *Çam Kökü Ekstraksiyon Reçinesinin Distilasyonu Ve Kimyasal Karakterizasyonu*. Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Arabani, M., Mirabdolazimi, S., & Sasani, A. (2010). The Effect of Waste Tire Thread Mesh on the Dynamic Behaviour of Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, 24, s. 1060-1068.
- Arslan, D., Gürü, M., & Çubuk, M. (2014). Preventing of Rutting and Crakings in The Bituminous Mixtures by Monoethylene and Diethylene Glycol Based Synthetic Polyboron Compounds. *Construction and Building Materials*, 50, s. 102-107.
- Arslan, D., Gürü, M., & Çubuk, M. K. (2012). Performance Assessment of Organic-Based Synthetic Calcium And Boric Acid Modified Bitumens. *Fuel*, 102, s. 766-772.
- Arslan, D., Gürü, M., Çubuk, M., & Çubuk, M. (2011). Improvement of bitumen and bituminous mixtures performances by triethylene glycol based synthetic polyboron. *Construction and Building Materials*, 25(10), s. 3863-3868.
- Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi*. (2002). İSFALT Bilimsel Yayın No:2, İstanbul.
- ASTM D6521. (2013). Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV), USA: Annual Book of ASTM Standards.
- Azahar, W. N., Jaya, R. P., Hainin, M. R., Hasan, M. R., & Shaffie, E. (2019). X-Ray Diffraction Analysis of Bitumen Containing Untreated and Treated Waste Cooking Oil,. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878*, 8(3S3).
- B., Ş., & Işıkyakar G. (2008). Evaluation of the Properties and Microstructure of SBS and EVA Polymer Modified Bitumen. *Constr Build Mater*, s. 1897-1905.
- Baykara, A. (2021). *Bitüm Modifikasyonunda Farklı Kaynaklardan Temin Edilen Bağlayıcı Kullanımının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elâzığ.
- Behnood, A., & Olek, J. (2017). Rheological properties of asphalt binders modified with styrene- butadiene-styrene (SBS), ground tire rubber (GTR), or polyphosphoric acid (PPA). *Construction and Building Materials*, 151, s. 464–478.

- Bektaş, İ., Yalçın, E., Yamaç, E., & Ö., Y. M. (2021). İki Farklı Düşük Yoğunluklu Polietilen (LDPE) Plastik Atığın Bitüm Modifikasyonunda Kullanımı. *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 33, s. 339-346.
- Binish, M., Binu, P., Gopikrishna, V., & Mohan, M. (2022). Chapter 15 - Potential of anaerobic bacteria in bioremediation of metal-contaminated marine and estuarine environment, Editor(s): Surajit Das, Hirak Ranjan Dash, Microbial Biodegradation and Bioremediation (Second Edition), Elsevier. s. 305-326.
- Birliker, R. Y. (1998). *Bitümlü Karışımlara Eklenebilecek Katkılar ile Bu Tip Bitümlü Karışımların Davranışlarının Araştırılması ve Bir Yorulma Eğrisi Tahmin Modeli*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Bostancıoğlu, M., & Oruc, S. (2016). Effect of Activated Carbon and Furan Resin on Asphalt Concrete Modification. *Structural Engineering and Mechanics*, 59(2), s. 373-385.
- Bostancıoğlu, M. (2012). *Bitkisel Atıklardan Elde Edilen Kimyasal Ürünler İle Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Bostancıoğlu, M., & Oruç, Ş. (2015). Effect of Furfural-Derived Thermoset Furan Resin on the High-Temperature Performance of Bitumen. *Road Materials and Pavement Design*, 16, s. 227-237.
- Bradbeery, S. (2012). acetone. *Medicine*, 40(2).
- Buncher, M., & Anderson, M. (2014). Asphalt mix design methods, 7th edition, Asphalt Institute.
- Cansever, T. (2016). *Katkısız Ve Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcıların Yüzey Enerji Bileşenlerinin Durgun Damla Yöntemiyle Değerlendirilmesi*. Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, .
- Çeloğlu, M. E. (2020). *Farklı biyokütlelerin pirolizinden elde edilen biyoçarların bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliğinin araştırılması*. Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Doktora tezi, Elazığ.
- Çubuk, M., Gürü, M., & Çubuk, M. (2009). Improvement of Bitumen Performance with Epoxy Resin. *Fuel*, 88(7), s. 1324-1328.
- Deng, P., Shi, Y., Liu, Y., Liu, Y., & Wang, Q. (2018). Solidifying process and flame retardancy of epoxy resin cured with boron-containing phenolic resin. *Applied Surface Science*, 427(Part A), s. 894-904.
- Doyle, P. C., River, R., O., H. E., Falls, C., & Hardman, H. F. (1963). *United States Patent Office Patent No. 3094427*.

- Ebnesajjad, S. (2006). 4 - Surface and Material Characterization Techniques, Editor(s): Sina Ebnesajjad, Surface Treatment of Materials for Adhesion Bonding, William Andrew Publishing. s. 43-75.
- El Bourakadi, K., Bouhfid, R., & El Kacem Qaiss, A. (2021). *Chapter 2 - Characterization techniques for hybrid nanocomposites based on cellulose nanocrystals/nanofibrils and nanoparticles*, Editor(s): Denis Rodrigue, Abou el Kacem Qaiss, Rachid Bouhfid, In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engine.
- EN-13399, T. (2018). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - Modifiye bitümün depolama stabilitesinin belirlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Fang, C., Yu, R., Liu, S., & Li, Y. (2013). Nano Materials Applied in Asphalt Modification: A Review. *J. Mater. Sci. Technol.*, 29(7), s. 589-594.
- G., P., A., M., D., B., & Santini S. (2006). Effect of Composition on the Properties of SEBS Modified Asphalts. *EurPoly J*, s. 1113-1121.
- Gao, J., Liu, Y., & Yang, L. (1999). Thermalstability of boron-containing phenol formaldehyde resin. *Polymer Degradation and Stability*, 63(1), s. 19-22.
- García-Morales, 2., Partal, P., Navarro, F., & Gallegos, C. (2006). Effect Of Waste Polymer Addition On The Rheology Of Modified Bitumen. *Fuel*, 85, s. 936-943.
- Geçkil, T. (2008). *Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
- Geçkil, T., Alataş, T., & Ahmedzade, P. (2011). Superpave Sisteminde Bölge Meteorolojik Hava Verileri Kullanılarak Performans Dereceli (PG) bağlayıcı sınıfı seçimi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(1), s. 88-106.
- Geçkil, T., İnce, C. B., & Özpınar, E. T. (2021). Nanosilikanın Bitümün Kıvamı, Viskozitesi ve Mikroyapısına Etkileri. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(4).
- Geçkil, T., Y., Ö., & B, İ. C. (2021). Atık PET ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Sıcak Karışımların Nem Direnci. *Politeknik Dergisi*, 24(2), s. 461-471.
- Gedik, A. (2021). Soğuk Bölgelerde Kullanılacak Saf Bitümün Modifikasyonu ve Beton Asfalt Üretiminde Kullanımı: B70/100 Bitüm Örneği. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15, s. 548-559.
- Goel, H., Saini, K., Razdan, K., Khurana, R., Elkordy, A., & Singh, K. K. (2022). Chapter 3 - In vitro physicochemical characterization of nanocarriers: a road to optimization, Editor(s): Prashant Kesharwani, Kamalinder K. Singh, Nanoparticle Therapeutics, Academic Press. s. 133-179.

- Gonon, A. (2021). *Case Studies in the X-ray Diffraction of Ceramics*, Editor(s): Michael Pomeroy, *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*, Elsevier.
- Gökalp, İ., Özinal, Y., & Uz, V. E. (2018). Atık Bitkisel Yemelik Yağların Saf Bitüm Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(4), s. 570-578.
- Güngör, A. G. (2009). Polimer Modifiye Bitümlerin Superpave Performans Sınıflarının Belirlenmesi. 5. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara.
- Gürer, C., & Karaşahin, M. (2014). Sathi kaplama agregalarının adezyon özelliklerinin araştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10, s. 1-11.
- Gürer, C., Korkmaz, B., Ş., Y., & Rahmany, M. B. (2019). Sıcak Agrega ile Sathi Kaplama Uygulamasının Araştırılması. *AKÜ FEMÜBİD*, s. 401-409.
- Gürü, M., Çubuk, M. K., Arslan, D., & Aminbakhsh, S. (2017). Effects of Sugar Beet Molasses and Molasses- Based Boron Oxide Compound on Bitumen Properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(4).
- Gürü, M., Nubuk, M., Arslan, D., Farzanian, S., & Bilici, I. (2014). An Approach To The Usage Of Polyethyleneterephthalate (PET) Waste As Roadway Pavement Material. *J. Hazard. Mater.*, 279, s. 302-310.
- H. Wang, I. A.-Q. (2010). Evaluation Of Surface-Related Pavement Damage Due To Tire Braking. *Road Mater. Pavement Des.*, 11(1), s. 101-122.
- Hadavand, B. (2010). Bitumen Modification with Polysulphide Polymer Prepared from Heavy End Waste. *Iranian Polymer Journal*, 19(5).
- Han, Y., Tian, J., Ding, J., S. L., & Ni, F. (2022). Evaluating the storage stability of SBR-modified asphalt binder containing polyphosphoric acid (PPA). *Case Studies in Construction Materials*, 17.
- Hassanpour-Kasanagh, S., Ahmedzade, P., Fainleib, A. M., & Behnood, A. (2020). Rheological properties of asphalt binders modified with recycled materials: A comparison with Styrene-Butadiene-Styrene (SBS). *Construction and Building Materials*, 230, s. 117047.
- Hunter, R. N., Self, A., & Read, J. (2015). *The Shell Bitumen Handbook*, 6th edition. British library.
- Huş, S. (1997). Kolofan ve terebantın yağından elde edilen yeni türevler ve bunların endüstrideki önem. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, s. 80-94.

- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., & Eren, K. (tarih yok). Asfalt ve Uygulamaları. *Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı, İsfalt Bilimsel Yayın No:1, İstanbul*, s. 2001.
- İnce, C. B. (2019). *Geri Kazanılmış Polietilen Tereftalat (PET) 'İn Bitüm Ve Bittümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması*. İnönü Üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- İskender, C. (2017). *Cam Agregaya Boyutu Ve Agregaya Gradasyonunun Asfalt Kaplama Performansına Etkisi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi.
- J. Baek, H. O.-Q. (2010). Effects Of Interface Conditions On Reflective Cracking Development In Hot-Mix Asphalt Overlays. *Road Mater. Pavement Des.*, 11(2), s. 307-334.
- J. Zhu, B. B. (2014). Polymer Modification Of Bitumen: Advances And Challenges. *Eur. Polym. J.*, 54, s. 18-38.
- J., W., Wang T., H. X., & F., X. (2019). Modelling of rheological and chemical properties of asphalt binder considering SARA fractio. *Fuel*, 238, s. 320-330.
- Jahromi, S., & Khodaii, A. (2009). Effects of Nano clay on Rheological Properties of Bitumen Binder. *Constr. Build. Mater.*, 23(8), s. 2894-2904.
- Janmohammadi, M., Pornour, N., Javanmard, A., & Sabaghnia, N. (2016). Effects of bio-organic, conventional and nanofertilizers on growth, yield and quality of potato in cold steppe / Bioorganinių, tradicinių ir nanotrąšų poveikis bulvių augimui, derliui ir kokybei šaltojoje stepėje. 22, s. 133-144.
- Jiang, Y., Han, X., Gong, J., Xi, Z., Cai, J., Wang, Q., . . . Xie, H. (2019). Laboratory investigation of epoxy asphalt binder modified by brominated SBS. *Construction and Building Materials*, 228, s. 116733.
- Jones R. (1990). *Modifiers for Asphalt Concrete, Air Force Engineering and Service Center Project*. No: ESL–TR–88-32.
- Kabadayı, E. (2019). *Üleksitin Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Kang, Y., Song, M., Pu, L., & Liu, T. (2015). Rheological behaviors of epoxy asphalt binder in comparison of base asphalt binder and SBS modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 76, s. 343-350.
- Kaya, D., & Topal, A. (2016). Marshall ve Superpave Tasarım Yöntemleri Arasındaki Farklılıkların Ilık Karışım Asfaltlar Açısından İncelenmesi. *CBÜ Fen Bil. Dergi.*, 12(2), s. 289-302.

- Kaya, D., & Topal, A. (2016). Marshall ve Superpave Tasarım Yöntemleri Arasındaki Farklılıkların Ilık Karışım Asfaltlar Açısından İncelenmesi. *CBÜ Fen Bil. Dergi.*, 12(2), s. 289-302.
- Keçeciler, A. F., & Akkol, G. (1990). Bitümlü malzemeler laboratuvar el kitabı. *Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.*
- Kennedy, T. W., Huber, G. A., Harrigan, E. T., Cominsky, R. J., Hughes, C. S., Quintus, H. V., & Moulthrop, J. S. (1994). Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program. *SHRP-A-410, National Research.*
- Keskin, M., & Karacasu, M. (2019). Effect of boron containing additives on asphalt performance and sustainability perspective. *Construction and Building Materials*, 218, s. 434-447.
- Kizirgil, M. E. (2013). *Stiren-Butadien-Stiren ve Uçucu Külün Birlikte Kullanılmasının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
- Kök, B. V. (2007). *Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni Bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi.
- Kök, B. V., & Kuloğlu, N. (2008). İki Aşamalı Karıştırma Yönteminin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(1), s. 35-48.
- Kuloğlu, N., Yılmaz, M., & Kök, B. V. (2008). Farklı Penetrasyon Derecelerine Sahip Asfalt Çimentolarının Kalıcı Deformasyona Karşı Dayanımlarının ve İşlenebilirliklerinin İncelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 13(1).
- Kumar Singh, M., & Singh, A. (2022). Chapter 9 - Thermal characterization of materials using differential scanning calorimeter, Editor(s): Mukesh Kumar Singh, Annika Singh, In The Textile Institute Book Series, Characterization of Polymers and Fibres, Woodhead Publishing. s. 201-222.
- Kumar, A., Choudhary, R., Narzari, R., Kataki, R., & Shukla, S. (2018). Evaluation of bio-asphalt binders modified with biochar: a pyrolysis by-product of Mesua ferrea seed cover waste. *Cogent Eng.*, 5, s. 1-15.
- Kurtis, K. (2003). *Asphalt and Asphalt Concrete*. Scholl of Civil Engineering Georgia Institute Technology, Atlanta, Georgia.
- Kuru, R., & Yarat, A. (2017). Bor ve Sağlığımıza Olan Etkilerine Güüncel Bir Bakış. *Clinical and Experimental Health Sciences*, 7, s. 107-14.

- Kutuk, S., & Kutuk-Sert, T. (2020). An examination of nanoparticle colemanite mineral added warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 243, s. 118252.
- Kütük Sert, T. (2017). Sub-mikron boyutlarında üleksit mineralinin asfalt karışımların suya hassasiyetine etkisinin incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), s. 141-152.
- Laçın, Ö., & Dönmez, B. (2021). Modifiye Hummers Yöntemi ile Elde Edilen Grafen Oksit Sentezleri İçin: Kısım3, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, s. 985-989.
- Lavin, P. (2003). *Asphalt Pavements*. Spon Press, London and New york.
- Lee, C., Lim, S., Kim, G., Kim, D., Kim, D., Lee, H., & Lee, K. (2021). Rosin microparticles as drug carriers: Influence of various solvents on the formation of particles and sustained-release of indomethacin. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 9(6), s. 476-481.
- Lentz, A. P. (1945). *United States Patent Office Patent No. 2375117*.
- Li, Y., Lv, C., Cheng, P., Chen, Y., & Zhang, Z. (2023). Application of bio-resin in road materials: Rheological and chemical properties of asphalt binder modified by lignin-phenolic resin. *Case Studies in Construction Materials*, 18, s. 01989.
- Liang, M., Liang, P., Fan, W., Qian, C., Xin, X., Shi, J., & Nan G.Z. (2015). Thermo-rheological behavior and compatibility of modified asphalt with various styrene-butadiene structures in SBS copolymers. *Mater. Des.*, 88, s. 177-185.
- Liu, X., Zhou, C., Feng, D., Tang, H., Xu, Y., & Fan, X. (2016). Influence of moisture in aggregates on properties of cold-mixed resin asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 120, s. 232-240.
- Loganathan, S., Valapa, R., M. R., Pugazhenth, G., & Thomas, S. (2017). Chapter 4 - Thermogravimetric Analysis for Characterization of Nanomaterials, Editor(s): Sabu Thomas, Raju Thomas, Ajesh K. Zachariah, Raghvendra Kumar Mishra, In Micro and Nano Technologies, Thermal and Rheological Measurement Techniques for Nanomaterial. s. 67-108.
- Luo, S., Lu, Q., & Qian, Z. (2015). Performance evaluation of epoxy modified open-graded porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 76, s. 97-102.
- Luo, S., Qian, Z., Yang, X., & Lu, Q. (2017). Fatigue behavior of epoxy asphalt concrete and its moisture susceptibility from flexural stiffness and phase angle. *Construction and Building Materials*, 145, s. 506-517.
- M., G., Nayır, F., Ziya, U., Çalışkan, K. K., Öztürk, A., Tutan, S. N., & Komut, M. (2021). Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı. Araştırma Ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.

- M332, A. (2015). Standard specification for Performance-Graded Asphalt Binder using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. Test, AASHTO, Washington, D.C.
- Mackiewicz, P. (2013). Fatigue tests of bituminous mixtures with inclusion of initial cracks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(1), s. 140-147.
- Malkoç, G. (2000). Asfalt Çimentosunun Kimyasal Yapısı, Modifikasyona Etkisi ve Bu Kapsamda Ülkemiz Ürünlerinin Değerlendirilmesi. III. Asfalt Sempozyumu, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Mazumder, M., Ahmed, R., Ali, A. W., & Lee, S. (tarih yok). SEM and ESEM techniques used for analysis of asphalt binder and mixture: A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 186, s. 313-329.
- McGennis, R. B., Shuler, S., & Bahia, H. U. (1994). Background of superpave asphalt binder test methods. *National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-069, Asphalt Institute, Lexington*, s. 91 s.
- Ming., L. Y., Feng, C. P., & Sidding, E. (2018). Effect of phenolic resin on the performance of the styrene-butadiene rubber modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 181, s. 465-473.
- Mirzaiyan, D., Ameri, M., Amini, A., Sabouri, M., & Norouzi, A. (2019). Evaluation of the performance and temperature susceptibility of gilsonite- and SBS-modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 207, s. 679-692.
- Morova, N., & Terzi, S. (2015). Kulemanit atıkların sıcak karışım asfalt betonda agrega olarak değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(2), s. 8-15.
- Motamedi, M., Attar, M. M., & Rostami, M. (2017). Performance Enhancement of The Oxidized Bitumen Binder Using Epoxy Resin. *Progress in Organic Coatings*, 102, s. 178-185.
- Namlı, R., & Kuloğlu, N. (2007). Superpave ve Marshall Yöntemlerinin Deneyisel Karşılaştırılması. *İMO Teknik Dergi*, s. 4103 -4118.
- O., B. R., Glendale, S., & Osborne, P. S. (1964). *United States Patent Office, Patent No. 3152093*.
- Orhan, F. (2005). *Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları*. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Oruç, Ş. (1997). *Torul Kalker Taşocağı Agregalarının Asfalt Betonu İçerisindeki Performansının Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.

- Oruç, Ş. (2002). *Yoğun Granülometrilili Emülsifiye Asfalt Betonunda Çimentonun Karışım Performansı Üzerindeki Etkisi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon,
- Oruç, Ş., & Yılmaz, B. (2016). Improvement in Performance Properties of Asphalt Using a Novel Boron-containing Additive. *Construction and Building Materials*, 123, s. 207-213.
- Oruç, Ş., Yılmaz, B., & Bostancıoğlu, M. (2013). Borik Asidin Asfaltın Fiziksel Özelliklerine Etkisi. 6. *Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi*, s. 297-306.
- Oruç, Ş., Yılmaz, B., & Sancak, K. (2015). Effect of Boron-Containing Additives on Rheological Properties of Asphalt Binder. *Road Materials and Pavement Design*.
- Oruç, Ş., Yılmaz, B., & Sancak, K. (2016). Effect of Boron-containing Additives on Rheological Properties of Asphalt Binder. *Road Materials and Pavement Design*, 17(4), s. 810-824.
- Öz, M., Deniz, İ., Yaşar, M., Komut, O., & Fidan, M. S. (2010). Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.)’da Reçine Kelebeği (*Dioryctria sylvestrella* Ratz.) ve Gövde Reçinesinin Uçucu Yağ Miktarları.
- Özsin, G. (2018). Investigation of biomass pyrolysis by using spectral methods combined with thermal analysis, *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 20(2), s. 315-329.
- Peak, D. (2013). Fourier Transform Infrared Spectroscopic Methods of Soil Analysis. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier.
- Petit, S., & Madejova, J. (2013). Chapter 2.7 - Fourier Transform Infrared Spectroscopy, Editor(s): Faïza Bergaya, Gerhard Lagaly, *Developments in Clay Science*, Elsevier, Volume 5. s. 213-231.
- Pişkin, M. B. (2016). Bor Kullanım Alanları, Borun Canlılar Üzerindeki Etkileri. *Ders notu, Biyomedikal Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi*. içinde
- Planı, R. E. (2017). Orman Genel Müdürlüğü, OGM Yayınları.
- Portugal, 2., Lucena, L., Lucena, A., & Costa, D. B. (2017). Rheological Performance of Soybean in Asphalt Binder Modification. *Road Materials Pavement Design*, s. 1-15.
- Qin, Q., Farrar, M., Turner, T. F., & Planche, J. (2015). Technical White Paper Characterization of the Effects of Wax (Sasobit ®) on Asphalt Binder Fundamental Properties of Asphalts and Modified Asphalts III Product : FP 13 By.

- Rahman, Z., Aziz, M., Hainin, M., & Bakar, W. (2014). Impact of Bitumen Binder: Scope of Bio-Based Binder for Construction Of Flexible Pavement. *J. Teknol.*, 70(7), s. 105-109.
- Rahman, A.-M. T., Aziz, M. M., Hainin, M. R., & Bakar, W. W. (2014). Impact of Bitumen Binder: Scope of Bio-based Binder for Construction of Flexible Pavement, *Jurnal Teknologi*, 70(7), s. 105-109.
- Ray, S., & Okamoto, M. (2003). Biodegradable Polylactide and Its Nano Composites: Opening A New Dimension for Plastics and Composites. *Macromol. Rapid Commun.*, 24(14), s. 815-840.
- Sabouri, M., Mirzaiyan, D., & Moniri, A. (2018). Effectiveness of Linear Amplitude Sweep (LAS) asphalt binder test in predicting asphalt mixtures fatigue performance. *Construction and Building Materials*, 171, s. 281–290.
- Sai Revanth, J., Sai Madhav, V., Sai, Y. K., Krishna, D. V., Srividya, K., & Sumanth, C. M. (2020). TGA and DSC analysis of vinyl ester reinforced by Vetiveria zizanioides, jute and glass fiber,. *Materials Today: Proceedings*, 26(2), s. 460-465.
- Selman, G. Ş. (2015). *Bor Atıklarının Asfalt Kaplamalarda Mineral Filler Olarak Kullanılabilirliği*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyon,.
- Sengoz, B., & Isikyakar, G. (2008). Evaluation of the Properties and Microstructure of SBS and EVA Polymer Modified Bitumen. *Construction and Building Materials* , 22, s. 1897-1905 .
- Soltes, E., J. Zinkel, D. F., & Zinkel. (1989). Chemistry of rosin. *Naval stores: Production, Chemistry, and Utilization*, Pulp Chemical Association, New York,
- Sorolla-Rosario, D., L.-P. J., Pérez-Martínez, M., Lozano-Castelló, D., & Bueno-López, A. (2022). Study of microplastics with semicrystalline and amorphous structure identification by TGA and DSC. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1).
- Southern, M. (2015). A perspective of bituminous binder specifications, Editor(s): Shin-Ch. *In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Advances in Asphalt Materials*, Woodhead Publishing, s. 1-27.
- Sönmez, İ., Taştan, Y., Yıldız, K., & Bayraklı, Y. (2018). İki Asfalt Tabakası Arasında Geogrid Kullanımının Asfalt Performansına Olan Etkisi. *İSFALT yayınları*.
- Sultani, K. A. (2021). *Polipropilen Pirolizi Kullanılarak Yapılan Taş Mastik Asfalt Karışımların Marshall Özellikleri*. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

- Sybilski, D. (1994). Relationship Between Absolute Viscosity of Polymer Modified Bitumens And Rutting Resistance of Pavement. *Material and Structures*, 27, s. 110-120.
- Şahin, D. (2017). *Aspir Yağı ve Borik Asit İçerikli Organik Katkının Bittümün Fiziksel ve Reolojik Özellikleri Üzerine Etkisi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Şartnamesi, K. T. (2013). *Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara*.
- Taşgın, Y. (2018). The Investigation of the Effects of Boron Oxide and Boric Acid, Added As Catalyst, on Polyester in terms of Mechanical Properties and Microstructure. *Science and Eng. J of Fırat Univ*, 30(2), s. 303-311.
- Tombal, D. T., Özkan, Ş. G., Ünver, i. K., & Osmanlıoğlu, A. E. (2016). Bor bileşiklerinin özellikleri, üretimi, kullanımı ve nükleer reaktör teknolojisinde önemi. *BORON*, 1(2), s. 86-95.
- Töre, İ., & Ay, N. (2004). The Characterization and Production of Amorphous Boron Oxide. *International Boren Symposium, Eskişehir, Turkey*.
- TP101-14, A. (200). Standard Method of Test for Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep.
- Tunç, A. (2007). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- Ullidtz, P. (1987). *PAVEMENT ANALYSIS. DEVELOPMENTS IN CIVIL ENGINEERING*, 19. Amsterdam, Netherlands.
- Umar, F., & Açar, E. (1991). *Yol Üst Yapısı, İTÜ Rektörlüğü*.
- URL-1. (2023). Nisan 26, 2023 tarihinde <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/turkiyede-madencilik/2021-yili-maden-dis-ticaret.pdf> adresinden alındı
- URL-10. (2023, Mayıs 11). <https://www.ogm.gov.tr/tr/e-kutuphane/resmi-istatistikler> adresinden alındı
- URL-11. (2023, Şubat 20). *Rosin*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Rosin> adresinden alındı
- URL-12. (2023, Nisan 16). <https://www.etimaden.gov.tr/bor-elementi> adresinden alındı
- URL-13. (2023, Nisan 16). *TÜBİTAK Bor Raporu*. <http://www.tubitak.gov.tr>. adresinden alındı
- URL-14. (2023, Nisan 16). <https://www.etimaden.gov.tr/dunyada-bor> adresinden alındı
- URL-15. (2023, Nisan 16). <https://boren.tenmak.gov.tr/tr/calisma-alanlari/rezervler.html> adresinden alındı

- URL-16. (2023, Nisan 16). <https://www.etimaden.gov.tr/turkiyede-bor> adresinden alındı
- URL-17. (2023, Nisan 16). <https://www.droctasatis.com/bor-nedir/> adresinden alındı
- URL-18. (2023, Nisan 16). <https://www.etimaden.gov.tr/rafine-urunler> adresinden alındı
- URL-2. (2023, Nisan 16). <https://www.etimaden.gov.tr/turkiyede-bor> adresinden alındı
- URL-3. (2023, Nisan 26). <https://www.hjoil.com.tw/products.php?getId=6> adresinden alındı
- URL-4. (2023, Nisan 26). https://www.eurobitume.eu/public_downloads/Technical/EB_Technical_Information_FD_English.pdf adresinden alındı
- URL-5. (2023, Ağustos 10). <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/pubs/hif11038/hif11038.pdf> adresinden alındı
- Url-6. (2023, Ağustos 10). https://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/hmec/pubs/module_f/lab_manual_asphalt.pdf adresinden alındı
- URL-7. (2023, Nisan 28). <https://civilblog.org/2015/09/18/10-different-types-of-failures-of-flexible-pavement/> adresinden alındı
- URL-8. (2023, Nisan 28). <https://insapedia.com/asfalt-yollarda-meydana-gelen-kusur-ve-hasar-cesitleri/> adresinden alındı
- URL-9. (2023, Nisan 28). <https://docplayer.biz.tr/48297242-Bolum-6-asfalt-betonu-kaplamalarda-meydana-gelen-bozulmalar-nedenleri-ve-iyilestirilmeleri-6-1-giris-her-cesit-kaplamada-trafik-etkisi-iklim.html> adresinden alındı
- Vishwakarma, İ., & Uthaman, S. (200). 9 - *Environmental impact of sustainable green concrete*, Editor(s): Mohd Shahir Liew, Phuong Nguyen-Tri, Tuan Anh Nguyen, Saeid Kakooei, In *Micro and Nano Technologies, Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials*, Elsevier.
- Wang, H., Liu, X., Liu, B., Zhang, J., & Xian, M. (2009). Synthesis of rosin-based flexible anhydride-type curing agents and properties of the cured epoxy. *Polymer International*, 58(12), s. 1435-1441.
- Wang, T., Weng, Y., Cai, X., Li, J., Xiao, F., Sun, G., & Zhang, F. (2022). Statistical modeling of low-temperature properties and FTIR spectra of crumb rubber modified asphalts considering SARA fractions. *Journal of Cleaner Production*, 374, s. 134016.
- Wei, X., Dub, D., & Z. Chen, C. (2006). Thermal analysis study of 5,10,15,20- tetrakis (methoxyphenyl) porphyrins and their nickel complexes. *Thermochimica Acta*, 440, s. 181-187.

- Weigel, S., Wetekam, J., & Mollenhauer, K. (2023). Identification and classification of PAH in asphalt binders with FTIR spectroscopy and multivariate analysis methods. *Fuel*, 337, s. 126845.
- Whiteoak, D. (2004). *Shell Bitüm El Kitabı*, Lav, A. H. ve Lav, A. İsfalt Bilimsel Yayın No:3, İstanbul.
- Xue, Y., & Qian, Z. (2016). Development and performance evaluation of epoxy asphalt concrete modified with mineral fiber. *Construction and Building Materials*, 102(1), s. 378-383.
- Yakıncı, Z. D., & Kök, M. (2016). Borun Sağlık Alanında Kullanımı. *İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Dergisi* , 4(1).
- Yao, H., Dai, Q., & You, Z. (2015). Chemo-physical Analysis and Molecular Dynamics (Md) Simulation of Moisture Susceptibility of Nanohydrated Lime Modified Asphalt Mixtures. *Constr. Build. Mater.*, 101(1), s. 536-547.
- Yao, K. (2013). Renewable Bio-Based Polymers and Degradable Functional Polymers. *Doctoral dissertation*.
- Yesilcicek, H., Bozdemir, M., & Ş., O. (2023). Rheological properties of synthesised additives in hot mix asphalt. *Gradevinar*, 75(7), s. 641 – 752.
- Yeşilçiçek, H., Oruç, Ş., & Bozdemir, M. G. (2022). Characterization and rheological properties of asphalt binder with a novel tall oil-based boron additive to enhance asphalt performance. *Construction and Building Materials*, 359, s. 129510.
- Yıldırım, M. (2014). *Farklı Doğal Asfaltların Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisi*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elâzığ.
- Yılmaz, B. (2016). *Bor içerikli Katkıyla Modifiye Edilen Asfaltın Performans Özelliklerinin Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Yılmaz, M. (2011). *Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Doktora Tezi,.
- Yılmaz, M., Kök, B. V., N., K., & Alataş, T. (2013). Elastomer Türü polimerler İle Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcıların Depolama Stabilitelerinin ve Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi. *Deü Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 15(1), s. 67-77.
- Yusoff, N., Breem, A., Alattug, H., Hamim, A., & Ahmad, J. (2014). The effects of moisture susceptibility and Ageing Conditions on Nano-Silica/Polymer Modified Asphalt Mixtures. *Constr. Build. Mater.*, 72, s. 139-147.

- Yüknü, K., Öztürk., T., & Komut, M. (2020). *Bitümlü bağlayıcılar laboratuvar el kitabı*. Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Araştırma Ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Zaniewski, J. P., & Pumphrey, M. E. (2004). Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol. *West Virginia University, Morgantown*.
- Zhang, J. (2012). Rosin-based chemicals and polymers. *Smithers Rapra*.
- Zhang, J., Wang, J., Wu, Y., Wang, Y., & Wang, Y. (2009). Evaluation of the Improved Properties of SBR/Weathered Coal Modified Bitumen Containing Carbon Black. *Construction and Building Materials*, 23, s. 2678-2687 .
- Zhang, W., Liu, C., Ying, Y., & Dong, W. (2010). The preparation and characterization of boron-containing phenolic fibers. *Materials chemistry and physics*, 121, s. 89-94.
- Zhang, W., Q. L., Liu, J., Hu, K., Zou, L., Chen, Y., . . . Zang, J. (2021). Modification mechanism of C9 petroleum resin and its influence on SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 306, s. 124740.
- Zhong, K., Yang, X., & Wei, X. (2017). Investigation on surface characteristics of epoxy asphalt concrete pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(6), s. 545-552.
- Zhou, H.-Y., Dou, H.-B., & Chen, X.-H. (2021). Rheological Properties of Graphene/Polyethylene Composite Modified Asphalt Binder. *Materials*, 14, s. 3986.

8. EKLER

Ek Tablo 1. Optimum Bağlayıcı Miktarı İçin Marshall Föyü

Sıra No	Asfalt		Briket Yükseklikleri (mm)				Havadaki	Sudaki	Doygun Yüzey	Hacim	Hacim	Maks.	Boşluk	Agr.Arası	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	(cm3)	Özg.Ağr.	Teo. Özg. Ağr.	(%)	Boşluk (%)	Boşluk (%)			Faktörü	Stabilite
	Wa (%)	Ağırlık (gr)	1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf	(mm)	(kg)		(kg)
1	4,00	46	64,0	64,0	63,0	63,7	1176,0	679,7	1184,3	504,6	2,331					3,48	1663	0,995	1655
2	4,00	46	63,0	63,0	63,0	63,0	1183,0	684,4	1190,1	505,7	2,339					3,35	1774	1,013	1797
3	4,00	46	64,0	64,0	64,0	64,0	1189,9	685,1	1197,2	512,1	2,324					3,49	1532	0,988	1514
											2,331	2,509	7,08	15,93	55,55	3,44			1655
4	4,50	51,8	63,0	63,0	63,0	63,0	1192,9	688,3	1200,6	512,3	2,329					4,10	1654	1,013	1675
5	4,50	51,8	63,0	63,0	63,0	63,0	1192,3	691,3	1196,9	505,6	2,358					3,83	1512	1,013	1532
6	4,50	51,8	63,0	63,0	63,0	63,0	1190,5	686,4	1199,4	513,0	2,321					3,26	1648	1,013	1669
											2,336	2,492	6,26	16,17	61,29	3,73			1625
7	5,00	57,5	62,0	62,0	62,0	62,0	1202,4	697,6	1206,4	508,8	2,363					4,77	1581	1,038	1641
8	5,00	57,5	62,0	62,0	62,0	62,0	1198,9	693,4	1202,8	509,4	2,354					4,16	1761	1,038	1828
9	5,00	57,5	62,0	62,0	62,0	62,0	1199,8	695,9	1203,4	507,5	2,364					4,47	1642	1,038	1704
											2,360	2,475	4,65	15,69	70,39	4,47			1724
10	5,50	63,3	62,0	62,0	62,0	62,0	1202,7	695,5	1204,2	508,7	2,364					3,62	1733	1,038	1799
11	5,50	63,3	62,0	63,0	62,0	62,3	1204,4	695,7	1206,4	510,7	2,358					4,50	1741	1,030	1793
12	5,50	63,3	63,0	62,0	62,0	62,3	1202,6	694,9	1204,7	509,8	2,359					5,37	1680	1,030	1730
											2,361	2,459	3,99	16,09	75,22	4,50			1774
13	6,00	69	63,0	63,0	62,0	62,7	1206,1	698,0	1207,7	509,7	2,366					5,39	1405	1,020	1433
14	6,00	69	62,0	62,0	62,0	62,0	1207,0	697,2	1209,3	512,1	2,357					4,82	1606	1,038	1667
15	6,00	69	63,0	63,0	62,0	62,7	1211,9	699,5	1215,9	516,4	2,347					5,39	1414	1,020	1442
											2,357	2,443	3,52	16,62	78,82	5,20			1514
16	6,50	74,8	62,0	62,0	64,0	62,7	1215,1	701,6	1217,6	516,0	2,355					5,50	1250	1,020	1275
17	6,50	74,8	61,0	62,0	62,0	61,7	1216,1	700,2	1218,9	518,7	2,345					5,28	1404	1,046	1469
18	6,50	74,8	62,0	62,0	62,0	62,0	1216,8	701,6	1218,7	517,1	2,353					5,78	1376	1,038	1428
											2,351	2,427	3,13	17,21	81,81	5,52			1391

ÖZGEÇMİŞ

Merve Gülfer BOZDEMİR, ilköğrenimini Sabancı İlköğretim Okulu'nda bitirdikten lise eğitimini 2007 yılında Erzurum Mecidiye Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2008-2009 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nünde lisans eğitimine başladı ve bu bölümden 2013 yılında mezun oldu. 2013-2014 öğretim yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ulaştırma Bölümü'nde yüksek lisans yapmaya hak kazandı. 2015 yılında ÖYP kapsamında Erzurum Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ulaştırma bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. 2015 yılında Boğaziçi Üniversitesi'nde 6 aylık dil eğitiminden sonra 2018 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlayıp 2019 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde doktora eğitimine başladı ve halen Erzurum Teknik Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Bozdemir M. G., Oruç Ş., Yeşilçiçek H., (2023), Physical and Microstructural Properties of New Boron Resin Compound Synthesized Asphalt, American Society of Civil Engineers-Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 35, Issue 2.

Yeşilçiçek H., Bozdemir M. G., Oruç Ş., (2023), Rheological properties of synthesised additives in hot mix asphalt, GRADEVINAR 75, 7, 679-694