

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BOR VE TALL YAĞININ SENTEZLENMESİYLE ELDE EDİLEN KATKIYLA
ASFALTIN MODİFİYE EDİLMESİ VE KAPLAMA PERFORMANSI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Hacer YEŞİLÇİÇEK

MAYIS 2024
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BOR VE TALL YAĞININ SENTEZLENMESİYLE ELDE EDİLEN KATKIYLA
ASFALTIN MODİFİYE EDİLMESİ VE KAPLAMA PERFORMANSI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Hacer YEŞİLÇİÇEK

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 17/04/2024

Tezin Savunma Tarihi : 21/05/2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Şeref ORUÇ

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Bor ve Tall Yağının Sentezlenmesiyle Elde Edilen Katkıyla Asfaltın Modifiye Edilmesi ve Kaplama Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, yaptığı çalışmalarla önemli akademik başarılarla sahip, akıl ve vicdan konusundaki sarsılmaz inancı, yol göstermedeki engin bilgi ve hoşgörüsünü hayatımın geri kalanında kendime şiar edinmekten büyük mutluluk duyacağım, değerli bilgi ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan çok kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Şeref ORUÇ’a teşekkürü bir borç bilirim.

Mütevazı kişiliği ve bitmek bilmeyen çalışma azmiyle her zaman bitti denen yerde engin bilgi birikimi ve tecrübesiyle beni aydınlatan, laboratuvar çalışmalarında hem üst düzey kimya bilgisi hem de akademik alandaki yol göstericiliği ile desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok kıymetli hocam Prof. Dr. Kemal SANCAK’a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, doktora eğitimim boyunca her daim yanımda olan, karşılaştığım tüm sorunlarda yapıcı eleştirileri ve önerileri ile zorlukların üstesinden birlikte geldiğim değerli meslektaşım, yakın arkadaşım, yoldaşım Arş. Gör. Merve Gülfer BOZDEMİR’e teşekkür ederim.

Birlikte tüm sorunların üstesinden gelerek hayatı daha kolay baş edilebilir hale getiren, varlığıyla gücüme güç katan biricik eşim Muhammed YEŞİLÇİÇEK’e, gözlerindeki ışıyla her daim motivasyon kaynağım ve hayat enerjim olan ilk göz ağrım, biricik oğlum Selim’e ve minik tekmeleriyle varlığını hissettiren biricik kızım Melis’e zorlu doktora sürecimi keyifli bir yolculuğa dönüştürdükleri için teşekkür ederim.

Yapılacak tüm işlerde, alınacak tüm sorumluluklarda, atılacak her adımda sırtımı gönül rahatlığıyla dayayabildiğim gönül aydınlığım canım babam Ahmet AYDIN’a, her daim yanımda olan, tüm varlığıyla hayatıma ışık tutarak yolumu aydınlatan, tüm fırtınalarda sığınacağım tek limanım, kalbimin parıltısı canım annem Havva AYDIN’a, varlıklarıyla her anımı dolduran can şenliklerim, kardeşlerim Esma KASAP’a ve Ömer AYDIN’a tüm destekleri için sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca küçük ve pek sevimli can parçalarımız Mihra AYDIN’a ve Kevser KASAP’a varlıkları için teşekkür ederim.

Hacer YEŞİLÇİÇEK
Trabzon, 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Bor ve Tall Yağının Sentezlenmesiyle Elde Edilen Katkıyla Asfaltın Modifiye Edilmesi ve Kaplama Performansı Üzerindeki Etkilerinin 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. 21/05/2024

Hacer YEŞİLÇİÇEK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Konuyla İlgili Yapılan Çalışmalar	3
1.3. Çalışmanın Amacı ve Tezin Organizasyonu	12
1.4. Bitümlü Bağlayıcılar	14
1.4.1. Bitümün Kimyasal Bileşimi ve Yapısı.....	15
1.4.2. Bitümün Reolojisi	16
1.5. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler	18
1.5.1. Geleneksel Bağlayıcı Deneyleri.....	19
1.5.2. Superpave Bağlayıcı Deneyleri.....	26
1.6. Bitümlü Sıcak Karışımlar	37
1.6.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Özellikleri	37
1.6.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Oluşan Bozulmalar	40
1.6.3. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar	45
1.6.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Tasarım Yöntemleri	50
1.6.5. Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler.....	50
1.6.5.1. Dolaylı Çekme Yorulma Deneyi.....	55
1.7. Bitümün ve Bitümlü Karışımların Modifikasyonu	56
1.8. Yapısal Analiz Yöntemleri	60
1.8.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrumu (FT-IR)	60
1.8.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	60
1.8.3. Termogravimetrik Analiz (TGA).....	61

1.8.4. X-Işını Kırınım Yöntemi (XRD).....	61
1.8.5. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC).....	61
1.9. Bor.....	61
1.10. Tall Yağı.....	65
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	67
2.1. Kullanılan Malzemeler.....	68
2.2. Katkı Maddesinin Kimyasal Sentezi.....	70
2.3. Sentez Katkı Maddesinin Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi.....	72
2.3.1. FT-IR Analizi.....	72
2.3.2. SEM Analizi.....	72
2.3.3. TG/DTG Analizleri.....	73
2.3.4. DSC Analizi.....	74
2.3.5. XRD Analizi.....	74
2.4. Modifiye Bağlayıcıların Hazırlanması.....	75
2.5. Modifiye Bağlayıcıların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi.....	76
2.6. Modifiye Bağlayıcıların Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	77
2.6.1. RV Deneyinin Yapılışı.....	77
2.6.2. RTFOT Deneyinin Yapılışı.....	77
2.6.3. PAV Deneyinin Yapılışı.....	78
2.6.4. DSR Deneyinin Yapılışı.....	78
2.6.5. BBR Deneyinin Yapılışı.....	78
2.6.6. Depolama Stabilitesi Deneyi.....	79
2.6.7. MSCR Deneyinin Yapılışı.....	79
2.6.8. LAS Deneyinin Yapılışı.....	80
2.7. Bitümlü Sıcak Karışımların Hazırlanması.....	80
2.8. Bitümlü Sıcak Karışım Özelliklerinin Belirlenmesi.....	82
2.8.1. Marshall Tasarım Yöntemi.....	83
2.8.2. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyinin Yapılışı.....	83
2.8.3. Modifiye Lottman Deneyinin Yapılışı.....	84
2.8.4. Dinamik (Tekrarlı) Sünme Deneyinin Yapılışı.....	85
2.8.5. Dolaylı Çekme Yorulma Deneyinin Yapılışı.....	85
3. BULGULAR VE İRDELEME.....	86
3.1. Katkı Maddesinin Yapısal Analiz Sonuçları.....	86
3.1.1. FT-IR Analizi.....	86

3.1.2. SEM Analizi.....	88
3.1.3. TG Analizi.....	90
3.1.4. DSC Analizi	90
3.1.5. XRD Analizi	91
3.2. Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deney Sonuçları	92
3.3. Düktilite Deney Sonuçları	93
3.4. Kuvvet Ölçümlü Düktilite ve Elastik Geri Dönme Deneyi Sonuçları	94
3.5. Parlama Noktası Deney Sonuçları.....	95
3.6. Özgül Ağırlık Deney Sonuçları.....	96
3.7. Fraass Kırılma Noktası Deney Sonuçları	96
3.8. Trikloretilende Çözünürlük Deneyi.....	97
3.9. Nicholson Soyulma Deney Sonuçları.....	97
3.10. Dönel Viskozimetre (RV) Deney Sonuçları.....	99
3.11. Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deney Sonuçları	100
3.12. Basıncılı Yaşlandırma Kabini (PAV) Deney Sonuçları	104
3.13. Dinamik Kesme Reometrisi (DSR) Deney Sonuçları	106
3.14. Frekans Taraması Deney Sonuçları.....	108
3.15. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deney Sonuçları	112
3.16. Depolama Stabilitesi Deney Sonuçları.....	114
3.17. Bağlayıcının Sıcaklık Hassasiyeti Deney Sonuçları	120
3.18. Çoklu Gerilme Sünme Geri Dönme (MSCR) Deney sonuçları	121
3.19. Lineer Farklı Genlik Tarama (LAS) Deney Sonuçları.....	125
3.20. Marshall Tasarımına Göre Optimum Bitüm İçeriğinin Belirlenmesi	129
3.21. Marshall Stabilitesi ve Akma Deney Sonuçları	132
3.22. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Sonuçları.....	134
3.23. Modifiye Lottman Deney Sonuçları.....	134
3.24. Dinamik (Tekrarlı) Sünme Deney Sonuçları.....	137
3.25. Dolaylı Çekme Yorulma Deney Sonuçları.....	137
3.26. TOBO Katkısının SBS Katkısıyla Mali Açıdan Karşılaştırılması	138
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	140
5. KAYNAKLAR	146
6. EKLER.....	163
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

BOR VE TALL YAĞININ SENTEZLENMESİYLE ELDE EDİLEN KATKIYLA ASFALTIN MODİFİYE EDİLMESİ VE KAPLAMA PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Hacer YEŞİLÇİÇEK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Şeref ORUÇ
2024, 162 Sayfa, 1 Sayfa Ek

Bu tez çalışmasında, ülkemiz sanayisinin stratejik ham maddesi olan bor bileşiği ve kâğıt endüstrisinin bir yan ürünü olan tall yağının laboratuvarında kimyasal olarak sentezlenmesiyle elde edilen yeni sentez katkı maddesinin bitüm ve bitümlü karışımlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada elde edilen bor içerikli tall yağı katkısının (TOBO) yapısal analizi FT-IR, SEM, TG, XRD ve DSC yöntemleriyle tespit edilmiştir. TOBO maddesinin bitümlü bağlayıcıya ağırlıkça dört farklı oranda ilavesiyle elde edilen modifiye bağlayıcıların fiziksel özellikleri geleneksel deneylerle, reolojik özellikleri Superpave deneylerinden dönel viskozimetre (RV), dönel ince film halinde yaşlandırma (RTFOT), basınçlı yaşlandırma kabini (PAV), dinamik kesme reometresi (DSR) ve kırılganlık reometresi (BBR) gibi deneylerle belirlenmiştir. Ek olarak, Çoklu Gerilme Sünme-Geri Kurtarma (MSCR) ve Lineer Genlik Taraması (LAS) deneyleri de modifiye bağlayıcılara uygulanmıştır. Modifiye bağlayıcılarla üretilen karışım numunelerine ait mekanik özellikler, Marshall Stabilite ve Akma, Dolaylı Çekme Mukavemeti, Modifiye Lottman, Dinamik Sünme ve Dolaylı Çekme Yorulma deneyleri ile ortaya konmuştur. Deney sonuçlarına göre, TOBO katkı maddesinin yüksek sıcaklıklarda bağlayıcının kıvamını ve tekerlek izi direncini arttırdığı, düşük sıcaklıklardaki çatlama eğilimini azalttığı ve bağlayıcının performansına en iyi etki eden katkı oranının %1.5 olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bor oksit, Tall yağı, Bitüm modifikasyonu, Asfaltın reolojisi, Asfalt karışım performansı

PhD. Thesis

SUMMARY

MODIFICATION OF ASPHALT WITH THE ADDITIVE MADE BY SYNTHESISING BORON AND TALL OIL AND INVESTIGATION OF ITS EFFECTS ON PAVEMENT PERFORMANCE

Hacer YEŞİLÇİÇEK

The Graduate School of Natural and Applied Sciences

Civil Engineering Graduate Program

Supervisor: Prof. Dr. Şeref ORUÇ

2024, 162 Pages, 1 Pages Appendix

In this thesis study, the effect of the new synthesis additive obtained by chemically synthesizing boron compound, which is the strategic raw material of our country's industry, and tall oil, which is a by-product of the paper industry, in the laboratory, on bitumen and bituminous mixtures was investigated. The structural analysis of the boron-containing tall oil additive (TOBO) obtained in the study was determined by FT-IR, SEM, TG, XRD and DSC methods. The physical properties of the modified binders obtained by adding TOBO material to the bituminous binder in four different weight ratios were determined by conventional experiments, and their rheological properties were determined by Superpave experiments, such as rotational viscometer (RV), rotational thin film aging (RTFOT), pressure aging vessel (PAV), dynamic shear rheometer (DSR). and determined by experiments such as bending beam rheometer (BBR). Additionally, Multiple Stress Creep-Recovery (MSCR) and Linear Amplitude Sweep (LAS) experiments were also applied to the modified binders. Mechanical properties of mixture samples produced with modified binders were demonstrated by Marshall Stability and Flow, Indirect Tensile Strength, Modified Lottman, Dynamic Creep and Indirect Tensile Fatigue tests. According to the test results, it was concluded that TOBO additive increases the consistency and rutting resistance of the binder at high temperatures, reduces cracking tendency at low temperatures, and the additive ratio that best affects the performance of the binder is 1.5%.

Key Words: Boron oxide, Tall oil, Bitumen modification, Asphalt reology, Asphalt mixture performance

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Petrolün ham halinin damıtılması ve bitüm eldesi	15
Şekil 2. Bitümün kimyasal bileşiminin şematik gösterimi	16
Şekil 3. Bitümlü bağlayıcının yaşlanma aşamaları	18
Şekil 4. Penetrasyon deney aleti ve 25°C su banyosundaki deney numuneleri.....	19
Şekil 5. Yumuşama noktası cihazı	20
Şekil 6. Düktilite deney aleti.....	21
Şekil 7. Kuvvet ölçümlü düktilite cihazı ve deneye ait numuneler	22
Şekil 8. Parlama noktası cihazı	23
Şekil 9. Fraass kırılma noktası deney aleti ve deney sonrası çatlamanın olduğu numune	25
Şekil 10. Dönel viskozimetre cihazı	28
Şekil 11. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi	29
Şekil 12. PAV deney aşamaları	30
Şekil 13. DSR deneyinde deformasyon yönleri.....	31
Şekil 14. Bitümlü bağlayıcının viskoelastik davranışı.....	32
Şekil 15. BBR deney aleti.....	33
Şekil 16. Sünme oranı değerinin belirlenmesi	34
Şekil 17. Tekerlek izi deformasyonu	42
Şekil 18. Kaplama tabakasında meydana gelen oturma (a) ve çökme (b).....	42
Şekil 19. Kaplama tabakasında görülen ondülasyonlar	43
Şekil 20. Timsah sırtı yorulma çatlakları.....	44
Şekil 21. Düşük ısı çatlağı (Yılmaz, 2016).....	44
Şekil 22. Kaplama tabakasında meydana gelen sökülme	45
Şekil 23. Agregada Gradasyon Tipleri (a) ve Görsel Dağılımı (b).....	48
Şekil 24. Agregada danelerinin biçimsel olarak sınıflandırılması (Tunç, 2007).....	48
Şekil 25. Porozite sınıflandırılması.....	49
Şekil 26. Agreganın özgül ağırlık hesaplamalarında kullanılan hacimler	50
Şekil 27. Marshall deney aleti.....	51
Şekil 28. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi	52
Şekil 29. Asfalt tester cihazı	54
Şekil 30. Yük-zaman ve deformasyon ilişkisi	55

Şekil 31.	Dolaylı çekme yorulma deney düzeneği.....	56
Şekil 32.	Bor cevherine ait görsel	62
Şekil 33.	Bor oksit	65
Şekil 34.	Tall yağı.....	65
Şekil 35.	Katkı maddesine ait görsel.....	71
Şekil 36.	FT-IR spektrometresi.....	72
Şekil 37.	SEM cihazına ait görsel	73
Şekil 38.	TG/DTA cihazı	74
Şekil 39.	DSC cihazına ait görsel	74
Şekil 40.	XRD cihazına ait görsel.....	75
Şekil 41.	Modifikasyon işleminde kullanılan yüksek hızlı parçalayıcı	76
Şekil 42.	Depolama stabilitesi deney aşamaları.....	79
Şekil 43.	Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan agrega granülometrisi	82
Şekil 44.	Üretilen Marshall briketleri	83
Şekil 45.	Dolaylı çekme mukavemeti deneyi ve sonrasında kırılan numune	84
Şekil 46.	Su hasarına maruz bırakılan briketlerin koşullandırma aşamaları.....	85
Şekil 47.	Tall yağı (a) ve TOBO katkısına ait (b) FT-IR spektrumu	87
Şekil 48.	Saf bağlayıcı (a) ve %5 TOBO ile modifiye edilmiş bağlayıcının (b) FT-IR spektrumları	88
Şekil 49.	TOBO maddesinin farklı büyütme oranlarına ait SEM görüntüleri	89
Şekil 50.	%5 TOBO ile modifiye edilmiş bağlayıcıya ait iki farklı çözünürlükte SEM görüntüleri	89
Şekil 51.	Bor katkılı tall yağı bileşiğinin TG eğrileri.	90
Şekil 52.	Bor katkılı tall yağı bileşiğine ait DSC eğrisi.	91
Şekil 53.	TOBO katkı maddesine ait XRD grafiği	92
Şekil 54.	Penetrasyon deney sonuçları.....	92
Şekil 55.	Yumuşama noktası deney sonuçları	93
Şekil 56.	Düktilite deney sonuçları	93
Şekil 57.	Bağlayıcıların yük-deformasyon ilişkisi.....	94
Şekil 58.	Parlama noktası deney sonuçları	95
Şekil 59.	Özgül ağırlık deney sonuçları	96
Şekil 60.	Fraass kırılma noktası deney sonuçları.....	96
Şekil 61.	%5 katkı içerikli bağlayıcının trikloretilende çözünmesi	97
Şekil 62.	Nicholson soyulma deneyi sonrası sıkıştırılmamış karışımların görüntüsü	98

Şekil 63.	Bitümlü bağlayıcı karışımların soyulma direnci değerleri	98
Şekil 64.	Bitümlü bağlayıcıların RV deney sonuçları	99
Şekil 65.	Logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği	100
Şekil 66.	RTFOT sonrası bağlayıcıların penetrasyon sonuçları	101
Şekil 67.	RTFOT sonrası bağlayıcıların yumuşam noktası sonuçları	102
Şekil 68.	RTFOT sonrası yumuşama noktası sıcaklık farkları	102
Şekil 69.	RTFOT sonrası $G^*/\sin\delta$ değerleri.....	104
Şekil 70.	PAV sonrası $G^*.\sin\delta$ değerleri	105
Şekil 71.	Bağlayıcıların kompleks modül (G^*) değerleri	106
Şekil 72.	Bağlayıcıların faz açısı (δ°) değerleri	107
Şekil 73.	Bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerleri.....	108
Şekil 74.	Saf ve modifiyeli bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki kompleks modüllerinin frekansla değişimi	109
Şekil 75.	Saf ve modifiye bağlayıcıların 40 °C referans sıcaklıktaki G^* ana eğrileri.....	110
Şekil 76.	Saf ve modifiye bağlayıcıların 40°C referans sıcaklıktaki faz açısı ana eğrileri.....	111
Şekil 77.	Siyah (Black) diyagram	112
Şekil 78.	S değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	113
Şekil 79.	m değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	113
Şekil 80.	Depolama stabilitesi sonrası penetrasyon deney sonuçları.....	115
Şekil 81.	Depolama stabilitesi sonrası penetrasyon deney sonuçları.....	116
Şekil 82.	Depolama stabilitesi sonrası bağlayıcıların 135°C'deki viskozite sonuçları.....	117
Şekil 83.	Depolama stabilitesi sonrası bağlayıcıların 165°C'deki viskozite sonuçları.....	118
Şekil 84.	Depolama stabilitesi sonrası tekerlek izi parametreleri	119
Şekil 85.	Bağlayıcıların PI değerleri.....	120
Şekil 86.	Bağlayıcıların VTS değerleri.....	121
Şekil 87.	Saf ve modifiye bağlayıcıların 3.2 kPa gerilme seviyesindeki sünme uyumu ilişkisi	122
Şekil 88.	Saf ve modifiye bağlayıcıların 0.1 kPa gerilme seviyesindeki sünme uyumu ilişkisi	122
Şekil 89.	0.1 kPa ve 3.2 kPa gerilme seviyelerindeki sünme uyumunun yüzdesel farkları.....	123
Şekil 90.	Saf ve modifiye bağlayıcıların 0.1 kPa gerilme seviyesindeki ortalama yüzde geri dönme ilişkisi	124

Şekil 91.	Saf ve modifiye bağlayıcıların 3.2 kPa gerilme seviyesindeki ortalama yüzde geri dönme ilişkisi	124
Şekil 92.	Saf ve modifiye bağlayıcılar 0.1 kPa ve 3.2 kPa gerilme seviyelerinde yüzdesel geri dönme değerleri	125
Şekil 93.	Saf ve modifiye bağlayıcıların (a) %2.5 ve (b) %5 (c) %15 gerinim seviyelerine ait yorulma ömürleri	127
Şekil 94.	Farklı gerinim seviyelerindeki yorulma ömürleri	127
Şekil 95.	Saf ve modifiye bağlayıcıların malzeme bütünlüğü ve hasar yoğunluğu ilişkisi	128
Şekil 96.	Saf ve TOBO katkılı bağlayıcıların gerilme-şekil değiştirmeleri arasındaki ilişki	129
Şekil 97.	Dp, Vh, Vf , VMA, stabilite ve akma değerlerini gösteren grafik eğrileri	131
Şekil 98.	Karışımlarının stabilite ve MQ değerleri	133
Şekil 99.	Dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları	134
Şekil 100.	Koşulsuz ve koşullu dolaylı çekme mukavemeti değerleri	135
Şekil 101.	ITSR değerleri	136
Şekil 102.	Karışımların 40°C sıcaklıktaki deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	137
Şekil 103.	Saf ve modifiye bağlayıcıların deformasyon-yük tekrar sayıları arasındaki ilişki	138

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etki eden parametreler	40
Tablo 2. Katkı maddelerine ait genel sınıflandırma.....	58
Tablo 3. Yaygın kullanılan modifiyerlerin bozulmalar üzerindeki etkileri	59
Tablo 4. Ticari önemi olan bor minerallerinin bulunduğu bölgeler.....	62
Tablo 5. Dünyadaki bor rezervleri (Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2018).....	63
Tablo 6. Türkiye’de bor rezervlerinin mineral bazında miktarları	64
Tablo 7. Tall yağının özellikleri.....	69
Tablo 8. Bor oksitin özellikleri	69
Tablo 9. Saf bağlayıcının fiziksel özellikleri	70
Tablo 10. Bitümlü bağlayıcılar ve kodlamalar.....	76
Tablo 11. Agregaya ait fiziksel özellikler	81
Tablo 12. Karışımlarda kullanılan agrega granülometrisi ve şartname sınırları.....	82
Tablo 13. Asfalt bağlayıcıların elastik geri dönme ve yüzdeleri kuvvet ölçüm duktilite alanları	95
Tablo 14. Bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları.....	100
Tablo 15. RTFOT deneyi sonrası tüm bağlayıcılara ait fiziksel özellikler	101
Tablo 16. RTFOT deneyi sonrası DSR test sonuçları.....	103
Tablo 17. PAVdeneyi sonrası DSR test sonuçları	104
Tablo 18. Tüm bağlayıcıların DSR deney sonuçları.....	106
Tablo 19. BBR deney sonuçları	112
Tablo 20. Bağlayıcıların performans sınıfları	114
Tablo 21. Depolama stabilitesi sonrası uygulanan DSR deney sonuçları	118
Tablo 22. PG ve MSCR test sonuçlarına göre bağlayıcı performans seviyeleri.....	125
Tablo 23. Tüm bağlayıcıların VECD yorulma parametreleri	126
Tablo 24. Saf bağlayıcıyla hazırlanan briketlerin tasarım sonuçları ve şartname limitleri	130
Tablo 25. Marshall stabilite deney sonuçları	132

KISALTMALAR VE SEMBOLLER 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 Spektroskopisi
dk	: Dakika
Hz	: Hertz
kPa	: Kilopascal
mPa	: Megapascal
ms	: Milisaniye
nm	: Nanometre
Pa.s	: Pascal-saniye
PAV	: Basıncılı 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 Mikroskopu
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

Dünyada, yaşam standartlarının yükselmesi, ekonomik gelişme ve hızlı nüfus artışıyla birlikte devamlı olarak artmakta olan ulaşım isteği nedeniyle inşa edilen yolların bakımı ve onarımı bitümlü bağlayıcıya gün geçtikçe duyulan talebi arttırmaktadır (Çeloğlu, 2020). Bir petrol rafinaj ürünü olan ve kaplama tabakasında kullanılan bitümlü bağlayıcıların rezervinin azalması, büyük bir kısmının ithal edildiği, ülkemizde yük ve yolcu taşımacılığının neredeyse tamamına yakınının (yaklaşık %95) karayollarından yapılması, ekonomik açıdan kaplama tabakası için harcanan her türlü bakım-onarım maliyetinin azaltılması ve mevcut kaplama tabakası malzemesinin birtakım özelliklerinin geliştirilmesi oldukça önem arz etmektedir (Ahmetzade, Alataş, & Geçkil, 2008).

Esnek üstyapılar, genel itibarıyla hava, agrega ve bağlayıcıdan meydana gelen karmaşık bir yapıya sahiptirler. Kapsama tabakasındaki bitümlü bağlayıcı içeriği karışıma ve uygulamaya bağlı olarak %4-7 gibi düşük oranlarda kullanılmasına karşın performans ve maliyeti bakımından büyük önem arz etmektedir. Termoplastik bir malzeme olan bitümlü bağlayıcı viskoelastik bir davranış sergileyerek iklim ve çevresel koşullara bağlı olarak farklı davranışlar göstermektedir (Geçkil & Seloğlu, 2018; Aksağan, 2021). Asfalt kaplamalarda artan trafik hacmiyle birlikte dingil ağırlıklarının ve lastik iç basınçlarının etkisiyle kalıcı deformasyonlar, yorulma ve çatlamlar gibi deformasyonlar oluşmaktadır. Meydana gelen bu bozulmaları en aza indirerek kaplama performansını iyileştirmek amacıyla bitümlü bağlayıcıya birçok farklı türde katkı maddesi ekleyerek bitümlü bağlayıcı modifiye edilmektedir (Hossain, Zaman, Howa & Saha, 2015; Ye, Wu, & Li, 2009; Erkuş, Kök, & Yılmaz, 2020). Asfalt bağlayıcının özelliklerinin geliştirilebilmesi için çeşitli polimerler (Cortizo, Larsen, Bianchetto, & Alessandrini, 2004; Chen, Liao, & Shiah, 2002, Şengül, Oruç, İskender, & Aksoy, 2013; Zhao, Wang, Wang, & Yao, 2016; Ameri, Mansourian, & Sheikhmotevali, 2013; Liang, Ren, Fan, Xin, Shi, & Luo, 2017; Moreno, Sol, Martin, Perez, & Rubio, 2013), nano ve nano kompozit malzemeler (Walters, 2013; You, Mills-Beale, Foley, Roy, Odegard, Dai, & Goh, 2011; Vargas, Moreno, Montiel, Manero, & Vazquez, 2017; Melo & Triches, 2017; Amini, Ziari, Saadatjoo, Hashemifar, & Goli, 2021; Xu, Guo,

Wang, Zhang, Wang, & Yang, 2019; Amini & Hayati, 2020), çeşitli yağlar (Yang & You, 2015; Sun, Yi, Huang, Feng, & Guo, 2016; Bostancıoğlu & Oruç, 2016; Cao, Wang, Cao, Sun, Zhu, & Tang, 2018) ve atık malzemeler (Ahmetzade, Demirelli, Günay, Biryani, & Alqudah, 2015; Yin & Wu, 2018; Köfteci, Ahmetzade, & Kultayev, 2014) kullanılmaktadır.

Ülkemiz, bor rezervi bakımından dünyada yaklaşık %73'lük oranla birinci sırada yer almaktadır (Yenmez, 2009; Turkbay, Bongono, Alix, Laratte, & Elevli, 2022). Sanayi ve teknolojinin hızla gelişmesine bağlı olarak bor ve türevleri tarımdan uzay teknolojisine, sağlıktan enerjiye kadar çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Çöl & Çöl, 2003). Bu açıdan, bor minerali pek çok sektör ve teknoloji alanını ilgilendiren bir “tekno-ekonomik” faktör durumundadır. Ülkemizin sahip olduğu zengin bor yatakları dikkate alındığında bu madenin ne kadar önemli ve stratejik bir kaynak olarak ele alınması gerektiği oldukça net görülmektedir (Erişkin, Karahançer, Terzi, & Saltan, 2017). Bu bağlamda, yol endüstrisinde kullanılan asfalt bağlayıcının yaklaşık %90'ının ithal edildiği düşünüldüğünde, bor ürünlerinin bu alanda kullanılabilirliğinin araştırılması ülkemiz ekonomisi açısından büyük önem arz etmektedir.

Selüloz ve kağıt endüstrisinde çam ağaçlarından, kağıt üretimi aşamasında sülfat (Kraft) yöntemi prosesinde bir yan ürün olarak ortaya çıkan tall yağı, yüksek oranda doymamış yağ asidi ve çeşitli reçine asitlerinden, özellikle abiyetik asitten oluşmaktadır. Tall yağı içerisinde var olan maddeler, iklim, coğrafya, ağaç cinsi, üretim sezonu, kâğıt üretim prosesi ve ayırma prosesi gibi pek birçok faktöre bağlıdır (Delibaş, 2003). Mevcut diğer bitkisel yağlardan çok daha az maliyetli oluşu ve bünyesinde fazla miktarda doymamış yağ asitlerinin olması tall yağını cazip hale getirmektedir (Keskin, Gürü, & Altınparmak, 2007).

Bitümlü bağlayıcılara ya da bitümlü sıcak karışımlara direkt olarak eklenen modifiyer miktarı hem dünyada hem ülkemizde oldukça fazla bulunmaktadır. Ancak, bu çalışmalardaki katkıların maliyetli olması, çevre kirliliğine neden olması, özel karışım tesisi gerektirmesi ve asfalt bağlayıcıya ilavesi sırasında büyük miktarda enerji tüketimine neden olması sebebiyle en azından mevcut katkıları seviyesinde, düşük maliyetli, çevre dostu ve doğal kökenli yeni katkı maddelerinin üretilerek kaplama performansının artırılması araştırmacılar için halen önemli çalışma konusudur. Bitümlü bağlayıcıların fiziksel ve reolojik özelliklerinin bor ve bor türevleri ile iyileştirilmesinin araştırılmasını kapsayan çalışmalar mevcut olsa da bor oksit ve tall yağının birlikte kullanıldığı literatürde bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ülkemizde, ormanlık alanlarının %60'ını çam ağaçlarının

oluşturduğu ve bu ağaçların kâğıt endüstrisinde kullanımı sonucu yan ürün olarak tall yağının elde edilmesi, bu yağın asfalt bağlayıcının modifiyesinde bor oksit ile birlikte yeni bir katkı maddesi şeklinde kullanılarak, asfalt bağlayıcı ve karışım performansının artırılması ve bu bağlamda bor madeninin ülkenin kalkınması için kullanılması, üretim, sanayi ve çevre gibi birtakım politikalarla entegre edilerek ele alınması amaçlanmaktadır.

1.2. Konuyla İlgili Yapılan Çalışmalar

İlerleyen teknoloji ve sanayileşmeyle beraber kentleşme hızının artması, nüfusun yoğunlaşması, tonaj miktarı büyük taşıtların üretilmesi ve bu ağır taşıtların sayıca fazla olması, iklim ve çevre koşullarının olumsuz etkilerinden dolayı pek çok araştırmacı, günümüze kadar asfalt kaplamaların performansını iyileştirmek ve servis ömrünü uzatmak için asfalt bağlayıcıyı farklı birçok tip ve değişen oranlarda katkı maddeleriyle modifiye eden çalışmalar yapmışlardır. Literatür çalışmaları incelendiğinde, asfalt bağlayıcının modifiye edilmesinde yağ ve türevleriyle ilgili modifikasyon çalışmaları bulunmasına karşın, tek başına tall yağının asfalt bağlayıcı modifikasyonunda kullanılması ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu açıdan, incelenen çalışmalar, yağ ve bor türevleri olmak üzere iki alt başlığa ayrılarak verilmiştir.

❖ Yağ ve türevleri ile ilgili yapılan çalışmalar;

Zeng vd., asfalt bağlayıcıyı %30'a kadar hint yağı içeren biyoasfaltla modifiye ederek geleneksel bağlayıcı deneylerini uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, biyo asfalt içeriğinin artmasıyla penetrasyon değerinde artma, yumuşama noktası ve düktilite değerinde azalma meydana geldiğini belirlemişlerdir. Katkı içeriğinin artmasıyla birlikte penetrasyon indeksinde önemli bir artışın olduğu dolayısıyla modifiye bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin iyileştiğini kaydetmişlerdir (Zeng, Pan, Zhao, & Tian, 2016).

Luo vd., asfalt bağlayıcının yüksek sıcaklıklardaki reolojik ve fiziksel özelliklerini araştırmak amacıyla asfalt bağlayıcıya iki farklı oranda iki farklı polimer (%3.5 ve %5.5 SBS ve %3 ve %5 PE) ve %5 oranında atık yağ kullanarak asfalt bağlayıcıyı modifiye etmişlerdir. Tüm modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde geleneksel bağlayıcı deneylerine ek olarak İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (TFOT) ve Basınça Yaşlandırma Deneyi (PAV) ile bağlayıcılar kısa ve uzun süre yaşlandırmaya maruz bırakmışlardır. Yaşlandırılmamış ve yaşlandırılmış tüm modifiye bağlayıcılara Dinamik Kesme Reometrisi (DSR) deneyi

uygulayarak numunelerin yüksek sıcaklıklardaki performansı incelemişlerdir. Deney sonucunda, en iyi viskoelastik davranış ve yüksek tekerlek izi dayanımı gösteren numunenin %5.5SBS+%5PE+%5 atık yağ içeren modifiye bağlayıcı olduğunu ifade etmişlerdir (Luo, Zhang, & Cong, 2017).

Lei vd., yağların asfalt bağlayıcının reolojik özelliklerine etkisini incelemek amacıyla üç farklı kökenli (biyo, petrol ve rafine edilmiş atık yağ) toplam 6 çeşit yağ kullanmışlardır. Kullanılan yağların asfalt bağlayıcı performans derecesi üzerindeki etkisi açısından yağın sınıflandırılması için pratik ve etkili bir yağ modifikasyon indeksi (OMI) önermişlerdir. Önerdikleri OMI indeksine göre optimum yağ içeren modifiye bağlayıcılar üzerinde DSR, BBR, MSCR ve LAS deneylerini uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, incelenen tüm yağ türleri için, yağ modifikasyonunun tüm performans sıcaklık aralıklarında asfalt bağlayıcının sertliğini azalttığı, dolayısıyla düşük sıcaklık performansı ve yorulma ömrünü iyileştirirken, yüksek sıcaklık performans derecesini olumsuz etkilediği belirtmişlerdir (Lei, Bahia, Yi-qui, & Ling, 2017).

Qurashi & Sawamy, saf ve geri dönüştürülmüş asfalt bağlayıcıların beş farklı oranda (%0, 2, 4, 6, 8) atık motor yağı ile modifiye ederek viskoelastik özelliklerinin incelenmesini amaçlamışlardır. Modifiye edilen asfalt bağlayıcılar üzerinde RV ve DSR deneylerini uygulamışlardır. Yapılan deneyler neticesinde atık motor yağının ilavesiyle bağlayıcının viskozitesi dolayısıyla yumuşama noktasında azalmanın meydana geldiği, tüm deney sıcaklıklarında atık yağ ilavesinin kompleks modülde (G^*) azalmaya, faz açısı (δ) artmaya neden olduğunu saptamışlardır (Qurashi & Sawamy, 2018).

Zheng vd., RTFOT ve PAV ile yaşlandırılmış asfalt bağlayıcıya değişen oranlarda (%0-10-20-30-40-50) hint yağı kalıntısı ekleyerek gençleştirici olarak kullanımını araştırmışlardır. 135°C'de 1500 rpm hızda toplam 45 dakika boyunca modifiye ettikleri bağlayıcıların üzerinde superpave deneylerinden DSR ve BBR testlerini uygulamışlardır. Veri analizi sonuçlarına göre, gençleştirici yağın miktarının artmasıyla kompleks kayma modülü değerinde bir azalma, faz açısı değerinde ise artma meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca hint yağı miktarının %0'dan %50'ye çıktığında PG sınıfının da iki dereceden fazla düştüğünü yani gençleştirici yağın asfalt bağlayıcıların düşük sıcaklık performansını olumlu yönde etkilediğini ifade etmişlerdir (Zheng, Li, Zhu, & Xia, 2018).

Girimath & Singh, atık odun biyo kütesinden elde edilen biyo-yagın asfalt bağlayıcının fiziksel özellikleri, tekerlek izi ve yorulma gibi parametreler üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Bu doğrultuda, asfalt bağlayıcıya %0 ile %10 arasında

değişen oranlarda biyo-yag eklemişlerdir. Biyo-yagla modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların fiziksel özellik testlerinin (penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite) yanı sıra tekerlek izi ve yorulma performansı, sırasıyla çoklu gerilim sürünme geri kazanımı (MSCR) ve doğrusal genlik tarama (LAS) testleri kullanılarak değerlendirilmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, biyo-yagın asfalt bağlayıcının penetrasyonunu arttırdığını ve orijinal asfalt bağlayıcının yumuşama noktası ve viskozitesini azalttığını belirlemişlerdir. Ek olarak, biyo-yag ilavesi asfalt bağlayıcının tekerlek izi performansını azalttığını, yorulma ve termal çatlama direncini artırttığını saptamışlardır (Girimath & Singh, 2019).

Ye vd., uygulamada zayıf düşük sıcaklık özelliğine sahip olan nano-montmorillonit/SBS modifiyeli asfalt bağlayıcının bu özelliğini naftenik yağ kullanarak çözmeyi amaçlamışlardır. Öncelikle %3.5 SBS ile modifiye edilen asfalt bağlayıcıya dört farklı oranda (%1, %3, %5, %7) nano-montmorillonit kili ilave ederek modifiye etmişlerdir. Daha sonra nano-montmorillonit/SBS modifiyeli asfalt bağlayıcıya beş farklı oranda (%0, %50, %100, %150, %200) naftenik yağı ilavesi yapmışlardır. Nihai modifiyeli bağlayıcıları DSR testine dayanan bir dizi (düşük ve yüksek sıcaklık testleri, kısa dönem yaşlanma, stabilite gibi) deneye tabi tutmuşlardır. Yapılan deney sonuçlarına göre, kompleks kayma modülü değerinin naftenik yağ miktarının artmasıyla birlikte azaldığını, akışkanlığını ve sünekliğini yani düşük sıcaklık özelliklerini iyileştirdiğini belirlemişlerdir (Ye, Yin, Lu, & Dong, 2020).

Suo vd., atık bitkisel yağ (mısır özü ve soya yağı) ve mineral yağların gençleştirici etkisi altında geri kazanılmış asfalt betonunun (RAC) kısa ve uzun vadeli yaşlanma özelliklerini araştırmışlardır. %3, 6, 9 gibi üç farklı oranda kullandıkları bitkisel ve mineral yağ ile modifiye ettikleri bağlayıcıları DSR testine tabii tutmuşlardır. Deney sonuçlarından, bitkisel yağlarla modifiye edilen geri kazanılmış asfalt betonunun kalıcı deformasyonlara karşı gösterdiği direncin daha iy olduğunu ifade etmişlerdir (Suo, Yan, Ji, Liu, Chen, & Zhang, 2021).

Lyu vd., termal oksidasyon ve ultraviyole maruz kalma, asfalt bağlayıcının fizikokimyasal ve reolojik özelliklerinde büyük değişikliklere neden olarak kaplamaların bozulmasına yol açmaktadır. Bu doğrultuda, termal yaşlanmaya ve ultraviyole yaşlanmaya karşı arttırılmış dirence sahip, biyolojik olarak değiştirilmiş kauçuklu asfalt bağlayıcıyı atık yağlardan oluşan biyoyağ ile modifiye etmişlerdir. Modifiye edilen bağlayıcılar üzerinde RTFOT, PAV ve Ultraviyole ile yaşlandırma (UV) işlemine maruz bırakmışlardır. Sonuç olarak, termal yaşlandırmanın, doymuş maddelerin kaybına ve ardından kauçuklu asfalt

bağlayıcıda aromatiklerin birikmesine neden olduğunu, UV yaşlanmasının ise asfalt moleküllerinin hızla topaklaşmasına ve ardından zincirin kesilmesine neden olduğunu ifade etmişlerdir (Lyu, Pei, Hu, & Fini, 2021).

Ali vd., yüksek polimer ile modifiye edilmiş asfalt (HPMA) karışımları üzerinde yaşlanmanın etkisini değerlendirmişlerdir. Bu amaçla %7.5 ve %10 oranlarında SBS ile modifiye ettikleri asfalt bağlayıcıya %7 ve %14 oranlarında yumuşatıcı ajan olarak mısır yağı ilave etmişlerdir. Yaşlanmanın karışımlar üzerindeki etkisini değerlendirmek için dinamik kesme modülü, hamburg tekerlek izi ve yarı dairesel bükülme testlerini uygulamışlardır. Test sonuçlarına göre, %7.5 SBS+ %7 mısır yağı ilaveli karışımların tekerlek izi oluşumuna ve çatlamaya karşı direncinin daha iyi olduğunu belirlemişlerdir (Ali, Kabir, Al-Badr, Alfalah, Xie, Decarlo, Elshaer, & Mehta, 2022).

Liu vd., asfalt bağlayıcının kendi kendini iyileştirmesi ve yorulma davranışını geliştirmesi için üç farklı oranda (%2, %4, %6) atık motor yağı ve iki farklı oranda (%1 ve %2) polifosforik asit kullanarak bağlayıcıyı modifiye etmişlerdir. Modifiye bağlayıcıların tümüne DSR ve LAS testlerini uygulamışlardır. Ayrıca asfalt bağlayıcıların sıcaklıkla ilişkili faz durumlarını ortaya koymak için DSC deneyi yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre, %2 polifosforik asit + %2 atık yağ kullanımı ile modifiye edilen bağlayıcıların yorulma ömrünün %1000 gibi olağanüstü bir değerle arttığını ifade etmişlerdir. DSC sonuçlarına göre ise, kullanılan katkılardan sonra orijinal bağlayıcının iki tepe sıcaklığının modifiye edilen bağlayıcılardan daha düşük olduğunu, bunun sebebinin de atık yağ ve polifosforik asitten kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir (Liu, Li, & Wang, 2022).

Fakhri & Norouzi, bitümün kısmi ikamesi olarak biyo-katkı maddesi olarak lignini ve atık endüstriyel ürün olarak atık motor yağını (WEO) kullaarak modifiye edilen bağlayıcıların reolojik ve yaşlanma özelliklerini araştırmayı amaçlamışlardır. %5 ve %10 oranlarında reçineye %4 WEO içeriği ilave ederek altı farklı modifiye bağlayıcı elde etmişlerdir. Modifiye bağlayıcılara superpave deneylerinden RV, DSR ve BBR deneylerini uygulamışlardır. Uygulanan deney sonuçlarına göre, asfalt bağlayıcıya reçine ilavesi viskoziteyi arttırırken, WEO ilavesinin vizkoziteyi azalttığını, reçine ilavesinin bağlayıcının tekerlek izi parametresini arttırdığını, WEO içeriğinin ilavesiyle tekerlek izi direncinin azaldığını kaydetmişlerdir. BBR sonuçlarına göre ise reçine ile modifiye edilmiş bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda çatlamaya karşı direncinin daha düşük olduğu, reçine ve WEO ilaveli bağlayıcıların düşük sıcaklık performansının orijinal bağlayıcıya göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir (Fakhri & Norouzi, 2022).

Kumar vd., hurda lastiklerin pirolizinden elde ettikleri lastik pirolitik yağının (TPO) ve etilen-propilen-dien monomer (EPDM) kauçuğunun asfalt modifikasyonunda kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu amaçla, %8 EPDM ve %6 TPO kullanarak beş farklı kombinasyonda modifiye bağlayıcılar hazırlamışlardır. Hazırladıkları modifiye bağlayıcılara LAS ve MSCR testlerini uygulamışlardır. Yapılan test sonuçlarına göre, modifikasyon için orijinal bağlayıcıya tek başına TPO'nun eklenmesinin, tekerlek izi ve yorulma parametrelerini azalttığını, tek başına EPDM kauçuğun eklenmesi ise bu parametreleri iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Asfalt bağlayıcının TPO ve EPDM kauçukla kompozit modifikasyonunda ise tekerlek izi ve yorulma parametrelerinin orijinal bağlayıcıya göre gelişmiş bir performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır (Kumar, Choudhary, & Kumar, 2022).

Han vd., asfalt bağlayıcının yüksek sıcaklıktaki inşası sırasında meydana gelen inşaat dumanlarını azaltabilen yeni bir duman bastırıcının, yani yağ emici organojel polistiren-stearil metakrilatın (P(S-SMA)) performansını araştırmayı amaçlamışlardır. %1, %3 ve %5 oranlarında P(S-SMA kullanarak elde edilen modifiye bağlayıcılara Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR), DSR, MSCR ve LAS testlerini uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, P(S-SMA)'nın mikro ve makro karakterizasyon analizleri, daha iyi kimyasal ve termal stabiliteye sahip P(S-SMA)'nın asfalt bağlayıcının hafif bileşenlerini (doymuşlar, aromatikler ve reçineler) absorbe edebildiğini, modifiye asfalt bağlayıcının mikro karakterizasyon analizleri, modifiye edici olarak P(S-SMA) kullanımının asfalt bağlayıcının yaşlanma direncini artırabildiğini ve yüksek sıcaklıklarda asfalt dumanının partikül kütlesini azaltabileceğini ifade etmişlerdir. Reolojik test sonuçlarına göre ise, P(S-SMA) asfalt bağayıcıya eklemenin elastik ve viskozite özelliklerini artırabildiğini, yorulma ömrünü uzatabildiğini ve diğer duman bastırıcılara kıyasla avantajlar sağlayan asfalt bağlayıcının tekerlek izi direncini arttırdığını saptamışlardır (Han, Tan, Leng, Zou, Li, Li, & Zhang, 2023).

Lee vd., geri kazanılmış asfalt kaplama (RAP) bağlayıcılarının performansını artırmak ve yan ürün malzemelerinin tüketimini teşvik etmek için yemeklik atık yağ (COW) ve düşük viskoziteli bağlayıcının (LVB) kullanımını araştırmayı amaçlamışlardır. RTFOT ve PAV ile yaşlandırılmış modifiyeli bağlayıcılar üzerinde DSR, modifiyeli bağlayıcılarla hazırlanan karışımlar üzerinde ise Hamburg tekerlek izi deneylerini uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, LVB'nin RAP bağlayıcıya ilave edilmesinin yorulma çatlamasına karşı duyarlılığın

azalmasına katkı sağladığını bu da özellikle düşük sıcaklıklarda termal çatlama dayanımını arttırdığına işaret edeceğini belirlemiştir (Lee, Kwak, & Le, 2023).

Tosun, atık lastik granüllerinden vakum atmosferi altında elde ettiği pirolitik yağın asfalt bağlayıcının kısmi olarak yerine kullanılmasının yanı sıra bağlayıcının temel fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. %5, %10 ve %15 gibi üç farklı oranda kullandığı pirolitik yağla modifiye ettiği asfalt bağlayıcılara geleneksel deneylere ek olarak RV ve BBR testlerini uygulamıştır. Geleneksel deney sonuçlarına göre pirolitik yağın ilavesiyle asfalt bağlayıcının penetrasyon ve düktilite değerlerinin arttığı, yumuşama noktası değerinin ise azaldığını ifade etmiştir. Pirolitik yağ ilavesinin artmasıyla bağlayıcıların viskozite değerlerinin orijinal bağlayıcıdan daha yüksek olduğu, daha yüksek sünme rijitliği ve düşük m değerlerine sahip olduğunu saptamıştır (Tosun, 2023).

❖ Bor ve türevleri kullanılarak yapılan çalışmalar;

Arslan vd., bitümlü bağlayıcının laboratuvar koşullarında kimyasal olarak sentezlenen yeni bir katkı maddesi olan trietilen glikol bazlı polibor (TEGPB) ile modifikasyonunu araştırmışlardır. 50/70 penetrasyon dereceli bitümü modifiye etmek için dört farklı oranda (%1, %2, %3, %5) TEGPB konsantrasyonu kullanmışlardır. Modifiye bağlayıcılar üzerinde geleneksel ve superpave deneylerini uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, katkı maddesi miktarının artmasıyla orijinal bağlayıcıya göre viskozitenin arttığı dolayısıyla sıcak iklim bölgelerinde bu katkı maddesinin daha uygun olacağını ifade etmişlerdir. Ayrıca TEGPB nin bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi parametresini arttırdığını da belirlemiştir (Arslan, Gürü, & Çubuk, 2011).

Arslan vd., laboratuvar ortamında kimyasal olarak sentezlenen organik bazlı kalsiyum bileşiği (OBCC) ve organik bazlı borik asit bileşiği (OBBAC) ile asfalt bağlayıcıyı modifiye etmişlerdir. %1, %3, %5, %7 ve %10 konsantrasyonlarında asfalt bağlayıcıya ilave edilen iki yeni katkı ile hazırlanan modifiye bağlayıcılar üzerinde geleneksel deneyler (penetrasyon, yumuşama, düktilite, Nicholson soyulma deneyi) ve superpave deneyleri (RV, DSR ve BBR) uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, yumuşama noktası ve vizkozite değerleri her iki katkı içeriğinin artmasıyla azalırken, düktilite değerlerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Modifiye edilmiş bağlayıcıların yüksek sıcaklık performanslarının orijinal asfalt bağlayıcı ile aynı seviyede kaldığını buna karşın BBR sonuçlarının ise her iki katkı içeriğinde de daha iyi düşük sıcaklık performansı gösterdiğini ifade etmişlerdir (Arslan, Gürü, & Çubuk, 2012).

Arslan vd., asfalt modifiyeri olarak yeni sentezlenen katkı malzemeleri, organik bazlı magnezyum bileşiği (OBMAGC), organik bazlı manganerz bileşiği (OBMANC) ve organik bazlı çinko bileşiği (OBZC) kullanılarak asfalt bağlayıcıyı modifiye ederek sıcak asfalt karışımlar üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, %1 ile %10 arasında değişen oranlarda kullandıkları yeni sentez katkı maddeleri ile asfalt bağlayıcıyı modifiye etmişlerdir. Modifiye bağlayıcılar üzerinde geleneksel deneyler, superpave testleri ve karışım deneylerinden Marshall stabilite testini uygulamışlardır. Test sonuçlarına göre, her üç katkı içeriğinin artmasıyla orijinal asfalt bağlayıcının viskozitesinin azaldığı, yumuşama noktası ve sünme sertliğinin azaldığı, yüksek sıcaklık performanslarının aynı seviyede kaldığı, Marshall ve Nicholson soyulma deneylerine göre isedaha iyi stabilite ve yapışma özelliğinin elde edildiğini ifade etmişlerdir (Arslan, Gürü, & Çubuk, 2013).

Arslan vd., asfalt bağlayıcının monoetilen glikol bazlı poliboron bileşiği (MEGPC) ve dietilen glikol bazlı poliboron bileşiği (DEGPC) olmak üzere iki yeni katkı maddesi ile modifikasyonunu amaçlamışlardır. 50/70 penetrasyon dereceli asfalt bağlayıcıyı MEGPC ve DEGPC ile 4 farklı oranda modifiye ederek yumuşama noktası, Nicholson soyulma, Marshall stabilite, DSR, BBR gibi deneyleri uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, asfalt bağlayıcının viskozitesinin ve yumuşama noktasının DEGPC ile arttığını, MEGPC ile ise azaldığını belirlemişlerdir. MEGPC ile modifiye edilmiş bağlayıcının soyulma direncinin ve düşük sıcaklıklardaki çatlamaya karşı gösterdiği direncin daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir (Arslan, Gürü, & Çubuk, 2014).

Selman, bor minerallerinden olan tinkalin tesislerde işlenmesi sonucu ortaya çıkan atığının sıcak asfalt karışımlarda mineral filler olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu amaçla sıcak asfalt karışımlara farklı oranlarda tinkal atığı ilave ederek karışım numunelerini hazırlamıştır. Hazırlanan karışım numunelerine Marshall stabilitesi, dolaylı çekme ve Marshall mekanik batırma deneylerini uygulamıştır. Deney sonuçlarını karşılaştırmak için %6 oranında kireçtaşı ilave ettiği kontrol numunesi hazırlamıştır. Deney sonuçlarına göre, plastik deformasyon oluşumuna karşı en iyi davranışın %5 bor atığı filler katkılı numunelerde görülebileceği, mekanik Marshall batırma deneyi sonuçlarına göre %7 bor atığı filler katkısı ile hazırlanan numunelerin su etkisine karşı diğer numunelere göre daha dayanıklı olduğu sonucuna varmıştır (Selman, 2015).

Oruç vd., bor içeren dört yeni katkı maddesini laboratuvarında kimyasal olarak sentezleyerek aynı sıcaklık ve karıştırma koşullarında asfalt bağlayıcıya ağırlıkça %1 oranında ilave edilerek modifiye etmişlerdir. Elde edilen modifiye bağlayıcıların

modifikasyon mekanizması ve mikro yapısını, Fourier dönüşümü kızılötesi spektrometresi (FTIR) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemişlerdir. Orijinal asfalt bağlayıcıya göre modifiye numunelerin değişimlerini penetrasyon yumuşama noktası, DSR, genlik-frekans-sıcaklık taramaları ve RV testleri yaparak araştırmışlardır. Test sonuçlarına göre, katkı maddelerinin asfaltın yumuşama noktasını, tekerlek izi direncini, elastik özelliklerini ve viskozitesini arttırdığını belirlemişlerdir. Triazol borat esteroktanol-sülfürik asit katalizörleriyle sentezlenen katkı maddesinin orijinal asfalta göre en fazla iyileştirmeyi sağladığını ifade etmişlerdir (Oruç, Yılmaz, & Sancak, 2016).

Oruç & Yılmaz, bitümlü bağlayıcıya laboratuvarında yeni bir katkı maddesi kimyasal olarak sentezlenen siklik borat esterinin (CBE) ağırlıkça dört farklı oranda (%1, 2, 4 ve 6) oranlarında eklenerek modifikasyonu gerçekleştirmişlerdir. Modifiye bitümlü bağlayıcılara geleneksel deneyler ve superpave deneylerini uygulamışlardır. Deney sonuçlarının CBE katkısı kullanımının asfalt bağlayıcının sertliğini, yumuşama noktasını, viskozitesini, parlama noktası değerini ve tekerlek izi direncini arttırdığını ve sıcaklık hassasiyetini azalttığını gösterdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca kullanılan CBE katkısının asfalt bağlayıcının elastik özelliklerini iyileştirdiği, yaşlanma direncini ve düşük sıcaklıklardaki çatlamaya karşı direncini arttırdığını ortaya koymuşlardır (Oruç & Yılmaz, 2016).

Gürü vd., ham şekerden şeker rafinelerinde rafinasyon prosesi esnasında elde edilen ve organik atık olan şeker pancarı melasının bor oksitle birlikte laboratuvar ortamına kimyasal olarak sentezlenmesiyle elde edilen melas bazlı bor oksit bileşiğinin (MBOC) asfalt modifikasyonunda kullanılabilirliğini araştırmışlardır. 50/70 penetrasyonlu asfalt bağlayıcıya %1 ile %10 arasında değişen oranlarda ilave ederek modifikasyon işlemini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen modifiye bağlayıcılara geleneksel deneyler ve superpave deneylerini uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, tüm test sıcaklıklarında katkı maddesi miktarının artmasıyla viskozite ve yumuşama noktasının azaldığını penetrasyonun arttığını belirlemişlerdir. Superpave deney sonuçlarından %5 MBOC ilavesinden sonra yorulmaya karşı direncin arttığı fakat tekerlek izi direncinin azaldığını belirlemişlerdir (Gürü, Çubuk, Aslan, & Aminbakhsh, 2017).

Şahin, laboratuvar ortamında kimyasal olarak aspir yağının borik asitle birlikte katalizör olarak sülfürik asit kullanılarak yeni bir modifiyer sentezleyerek bitümlü bağlayıcının hem fiziksel hem de reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu amaçla, yeni katkı maddesini dört farklı oranda (%0.3, %0.5, %0.7 ve %1) kullanarak asfalt bağlayıcıyı modifiye etmiştir. Modifiye bağlayıcılara geleneksel deneylerin yanı sıra DSR

ve RV deneylerini de uygulamıştır. Deney sonuçlarına göre, sentezlenen yeni katkının orijinal bitümlü bağlayıcının işlenebilirliğini, tekerlek izi direncini arttırdığını ve sıcaklık hassasiyetini azalttığı gözlemlenmiştir (Şahin, 2017).

Çalışıcı vd., bitümün kısa süreli yaşlanma direncini kimyasal olarak sentezledikleri yeni bir malzeme olan dietilen glikol bazlı polibor bileşiği (DEGPB) ile iyileştirilmesini anaçlamışlardır. Bu doğrultuda, dört farklı oranda DEGPB ile bitümü modifiye ederek geleneksel ve superpave deneylerini uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, DEGPB katkısının bitümün viskozitesini ve yumuşama noktasını arttırdığını, penetrasyonunu ve sünekliğini azalttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca DEGPB katkısının modifiye bitümün yaşlanmasını yaklaşık %42 oranında azalttığını da saptamışlardır (Çalışıcı, Gürü, Çubuk, & Cansız, 2018).

Keskin & Karacasu, asfalt karışımlara kırılmış bor atığı (CBW), boraks pentahidrat (BP) ve susuz boraks (BA) gibi malzemeler ilave edilerek hazırlanan asfalt karışım numunelerinin performans özelliklerini ve kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Hazırlanan karışım numunelerine Marshall stabilite ve akma testi, statik sünme ve dinamik sünme deneylerini uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, CBW katkılı numunelerin en yüksek stabilite değerlerine sahip olduğunu, BA ve BP katkılı numunelerin ise en düşük değerlere sahip olduğunu belirlemişlerdir. En yüksek deformasyonların BA ve BP ilaveli numunelerde meydana geldiğini, servis ömrü en uzun olan ve tekerlek izi oluşumuna daha dayanıklı olan numunelerin ise CBW ilaveli numuneler olduğunu ortaya koymuşlardır (Keskin & Karacasu, 2019).

Kutuk & Kutuk-Sert, bor minerallerinden olan kolemanitin (C) yüksek enerjili bilyalı değirmende öğütülmesi suretiyle 53 μm mikron boyutu (C+53 μm) ve 25 μm olan nano boyutunu (C-25 μm) kullanarak ılık asfalt karışımlar üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Tozların parçacık boyutu dağılımı (PSD), morfolojisi ve element içeriği özelliklerini X-ışını spektrometresini kullanarak dönüşümlü ölçmüşlerdir. Hazırladıkları numunelere Marshall stabilite, tekrarlı sünme, dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deneylerini uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, öğütme işlemiden sonra element yapısının değişmediğini, nano-kolemanit katkısı ile hazırlanan modifiye bitüm, maksimum 300 MPa olan kriter değerinin altında kalarak sertlik koşulunu sağladığını, ITSM analizine göre elde edilen bulguların ise boyut etkisine bakılmaksızın ılık asfalt karışımlarda bor mineralinin tercih edilmesinin olumlu bir karar olduğunu ifade etmişlerdir (Kutuk & Kutuk-Sert, 2020).

Yeşilçiçek vd., kâğıt üretimi sırasında ortaya çıkan ve bir yan ürün olan tall yağının bor oksit ile laboratuvarda kimyasal olarak sentezlenmesiyle literatürde daha önce olmayan yeni bir katkı maddesi üretilerek bitüm modifikasyonunda kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Sentezlenen yeni katkı maddesinin mikroyapısal özelliklerini belirlemek için FTIR, SEM ve TG/DTG analizleri yapmışlardır. Ek olarak, yeni katkı maddesini dört farklı oranda bitümlü bağlayıcıya ilave ederek modifiye asfalt numuneleri hazırlamışlardır. Hazırlanan modifiyeli bağlayıcılar üzerinde geleneksel deneyler ve superpave deneylerinden DSR, BBR ve RV deneylerini uygulamışlardır. Yapısal analiz sonuçları ile katkı maddesinin başarılı bir şekilde sentezlendiğini, asfalt matrisinde makro anlamda homojen dağıldığını ve bozunma sıcaklığının ise asfaltın modifikasyon şartlarının çok üstünde olduğunu saptamışlardır. Deney sonuçlarına göre, katkı maddesi ilavesi ile bitümlü bağlayıcının işlenebilirlik özelliğinin iyileştiği, sıcaklık hassasiyetinin ise azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, katkı maddesinin bitümlü bağlayıcının tekerlek izi direnci ve yorulma direncini de arttırdığını ancak belirli bir katkı oranından sonra düşük sıcaklık performansının olumsuz etkilendiği sonucuna varmışlardır (Yeşilçiçek, Oruç, & Bozdemir, 2022).

Bozdemir vd., bor oksidin çam ağaçlarından doğal olarak üretilen kolofon reçinesi ile laboratuvar ortamında sentezlenmesiyle elde edilen yeni katkı maddesiyle asfaltın modifiye edilmesini amaçlamışlardır. Üretilen katkı maddesinin yapısal özelliklerini belirlemek için SEM, FTIR, diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC)/termogravimetrik (TG) ve X-ışını toz kırınımı (XRD) analizlerini kullanmışlardır. Ayrıca yeni katkı maddesini belli oranlarda asfalt bağlayıcıya ilave ederek modifikasyon işlemini gerçekleştirmişlerdir. Tüm modifiye bağlayıcılara geleneksel bağlayıcı deneylerinin yanı sıra superpave deneylerini de uygulamışlardır. Yapısal analiz sonuçları ile yeni katkı maddesinin kimyasal olarak başarılı bir şekilde sentezlendiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca bor katkılı reçine bileşiği asfalt bağlayıcının işlenebilirlik ve pompalanabilirlik özelliklerini olumsuz yönde etkilemediğini ve modifiye edilmiş asfalt bağlayıcıların tekerlek izi direncini de önemli ölçüde arttırdığını ifade etmişlerdir (Bozdemir, Oruç, & Yeşilçiçek, 2022).

1.3. Çalışmanın Amacı ve Tezin Organizasyonu

Dünya nüfusunun artması ve tüketim alışkanlıklarının değişmesi, hızla gelişen teknoloji ve sanayileşmenin ekonomide yarattığı istihdamın artışı, hammadde ve enerji

kaynaklarının tükenmesi, çevre kirliliğinin artması gibi birçok sorunu da beraberinde getirmiştir (Yeşilçiçek, Bozdemir, & Oruç, 2023). Çevresel kaygılardan, ekonomiden ve yenilenemeyen enerji kaynaklarından tasarruf düşüncesiyle mevcut sorunların çözümü için birçok araştırmacı atık ve yan ürün olan malzemelere yönelmiştir. Doğal kaynaklardan çeşitli prosesler sonucu elde edilen farklı malzemelerin değerlendirilmesi, var olan çevre sorunlarına ışık tutmak için oldukça cazip ve beklentisi yüksek bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Ülkemizde var olan ormanlık alanlarının %60'ının çam ağaçlarından meydana geldiği ve çam ağaçlarının kâğıt endüstrisinde kullanımı sonucu yan ürün olarak tall yağının elde edilmesi, bu yağın asfalt bağlayıcının modifikasyonunda yeni bir katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması cazip bir fikir olarak düşünülmüştür.

Ülkemizde mevcut bor yataklarının zenginliği dikkate alındığında son derece kıymetli, hayati ve stratejik bir kaynak olarak değerlendirilmesi gereken bor ve türevlerinin literatürde asfalt kaplama tabakasında katkı maddesi olarak kullanımına dair çok az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Yapılan çalışmalarda tek başına borik asitin asfalt bağlayıcı ya da karışıma ilavesi sırasında 175-220°C gibi yüksek sıcaklık gerektirmesi ve kimyasal olarak da asfalt bağlayıcı ile kısmi bir bağın meydana geldiğini göstermişlerdir (Yılmaz, 2016). Fakat asfalt modifikasyonun yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi nedeniyle asfalt bağlayıcıda oksidasyonla birlikte kütle kayıpları da meydana gelmektedir.

Tribolojik alanlarda yapılan çalışmaların son zamanlarda hızla artmasıyla, bor bileşiklerinin bazı yağ asidi ve hidrokarbon türevleriyle intibak içinde olması, bor ürünlerine ısıl stabilite, oksidatif ve mekanik direnç ve yangın geciktirici gibi mükemmel özellikler kazandırmaktadır (Gao, Liu, & Wang, 2001; Gao, Su, & Xia, 2005; Martin, Hunt Ebdon, Ronda, & Cadiz, 2006; Martin, Ronda, & Cadiz, 2006; Wang, Chang, & Chen, 2008;). Bu çalışmada, yüksek oranda doymamış yağ asidine sahip tall yağının başka elementleri kolaylıkla alabilme özelliği, borik astin asfalt bağlayıcıya tall yağı aracılığıyla katılabileceği fikrini doğurmuştur. Bu bağlamda, bitümlü bağlayıcıya birden fazla özelliği aynı anda kazandırmak suretiyle bitümün mekanik ve reolojik özelliklerini iyileştireceğini hedefleyerek, bor ve tall yağı birlikte uyumundan oluşan yeni, tamamı yerli, ucuz ve son derece orijinal nitelikte katkı maddesi sentezi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, asfalt bağlayıcıya %1, %1.5, %3 ve %5 oranlarında yeni sentez katkı maddesi ilave ederek asfalt modifikasyonu gerçekleştirilmiştir.

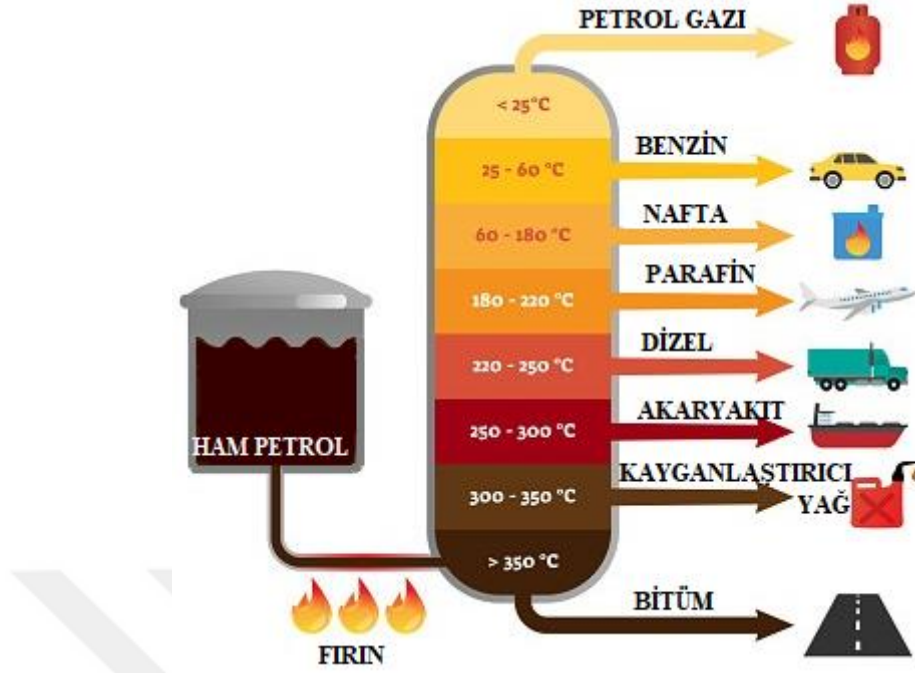
Kimyasal olarak sentezlenen bor esaslı tall yağı bileşimini oluşturan yeni katkı maddesinin yanı sıra bor oksit ve tall yağının ayrı ayrı yapısal analizleri, Fourier Dönüşümü

Kızılötesi Spektroskopisi (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Termogravimetrik analiz (TG) X-ışını Kırınımı (XRD) ve Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir.

Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların fiziksel özellikleri geleneksel bağlayıcı deneyleri ile saptanırken, bitümlü bağlayıcının kısa ve uzun dönem yaşlanmasını simüle eden RTFOT ve PAV deneyleri ile belirlenmiştir. Modifiye edilen tüm bağlayıcıların düşük ve yüksek sıcaklıklardaki reolojik davranışları ise Superpave deneylerinden olan RV, DSR, MSCR, LAS deneyleri ile ortaya konmuştur. Ayrıca yeni katkı maddesinin bitümlü sıcak karışım performansı üzerindeki etkisini belirlemek için de Marshall stabilite ve akma, Dolaylı Çekme Mukavemeti, Modifiye Lottman Deneyi, Dinamik Sünme ve Dolaylı Çekme Yorulma Deneyi ve Nicholson soyulma deneyi uygulanmıştır.

1.4. Bitümlü Bağlayıcılar

Bitüm, doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı ya da hem doğal kökenli hem de pirojenik kökenli hidrokarbonların her ikisinin bir kombinasyonu olup yüksek oranda katı, yarı katı, sıvı ve gaz halinde metal olmayan türevleriyle olan, karbon disülfürde (C_2S) tamamı çözünebilen, siyah veya koyu renkli bağlayıcı madde olarak tanımlanır (Oruç, 1997; Ağar & Umar, 1991). Yol kaplamalarında kullanılan bitümlü bağlayıcılar, bitkisel kökenli kömürden elde edilen katranlar ve hayvansal kökenli petrolden elde edilen asfaltlar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır (Tunç, 2007). Katranlar, odun ve kömürün damıtılması ile elde edilen sıvıdan yarı katıya kadar değişen bitümlü malzemelerdir ve yol inşaatında kullanılabilmeleri için ekstradan bir damıtma işlemine tabii tutulması gerekmektedir (Bostancıoğlu, 2012; Geçkil, 2008). Asfaltlar ise doğal kökenli veya petrolün rafinerilerde işlenerek oluşan rengi koyu kahve ile siyah arasında bağlayıcı bir malzeme olarak ASTM tarafından tanımlanmaktadır. Şekil 1’de ham petrolün rafinerilerde damıtılması işlemi ve bitümün eldesi verilmektedir.

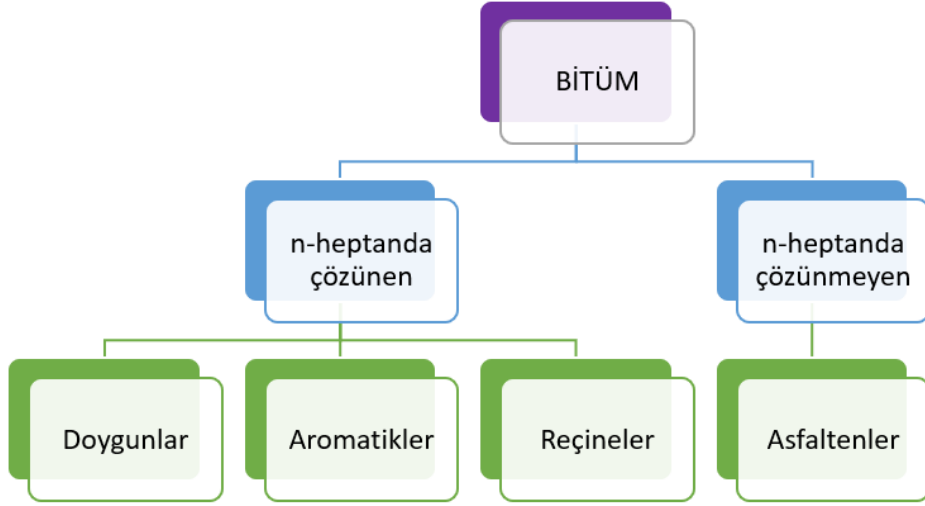


Şekil 1. Petrolün ham halinin damıtılması ve bitüm eldesi (URL-1, 2023)

1.4.1. Bitümün Kimyasal Bileşimi ve Yapısı

Bitüm, az miktarda yapısal olarak benzer heterosiklik türler (azot, kükürt), sülfür, nitrojen ve oksijen atomları ile hidrokarbon molekülleri hâkim durumda olan (%95-99) karmaşık bir kimyasal yapıya sahiptir. Bunun yanı sıra bitümüm içerisinde organik olmayan tuzlar, demir, vanadyum, nikel, kalsiyum ve magnezyum gibi metaller eser miktarda (milyonda bir) bünyesinde barındırmaktadır (Whiteoak, 2004).

Kimyasal bileşimi oldukça komplike olan bitümün tam olarak içerik analizinin yapılamaması, analiz sonuçlarının çok sayıda veriye sahip olması gibi etkenler bitümün reolojisi ile korelasyonu zorlaştırmaktadır. Esas itibariyle kimyasal olarak bitüm n-heptanda çözünmeyen kısım asfaltenler ve n-heptanda çözünen kısım maltenler adı altında iki gruptur. Ayrıca maltenler de doygunlar, reçineler ve aromatikler olarak alt gruplara ayrılmaktadır (Asfalt El Kitabı, 2002). Şekil 2’de bu dört grubun şematik olarak gösterimi verilmiştir.



Şekil 2. Bitümün kimyasal bileşiminin şematik gösterimi

Asfaltenler, çekirdekte aromatik hidrokarbonları, oksijen, hidrojen, azot ve kükürt gibi heteroatomları ve fonksiyonel grupları içeren amorf şeklinde katı yapıya sahip olup bitümün %5 ila %25'ini oluşturmaktadırlar. Asfaltenler ham petrolün en ağır ve en polar bileşenleridir (Tazikeh, Amin, & Zendehboudi, 2020). Asfalten miktarının artırılması ile daha katı, daha yüksek yumuşama noktasına sahip ve sonuç olarak daha yüksek viskoziteli bir bitüm elde edilmektedir. Reçineler, katı ve yarı katı kıvamda, koyu kahverengi renkte olup doğal elektriksel yüklere sahip olmalarından ötürü bitüme yüksek adezyon özelliği kazandırmaktadırlar. Aromatikler, asfaltenlerin yayılımı için gerekli ortamı oluşturan, koyu kahverenkli ve bitümün %40 ila %60'ını meydana getiren viskoz sıvılardır. Halkalı sistemlere sahip polar olmayan karbon zincirlerinden meydana gelen aromatikler, bitüm içerisindeki en düşük molekül ağırlığına sahip bileşiklerdir. Doygunlar ise polar olmayan beyaz renkte olabilen akışkan yağlardır ve bitümün %5 - %20'sini meydana getirmektedir (Asfalt El Kitabı, 2002; Geçkil, 2008; Tunç, 2004; Zuo, Qu, & Shen, 2019).

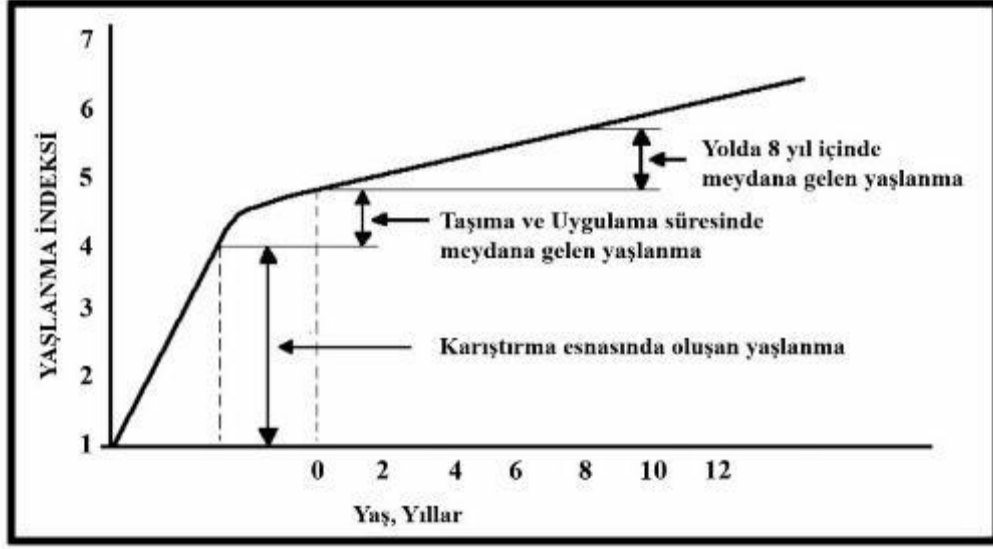
1.4.2. Bitümün Reolojisi

Bir bilim dalı olarak reoloji, herhangi bir maddenin basınç ve zaman parametreleri dâhilinde meydana gelen deformasyonunu yük ve yükün süresine bağlı olarak incelemektedir. Bitümün reolojisi ise belirli bir sıcaklıkta bitümün yük altındaki davranışı, üzerine uygulanan yük ve yükleme süresi dikkate alınarak kimyasal bileşenlerindeki baskın hidrokarbon yapıların saptanmasının yanı sıra bileşimindeki ve yapısındaki değişikliklerin

etkisinin incelenmesidir. Reolojik bir malzeme olarak bitüm, visko-elastik ve termo-plastik özellikler göstermektedir. Yani, yüksek yükleme hızında ve düşük sıcaklıklarda elastik ve yüksek mukavemet, düşük yükleme hızında ve yüksek sıcaklıklarda viskoz ve düşük mukavemet gösterirler (Geçkil, 2008; Çubuk, 2007; Sayın & Tanyıldızı, 2006; Kuloğlu, 2001).

Sıcak iklim koşullarının hâkim olduğu yaz aylarında veya park halindeki ya da ağır araçlardan kaynaklanan, değişmeyen ve sürekli yüklere maruz kalan bitümlü kaplamalar viskoz davranış sergiler. Viskoz davranıştan sonra soğuma meydana gelse dahi eski durumlarına dönemediklerinden dolayı plastik davranış gösterirler. Bundan dolayı, kaplama takabakasında yükü taşıyan sadece agrega olduğundan sıcak asfalt karışımlarda tekerlek izi meydana gelmektedir. Soğuk iklim koşullarının yaşandığı kış aylarında veya araç trafiğinin hızlı aktığı yerlerde, kaplamalarda meydana gelen kısa süreli yükler bitümlü bağlayıcının elastik bir katı gibi hareket etmesine neden olmaktadır. Elastik katılar yük altında şekil değiştirirler, fakat yük kaldırıldığında tekrar eski haline geri dönmektedirler. Bu tür malzemelere kapasitesinin taşıyabileceğinden daha fazla yükleme yapıldığı zaman malzemenin kendisinde kırılma, çatlama veya kopmalar oluşmaktadır. Düşük sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcılar oldukça elastik bir malzeme gibi davranış gösterse de aşırı yükleme durumunda kırılma olup çatlamlar oluşmaktadır. Bu nedenle, bitümlü sıcak karışımlarda soğuk havalarda ısıl çatlaklar görülmektedir. Bu durumun nedeni olarak ise düşük sıcaklık etkisiyle kaplamanın büzülmeyle çalışarak meydana getirdiği iç gerilmelerdir (Sybilski, 1994; Avcı, 2009; Kizirgil, 2013, Çeloğlu, 2020).

Bitümlü kaplama tabakası bileşenlerinden olan bitümlü bağlayıcı hizmet ömrü boyunca atmosferik dış etkiler olan oksijenden, ultraviyole ışınlardan ve sıcaklık değişimlerinden etkilenmektedir. Bu değişimler sonucu bitümde yaşlanma süreci meydana gelmekte ve daha kırılma olmaktadır. Yaşlanma süresince bitümün kimyasal yapısında birtakım değişiklikler meydana gelmektedir. Bitümde meydana gelen yaşlanma kısa ve uzun dönem yaşlanma şeklinde meydana geldiği kabul görmektedir. Kısa dönem yaşlanma, bitümlü karışımın depolanması, plente taşınması, plente karıştırılması, şantiye yerine taşınması, serilmesi ve sıkıştırılması esnasında oluşmaktadır. Uzun dönem yaşlanma ise, yolun yaklaşık 8 yıllık hizmet süresinden sonra yani servis ömrü boyunca meydana gelmektedir (Bell, Wieder, & Fellin, 1994; Whiteoak, 2004). Şekil 3'te bitümlü bağlayıcının kısa ve uzun dönem yaşlanmasını gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 3. Bitümlü bağlayıcının yaşlanma aşamaları (Whiteoak, 2004).

1.5. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Bitümlü sıcak karışımın %5-7'sini, hacim olarak %13-15'ini meydana getiren bitümlü bağlayıcılar, kaplama performansı ve dayanımı üzerinde çok önemli etkilere sahiptir. Dünyada ve ülkemizde bu özelliklerin belirlenebilmesi için Karayolları Teknik Şartnamesi'nde yer alan geleneksel bağlayıcı deneylerinin yanı sıra sıcak karışım tasarımı için superpave bağlayıcı deneyleri uygulanmaktadır. Bu deneyler Amerika Stratejik Karayolu Araştırma Programı (Strategic Highway Research Program, SHRP) tarafından oluşturularak geliştirilmiştir.

➤ Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Penetrasyon deneyi

Yumuşama noktası deneyi

Düktilite deneyi

Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deneyi ve Elastik Geri Dönme

Parlama noktası deneyi

Özgül ağırlık deneyi

Fraass kırılma noktası deneyi

Trikloretilende çözünürlük deneyi

Nicholson soyulma deneyi

- Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Superpave Deneyleri
 - Dönel viskozimetre (Rotational Viscosimeter, RV) deneyi
 - Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT)
 - Basınçlı yaşlandırma kabini (Pressure Aging Vessel, PAV) deneyi
 - Dinamik kayma reometresi (Dynamic Shear Rheometer, DSR) deneyi
 - Kiriş eğme reometresi (Bending Beam Rheometer, BBR) deneyi
 - Depolama Stabilesi Deneyi
 - Çoklu Gerilim Sünme-Geri Kurtarma Deneyi (Multi Stress Creep Recovery, MSCR)
 - Lineer Genlik Taraması Deneyi (Linear amplitude sweep, LAS)

1.5.1. Geleneksel Bağlayıcı Deneyleri

a) Penetrasyon Deneyi

ASTM D5/D5M-13 standardına göre penetrasyon, 100 g ağırlığındaki standart bir iğnenin 5 saniye süreyle 25°C sıcaklıktaki bitümlü bağlayıcıya batma miktarıdır. Penetrasyon değeri bağlayıcının kıvamlılığı ile yani sertliğiyle ters orantılıdır. Dolayısıyla bağlayıcının penetrasyon değerinin artması bağlayıcının yumuşadığının, azalması ise kıvamının arttığının yani serleştiğinin göstergesidir (Yılmaz, 2016; Kumandaş, Çavdar, Oruç, Pancar, & Kök, 2022). Şekil 4'te penetrasyon deney aleti ve 25°C su banyosundaki deney numuneleri gösterilmektedir.



Şekil 4. Penetrasyon deney aleti ve 25°C su banyosundaki deney numuneleri

b) Yumuşama noktası deneyi

Yumuşama noktası deneyi, bitümlü bağlayıcının sıcaklığa karşı duyarlılığını ölçen deneylerden biridir. ASTM D36/D36M-14 standardına göre, hazırlanan standart pirinç halkalar üzerine konulan bitümlü bağlayıcı üzerine 3.5 g ağırlığında çelik bilyeler yerleştirilir. Bağlayıcı numuneleri su banyosuna yerleştirilir ve dakikada 5°C ısıtılır. Bilyelerin, halkaları tutan 25 mm aşağıdaki çelik tabakanın üzerine düştüğü anda termometreden okunan sıcaklık değeri yumuşama noktası olacak şekilde kayıt altına alınır. Yumuşama noktası değeri, bitümlü bağlayıcının akmaya başladığı sıcaklığı ifade etmektedir (Mohammed, 2014). Yumuşama noktası cihazı Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 5. Yumuşama noktası cihazı

Penetrasyon İndeksi (PI), bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin, penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçlarına göre hesaplanmaktadır. Aynı zamanda sıcaklığın bir fonksiyonu olan PI, bitümün kıvamlılığının değişimini tanımlayan nicel bir kavram olup Denklem1 ile hesaplanmaktadır.

$$PI = \frac{1952 - 500 \times \log(Pen25) - 20 \times YN}{50 \times \log(Pen25) - YN - 120} \quad (1)$$

Denklemde Pen25 bitümlü bağlayıcının 25°C’de ölçülen penetrasyon değerini, YN ise deney sonucu elde edilen yumuşama noktası değeridir. PI değeri ne kadar düşükse bitümün sıcaklık hassasiyeti o kadar yüksek olmaktadır. Aynı şekilde, yüksek PI değeri bitümlü

bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda oluşabilecek çatlaklara ve deformasyona karşı direncinin daha yüksek olduğunu göstermektedir (Yan, Liu, You, Ou, & Zhang, 2021; Erkuş, Kök, & Yılmaz, 2020; Wang, Wei, & Zhang, 2009; Sengoz & Isikyakar, 2008). PI değerinin alt ve üst limit değerleri -2 ile +2 arasında değişmektedir. Bu değerlerin altında hesaplanan değerler bitümün sıcaklık duyarlılığın artmasına, üstünde olan değerler ise bitümün oksidasyonuna işaret etmektedir (Koral, 2012; Geçkil & Seloğlu, 2019).

c) Düktilite Deneyi

Düktilite kelime anlamı olarak uzama ya da çekilebilmeyken, terimsel anlamda bitümlü bağlayıcıdan yapılan standart bir brikette kopma olmadan ne kadar çekilebileceği uzunluğun cm olarak ifadesidir. ASTM D113-17 standardına göre, 25°C sıcaklıktaki su ile doldurulan düktilite cihazına yerleştirilen numune 5 cm/dk hız ile yatay olarak çekilir ve işleme biriket kopana kadar devam edilmektedir (Şekil 6). Kopma anında düktilite cihazının hemen kenarında var olan cetvelden bitümlü bağlayıcının cm cinsinden uzama miktarı okunur. Aynı anda üç bağlayıcı nummunesi için ölçüm yapılır ve bu üç numunenin ortalaması bağlayıcının düktilite değeri olarak elde edilmiş olur (Oruç, 2002; Ilıcalı, Tayfur, Özen, Sönmez, & Eren, 2001). Düktilite değeri ne kadar yüksekse bitümün bağlayıcılık özelliği de o kadar yüksek olmaktadır. Fakat düktilite değeri çok fazla ise bitümlerin ısıya karşı hassasiyetlerinin fazla olduğu ifade edilmektedir (Öz Kıcı & Saltan, 2020).



Şekil 6. Düktilite deney aleti

d) Kuvvet ölçümlü düktilite deneyi ve elastik geri dönme

Kohezyon kelimesi malzemenin en küçük yapı taşlarını bir arada tutmaya yarayan kuvvettir. Kuvvet ölçümlü düktilite deneyinde bu yapı taşlarını birbirinden ayırabilen kuvveti ölçen deney şeklinde ifade edilmektedir. Bitümlü bağlayıcının kohezyondan meydana gelen (Cohesive) dayanımının düşük sıcaklıkta (25°C, 15°C, 5°C gibi) su banyosu içerisinde 50 mm/dk hız ile bitüm numunesinin çekilerek bitümün kopma anındaki uzama miktarının ölçülmesidir (Çeloğlu, 2020; Ertaş, 2019). Deney sonunda, yük uzama eğrisi kopma anındaki uzama miktarı hesaplanarak çizilir. Çizilen eğrinin yardımıyla deformasyon enerjisi ek olarak hesaplanabilir (Orhan, 2005). Deney cihazında aynı anda üç numune için ölçüm yapılmaktadır. Ölçülen üç numuneye ait değerlerin aritmetik ortalaması hesaplanarak bitümlü bağlayıcının düktilite değeri belirlenir. Düktilite cihazı ve deneye ait numuneler Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Kuvvet ölçümlü düktilite cihazı ve deneye ait numuneler

Elastik geri dönme ile, saf ya da modifiye edilmiş bağlayıcıların istenilen sıcaklıktaki elastik geri dönmesi ve bu geri dönme sonucunda oluşan deformasyonu belirlenmektedir. 25°C sıcaklıkta düktilite cihazına yerleştirilen numuneler 50 mm/dk hızla 200 mm uzama miktarına kadar TS EN 13398 standardına göre uzatılır. Uzamış numunelerin orta noktası belirlenerek kesilir ve 30 dk boyunca numunelerin geri dönme miktarları için beklenir. Elastik geri dönme oranı hesabında, kopan uçları arasındaki mesafe mm cinsinden ölçülür ve kullanılır. (Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvar El Kitabı, 2021). Denklem 2 yardımıyla elastik geri dönme yüzdesi bulunur.

$$R_E = \frac{d}{L} \times 100 \quad (2)$$

R_E : % Elastik geri dönme,

d : mm cinsinden bitüm numuneleri arasındaki mesafe (mm),

L : Uzama miktarının toplamı (200 ± 1 mm)

e) Parlama noktası deneyi

Bitümlü bağlayıcılarla çalışma esnasında herhangi bir tutuşma ve yanma riskini bertaraf etmek için her bağlayıcının parlama noktası değerini bilmek güvenlik açısından son derece önemlidir. Kısacası bitümlü bağlayıcıların güvenli çalışma sıcaklığı parlama noktası değerine göre belirlenmektedir (Gökalp, Özinal, & Uz, 2018). Bir maddenin alevle teması sırasında geçici olarak parladığı düşük sıcaklık parlama noktası olarak tanımlanmaktadır. Bitümlü malzemeler için parlama noktası ASTM D92-18 standardına göre, minimum 175 °C'dir (Orhan, 2005). Cleveland açık kap yöntemi, açık bir kap vasıtasıyla bitümlü malzemenin ısıtılması esnasında yüzeyde bir kıvılcım görülmesi şeklinde uygulanmaktadır. Alevin meydana geldiği ve gözle tespit edildiği zaman belirlenen sıcaklık değeri bitümlü malzemenin parlama noktası olarak kaydedilir (Bostancıoğlu, 2012; Yılmaz, 2016;). Şekil 8'de parlama cihazı görülmektedir.



Şekil 8. Parlama noktası cihazı

f) Özgöl ağırlık deneyi

Özgöl ağırlık deneyi bitümlü bağlayıcılarda genellikle piknometre yöntemi ile saptanmaktadır. Bu deneyi yapmak için bir adet piknometre, hassas terazi ve su banyosu kullanılmaktadır. Öncelikle piknometrenin kapağı ile birlikte tartımı yapılır (a). Daha sonra piknometre 25°C’de bulunan damıtılmış suyla doldurulup kapağı sıkıca kapatılır ve tekrar tartılır (b). 25 °C’ye getirilen bitümlü bağlayıcı numuneleri boş piknometrenin dörtte üçünü doldurcak şekilde ilave edilip doldurulup tartılır (c). Son işlem olarak da piknometrenin kalan kısmına su doldurulup tekrar tartılır (d). Kaydedilen tartım değerleri Denklem 3’te yerine yazılarak bitümlü bağlayıcının özgül ağırlık değeri elde edilir (Orhan, 2012).

$$\text{Özgöl ağırlık} = \frac{c-a}{(b-a)-(d-c)} \quad (3)$$

g) Fraass kırılma noktası deneyi

Fraass kırılma noktası, yüzeyi düzeltilmiş bir bitümlü bağlayıcı filminin yükleme şartlarında kırıldığı sıcaklığın Celsius cinsinden ifade edilmesidir. TS EN 12593 ye göre, bitümlü bağlayıcı numunesi metal bir plaka üzerine eşit bir kalınlıkta yayılır. Plakanın boyutları 41.00 mm ± 0.05 mm uzunluğunda, 20.0 mm ± 0.2 mm genişliğinde ve 0.15 mm ± 0.02 mm kalınlığındadır. Plakaya 0.40 g ± 0.01 g bitümlü bağlayıcı dökülür ve soğutulur. Plaka üzerindeki bağlayıcıda çatlama meydana gelinceye kadar plaka belli sürelerde esnetilir. Çatlama oluştuğu andaki sıcaklık, Fraass kırılma noktası olarak kaydedilir (Yılmaz, 2016) Fraass kırılma noktasını belirleyen deney aleti ve deney sonrası çatlamanın olduğu numune Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Fraass kırılma noktası deney aleti ve deney sonrası çatlamanın olduğu numune

h) Trikloretilende çözünürlük deneyi

Çözünürlük deneyi, bitümlü bağlayıcının yapısında mevcut olan mineral maddelerin miktarının belirlenmesi, diğer bir deyişle bitümün ne kadar saf olduğunu tespit etmek için yapılmaktadır. Kaplama sınıfı bitümlü bağlayıcılar için organik çözücülerden olan trikloretilen çözeltisi kullanılmaktadır (Sağlık, 2009). Bitümlü bağlayıcının trikloroetilende çözünme yüzdesinin en az % 99 oranında olması beklenmektedir (Orhan, 2005; Yılmaz, 2016; Yüknü, Öztürk., & Komut, 2020).

i) Nicholson soyulma deneyi

Soyulma, agrega yüzeyi ile bitümlü bağlayıcı arasında var olan adezif bağın su ve sıcaklık etkisi ile kırılması sonucu meydana gelmektedir. 200 g alınan agrega numunesi damıtılmış su ile iyice yıkanır ve ardından 110°C ısıtılmış etüvde kurutulur. 100 gr yıkanıp kurutulan agrega 1 saat süreyle 140°C-150°C'de etüvde ısıtmaya bırakılır. Ağırlıkça agreganın %5'ine eşit olacak şekilde bitümlü bağlayıcı da 150±5°C'lik etüvde ısıtıldıktan sonra agregalarla homojen karışım olana kadar karıştırılır. İki petri kabına bu karışımdan eşit miktarlarda dökülür ve 24 saat boyunca karışımın üzerinde en az 3 cm yüksekliğinde su olacak şekilde 60°C'lik etüve bırakılır. Daha sonra petri kaplarındaki sular dökülerek yandan gelen ışık altında gözle inceleme yapılır. Soyulmaya karşı direnç, soyulmamış yüzeylerin karışımdaki bütün yüzeye oranı olarak ifade edilmektedir. Oluşan soyulmanın miktarı alınan agreganın cinsine ve kullanılan bitümlü bağlayıcı türüne göre değişiklik göstermektedir. Karayolları teknik şartnamesinde soyulma deneyi

yapıldıktan sonra karışımların en az %60'ının soyulmadan kalması istenmektedir (Dede, 2023; Karadağ & Saltan, 2021; Gürer, Korkmaz, Yarcı & Rahmany, 2019; Gürer & Karaşahin, 2014;).

1.5.2. Superpave Bağlayıcı Deneyleri

Sadece belirli bir sıcaklıktaki bitümün kıvam özelliğine dayanan geleneksel bitüm sınıflama sistemlerinin yetersiz kaldığının görülmesi üzerine, ABD'de kongre kararı ile Stratejik Karayolu Araştırma Programı (Strategic Highway Research Program, SHRP) tarafından 1987 yılında başlanan ve 1993 yılında tamamlanan “Yüksek performanslı kaplama” yöntemi olarak isimlendirilerek geliştirilmiştir (Harman, D'Angelo & Bukowski, 2002; Kaya & Topal, 2016). Bu yöntemde, bitümlü bağlayıcılar farklı sıcaklıklarda sergiledikleri performansa göre sınıflandırılmaktadırlar. Bu tür bağlayıcılara Performans Sınıfı (Performance Grade) bağlayıcı olarak tanımlanmış ve PG simgesi ile ifade edilmiştir (Öztürk & Çubuk, 2004).

Superpave yönteminin en önemli özelliği, deneylerin, standart deney sıcaklıklarında değil, kaplamanın hizmet vereceği bölgedeki sıcaklıklarda tasarlanmasıdır. Bitümlü bağlayıcının doğrudan saha performansı ile ilgili fiziksel ve reolojik özelliklerinin analitik deneylerle tespit edilmesinin yanı sıra genel olarak saha performansının daha iyi ve gerçekçi olarak yansıtmaktadır. Superpave karışım dizayn yöntemi, trafik yükü ve iklim koşulları altında meydana gelen kalıcı deformasyon, yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlaklarını azaltarak, dizayn çevre koşullarında kaplama performansını arttırmak için performans esaslı bağlayıcı malzemelerinin geliştirilmesini içermektedir (Keskin, 2011; Geçkil & Alataş, 2018).

Bitümlü bağlayıcıların işlenebilirlik özelliklerini saptamak için Superpave deneylerinden Dönel Viskozimetre (RV), kısa dönem yaşlanmasını belirlemek için Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) ve uzun dönem yaşlanmasının tespit edilmesi için Basınçlı Yaşlandırma Aleti (PAV) deneyleri kullanılmaktadır. Düşük sıcaklıklarda bağlayıcılarda meydana gelen çatlaklara karşı direnci belirlemek amacıyla Kiriş Eğme Reometresi (BBR) ve tekerlek izi dayanımını tespit için Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi uygulanmaktadır.

a) Dönel viskozimetre deneyi (Rotational Viscosimeter, RV)

Viskozite deneyi, plentte karıştırma, yerleştirme ve sıkıştırma prosesi sırasında sıcak asfalt karışımının yeterli işlenebilirliğini sağlamak amacıyla bitümlü bağlayıcının akışkanlık ve işlenebilirlik özelliklerini araştırmak amacıyla kullanılmaktadır. Deneyde AASHTO T 316 standardına göre Brookfield dönel viskozimetresi (Şekil 10) kullanılarak, sıcaklığın sabit tutulması şartıyla bir milin bitümlü bağlayıcı numunesi içine kendi eksenini etrafında sabit bir hızla dönerek gerekli tork değeri ölçülmektedir. Superpave şartnamesine göre, saf veya modifiye edilen bitümlü bağlayıcılara uygulanan RV deneyinde 135°C'deki bağlayıcının sahip olması gereken viskozite değerinin 3.0 Pa.s'yi (3000 cP) geçmemesi beklenmektedir. Deney esnasında yaklaşık 30 g kadar alınan bitümlü bağlayıcı etüvde akışkan hale gelene kadar ısıtılmaktadır. Akışkan hale getirilen bitümlü bağlayıcıdan yaklaşık 11 gr alınıp silindirik şeklindeki deney tüpüne dökülür, deney tüpü termosele yerleştirilir, sabit sıcaklık altında numune 15-30 dakika durduktan sonra cihaza mil (spindle) takılarak ölçüm yapılır. Spindle dönme hızı 20 rpm.'dir. Bağlayıcı sınıfına göre farklı boyutlarda (No.21, No.27, No.29) spindle tercih edilmektedir. Cihazdan tek numune için üç vizkozite değeri okunur ve okunan bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak bağlayıcıya ait viskozite değeri hesaplanır (Kök, Yılmaz, & Akpolat, 2014; Yan, Hong, You, Ou, & Miljkovic, 2021; Ahmetzade, 2013; Yeşilçiçek, Oruç, & Bozdemir, 2022).



Şekil 10. Dönel viskozimetre cihazı

b) Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT)

Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) ile laboratuarda üretim ve yapım aşamasında bitümlü sıcak karışımlarda oluşan kısa süreli yaşlanma simüle edilmektedir. Bu deneyde plentte karıştırma esnasında bitümlü bağlayıcıda meydana gelen sertleşmeyi tespit için, dönme hareketi yapan ince film halindeki bitümlü bağlayıcıların, sıcaklık ve havanın her ikisinin birlikte etkisini ölçmektedir. TS EN 12607-1 deney standardına göre, 163°C sıcaklıkta ısıtılan etüve 8 adet cam şişe yerleştirilerek deney yapılmaktadır (Şekil 11). 8 adet şişeden her birine 35 gram bitümlü bağlayıcı doldurularak düşey ekseninde EN 12607-1 standardı için 75 dakika veya ASTM D2872, AASHTO T240 standartları için de 85 dakika boyunca döndürülür. Cam şişelere dönme esnasında etüvde mevcut olan hava üfleyici aracılığıyla dakikada 4000±200 ml hava akışı verilmektedir. Sıcaklık ve dönmeyle birlikte bitümlü bağlayıcı ile 8 adet cam şişenin bütün yüzeyleri kaplanarak ince bir film tabakası oluşturmaktadır (Yılmaz,2016; Çeloğlu, 2020; Liu, Li & Zhang, 2018).



Şekil 11. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi

Deney süresi sonunda, altı şişede bulunan numuneler bitümlü bağlayıcıların yaşlanmadan sonraki fiziksel ve reolojik özellikleri belirlemek için kullanılırken geriye kalan iki şişede bulunan numuneler ise kütle kaybını tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır (Tian, Li, Zhang, Yang, Zuo, & Wang, 2021). Kütle kaybı Denklem 4 yardımıyla belirlenmektedir.

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = \frac{(\text{İlk Kütle} - \text{Son Kütle})}{(\text{İlk Kütle})} \times 100 \quad (4)$$

c) Basınçlı yaşlandırma kabini (Pressure Aging Vessel, PAV)

Arazi koşullarında bitümlü bağlayıcıların servis ömrü (7-10 yıl) boyunca maruz kaldığı uzun dönemli oksidasyonu laboratuvar koşullarında simüle etmek amacıyla basınçlı yaşlandırma kabini deneyi uygulanmaktadır. Deneyde RTFOT ile kısa dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcı numuneler kullanılmaktadır.

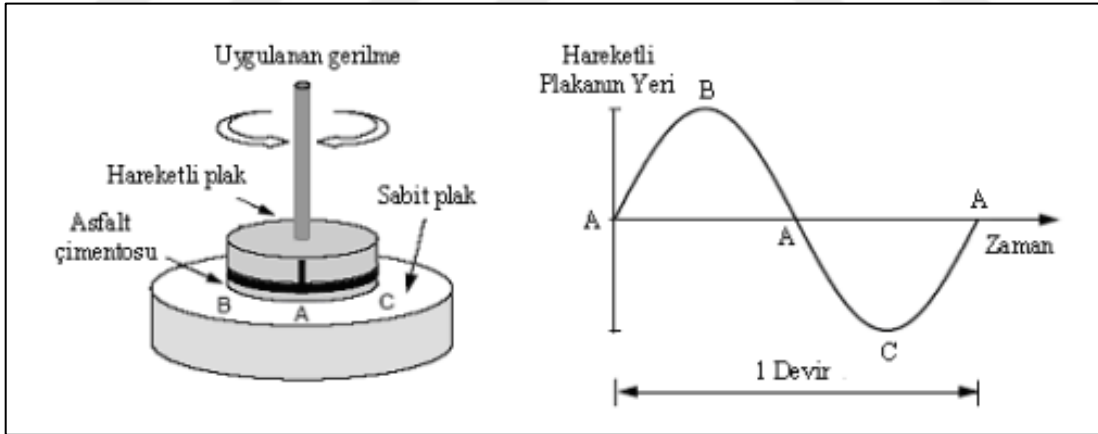
AASHTO PP1 standardına göre, PAV deneyinde numune kaplarından her birine 50 gram RTFOT deneyi sonrası elde edilen bitümlü bağlayıcı konularak 2.1 MPa (305 psi) basınç altında 20 saat boyunca belli bir sıcaklıkta deney gerçekleştirilmektedir (Yao, Wang & Xu, 2021). Bu deneyde bağlayıcı sınıfı için 90°C, 100°C veya 110°C değişen deney sıcaklıkları uygulanmaktadır (Şekil 12). Deney süresi bitiminde, sıcaklık ve basıncın etkisiyle bağlayıcı numuneleri üzerinde hava kabarcıkları meydana gelmektedir. Gaz alma cihazı ile 30 dakika 170°C sıcaklıkta bu hava kabarcıkları kaybolmaktadır (Şekil 13). Gaz alma işleminden sonra PAV sonrası numuneler diğer deneylerde kullanılmak üzere saklanmaktadır.



Şekil 12. PAV deney aşamaları

d) Dinamik kayma reometresi deneyi (Dynamic Shear Rheometer, DSR)

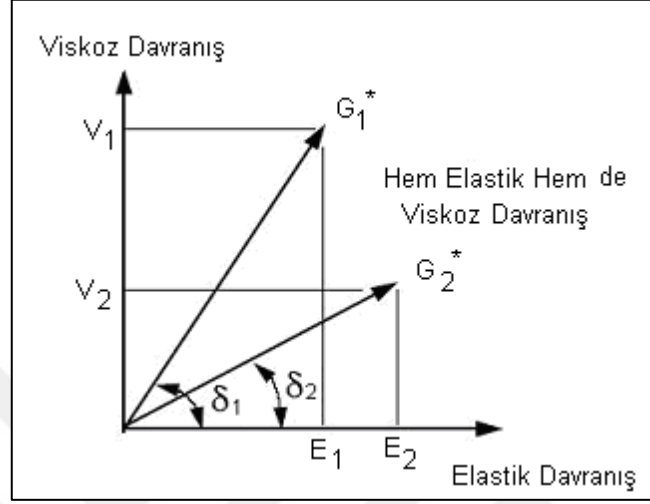
Dinamik Kayma Reometresi ile bitümlü bağlayıcıların çeşitli sıcaklıklardaki viskoelastik davranışı tespit edilmektedir (Zhao, Wu, Xie, Yang, Yang, Chen & Li, 2023). Yaşlandırılmamış ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcıların tekerlek izine karşı dirençlerini belirlemek için kullanılırken, PAV yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar için ise yorulma davranışlarını belirlemek için kullanılmaktadır (Çeloğlu, 2020; Yılmaz, 2016). AASHTO T 315 standardına göre, numune boyutları her deney için farklılık gösterirken tekerlek izi dayanımı için çapı 25 mm ve yüksekliği 1 mm olan, yorulma dayanımı için ise çapı 8 mm ve yüksekliği 2 mm olan deney geometrisi kullanılmaktadır. Şekil 13'teki gibi bağlayıcılar alt plak sabit ve üst plak hareketli olacak şekilde cihaza yerleştirilmektedir. Üst plaktaki A noktası, B noktasına gidip geri dönerek tekrar A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir ve daha sonra da tekrar A noktasına varmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deney boyunca tekrarlanmaktadır. Numuneye uygulanan salınımlı frekansın değeri saniyede 10 rad yani 1.59 Hz'dir. Bu değer, kaplama tabakasında 100 km/saat hıza sahip aracın hızına eşit olarak kabul edilmektedir (Zaniewski & Pumphrey, 2004; Bostancıoğlu, 2012; Zhu, Li, Zhang, Wang & Li, 2023;).



Şekil 13. DSR deneyinde deformasyon yönleri (Zaniewski & Pumphrey, 2004; Geçkil, 2008)

DSR deneyi, bitümlü bağlayıcıların kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir. G^* , tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı bağlayıcının gösterdiği toplam direncin göstergesidir. Faz açısı (δ) ise uygulanan kesme gerilmesi ile meydana gelen deformasyon arasındaki gecikme süresi olup viskoz ve elastik deformasyonun bağıl miktarlarının

göstergesidir. Hem G^* hem de δ değerleri bitümlü bağlayıcının sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir (Şekil 14) (Airey, 2011; Atasagun, 2021; McGennis, Shuler & Bahia, 1994;).



Şekil 14. Bitümlü bağlayıcının viskoelastik davranışı (Çetin, 2008)

DSR deneyi ile yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi parametresi olan $G^*/\sin\delta$ değeri ve orta sıcaklıklardaki yorulma direnci parametresi olan $G^* \cdot \sin(\delta)$ değerleri elde edilmektedir. Superpave şartnamesine göre bitümlü bağlayıcılar için tekerlek izi parametresinin saf bağlayıcılar için (yaşlanmamış bağlayıcılar) minimum 1 kPa ve RTFOT ile kısa süreli yaşlandırılmış bağlayıcılar için ise minimum 2.2 kPa olması istenmektedir. RTFOT+PAV ile uzun süreli yaşlandırılmış bağlayıcılarda ise yorulma direnci parametresinin ise maksimum 5000 kPa değerini vermesi istenmektedir. $G^*/\sin\delta$ değeri superpave şartnamesinde minimum 1 kPa olduğu sıcaklık değeri, bitümlü bağlayıcının performans seviyesinin tespitinde kullanılmaktadır. $G^* \cdot \sin(\delta)$ değeri ne kadar fazla olursa bitümlü bağlayıcıda oluşabilecek yorulma çatlağı da o kadar fazladır (Yılmaz, 2016; Bostancıoğlu, 2012; Çeloğlu, 2020; Oruç, Yılmaz & Sancak, 2015).

e) Kiriş eğme reometresi deneyi (Bending Beam Rheometer, BBR)

İklim ve çevre şartları etkisiyle meydana gelen ve termal çatlak şeklinde isimlendirilen, soğuk iklim bölgelerinde inşa edilen esnek kaplamalarda meydana gelen çatlakların belirlenmesi amacıyla kiriş eğme reometresi deneyi uygulanmaktadır. Termoplastik bir malzeme olan bitümlü bağlayıcıların belirli sıcaklıkta ve yükün sabit olduğu durumda sünme ya da defleksiyonun ne kadar olacağı BBR deneyi ile tespit

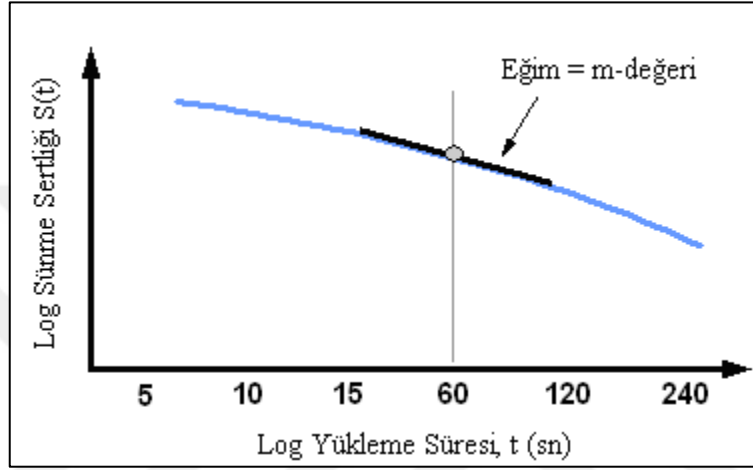
edilmektedir (Zaniewski, & Pumphrey, 2004; Oruç, Yılmaz & Sancak, 2016; Ahmedzade, Fainleb, Günay, & Grigoryeva, 2016). Bu deneyde RTFOT ve PAV deneyleri ile yaşlandırılan bağlayıcı numuneleri kullanılmaktadır. Şekil 15'te BBR deney aleti ait görsel verilmiştir.



Şekil 15. BBR deney aleti

AASHTO T313 standardına uygun olarak BBR deneyinde 12.5x25x6.25 mm ölçülerindeki kiriş bitümlü bağlayıcı ile doldurularak hazırlanır. İçerisinde sıvı karışım olan (etilen glikol, metanol ve su) BBR cihazına yerleştirilir. Bitümlü çubukta 240 saniye süreyle orta noktasına tatbik edilen sabit 100 g'lık yük (980 ± 5 mN) uygulanarak kirişte oluşan eğilme (bükülme) ölçülmektedir. Deney sonunda elde edilen yük ve defleksiyon, bağlayıcının sünme sertliğini (S) ve sünme oranını (m-değeri) belirlemede kullanılmaktadır. Sünme sertliği (S), numunelerin sabit sünme yüklerine karşı dayanımının bir göstergesiye sünme oranı (m-değeri) ise sünme sertliğindeki değişiklikler ile yükleme süresi arasındaki oranı ifade etmektedir. Yüke ve defleksiyona bağlı olarak sünme sertliği değeri belirlendikten sonra sünme sertlik değerlerinin zamanla değişimini gösteren bir grafik çizilir (Şekil 16). Bu grafikte eğriye teğet olan doğrunun 60. saniyedeki eğimi sünme oranını (m-değeri) vermektedir. Yüksek sünme sertliğine sahip bitümlü bağlayıcılar genellikle daha kırılgan olmakta ve düşük sıcaklıklarda daha hızlı termal çatlamlar görülmektedir. Düşük sünme oranına sahip bitümlü bağlayıcılarda ise bağlayıcının sertliği artmakta aynı zamanda

kaplama üzerinden meydana gelen çekme gerilmeleri de artmaktadır. Bu nedenle bitümlü bağlayıcılarda meydana gelen ısı çatlakların azalması için düşük S ve yüksek m oranı istenmektedir (Adnan & Wang, 2023). AASHTO TP313 standardına göre sünme sertlik değerinin maksimum 300 Mpa ve sünme oranı değerinin ise minimum 0,300 olması gerekmektedir (Yılmaz, 2011; Koral, 2012; Çeloğlu, 2020; Das, Tasdemir & Birgisson, 2012).



Şekil 16. Sünme oranı değerinin belirlenmesi (Çeloğlu, 2020)

Sünme sertliğinin düşük ve sünme oranının yüksek olması termal çatlakların meydana gelmesinin azalması için istenmektedir. Çünkü, bağlayıcının S değeri arttıkça bağlayıcı daha da sertleşerek gevrek hareket edip çatlayacaktır. Benzer olarak sünme oranı düştükçe de bağlayıcının sertliği artarak kaplama tabakasında meydana gelen çekme gerilmelerine ek olarak ısı çatlakları oluşumuna karşı daha hassas olacaktır (He, Tan, Yang, Zhu, Tan & Yang, 2023; Liu, Zhou & Xu, 2018).

f) Depolama stabilitesi deneyi

Bitümlü bağlayıcılar birçok çeşit katkı ile modifiye edilebilmektedir. Modifikasyon işlemi sırasında bitümlü bağlayıcı ve katkı arasında kimyasal ya da fiziksel bağ meydana gelebilmektedir. İşlem sonrasında homojen bir yapı elde edilebilmesine karşın özellikle fiziksel bağ oluşturan katkı türlerinde modifiye edilen bitümün yüksek sıcaklıklarda silolarda uzun süreli depolanması esnasında bitüm-katkı fazında ayrışmalar meydana gelebilmektedir. Bitümlü bağlayıcıların depolamaya karşı dayanımlarını tespit etmek için EN 13399, 2011 standardına göre depolama stabilitesi deneyi uygulanmaktadır (Raufi, 2018; Kumar, Choundary, & Kumar, 2023).

Depolama stabilitesi için modifiye bitüm en az 160 mm uzunlukta 25 mm ile 40 mm arasındaki çapta alüminyum folyo bir tüpe, 100-120 mm yüksekliğe kadar doldurulur ve tüpün ağzı kapatılır. Numune konulan tüpler, $180 \pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüve dik olarak yerleştirilir ve 72 ± 1 saat kadar bekletilir. Süre sonunda etüvden çıkarılan tüpler düşey pozisyonda soğumaya bırakılır ve sonrasında numuneler alüminyum folyodan çıkarılır. Bu işlem için iki yöntem izlenebilir. Birinci yöntemde örnek önce üç eşit parçaya kesilir. Ortadaki parça kullanılmaz, alt ve üst parçalar işaretlenerek küçük kutulara konulur ve $180 \pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki bir etüvde 60 dakikadan fazla olmamak üzere ısıtılarak folyodan çıkarılabilir. İkinci yöntemde ise örnek 30 dakika -20°C sıcaklıkta bekletildikten sonra üç eşit parçaya bölünür ve folyo kolaylıkla sökülebilir. Kesilen tüplerin alt ve üst parçaları diğer deneyler için ayrılır. Bu çalışmada saf ve modifiye bitümlere depolama stabilitesi prosedürü uygulanmıştır. Prosedür tamamlandıktan sonra numuneler -20°C sıcaklıkta 30 dakika bekletilip alüminyum tüpler çıkarılmıştır. Numune üç parçaya bölünerek ortadaki parça atıldı. Alt ve üst parçalar numaralandırılan kutulara konularak penetrasyon, yumuşama noktası, dönel viskozimetre ve DSR deneyleri uygulanmıştır (EN-13399, 2018; Zou, Sha, Ding, Tand, & Huan, 2017).

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

Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi potansiyeli, standart Superpave deneyinden elde edilen $G^*/\sin \delta$ parametresine göre belirlenmektedir. Ancak, SHRP tarafından yapılan yol testlerinden bu parametrenin, yol üzerinde meydana gelen deformasyonu ve bağlayıcının elastik özelliklerini tam yansıtamadığı belirlenmiştir. Bu sebeple, AASHTO T350 ve AASHTO M332 standartları ile tanımlanan, gerçek tekerlek iziyle daha iyi korelasyona sahip olan MSCR deneyi geliştirilmiştir (URL-2, FHWA).

MSCR deneyinde, RTFOT ile yaşlandırılmış numunelere, belirlenen sıcaklıklarda 0.1 kPa ve 3.2 kPa olmak üzere iki kayma gerilmesi uygulanmaktadır. Düşük gerilim seviyesi bitümlü bağlayıcının lineer bölgedeki davranışını temsil ederken, yüksek gerilim seviyesi ise lineer olmayan viskoelastik bölgeyi temsil etmektedir. Farklı kayma gerilmesi seviyelerinde numuneler üzerine 1 sn boyunca gerilim uygulanır ve 9 sn boyunca da numune üzerinde oluşan şekil değiştirmenin geri dönmesi beklenir ve bu bir döngüyü temsil etmektedir. Deney boyunca, 0.1 kPa gerilim seviyesi için 20 döngü, 3.2 kPa gerilim seviyesi içinde 10 döngü şeklinde uygulanmaktadır (FHWA).

MSCR deneyinde, her gerilim seviyesine için iki farklı parametre değeri elde edilmektedir. Bu parametreler, yüzde geri dönme (R) ve kalıcı sünme uyumu (Jnr) olup Denklem 5 ve 6'da verilmiştir.

$$R_{0.1/3.2} = \frac{\sum_{N=11}^{20} [\varepsilon_r(0.1/3.2, N)]}{10} \quad (5)$$

$$Jnr_{0.1/3.2} = \frac{\sum_{N=11}^{20} [Jnr(0.1/3.2, N)]}{10} \quad (6)$$

$\varepsilon_r(0.1/3.2, N)$: N döngü sayısında 0.1/3.2 gerilme seviyesindeki yüzde geri dönmeyi temsil etmektedir.

Ayrıca MSCR deneyinde, her iki gerilim seviyesi arasındaki kalıcı sünme uyumu değeri (Jnr_{diff}) olarak tanımlanmaktadır ve %75'i aşmaması gerekmektedir. Jnr_{diff} değerinin hesabı Denklem 7'de verilmiştir (AASHTO M332, 2015, Çeloğlu, 2020).

$$Jnr_{diff} = \frac{(Jnr_{3.2} - Jnr_{0.1})}{Jnr_{0.1}} * 100 \leq 75 \quad (7)$$

h) Lineer Genlik Taraması Deneyi (Linear amplitude sweep, LAS)

Bitümlü bağlayıcılarda meydana gelen yorulma direncinin nicel olarak belirlenmesi için, DSR cihazından elde edilen $|G^*|. \sin \delta$ parametresi kullanılmaktadır. Ancak, yapılan çalışmalar neticesinde mevcut yöntemin yükün farklı frekanslarda veya yüksek gerilimlerde uygulanamaması sebebiyle gerçek yorulma ömrünü tam anlamıyla karşılayamadığı belirlenmiştir. Bu sebeple, bağlayıcılarda oluşan yorulma ömrünün tespit edilebilmesi için ABD'de yeni bir yöntem geliştirilmiştir. AASHTO TP 101-14 standardında açıklanan yöntemde, bitümlü bağlayıcıların özelliklerinin belirlenmesi ve yorulma ömrünün hesaplanması için sırasıyla frekans ve genlik taramaları yapılmaktadır. Frekans taraması, deney boyunca yüzde 0,1'lik sabit kayma gerilimi ve 0.2-30.0 Hz aralığında artan değişken bir frekansta gerçekleştirilmektedir. Genlik taraması ise, gerinim kontrol modunda, %0.1 gerinim ve 10 Hz frekans altında yükleme döngüsü başlar ve artan gerinim genliğiyle %30'a ulaşıncaya kadar devam ettirilir (TP101-14, 200; Błażejowski, K.).

LAS deneyi, VECD - *Viskoelastik Sürekli Hasar* teorisine dayanmaktadır ve teori, numunelerin yorulma ömrünün herhangi bir yükleme genliğinde tahmin edilebilmesini sağlamaktadır. Bitümlü bağlayıcıların yorulma ömürleri, yükün genliğiyle ile korelasyon sağlayan Denklem 8'e göre hesaplanmaktadır.

$$N_f = A \times (\gamma_{\max})^{-B} \quad (8)$$

N_f : yorulma ömrü veya bozulmaya kadar olan döngü sayısı

$\gamma_{\max}$: kaplama için beklenen maksimum bitümlü bağlayıcı gerinimi (asfalt tabakası >4": %2,5 gerinim, asfalt tabakası <4": %5 gerinim kullanılmalı)

A ve B: VECD model katsayılarıdır.

A parametresi, bitümlü bağlayıcıların bütün yapısını koruma yetisini tanımlarken, B parametresi, bağlayıcıların gerilme seviyesindeki değişimlere karşı hassasiyetini temsil etmektedir. Yüksek A değerleri ve düşük B değerleri, bitümlü bağlayıcıların yorulmaya karşı daha dirençli olduğunu gösterebilmektedir (Błażejowski, K., Hassanpour-Kasanagh, Ahmedzade, Fainleib, & Behnood, 2020; Ameri, Nowbakht, Molayem, & Mirabimoghaddam, 2016; Sabouri, Mirzaiyan, & Moniri, 2018).

1.6. Bitümlü Sıcak Karışımlar

Bitümlü sıcak karışımlar, bir karışım tesisinde (plentte), en uygun gradasyona sahip agregalar ile bitümlü bağlayıcının homojen bir şekilde belirli sıcaklıklarda karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Agregaların kurutulması ve bağlayıcının yeterli işlenebilirliğe sahip olması için hem agrega hem de bitümlü bağlayıcının ısıtıldığı karışımlar sıcak karışım olarak adlandırılmaktadırlar. Plentte karıştırma süreci tamamlandıktan sonra, karışım kaplama alanına taşınır ve bir kaplama makinası (finişer) yardımıyla serilerek sıkıştırılır. Bitümlü sıcak karışımlar, yüksek trafikli yollar, otoyolları ve havaalanları gibi yoğun kullanılan alanlarda tercih edilmektedirler (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002; Tunç, 2007).

1.6.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Özellikleri

Bitümlü sıcak karışımların, üstyapıda kaplama tabakasında kullanılabilmesi için, karışımların dizaynı yapılırken dikkate alınması gereken belli başlı özellikler mevcuttur. Bu özellikler;

- Stabilité
- Rijitlik
- Durabilité (dayanıklılık)

- Esneklik (fleksibilite)
- Yorulmaya Karşı Direnç
- Kaymaya Karşı Direnç
- İşlenebilirlik ve
- Geçirimsizliktir.

a) Stabilite

Stabilite, asfalt kaplamaların trafik yükü altında, kaplama yüzeyinde oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği direncin ölçüsüdür. Sıcak karışımlarda stabilite, trafik yüklerini karşılayacak şekilde yüksek ve yol yüzeyinde oluşan gerilmelere karşı da esnek olacak kadar düşük olmalıdır. Ayrıca, yol kaplamalarının stabilitesi hem agregalar arası içsel sürtünmeye hem de bitüm agrega arası kohezyona bağlıdır. Bitümlü sıcak karışımda yüksek bağlayıcı yüzdesi ile kırılmamış veya az kırılmış agrega kaplama yüzeyinde tekerlek izinde oturmaya sebep olmaktadır (Önal, M.; Tunç, 2007).

b) Rijitlik

Bitümlü bağlayıcı, termoplastik ve viskoelastik bir malzeme olup yükleme hızı ve ısıya bağlı olarak farklı davranış sergilemektedir. Rijitlik kavramı bitümlü sıcak karışımlarda yükleme süresi ve sıcaklığın etkisiyle oluşabilecek deformasyon ve gerilme arasındaki ilişkidir. Rijitlik, yükleme süresi (veya yükleme hızı), ısı ve bitümlü bağlayıcının penetrasyon değeri azaldıkça artmaktadır (Tunç, 2007).

c) Durabilite (dayanıklılık)

Durabilite, bitümlü kaplamanın trafik, iklim ve suyun zararlı etkilerine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Yol kaplaması; bağlayıcı özelliklerinin değişmesi, agrega tanelerinin kırılması veya ufalanması ve bağlayıcının agrega yüzeyinden soyulması gibi dış etkilere karşı dirençli olmalıdır. İyi derecelendirilmiş gradasyon, yüksek bitümlü bağlayıcı içeriği ve sağlam sıkıştırılmış, geçirimsiz karışımlar ile imal edilen kaplamaların durabilitesi daha yüksek olmaktadır. Ancak, yüksek bağlayıcı miktarı yol kaplamasının stabilite değerini düşüreceğinden optimum miktarda bağlayıcı ile bitümlü sıcak karışımlar tasarlanmaktadır (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002; Tunç, 2007).

d) Esneklik (fleksibilite)

Esneklik, kaplama tabakasında çatlama meydana gelmeden eğilebilme durumu ve temel tabaklarında meydana gelebilecek oturmalara-çökmelere karşı adapte olma yeteneğidir. Yol inşasında dolgu kısmının yapımı sırasında, yol hattındaki tüm kesimlerin aynı taşıma değerine sahip olması imkânsızdır. Bu sebeple, bitümlü kaplamanın, küçük

çaptaki, farklı oturmalarla uyum sağlayabilecek esneklikte olması istenmektedir. Kaplamanın esnekliği, bitümlü bağlayıcı içeriği artışı ve boşluklu (açık) gradasyona sahip agregaların varlığı ile artmaktadır. Ancak, kaplamanın esnekliğini arttırırken yüksek bağlayıcı içeriği ile kaplamanın stabilite değerinin de azalacağı göz önünde bulundurulmalıdır (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002; Tunç, 2007).

e) Yorulmaya Karşı Direnç

Bitümlü sıcak karışımlarda yorulmaya karşı direnç, kaplama yüzeyinde çatlaklar meydana gelmeden tekrarlı yükler etkisi altında kaplamanın eğilmeye izin verme yeteneğidir. Kaplamaların rijitliği, bağlayıcı miktarı ve tabaka kalınlığı arttıkça yorulma mukavemeti de artmaktadır. Kaplamada meydana gelebilecek yorulma çatlaklarını engellemek için, karışımda çekme mukavemetine karşı koyacak malzemeler seçilmelidir (Tunç, 2007).

f) Kaymaya Karşı Direnç

Kaymaya karşı direnç, araçların güvenli bir şekilde frenlemesi ve kurbalarda savrulmadan yola devam edebilmesi için tekerlek ile kaplama yüzeyi arasındaki olması gereken sürtünmeyi temsil etmektedir. Kaplamanın kayma mukavemeti, pürüzlü, kırılmış ve cilalanmaya karşı direnci yüksek agrega sahip açık gradasyonlu karışımlar ile artmaktadır. Konforlu sürüşün sağlandığı aşınma tabakasında, aşınma direnci yüksek ve silisli, kırmataş agregaların silindirlerle kaplama yüzeyine gömülmesi ile kayma mukavemeti direnci arttırılabilmektedir (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002; Tunç, 2007).

g) İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, karışımın istenilen kıvam ve üniformalukta serilip sıkıştırılması sırasındaki kolaylığı ifade etmektedir. Düşük işlenebilirliğe sahip karışımlarda, serme ve sıkıştırma esnasında yeterli sıkışma sağlanamamakta ve bundan dolayı kaplamanın stabilite değeri düşmektedir. Ayrıca, düşük işlenebilirliğe sahip karışımlarda, homojen olmayan kaplamalar elde edilmekte ve zamanla kaplama yüzeyinde trafiğin etkisiyle yol yüzeyinde kopmalar meydana gelmektedir. Karışımın işlenebilirliğinde, agregaların yüzey yapısı, biçimi, kırılmış oranları ve yüzey yapıları ile bağlayıcının viskoz yapısı önemli rol oynamaktadır (Tunç, 2007).

h) Geçirimsizlik

Bitümlü sıcak karışımlardaki geçirimsizlik, kaplamaların içine su ve havanın geçişine karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir. Kaplamadaki boşluk oranı ile boşluklar arası irtibat ve kaplam yüzeyindeki su ve havanın geçişi için gerekli koridorlar sağlanmış olur. Bitümlü

bağlayıcı oranı, agrega granülometrisi ve sıkıştırmasının artması ile kaplamanın geçirimsizliği artmaktadır (Tunç, 2007). Bitümlü sıcak karışımların temel özelliklerine etki eden parametreler Tablo 1’de verilmiştir (Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2002).

Tablo 1. Bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etki eden parametreler

Karışım Özelliği	Bağlayıcı			Agrega			Yoğunluk (Sıkıştırma)		Isı		Yükleme Hızı		Kaplama Kalınlığı	
	Miktar		Katı	Katılık	Yoğunluk		Agrega Tipi	Yoğunluk (Sıkıştırma)	Isı	Yükleme Hızı	Kaplama Kalınlığı	Yükleme Hızı	Kaplama Kalınlığı	Kaplama Kalınlığı
	Fazla	Az			Çok	Az								
Stabilite	Opt.	(1)	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X
Rijitlik		(2)	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X
Dayanıklılık	X		X		X		X	X	(4)	X	X	X	X	X
Yorulma	X			X	X		X	X	(6)	X	X	X	X	X
Mükavemeti				X	X		X	X		X	X	X	X	X
Esneklik				X	X		X	X		X	X	X	X	X
Geçirgenlik	X		X		X		(5)	X	(7)	X	X	X	X	X
Kayma Direnci		X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X
İşlenebilirlik		(3)		X	X		X	X	X	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 kan ve su 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 sozulma, 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. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Oluşan Bozulmalar

Bitümlü kaplamalar kullanıma açıldıktan sonra, zamanla trafik ve iklimin olumsuz etkileriyle yol yapısında bazı kusurlar meydana gelmektedir. Yol kaplamalarında oluşan bu kusurların birçok sebebi olmakla birlikte, malzemelerin yanlış seçimi, bitümlü sıcak

karışımların üretim, serim veya sıkıştırma sırasındaki hataları ile kaplamalara uygulanan bakım ve onarımdaki eksikleri ön plana çıkmaktadır. Bitümlü kaplamalarda oluşan kusurlar, deformasyonlar (stabilite bozuklukları), ayrışmalar (yüzeysel kopmalar ve bozulmalar) ve çatlaklar olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilir (Tunç, 2007; Yılmaz B., 2016; Ilıcalı, Tayfur, Özen, Sönmez, & Eren, 2001).

❖ Deformasyonlar

Yol üstyapısının imalatından belli bir süre yol yüzeyinde kalıcı şekil değiştirmeler (deformasyonlar) meydana gelmektedir. Bu deformasyonlar yol eksenini boyunca veya yolun belli kesimlerinde oluşabilmektedir. Bu kusurlar, yol emniyeti ve sürüş konforunu olumsuz etkilemekte ve yol kaplamasının hizmet performansını düşürmektedir. Yol yüzeyinde meydana gelen deformasyonlara, genellikle düşük stabiliteye sahip bitümlü sıcak karışımlar neden olmaktadır (Tunç, 2007).

❖ Tekerlek izi

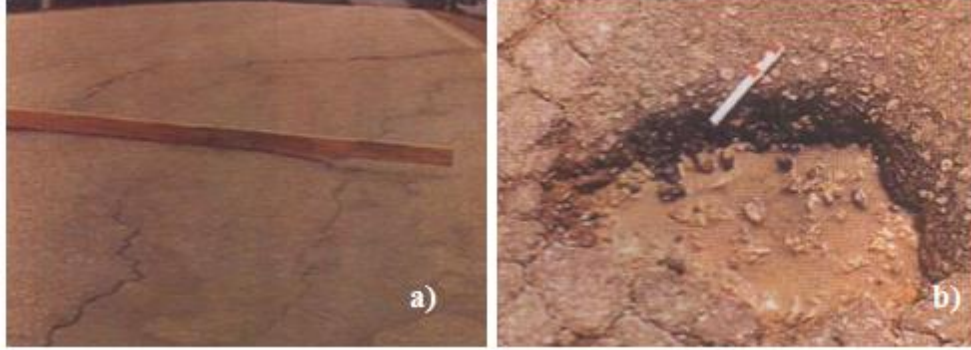
Tekerlek izi, yol üstyapısında sıklıkla görülen ve ağır trafiğin olduğu yerlerde meydana gelen bir deformasyon türüdür. Yol kaplamalarında oluşan tekerlek izlerinin birçok nedeni bulunmaktadır. Bu nedenler genel olarak bitümlü kaplama ve alt tabakalarla ilgili olsa da çevresel etkilerde göz ardı edilmeyecek derecede önemlidir. Tekerlek izi, yüksek bitüm yüzdesi, karışımın yetersiz sıkışması, doğal zeminin ve üst tabakaların yanıl hareketleri, alt tabakaların yetersiz kalınlığı ve hava sıcaklığının yüksek oluşu gibi nedenlere bağılı olarak oluşmaktadır. Yol yüzeylerinde meydana gelen tekerlek izi ve oluklar, suların birikmesiyle yolun kayma riskinin artmasına ve soğuk havadan kaynaklanan buz tabakalarının oluşmasına sebep olarak sürüşü olumsuz olarak etkilemektedir. Ayrıca, tekerlek izleri, seyir konforunu düşürerek şerit değiştirmek isteyen hızlı araçlar için de tehlikeli olmaktadır (Tunç, 2007; Ilıcalı, Tayfur, Özen, Sönmez, & Eren, 2001). Yol kaplaması üzerinde tekerlek izi deformasyonu Şekil 17’de gösterilmiştir.



Şekil 17. Tekerlek izi deformasyonu (URL-3)

❖ Oturmalar ve çökmeler

Oturmalar, dairesel ya da daşreye yakın boyutlarda ve kaplama tabakasının alt kısmında meydana gelen bozulmaların yüzeye yansıması sonucu oluşmaktadır. Kaplama tabakasındaki oturmaların oluşum nedenleri: su miktarının artması, yetersiz gradasyon, üniform olmayan sıkıştırma, drenaj ve zemin problemleri ve imalat sorunlarıdır (Şekil 18).



Şekil 18. Kaplama tabakasında meydana gelen oturma (a) ve çökme (b) (Bostancıoğlu, 2012)

❖ Ondülasyonlar (Dalgalanmalar veya Yığılmalar) ve Kabarmalar

Ondülasyonlar, trafik akışının olduğu yerlerde, yol yüzeyinde enine doğrultuda meydana gelen deformasyon türüdür. Dalga şekline benzeyen ve plastik bir bozulma olan ondülasyonlar, otobüs durakları, kavşaklar, tırmanma şeritleri gibi kısımlarda görülmektedir (Şekil 19). Yetersiz tabaka kalınlığı, düşük viskoziteli bağlayıcı, nem miktarı, düşük stabiliteli karışım, ağır taşıtların durma-kalkma hareketi gibi sebeplerden ondülasyonlar meydana gelmektedir (Yılmaz, 2016, Geçkil, 2008).



Şekil 19. Kaplama tabakasında görülen ondülasyonlar (Yılmaz, 2016)

Kabarmalar ise tabii zeminin veya üst tabakaların şişmesi sonucu kaplama tabakasının bölgesel olarak yukarı hareket etmesi şeklinde görülmektedir. Genel nedenleri ondülasyonlarla aynı olmakla beraber tabii zemindeki suyun donma-çözünmesinden de meydana gelmektedirler.

❖ Çatlaklar

Çatlaklar, yol yüzeyinde çevre, iklim ve trafiğin olumsuz etkisiyle farklı boyutlarda meydana gelen kusurlardır. Çatlaklar genellikle;

- Stabilitate çatlakları
- Yorulma çatlakları
- Yansıma çatlakları olmak üzere üç gruba ayrılmaktadırlar.

Stabilitate çatlakları, trafik yüklerinin etkisiyle kaplamanın alt kısmında oluşan çekme gerilmelerinin çekme mukavemetinden fazla olması sonucu meydana gelmektedir. Yorulma çatlakları ağır trafik yüklerinin tekrarlamasıyla kaplamanın yorulma dayanımını aşması sonucu oluşmaktadır. Yansıma çatlakları ise bozulmuş bir kaplamanın üzerine yeniden bir kaplama inşa edildiğinde, alttaki tabakada meydana gelen çatlakların üstteki tabakaya kadar ilerlemesidir (Tunç, 2007; Sönmez, Taştan, Yıldız, & Bayraklı, 2018, Yılmaz, 2016).

❖ Timsah sırtı çatlaklar (yorulma çatlakları)

Timsah sırtı ya da kümes teli görünümüne sahip, kaplama tabakasında ağır trafik yüklerinin tekrarlanmasından dolayı meydana gelen çekme gerilmesi dayanımının zamanla

aşılması il yorulma çatlakları oluşmaktadır. Trafiğin akış yönünde aralıklı olarak meydana gelen boyuna çatlaklar değişik boyutta bloklar halinde de olmaktadır (Şekil 20).



Şekil 20. Timsah sırtı yorulma çatlakları (Doğan, 2006)

❖ Düşük ısı çatlakları

Trafiğin olumsuz etkilerinden çok, soğuk havanın etkisiyle kaplama tabakasının büzülmesi sonucu oluşan enine doğrultudaki çatlaklardır (Şekil 21). Bu çatlakların meydana gelmesinin en önemli nedenleri bitümün kıvamı ve sıcaklığa olan duyarlılığıdır. Soğuk iklim bölgelerinde pentrasyon değeri ve penetrasyon indisi değerleri daha yüksek bitüm kullanmak bu tür çatlakların azalmasına yardımcı olmaktadır (Yılmaz, 2016; Geçkil 2008).



Şekil 21. Düşük ısı çatlağı (Yılmaz, 2016)

❖ Ayrışmalar

Aşınma tabakasında agrega danelerinin trafik, çevre ve iklimin etkisi ile küçük parçalar şeklinde ayrılarak kopması ve parçalanmasıdır. Genel itibariyle düşük kaliteli malzeme kullanımı, imalat kusurları, yetersiz adezyon, uygun olmayan agrega kullanımı, yanlış serim ve sıkıştırma gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır (Tunç, 2007; Geçkil,2008).

❖ Soyulmalar

Soyulma, agrega danelerini ince saran bitüm filminin su, kil ve trafiğin mekanik etkileriyle agregadan ayrılarak, agrega ile bağlayıcı arasındaki adeziv bağının zayıflamasıyla meydana gelmektedir. Temiz ve kuru agrega kullanımı, bağlayıcılık özelliği yüksek bitüm, ve yüksek viskoziteli bitüm kullanılması soyulmayı azaltan faktörlerdendir (Geçkil, 2008).

❖ Sökülmeler

Sökülmeler, çanak şeklinde ve farklı çaplardaki derinliklerde olabilen, bitüm ve agrega arasındaki bağ eksikliğinden kaynaklanan agregaların zamanla kaplama tabakasından koparak yavaş yavaş yüzeyden aşağı doğru koparak ayrılmasıdır (Şekil 22). İlk olarak ince malzemelerin kopmakta, daha sonra büyük parçalar koparak sökülmeler oluşmaktadır (Geçkil, 2008; Tunç, 2007).



Şekil 22. Kaplama tabakasında meydana gelen sökölme (URL-4)

1.6.3. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar

Bitümlü sıcak karışımları oluşturan iki ana malzemeden biri olan agregalar, kum, çakıl, kırma taş, cüruf ve diğer minerallerin herhangi bir bağlayıcı kullanılarak veya bağlayıcı kullanılmadan bir araya getirilmiş şekline denilmektedir (Tunç, 2007, Oruç, 1997, Koral,

2023). Kaplama performansında önemli etkisi olan agregalar, alttemel ve bağlayıcısız temel tabakalarının oransal olarak tamamını oluşturmaktadır. Agregalar, bitümlü sıcak karışımların ağırlıkça %90-95'ini, hacimce %80-85'ini oluşturmaktadır (Kuloğlu, 2006, Bozdemir, 2023)

Esnek üstyapılarda kullanılacak agregalardan trafik yüklerinden oluşan statik ve dinamik yüklere karşı koyabilecek, bitümle karıştırıldığında iyi aderans sağlayacak ve değişen hava şartlarına karşı koyabilecek özelliklerde olması istenmektedir (Geçkil, 2008; Selçuk, 2019). Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan agregaların; yüksek kayma ve sürtünme direncine, içsel sürtünmesi yeterli, yük altında kırılmaya karşı dirençli, bitümlü bağlayıcıyla yüksek adezyon oluşturabilecek, pürüzlü yapıya sahip olması gerekmektedir (Tunç, 2007; İssazoy, 2021).

Kaplama tabakalarında fazla gerilme alması ve trafiğin aşındırıcı etkisine daha çok maruz kalması nedeniyle bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan agregalar, temel tabakalarda kullanılan agregalara göre daha üstün özelliklere sahip olmalıdır. Bu sebeple agregaların şartnamelerde verilen fiziksel ve mekanik özellikleri sağlaması gerekmektedir (Tunç, 2007; Kizirgil, 2013).

- Agregaların Sınıflandırılması

Agregalar;

- ❖ minearolojik,
- ❖ boyut,
- ❖ gradasyon,
- ❖ biçim ve yüzey yapısı,
- ❖ porozite, yüzey alanı ve boşluk
- ❖ özgül ağırlık

olacak şekilde sınıflandırılmaktadırlar. Karayolu mühendisliğinde kullanılan malzemelerden biri olan agregalar, bitümlü sıcak karışımda kullanılan agregalar karışımların en önemli parçasını oluşturmaktadır. Bu nedenle kullanılan agregaların özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir (Aksağan, 2021).

- Minerolojik sınıflandırma

Agrega, mineralojik bileşimine bağlı olarak bir silika minerali, bir karbonat minerali veya bir mika minerali olarak sınıflandırılmaktadır. Agregalar elde edilmiş biçimlerine göre genel itibariyle; dere malzemesi, kırmataş ve yapay taşlar olarak kategorize edilmektedirler. Kum-çakıl karışımından oluşan dere malzemesi, birtakım negatif özelliklerinden dolayı

sadece alttemel tabakalarında kullanılırken, kırma çakıl ve kırma kum ise kırıcılarla kırıldıktan sonra yol üstyapısının tüm tabakalarında kullanılabilir. Yapay taşlar olarak kullanılan yüksek fırın cürufaları gevrek ve gözenekli yapıya sahip oldukları için yol kaplamalarında kullanılmazlar. Doğal kayaların taş ocaklarında konkasörler yardımıyla kırılması sonucu elde edilen kırma taş mineral agregaları, püskürük, tortul ve metamorfik olarak sınıflandırılmaktadırlar. Bu agregalar yol kaplamalarında kullanılacak en uygun agrega türlerindendir (Şimşek, 2020; İssazoy, 2021; Tunç, 2007). Püskürük kayalar, yüksek sıcaklıklarda eriyen magmanın soğuması sonucu meydana gelmektedirler. Çok sert bir yapıya sahip olmakla birlikte porozlulukları da oldukça düşüktür. Bu gruba bazalt, andezit, granit vb. kayalar dahildir. Tortul kayalar, yeryüzünde en çok görülen, su, rüzgâr, buz veya yerçekimi gibi dış etkenler tarafından taşınan ve deniz, göl, akarsu ve karalarda üst-üste birikmesi sonucu oluşmaktadırlar. Bu gruba kumtaşı, kalker, kum-çakıl vb. kayalar dâhil olmaktadır. Metamorfik kayalar ise kayaların yüksek basınç ve sıcaklıkla minerolojik ve dokusal değişime uğramasıyla meydana gelmişlerdir. Bu gruba, mermer, serpantin, kuvarsit, şist vb. kayalar girmektedir (Lavin, 2003; Tunç, 2007).

➤ Boyut sınıflandırması

Bitümlü sıcak karışım tasarımında kullanılan agregalar kaba, ince ve mineral filler olmak üzere sınıflandırılmaktadırlar.

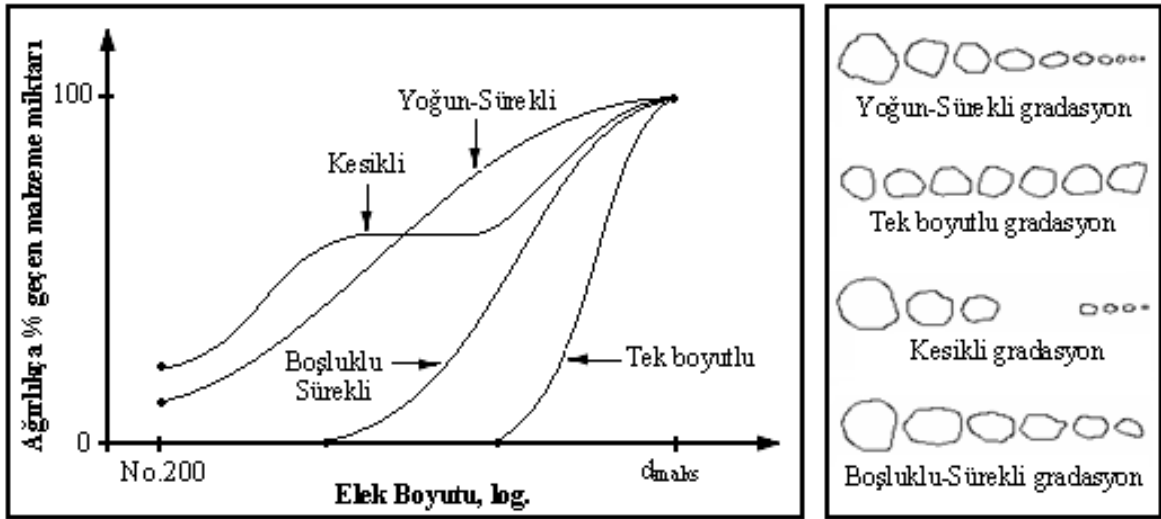
Kaba agrega: No. 4 (4.76 mm) eleğin üzerinde kalan kırılmış ve elenmiş, taş, çakıl veya bunların karışımından oluşan agrega,

İnce agrega: No.4 elekten geçen ve No.200 (0.075 mm) eleğin üzerinde kalan, doğal kum, ezilmiş kum (ince çakıl) veya ikisinin kombinasyonu olan agrega,

Filler agrega: No.200 elekten geçen (en az %65'i No. 200 elekten geçen mineral taş tozu veya taş unu) agrega olarak ifade edilmektedir (Keçeciler & Akkol, 1990; Tunç, 2007).

➤ Gradasyon sınıflandırması

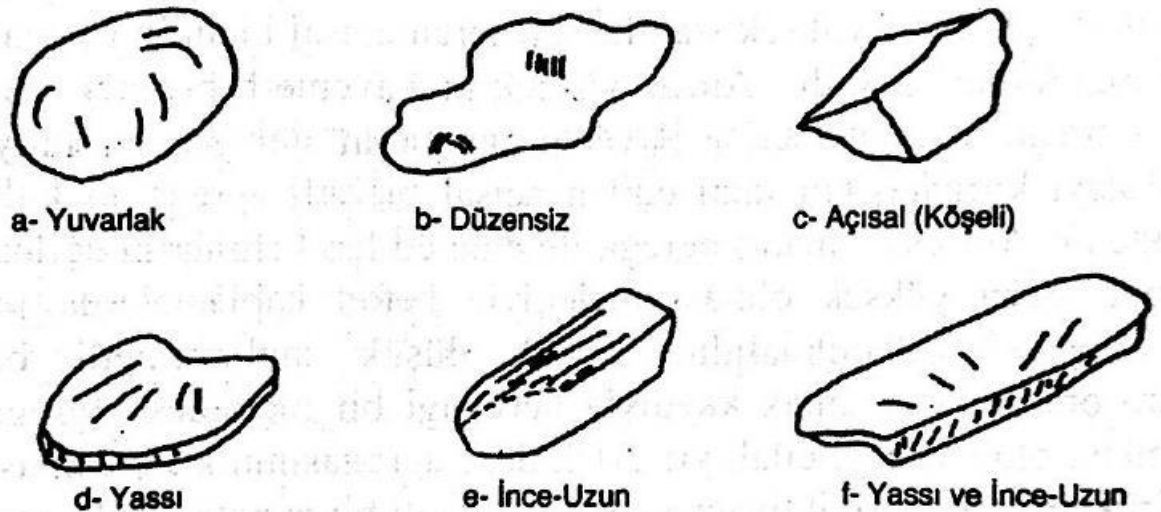
Gradasyon, agrega harmanını meydana getiren danelerin boyutlarına göre dağılımı anlamına gelmektedir. Agregada gradasyonu ise bitümlü sıcak karışımlarda karışımın işlenebilirlik ve stabilite özelliğini belirlemede rol oynamaktadır. Agregalar, gradasyon sınıflandırması bakımından kesikli, yoğun-sürekli, boşluklu-sürekli ve tek boyutlu gradasyon olmak üzere dört farklı şekilde kategorize edilmektedir. Bu gradasyon çeşitleri, elek analizi grafiğinde çizildiğinde kolaylıkla ayırt edilebilir ve farklı özelliklere sahip oldukları görülmektedir (Şekil 23).



Şekil 23. Agrega Gradasyon Tipleri (a) ve Görsel Dağılımı (b) (Tunç, 2007)

➤ Biçim ve yüzey yapısı sınıflandırması

Agrega danelerinin biçimleri, kaplama tabakasında kullanılan karışımların sıkışmaya karşı gösterdiği direnci, yoğunluğu, stabilitesi, işlenebilirliği gibi birtakım özelliklerine doğrudan etki etmektedirler. Şekil 24'te agrega danelerinin biçim olarak sınıflandırılması verilmiştir. Yuvarlak biçimli agregaların açısallık (köşelli) biçimli agregalara göre işlenebilirlik özelliği daha fazla olurken deformasyona karşı gösterdiği direnç açısından köşelli agregalar daha üstün özellik göstermektedirler (Tunç, 2007).



Şekil 24. Agrega danelerinin biçimsel olarak sınıflandırılması (Tunç, 2007)

Agrega danelerinin yüzey yapısı; agrega danelerinin yüzey pürüzlülüğünü ya da cilalanmayı ifade etmekle birlikte bağlayıcıyla kurduğu bağın üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Pürüzlü yüzey dokusuna sahip agregalar, bağlayıcı ile iyi bir kenetlenme oluşturarak kaplamanın kayma direncini arttırmaktadırlar. Eğer agrega danelerinin yüzey pürüzlülüğü fazla ise karışımın boşluk hacmi ve sıkışmaya karşı direnci gibi olumsuz özellikler de artmaktadır (Tunç, 2007; Umar & Açar, 1991; Balta, 2004).

➤ Porozite, yüzey alanı ve boşluk oranı sınıflandırması

Agrega danelerindeki toplam boşluk hacminin, agrega danesi hacmine oranı porozite olarak tanımlanmaktadır. Bitümlü bağlayıcı ile agrega arasındaki adezif bağın direncini arttıracak kadar agregaların yeterli poroziteye sahip olması istenmektedir. Bu durumun, karışımlarda suyun etkisiyle oluşacak soyulmanın azalmasına ve stabilitenin artmasına neden olmaktadır (Öbek, 2021; İnce, 2019). Şekil 25'te porozitenin üç farklı şekilde sınıflandırılması verilmiştir.

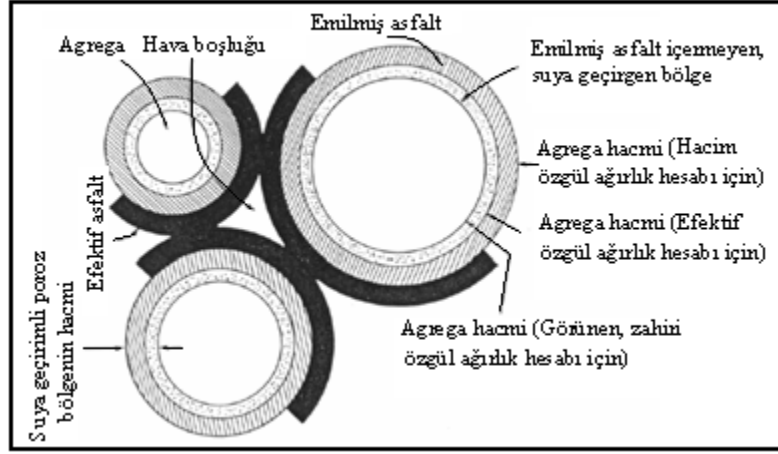


Şekil 25. Porozite sınıflandırılması (Tunç, 2007)

Agrega danelerindeki boşlukların toplamı ile agrega danelerinin yüzey alanlarının toplamı, bağlayıcılı ya da bağlayıcı kullanmadan hazırlanan karışımların bütün özelliklerine doğrudan etki eden önemli parametrelerden biridir (Geçkil, 2008; Tunç, 2007).

➤ Özgül ağırlık sınıflandırması

Özgül ağırlık, bir maddenin birim hacim ağırlığının, aynı hacimde 25°C'deki suyun ağırlığına bölünmesiyle elde edilmektedir. Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılacak bağlayıcı oranını tespit etmek için agrega özgül ağırlığının bilinmesi gerekmektedir. Karışımlarda kullanılacak agregalar için seçilecek özgül ağırlık, sıkıştırılmış kaplama tabakası için hesaplanan hava boşlukları miktarını en doğru şekilde vermelidir (Önal, 1993). Özgül ağırlık hesaplamalarında kullanılan agregaya ait hacim ifadeleri Şekil 26'da gösterilmiştir.



Şekil 26. Agreganın özgül ağırlık hesaplamalarında kullanılan hacimler (Yılmaz, 2016)

1.6.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Tasarım Yöntemleri

Bitümlü sıcak karışımların tasarımında kullanılan birçok yöntem vardır. Bunlar arasında en çok onaylanmış ve kullanılan Marshall ve Hveem olmak üzere iki tasarım yöntemi mevcuttur. Günümüzde artan taşıt miktarı ve dingil yüklerinden dolayı bitümlü sıcak karışımların deformasyona uğraması nedeniyle gelişmiş teknolojiyle beraber bu yöntemlere ek olarak her türlü hava şartlarında yolun performansını koruyarak hizmet vermesini amaçlayan Superpave tasarım yöntemi de geliştirilmiştir.

1.6.5. Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler

Üstyapı tasarımının analitik kısmında malzemelerin muhtemel bozulma şekillerini ortaya çıkaran en önemli performans özellikleri, bitümlü tabakalarda meydana gelen yorulma çatlağı ile kalıcı deformasyondur (Shell Bitüm El Kitabı, 2004).

Laboratuar deneylerindeki sıcaklık, yükleme süresi, gerilme durumları, sıkıştırma gibi koşullar mümkün olduğunca arazi şartlarına benzer hale getirilerek arazideki davranışın belirli bazı yönlerini sağlayan birçok basitleştirilmiş deney bulunmaktadır. Bu deneylerden yaygın olarak uygulananlarından bazıları: Marshall stabilite ve akma, dolaylı çekme mukavemeti (ITS), Modifiye Lottman, dinamik sünme, dolaylı çekme esneklik modülü (ITSM), dolaylı çekme yorulma deneyleridir.

- Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

Marshall stabilite ve akma deneyi, karışım numunelerinin deformasyona karşı göstermiş olduğu en yüksek dayanım (stabilite) ve en yüksek yüke ulaştığı anda numune üzerinde meydana gelebilecek düşey yöndeki deformasyonları (akma) belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların Marshall metodu ile tasarımı yapılırken öncelikle karışımda kullanılacak agreganın elek analizi yapılmaktadır. Elek analizinden sonra karışımın granülometrisi belirlenerek granülometri eğrisi çizilir. Belirlenen agrega gradasyonu ve uygun bağlayıcı ile sıcak karışım numuneleri hazırlanır ve standart kalıplar (63.5 mm yükseklikte, çap 101.6mm) içerisinde sıkıştırılmaktadır. Numunelerin yüksekliği eğer 63.5 mm'den fazla ise bu numuneler için düzeltme faktörü belirlenerek stabilite değerleri bu durum göz önüne alınarak hesaplanır. Deneyde, sıkıştırılmış olan numuneler kalıptan çıkarılarak numunenin yükseklik ve çeşitli ağırlıkları değerleri ölçülür. Numuneler daha sonra sıcaklığı $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ olan su banyosuna konularak yaklaşık 40 dakika kadar bekletildikten sonra sudan çıkarılan numuneler yaklaşık 30 sn içerisinde cihazın kırma çenesine yerleştirilmelidir. Cihazda 50 ± 2 mm/dak hızla numunenin yüklenerek kırılması sağlanır (Şekil 27). Deney bitiminde otomatik olarak elde edilen stabilite ve akma değerleri kaydedilir (İnce, 2019; Yamaç, 2015).



Şekil 27. Marshall deney aleti

Ayrıca, deney sonunda okunan stabilite ve akma değerlerinin birbirine oranlanmasıyla Marshall oranı (MQ) değeri hesaplanır. MQ değeri karışımların sertliğinin ve deformasyona karşı direncini gösteren bir parametredir.

- Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi (ITS)

ITS deneyi, genellikle bitümlü sıcak karışımların çekme mukavemeti özelliklerini ve karışımın kohezyon kuvvetini saptamak amacıyla kullanılmaktadır. Ek olarak, karışımların yorulma ve sıcaklık nedeniyle oluşan çekme gerilmelerini de karakterize etmek için uygulanmaktadır (Geçkil, 2008; Yılmaz, 2016; Bostancıoğlu, 2012).

Deney Marshall deney aleti ve ITS deney aparatlarıyla gerçekleştirilmektedir (Şekil 28). Marshall stabilite cihazına yerleştirilen karışım numunesine 50mm/dakika hız sabit basınçta uygulanır ve numune kırılıncaya kadar deneye devam edilir (İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2001; Yılmaz, 2016).



Şekil 28. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi

Deney bittikten sonra ITS değeri, Denklem 9 yardımıyla hesaplanmaktadır. Burada, P_{maks} : maximum yük (kN), h : numune yüksekliği (mm) ve d : numune çapı (mm)'ni ifade etmektedir.

$$ITS = [(2P_{maks} / \pi h d) \times 100] \quad (9)$$

- Modifiye Lottman Deneyi

Modifiye Lottman deneyi, AASHTO T283 standardına göre bitümlü sıcak karışımların suyun olumsuz etkilerine karşı hassasiyetinin belirlenmesi için uygulanmaktadır. Kaplama tabakasında su veya nemin bulunması, bitüm ile agrega arasındaki bağın zayıflamasına ve çeşitli bozulmalara neden olmaktadır (İnce, 2019; Geçkil, 2008).

Deneyde, altı adet sıcak karışım numunesi koşullandırılmamış ve koşullandırılmış olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Koşullandırılmış numuneleri suya doymun hale getirmek için vakum işlemi uygulanmaktadır. Daha sonra numuneler streç film ile sarılarak 16 saat boyunca -18°C sıcaklıktaki soğutucuda bekletilir ve süre bitiminde bu numuneler 24 saat boyunca 60°C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilir. Su banyosundan alınan numuneler 2 saat boyunca 25°C sıcaklıktaki banyosunda bekletilir. Bu işlemlerden sonra koşullandırılmamış (ITS_{kuru}) ve koşullandırılmış ($ITS_{yaş}$) numuneler Marshall cihazıyla teste tabii tutulur. Deney sonunda, dolaylı çekme mukavemeti oranı (ITSR) Denklem 10 yardımıyla hesaplanır.

$$ITSR = (ITS_{yaş} / ITS_{kuru}) \times 100 \quad (10)$$

Bitümlü sıcak karışımın sudan kaynaklı bozulmalara karşı direncin en az %70 olması beklenmektedir. %70'ten daha düşük ITSR değerinin olması, karışımların su etkilerine karşı dirençlerinin yeterli olmadığı ve suya karşı soyulma önleyici katkı kullanılarak karışımın direncinin artırılması istenmektedir (Geçkil, 2008).

- Dinamik (Tekrarlı) Sünme Deneyi

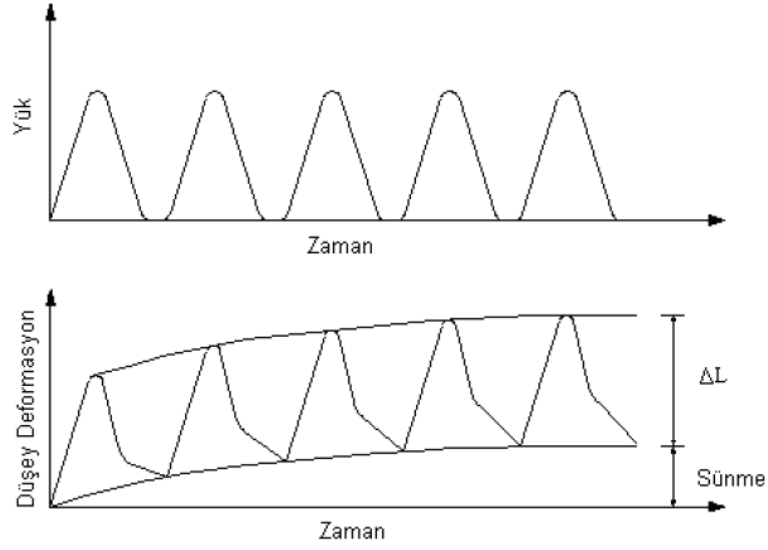
Dinamik sünme deneyi, bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona (tekerlek izi) karşı dayanımını tespit etmek için yapılmaktadır. Deney için asfalt tester cihazı kullanılarak (Şekil 29), silindirik numune belirli bir vuruş periyoduna ve tek eksenli basınç yükünün

etkisine bırakılarak uygulanan her yük tekrarından ardından kalıcı deformasyon ölçülmektedir (Oruç, 2002; Geçkil, 2008).



Şekil 29. Asfalt tester cihazı

Deneye başlamadan önce, ölçüm yapılacak numunenin sıcaklığının her noktada eşit olabilmesi için numune en az 3 saat deneyin yapılacağı sıcaklıkta bekletilmektedir. Deneyin yazılımının olduğu programa numuneye ilişkin veriler yazıldıktan sonra numune yükleme bölgesine yerleştirilip LVDT'ler ayarlanır. Deney başlatılarak ön yükleme yapılır ve tekrarlı yük normal gerilme seviyesinde uygulanır. Şekil 30'da numuneye ait yük-zaman ve deformasyon ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 30. Yük-zaman ve deformasyon ilişkisi (Alataş & İstek, 2020)

1.6.5.1. Dolaylı Çekme Yorulma Deneyi

Bitümlü sıcak karışımlarda en çok görülen bozulma türü olan yorulma çatlakları, trafiğin tekarlı yükleri etkisi altında zamanla artar ve kaplama tabakasının rijitliği azalmaktadır (Yılmaz, 2011; İnce, 2019).

Bitümlü sıcak karışımlarda kaplama tabakasındaki yorulma dayanımlarını belirlemek için pek çok deney bulunmaktadır. Bu deneylerin numunede oluşan gerilme artışları, yükleme şekli ve numune geometrisi farklılık gösterebilmektedir. Yorulma deneylerinde genel olarak, deformasyon ya da gerilme sabit tutularak kontrollü bir şekilde deney yapılmaktadır (Bozdemir, 2023; Yılmaz, 2016; Baykara, 2021; İnce, 2019).

Deneyde numuneler minimum 3 saat iklimlendirme kabinde bekletilir ve süre sonunda numuneye ait girdiler programa girildikten sonra numune çerçeve içerisine yerleştirilir (Şekil 31). Düşey deformasyonu tespit edecek LVDT sensörleri ayarlanarak deney başlatılır. Numuneler kırılncaya kadar devam ettirilir. Numune kırılınca cihaz, numuneye ait yük tekrerrür sayısı – deformasyon grafiğini belirlenmiş olmaktadır (Yamaç, 2015; İnce, 2019; Yılmaz, 2011).



Şekil 31. Dolaylı çekme yorulma deney düzeneği (Bozdemir, 2023)

1.7. Bitümün ve Bitümlü Karışımların Modifikasyonu

Tüm dünyada, nüfusun hızla artması ve yaşam standartlarının yükselmesiyle üst yapı tabakalarındaki aşırı trafik hacminin ve ağır trafik yüklerinin artması ve değişen iklim şartlarının olumsuz etkisiyle kaplama tabakasında birtakım bozulmalar meydana gelmektedir. Bu bozulmalar yüksek sıcaklıklarda meydana gelen tekerlek izi, orta sıcaklıklarda yorulma, düşük sıcaklıklarda oluşan çatlama şeklinde görülmektedir. Oluşan bu kalıcı deformasyonları azaltmak, kaplamaların performans özelliklerini iyileştirmek, bakım-onarım maliyetini azaltmak, yol kalitesini ve servis ömrünü arttırmak için çoğu araştırmacı bitümlü bağlayıcılara veya sıcak karışımlara birçok çeşitte ve tipte değişen miktarlarda katkı maddeleri ilave ederek bitüm modifikasyonunu temel alan çalışmalar yapmışlardır.

Modifikasyon işlemi, modifyer olarak kullanılan katkı maddelerinin belirli oranlarda ve şartlarda (sıcaklık, hız, süre vb.) doğrudan bitümlü bağlayıcı içerisine ilave edildiği gibi bitümlü sıcak karışım plentinde bitümlü karışım içerisine direkt ilave edilerek de gerçekleştirilmektedir. Böylece oluşan bağlayıcıya “modifiye bitüm”, bitümlü sıcak karışıma ise “modifiye karışım” denilmektedir. Bitüm modifikasyonu karışım modifikasyonuna göre bağlayıcının kısa sürede ve daha hızlı deneye tabii tutularak sonuçların elde edilmesi bakımından daha çok tercih edilmektedir. Fakat bitüm modifikasyonunda bağlayıcının özelliklerinin belirlenmesi, taşınma ve depolanması söz

konusu iken karışım modifikasyonunda modifiyer ilavesi için karıştırma ekipmanı, taşınma ve depolama sorunları gibi sorunlar söz konusu olmaktadır (Asfalt ve Uygulamaları, 2001).

Genel anlamda modifikasyonun amacı, bitüm ve bitümlü karışımların yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı dirençli olması, düşük sıcaklıklarda da çatlamalara ve kırılmalara karşı dirençli olmaları beklenmektedir. İlave olarak su etkisiyle kaplama tabakasında meydana gelecek soyulmalara karşı dirençli olması ve yüzeyde istenen kayma direncinin sürüş emniyetinin artırılması da amaçlanmaktadır (Birliker, 1998).

Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı maddelerinin birtakım belli başlı özelliklerde olması beklenmektedir. Bunlar;

- ❖ Kolay ve düşük maliyetli olmaları,
- ❖ Yüksek sıcaklıklarda yapısal bozulmalara uğramamaları,
- ❖ Bitüm matrisinde ve karışım içerisinde homojen olarak dağılım sağlamaları,
- ❖ Yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında yeterince viskoz yapıda olmaları,
- ❖ Düşük sıcaklıklarda bitümün sert olmamasını sağlaması,
- ❖ Ülke ekonomisi açısından ucuz maliyetli olmaları istenmektedir (Whiteoak, 2004).

Modifikasyon işleminde kullanılan katkı maddelerine ait sınıflandırma farklı şekillerde de yapılabilmektedir (Tablo 2). Yaygın olarak bitüm modifiyerlerinin bozulmalar üzerindeki olumlu etkileri de Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 2. Katkı maddelerine ait genel sınıflandırma (Asfalt ve Uygulamaları, 2001)

Tip	Özellikler	Modifiyerlerin Bağlayıcı Kıvamına Genel Etkisi
1. Filler	- Mineral Filler - Taş Tozu - Kireç - Portland Çimentosu - Uçucu Kül - Karbon Siyahı - Sülfür	Sertleştirme
2. Genleştirici (Ekstender)	- Sülfür - Lignin (Odun Özü)	Sertleştirme
3. Kauçuk a. Doğal Lateks b. Yapay Lateks c. Blok Kopolimer d. İşlenmiş Kauçuk	POLİMERLER	-
4. Plastik		Sertleştirme
5. Bileşim		-
6. Fiber	- Doğal: Asbest - Taş Yünü - Yapay: Polipropilen - Polyester - Fiberglas	Sertleştirme
7. Oksidan	Manganez Tuzu	Sertleştirme
8. Antioksidan	- Kurşun Karışımları - Karbon - Kalsiyum Tuzu	Yumuşatma
9. Hidrokarbon	- Yeniden Kullanma ve Gençleştirme Yağları - Sertleştirme ve Doğal Asfaltlar	Yumuşatma veya Sertleştirme
10. Soyulma Önleyici	- Aminler - Kireç	Yumuşatma

Tablo 3. Yaygın kullanılan modifiyerlerin bozulmalar üzerindeki etkileri (Yılmaz, 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 bileşikleri	x				
Hidrokarbonlar	Aromatikler			x		
	Naftenik					
	Parafmiks/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	
	Gilsonit	x			x	
Soyulma önleyiciler	Aminler: Amidoaminler				x	
	Poliaminler				x	
	Poliamidler				x	
	Organo-metalikler				x	
Fiberler	Polipropilen	x	x	x		
	Polyester	x				
	Fiberglas					
	Çelik	x	x	x		
	Güçlendiriciler	x	x	x		
	Doğal: Selüloz	x				
	Mineral	x				
Antioksidanlar	Karbamatlar: Kurşun			x		x
	Çinko			x		x
	Siyah karbon	x				x
	Kalsiyum tuzlar					x
	Fenoller					x
	Aminler				x	x

1.8. Yapısal Analiz Yöntemleri

Bu bölümde, yeni bor katkılı tall yağı bileşiğinin tek başına ya da belirli oranlarda bağlayıcıya eklenerek modifiye bağlayıcıların kimyasal, morfolojik ve ısı davranışını belirlemek için uygulanan FT-IR, SEM, TG, XRD ve DSC analiz yöntemleri detaylı olarak ele alınmıştır.

1.8.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrumu (FT-IR)

Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), basit, kolay, hızlı sonuç veren, uygun maliyetli ve numuneye zarar vermeksizin yspılan analitik bir inceleme yöntemidir (Padhi & Behera, 2022). IR spektrumları moleküler türlerdeki bağların karakteristiğidir; bu nedenle sıklıkla maddelerin 'parmak izini' almak ve bunların kimliğini, kalitesini ve safsızlıklarını belirlemek için kullanılmaktadır (Tranter, 2017). FT-IR spektroskopisi bitümlü bağlayıcılar için yüksek kalitede bitümün yapısında meydana gelen değişimleri ya da modifiye bağlayıcı içerisidenki katkı maddelerine ait gerilim bantlarını ve piklerdeki değişimi göstermektedir (Wetekama & Mollenhauer, 2023). FTIR testi, bitümlü bağlayıcılar için genellikle tarama spektrumu 4 cm^{-1} çözünürlükle $4000\text{-}500\text{ cm}^{-1}$ arasında değişmekle birlikte, bağlayıcıların fonksiyonel gruplarında modifikasyon ve yaşlanma sonrasında meydana gelen değişimi ölçmek için kullanılmaktadır.

1.8.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), parçacık boyutunu, şeklini ve dokusunu belirlemek için mikro metreden nanometre boyutlarına kadar ölçmeye izin veren, yalnızca miligram miktarlarda malzemenin kullanılabildiği bir tekniktir. SEM, bitümlü bağlayıcıların ve karışımların kırılma morfolojisi, reolojik özellikler, katkı maddesi ve agrega arasındaki modifikasyon mekanizması gibi mikromorfolojik özelliklerinin araştırılması için kullanılmaktadır. SEM tekniği, bitüm matrisinin karışımın diğer bileşenleri ile uyumsuzluğundan kaynaklanan mini çatlakların önleme etkisi nedeniyle, bağlayıcı ile yeni malzemelerin denenmesine ve uygulanmasına mühendislik açısından imkân sağlamaktadır.

1.8.3. Termogravimetrik Analiz (TGA)

Termogravimetrik analiz (TGA), malzemelerin termal stabilitesini belirlemek için kullanılan alternatif, ucuz, hızlı ve kullanımı kolay güçlü bir tekniktir. Analiz (TGA) yönteminde, malzemeler azot atmosferinde 10°C/dk hızla 500°C'ye kadar ısıtılmakta ve sıcaklık artışından dolayı meydana gelen kütle kayıpları belirlenmektedir. Elde edilen sıcaklık-kütle kaybı grafiğinden, kırılmanın meydana geldiği sıcaklık değeri bozulma sıcaklığı olarak tespit edilmektedir (Lu, Ma, Ye, & Huang, 2022, Ahmedzade, Alataş, & Geçkil, 2008). DTG eğrileri, TG eğrilerinin birinci türevi alınarak elde edilip kütle değişiminin zaman veya sıcaklığa bağlı değişimini göstermektedir.

1.8.4. X-Işını Kırınım Yöntemi (XRD)

Temel olarak XRD, malzemedeki kristal fazın atomik düzeni ve homojenliğinin tanımlanmasına yönelik yapılan numuneye zarar vermeyen bir tekniktir. Atomun saçılmasından oluşan kırınım modeli, malzemenin bünyesindeki atomların dizilimi hakkında bilgi vermektedir (Azahar, Jaya, Hainin, Hasan, & Shaffie, 2019). XRD analizi, bitümlü bağlayıcının yapısındaki kristal, amorf vb. bölgeleri tanımlamak ve bitümün yapısal özelliklerini analiz etmek için kullanılmaktadır (Alhumaidan, Hauser, Rana, Lababidi, & Behbehani, 2015).

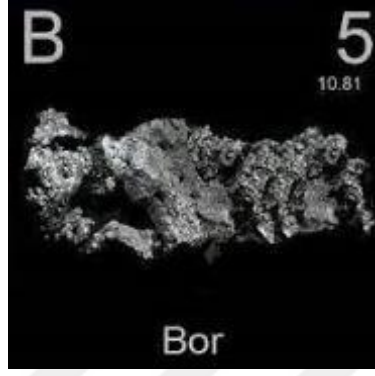
1.8.5. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)

DSC analizi, malzemelerin camsı geçiş ve erime sıcaklıkları gibi termal özelliklerini, belirlemek için yapılmaktadır (Başkent, 2016, Gu & Burgess, 2014). DSC, değişen sıcaklıkla birlikte katı/sıvı oranında değişiklikler sergileyen karmaşık çok fazlı bir karışım olan bitümlü bağlayıcının araştırılmasında etkili bir analiz yöntemidir. Ek olarak, asfaltın yüksek ve düşük sıcaklık özelliklerinin yanı sıra sıcaklık hassasiyeti hakkında da bilgi sağlamaktadır (Zhang, Zhou, Ping Zou, Hu, & Cao, 2024).

1.9. Bor

Yeryüzünde 51.yaygın element olan bor, periyodik tablonun IIIA grubunda bulunan B simgesiyle ifade edilmektedir. Atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 g/mol, yoğunluğu 2,34

g/cm³, ergime noktası 2200°C olup metal ve ametal arasında yarı iletken özellik göstermektedir. Bor, kristal ya da amorf yapıda bir elementtir, boratlar ve borosilikatlar halinde doğada bulunmaktadır (Yenmez, 2009, URL-5, 2023, Smith, 1995, Okumuş, 2021). Bor cevherine ait görsel Şekil 32’de verilmiştir.



Şekil 32. Bor cevherine ait görsel

Bor elementi doğada serbest halde bulunmamakta ve 150’den fazla mineralin yapısı içinde yer almaktadır (Sür, Sür, & Yiğitbaşıoğlu, 2001, Karaağaç, 2015). Bor mineralleri; sodyum, magnezyum, kalsiyum elementleri ile hidrat bileşikler halinde bulunurlar ve yapılarında farklı miktarlarda bor oksit (B_2O_3) içermektedirler (Bayar, 2002). Bor minerallerinden en yaygın olanları ve ticari önemi bulunanlar; Tinkal (Boraks), Koleanit, Üleksit, Hidroborasit, Pandemit ve Kernit’tir. Bor minerallerinin değeri içerdiği B_2O_3 miktarı ile ölçülmektedir. Yüksek oranda B_2O_3 bileşiği bulunduran bor mineralleri daha değerli olarak düşünülmektedir. Ticari önemi bulunan bor minerallerinin Türkiye’de ve dünyada bulundukları yerler Tablo 4’te gösterilmiştir (Yenialaca, 2009).

Tablo 4. Ticari önemi olan bor minerallerinin bulunduğu bölgeler (Yenialaca, 2009)

Mineral	Bulunduğu Yer
Tinkal	Türkiye (Kırka, Emet, Bigadiç), Arjantin, ABD
Koleanit	Emet, Bigadiç, ABD
Üleksit	Bigadiç, Kırka, Emet, Arjantin
Hidroborasit	Emet, Rusya, Arjantin
Pandemit	Sultançayır, Bigadiç
Kernit	Kırka, ABD, Arjantin

Dünya ticari bor mineral rezervleri ABD Kaliforniya Eyaletinin güneyinde bulunan Mojave Çölü, Güney Amerika'da bulunan And Kemer, Türkiye'yi de içeren Güney-Orta Asya Orojenik Kemer ve Doğu Rusya'da toplanmaktadır (Bideci, 2013, Tombal, Özkan, Ünver, & Osmanlıoğlu, 2016, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2017). Dünyadaki en önemli bor madeni yatakları Türkiye, Rusya, ABD ve Güney Amerika'da bulunmaktadır (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001). Peru, Arjantin, Çin, Bolivya, Şili, Kazakistan ve Sırbistan ise önemli miktarlarda bor rezervlerinin bulunduğu diğer bor yataklarıdır. Dünyadaki toplam bor rezervi B_2O_3 bazında tahmini değerleri ve dünyadaki bor rezervlerinin ülkeler bazındaki dağılımı Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Dünyadaki bor rezervleri (Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2018)

Ülkeler	Toplam Rezerv (Bin Ton B_2O_3)	Dağılım (% B_2O_3)
Türkiye	948.712	73.4
Rusya	100.000	7.7
ABD	80.000	6.2
Peru	22.000	7.7
Arjantin	9.000	0.7
Çin	36.000	2.8
Bolivya	19.000	1.5
Şili	41.000	3.2
Kazakistan	15.000	1.2
Sırbistan	21.000	1.6
TOPLAM	1.310.300	100

Türkiye, dünyada en fazla bor rezervine sahip ülke olmakla birlikte, dünyadaki toplam bor rezervinin %73,4'üne sahiptir. Türkiye'de mevcut rezervin bilinen rezervden daha fazla olduğu yönündeki araştırmalar hala devam ederken, Türkiye'nin dünyadaki bor rezervinin daha büyük bir kısmına sahip olabileceği düşünülmektedir. Türkiye'deki bor madeni rezervlerinin ömrü ise diğer ülkelere göre daha uzundur (TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 2088). Türkiye'de tıncal Kırka/Eskişehir bölgesinde, kolemanit Emet/Kütahya, Bigadiç/Balıkesir ve Kestelek/Bursa bölgelerinde, üleksit ise Bigadiç/Balıkesir bölgesinde bulunmaktadır. Ayrıca, Kestelek/Bursa bölgesinde üleksit yan ürün olarak üretilmektedir (Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2018, Helvacı, 2015, Helvacı, 2004). Türkiye bor rezervlerinin mineral bazındaki miktarları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Türkiye’de bor rezervlerinin mineral bazında miktarları (Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2018)

Bölge	Cevher Türü	Miktar (Ton)
Emet	Kolemant-Üleksit-Probertit	1.811.072.520
Kırka	Tinkal	824.720.950
Bigadiç	Kolemanit-Üleksit	628.350.480
Kestelek	Kolemanit	5.254.920
	TOPLAM	3.269.398.870

Borun kullanım alanları, gelişen ve ilerleyen teknolojiyle birlikte gün geçtikçe artmaktadır. Sanayi üretiminin temel stratejik hammaddelerinden biri olma özelliği daha da belirginleşen bor minerali, eklendiği malzemelerin katma değerini oldukça yükseltmesinden dolayı “sanayinin tuzu” olarak adlandırılmaktadır (TMMOB Metalürji Mühendisleri Odası, 2003). Bor minerallerinin ve bu minerallerden elde edilen ürünlerin cam, deterjan, elektronik, enerji, fotoğrafçılık, kozmetik, iletişim, inşaat, kağıt, kauçuk ve plastik, kimya, ilaç, metalürji, nükleer, otomobil, makine, seramik, tıp, tekstil, uzay gibi çeşitli sanayi dallarında kullanım alanları bulunmaktadır (Çalık, 2002).

Diborantrioksit (B_2O_3), borik anhidrit ya da susuz borik asit olarak adlandırılmaktadır. Genellikle borik asitin yüksek sıcaklıklarda dehidrasyonu ile üretilmektedir. Bor oksit, bor bileşikleri içerisinde ticari değere sahip olan tek oksitli bileşiktir. Rensiz, camsı ve sert yapılı katı halde bulunmaktadır. Amorf veya camsı yapıda bulunabilir (Şekil 33). Yaygın kullanım alanlarından biri cam sanayiidir. Bunun yanı sıra seramik üretiminde, optik malzemelerde, sırlarda, düşük ısı genleşme gerektiren (emaye vb.) malzemelerin imalatında, tarım ilaçlarında, deterjanlarda ve ağartıcılarda kullanılmaktadır. Ayrıca birçok reaksiyonda katalizör olarak kullanılır. Pek çok bor bileşiğinin de başlangıç maddesidir. Cam üretim prosesinde borik asit yerine bor oksit kullanılması enerji ve hammadde avantajı sağlamaktadır (Ediz & Özdağ 2001, Kararağaç 2015).



Şekil 33. Bor oksit

1.10. Tall Yağı

Tall yağı, kâğıt fabrikalarında üretim prosesi sonunda ortaya çıkan bir yan üründür. Yapı itibariyle büyük oranda yağ asitleri ve reçineden meydana gelmektedir. Ayrıca içerisinde az miktarda sabunlaşmayan maddeler de bulunmaktadır (Keskin, 2005). Tall yağına ait görsel Şekil 34’te verilmiştir.



Şekil 34. Tall yağı

Tall yağı, depolama tankında dinlenmiş olan sabun, reaktör tankına belli seviyeye kadar doldurulmaktadır. Doldurma işleminden sonra reaktör tankında bulunan karıştırıcı vasıtasıyla bir süre karıştırılmaktadır. Karıştırma işleminden sonra sabun dinlendirilmektedir. Tall yağı üretimine geçmeden, reaktör tankında mevcut olan ve dinlenen sabunun alt taban kısmında bulunan likör ince ürün tankına pompolanmaktadır. Bu işlem tamamlandıktan hemen sonra tanktaki karıştırıcı tekrar çalıştırılarak sirkülasyon işlemi başlatılmaktadır. Sabunun sıcaklığını 85°C’ye kadar ısıtmak için karıştırma işlemi ile eş

zamanlı olarak tanka buhar verilmektedir. Sıcaklık istenilen seviyeye geldiğinde tall yağı reaktör tankına asit ilave edilmektedir. Bu esnada, karıştırıcı ile sirkülasyon işlemi sıcaklık kontrollü devam etmektedir. İstenilen pH oranına ulaşınca kadar devam edilen asit verme işlemi bittikten sonra tall yağı reaktör tankında dinlendirmek için minimum 8 saat bekletilmektedir. Dinlenme işleminin akabinde reaktör tankındaki tall yağının boşaltılma işlemi gerçekleştirilmektedir (Gökmen, 2017).

Tall yağında, yağ asitleri bakımından linoleik asit (%40), oleik asit (%50), linolenik asit (%5), stearik asit (%2) ve palmitik asit (%0,1) bulunmaktadır. Reçine asitlerinden abiyetik asit (%27-%37), dehydroabietic asit (%29), neoabietik asit (%4-%5), palustrik asit (%10- 6 %14), pimarik asit (%1-%2) ve izopimaric asitten (%8-%15) meydana gelmektedir. Tall yağının kimyasal yapısı depoda bekeme süresine, üretim prosesine, ağacın türüne, yetiştirildiği coğrafi şartlara ve iklim şartlarına bağlı olarak değişim göstermektedir (Aro & Fatehi, 2017, Aryan, Maga, & Kraft, 2019).

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, bor oksit ve tall yağından labaratuvar ortamında yeni bir katkı maddesi elde edilerek bitümlü bağlayıcının modifikasyonu ve bu yeni katkı maddesinin sıcak karışımlar üzerindeki etkisinin iyileştirilmesi için temin edilen malzemeler, yapılan analiz ve deneylerle birlikte kullanılan yöntem aşağıdaki gibidir:

Kullanılan malzemeler:

- Sentez Bor Oksit ve Tall Yağı Bileşiği (TOBO)
- B50/70 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı
- Agregat

İzlenen yöntem,

- Bor oksit ve tall yağı bileşiğinin laboratuvar şartlarında elde edilmesi,
- Katkının mikro yapısının araştırılarak bitüm modifikasyonu için uygunluğunun belirlenmesi,
- Katkının bitümün reolojik özelliklerine etkisinin saptanması,
- Katkının kaplama performansına etkisinin incelenmesi ve optimum katkı oranının maliyetinin araştırılmasını kapsamaktadır.

a) Yapısal Analiz İçin Uygulanan Deneyler

- FT-IR
- SEM
- TG/DTG
- XRD
- DSC

b) Fiziksel Özellikler İçin Uygulanan Deneyler

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

- Trikloretilende Çözünürlük
- Nicholson Soyulma
- c) *Reolojik Özellikler İçin Uygulanan Deneyler*
 - RV
 - RTFOT
 - PAV
 - DSR
 - BBR
 - Depolama Stabilitesi
 - MSCR
 - LAS
- d) *Asfalt Karışımlara Uygulanan Deneyler*
 - Marshall Stabilitesi ve Akma
 - Dolaylı Çekme Mukavemeti
 - Dolaylı Çekme ve Su Hasarı
 - Dinamik (Tekrarlı) Sünme
 - Dolaylı Çekme Yorulma, şeklindedir.

2.1. Kullanılan Malzemeler

Tall yağı, selüloz ve kağıt endüstrisinde çam ağaçlarından, kağıt üretimi aşamasında sülfat (Kraft) yöntemi prosesinde açığa çıkan bir yan üründür (Korhonen & Kellomaki 1996; Bajpai, 2018; Aro & Fatehi, 2017). Yüksek oranda doymamış yağ asidi ve çeşitli reçine asitlerinden , özellikle de abiyetik asitten meydana gelen tall yağı içerisindeki bileşenler, iklim, coğrafya, ağaç cinsi, üretim sezonu, kâğıt üretim prosesi ve ayırma prosesine göre değişebilmektedir. Oyka Kâğıt Ambalaj'dan temin edilen tallı yağının özellikleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Tall yağının özellikleri

Özellikler	Değer
Asit Değeri	154.6
Sabunlaşma değeri	162.3
Viskozite 70°C (mm ² /s)	51
Akma Noktası (°C)	63
Isıl değeri (kJ/kg)	39,676
Parlama noktası (°C)	212
Su içeriği (%)	5.6
Reçine asidi (%)	53.6
Yağ asidi (%)	36.3

Bor oksit, renksiz, kokusuz, sert, camsı yapıya sahip bir katıdır ve genellikle borik asidin dehidrasyonu ile üretilmektedir (Çakmak & Özcan, 2022). Çalışma kapsamında kullanılan bor oksit, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'nün Balıkesir/Bandırma'da bulunan tesisinden temin edilmiştir. Bor okside ait özellikler Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Bor oksitin özellikleri

Özellikler	Değer
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2.17
Molekül ağırlığı (g/mol)	69.62
Erime sıcaklığı (°C)	450
Kaynama noktası (°C)	1860
Tane büyüklüğü (mm)	0.250+
pH	4.64

Bu çalışmada, Türkiye Petrolleri Rafinerisi'nden (İzmit) temin edilen penetrasyon derecesi olan 50/70 bitüm kullanılmıştır. Saf bağlayıcının özellikleri geleneksel deney yöntemleri ile belirlenerek Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 9. Saf 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/cm ³)	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	-
<i>Kütle fraksiyonları (%)</i>			
SARA analizi	Doygunlar	Aromatikler	Reçine Asfaltanlar
	8.8	42	25 10

2.2. Katkı Maddesinin Kimyasal Sentezi

Laboratuvar ortamında üretilmesi planlanan katkı maddesi için, tall yağı ve bor oksitle birlikte çok sayıda sentez çalışması yapılmıştır. Sentezlenen maddelerin bitümlü bağlayıcı için uygun olup olmadığı yapılan ön denemelerle araştırılmıştır. Bitümlü bağlayıcı ile adezyon özelliği yüksek, tamamen yerli ve orijinal özelliğe sahip, doğal ve yenilebilir bir kaynak olan ağaçlardan elde edilebilir olmasının yanı sıra bitüm matrisinde homojen dağılım göstererek bağlayıcının temel özelliklerini iyileştirerek maliyet açısından diğer modifiyerlere göre oldukça ucuz olan bu yeni katkı maddesi, uzun emek ve bir dizi çalışmanın sonucunda ortaya konmuştur. Katkı maddesinin ilk örnek olabilecek küçük miktarlarda elde edilmesi için üretim basamakları belirlenerek kaydedilmiştir.

Literatürde mevcut olan daha önceki çalışmalar ışığında, bor oksit ve tall yağı bileşiği laboratuvar ortamında sentezlenmiştir (Arslan, Guru, & Çubuk, 2012; Arslan, Guru, Çubuk, & Çubuk, 2011; Bozdemir, Oruc & Yeşilçiçek, 2022; Zhang, Liu, Ying & Dong, 2010). Tall yağının moleküler ağırlığı (oleik asit cinsinden) 282g/moldür ve bor oksitin (%99 saflıkta) molekül ağırlığı ise 69 g/moldür. Deney, manyetik karıştırıcılı bir ısıtıcı ve 2000 ml lik bir cam beher kullanılarak kontrollü sıcaklık koşulları altında 150±5°C’de gerçekleştirilmiştir. Öncelikle 338 g tall yağı miktarı tartıldıktan sonra içerisinde bulunan bir miktar katı fazın ortadan kaldırılması için ısıtılmıştır. Isıtılan tall yağına yavaş yavaş toplamda 84 g B₂O₃ bor

oksit ilavesi yapılmıştır. Tall yağının içerisinde birçok komponent (uçucu alkoller, waxlar gibi) olduğu için reaksiyonda katalizör olarak sülfirik asit (H_2SO_4) kullanılmıştır. Toplam sülfirik asit miktarı 20 ml civarındadır. Reaksiyon yaklaşık 3 saat devam etmiştir. Reaksiyon sonunda kalan bor oksit miktarını bertaraf etmek için katkı maddesi benzinde çözölmüştür. Elde edilen çözelti iki kere süzgeç kağıdıyla süzölmüştür. Bünyedeki benzini uzaklaştırmak için vakumlu aspiratör altında yaklaşık 1 haftada uzaklaştırılmıştır Benzin tamamen bünyeden uzaklaştırıldıktan sonra katkı maddesi içerisinde birtakım uçucuların olduğu, kıvamının daha yoğun olması için 2 saat boyunca $250^{\circ}C$ 'ye kadar ısıtılmıştır. Kalan katkı maddesinin uzama kabiliyetinin çok iyi olduğu, istenilen homojenitede olduğu ve maddenin sıvı fazdan katı faza geçtiği ve ortam sıcaklığında katı olduğu görsel olarak gözlemlenmiştir Şekil 35'te bor oksit ve tall yağı bileşğine (TOBO) ait görsel verilmiştir.



Şekil 35. Katkı maddesine ait görsel

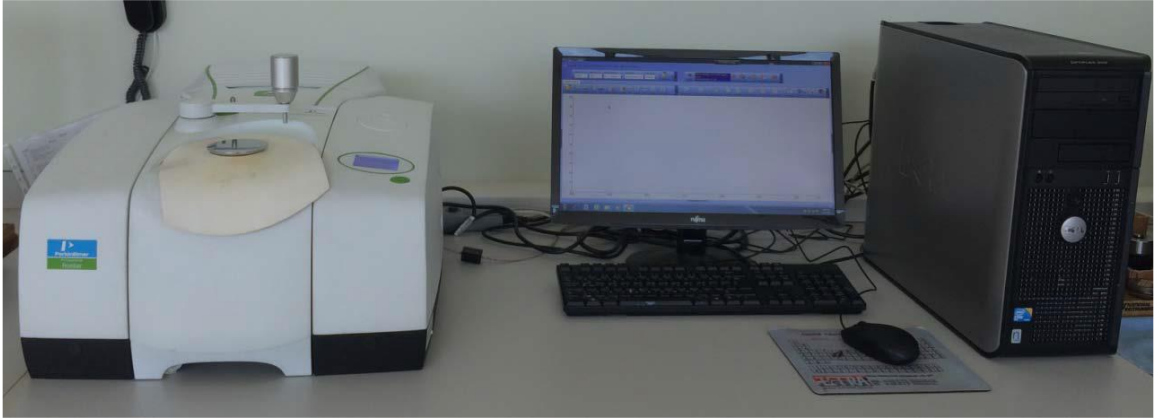
Sentezlenen katkı maddesinin kimyasal yapısı, FT-IR, TG, XRD ve DSC analizleriyle belirlenirken mikro yapısı SEM cihazıyla incelenmiştir. Yapılan analizlere ait bilgiler kapsamlı olarak Bölüm 2.3'te anlatılmıştır.

2.3. Sentez Katkı Maddesinin Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi

Bor oksit katkılı tall yağı bileşiğinin kimyasal yapısı ve yapısal değişimleri FT-IR ve XRD analizleriyle, mikro yapısı SEM cihazıyla, ısıl bozunma sıcaklıkları ve kütleli değişimleri TG ve DSC analizleri ile ortaya konulmuştur. Ayrıca sentezlenen katkı maddesinin saf bitümlü bağlayıcı içerisindeki dağılımı ve morfolojik yapısı SEM cihazı ile belirlenirken, FTIR analizi ile bitümlü bağlayıcı içerisindeki katkı maddesinin varlığı incelenmiştir.

2.3.1. FT-IR Analizi

FT-IR spektrometresi ile tall yağı, saf ve %5 TOBO modifiyeli bağlayıcıların kimyasal yapı karakterizasyonu ayrı ayrı belirlenmiştir. Ölçüm için yaklaşık 2 mg bağlayıcı numunesi Perkin Elmer (ABD) marka cihazın elmas krsitali üzerine yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir (Şekil 36). FT-IR ölçümleri $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 'de ve $600\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ değişen dalga boyuna sahip spektral analiz 2 cm^{-1} çözünürlükte ölçülmüştür.



Şekil 36. FT-IR spektrometresi

2.3.2. SEM Analizi

TOBO katkı maddesi ve %5 TOBO modifiyeli bağlayıcının morfolojik yapısını araştırmak için Sigma 300 VP (Zeiss, Almanya) SEM cihazı kullanılmıştır. Ölçüm yapmadan ön hazırlık için incelenecek numuneler ince bir altın tabakayla kaplanarak iletken karbon bant üzerine yerleştirilmiştir. Birkaç büyütme oranı belirlenerek her numunenin 5

farklı bölgesinden 30 dakika süreyle yapılan SEM görüntülemesi ile örneklerin mikro yapısındaki morfoloji ve dağılım incelenmiştir (Şekil 37).



Şekil 37. SEM cihazına ait görsel

2.3.3. TG/DTG Analizleri

Temel olarak belirli ısıtma hızı ve sıcaklık koşulları altında malzemelerin termal stabilitesini karakterize etmek ve sıcaklık artışıyla birlikte numunenin kütlesindeki değişimi ölçmek için TGA cihazı kullanılmıştır. Exstar SII TG/DTA 6300 model cihaz ile yapılan analiz, 20°C-350°C sıcaklık aralığında 10°C/dk sıcaklık artışıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 38).



Şekil 38. TG/DTA cihazı

2.3.4. DSC Analizi

DSC cihazı ile sentez katkı maddesinin termal analizi ısı akış yöntemine göre belirlenmiştir. Dakikada 15°C ısıtma hızında -20°C ile 300°C sıcaklık aralığında TOBO maddesine ait DSC analizi DSC-141 (Setaram KeP Technologies, ABD) cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 39).



Şekil 39. DSC cihazına ait görsel

2.3.5. XRD Analizi

TOBO maddesine ait XRD analizi, Cu $K\alpha 1$ yöntemine göre, difraktogramlar 0.0013° 'lik bir adım boyutu kullanılarak 10° ila 90° arasındaki 2° aralığında taranmıştır. XRD analizi iki kez yapılmıştır ve XRD kırınım dosyası veri tabanında yer alan standart

modellerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, Empyrean difraktometre (Malvern Panalytical, Birleşik Krallık) modeli XRD cihazı kullanılmıştır (Şekil 40).



Şekil 40. XRD cihazına ait görsel

2.4. Modifiye Bağlayıcıların Hazırlanması

150 $\pm$ 5 $^{\circ}$ C sıcaklıktaki etüvde penetrasyon sınıfı B50/70 olan saf bitümlü bağlayıcı akışkan hale getirilmiştir. Aynı zamanda karıştırma kapları ve sentez katkı maddesi de etüvde aynı sıcaklıkta ısıtılmıştır. 1500 g karıştırma kaplarına saf bağlayıcı ağırlığına göre hesaplanan %1, %1.5, %3 ve %5 oranlarında TOBO maddesi tek tek ilave edilmiştir. Katkı maddesinin bitümlü bağlayıcı içerisinde homojen dağılması için yüksek parçalayıcılı karıştırıcı (high shear mixer) kullanılmıştır (Şekil 41). Modifikasyon işlemi 150 $\pm$ 5 $^{\circ}$ C'de 3000 rpm'de 30 dakika boyunca devam etmiştir. Süre sonunda elde edilen tüm numuneler deneye tabii tutulmak üzere hazır hale getirilmiştir. Tablo 10'da bu çalışmada kullanılan tüm bağlayıcılara ait kodlamalar verilmiştir. Ayrıca, deney sonuçlarının anlamlı karşılaştırılması için saf bağlayıcı numunesi de aynı modifikasyon şartlarına maruz bırakılmıştır



Şekil 41. Modifikasyon işleminde kullanılan yüksek hızlı parçalayıcı

Tablo 10. Bitümlü bağlayıcılar ve kodlamalar

Numune içeriği	Kod
50/70 Bitümlü bağlayıcı	BA
50/70 Bitümlü bağlayıcı + %1 TOBO	BA1
50/70 Bitümlü bağlayıcı + %1.5 TOBO	BA1.5
50/70 Bitümlü bağlayıcı + %3 TOBO	BA3
50/70 Bitümlü bağlayıcı + %5 TOBO	BA5

2.5. Modifiye Bağlayıcıların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Saf ve modifiye bitümlü bağlayıcılara geleneksel deneyler (penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, kuvvet ölçümlü duktilite, elastik geri dönme, parlama noktası, özgül ağırlık, Fraass kırılma noktası, trikloretilende çözünürlük) uygulanmıştır. Ek olarak, saf ve modifiyeli bağlayıcılara belirli miktarda ve özellikte agrega karıştırılarak Nicholson soyulma deneyi de uygulanmıştır.

2.6. Modifiye Bağlayıcıların Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu tez çalışmasında saf ve modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılara ait reolojik özelliklerin tespiti için Superpave deneyleri (RV, RTFOT, PAV, DSR, BBR, Depolama stabilitesi, MSCR ve LAS) uygulanmıştır.

2.6.1. RV Deneyinin Yapılışı

RV (Dönel Viskozimetre) deneyi, TOBO katkı maddesi ile modifiye edilmiş bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirlik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Silindirik numune kabına akışkan hale getirilen bitümlü bağlayıcıdan yaklaşık 11 g dökülerek Brookfield DV2T marka viskozimetre cihazı yardımıyla saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların 90°C-180°C arasındaki sıcaklıklardaki viskozite değerleri ölçülmüştür. Kullanılan spindle (mil) bitümlü bağlayıcı miktarına göre farklılık göstermektedir. Bu çalışmada numarası 29 olan spindle kullanılmıştır. Tüm numunelerin 135°C ve 165°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri yardımıyla bitümlü sıcak karışımlardaki karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları belirlenmiştir.

2.6.2. RTFOT Deneyinin Yapılışı

RTFOT (Dönel İnce Film Halinde Isıtma) deneyi, kısa süreli yaşlandırma işlemi ile saf ve modifiyeli bağlayıcıların kütle kaybı, fiziksel ve reolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Akışkan hale getirilen bitümlü bağlayıcıdan 35 ± 0.5 g alınarak 8 adet cam şişenin her birine ayrı ayrı doldurulmuştur. 163°C'de önceden ısıtılan cihaza yerleştirilen cam şişeler 75 dakika boyunca dönerek hem yüksek ısıya hem de hava akışına maruz bırakılmıştır. Deney süresinin sonunda cam şişelerden 2 tanesinin içindeki bitümlü bağlayıcı miktarları ölçülerek bağlayıcının kütle kaybı belirlenmiştir. Kütle kaybı için numuneler 0,001 g hassasiyetle tartılmıştır. Geriye kalan şişelerdeki bitümlü bağlayıcılar daha sonraki deneylerde kullanılmak üzere bir kaba alınmıştır RTFOT sonrası kısa süreli yaşlandırılmış numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite deneyleri ile superpave deneylerinden DSR ve MSCR deneyleri uygulanmıştır.

2.6.3. PAV Deneyinin Yapılışı

PAV (Basınçlı Yaşlandırma Kabini) deneyi, RTFOT deneyinden elde edilen bağlayıcı numuneleri ısı ve basıncın etkisiyle uzun süreli yaşlandırılması amacıyla uygulanmıştır. Kısa süreli yaşlandırılan RTFOT kalıntısı etüvde akışkan hale gelene kadar ısıtılarak homojen olana kadar karıştırılmıştır. Deney sıcaklığı bağlayıcının performans sınıfına göre 90°C ile 110°C arasında değişmektedir. Deney şartları basınç 2.1 ± 0.1 MPa, sıcaklık 100°C ve süre 20 saattir. Deney sonunda numuneler, içerisinde biriken hava kabarcıklarından arındırılmak üzere gaz alma cihazında 170°C sıcaklıkta 30 dakika yüksek vakum altında bırakılmıştır. PAV deneyi ile yaşlandırılmış numunelere DSR ve BBR deneyleri uygulanmıştır.

2.6.4. DSR Deneyinin Yapılışı

Saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izinin yanı sıra yorulmaya karşı dayanımlarını belirlemek için DSR (Dinamik Kayma Reometresi) deneyi uygulanmıştır. Çalışma kapsamında Kinexus model DSR cihazı kullanılmıştır. Yaşlandırılmamış ve RTFOT ile yaşlandırılmış numuneler tekerlek izi dayanımı için kullanılmıştır. Deney, çapı 25 mm olan plaklar ve plakalar arası 1 mm boşluk olacak şekilde yerleştirilen her bağlayıcı numunesine, 58°C, 64°C ve 70°C üç ayrı sıcaklıkta, sabit gerilme altında (120 Pa) frekansın 1.59 Hz (10 rad/sn) olduğu durumda uygulanmıştır. PAV deneyi ile yaşlandırılan numuneler yorulma dayanımlarının belirlenmesi için kullanılmıştır. Deney, çapı 8 mm plaklar ve iki plaka arası 2 mm boşluk olacak şekilde ayarlanıp 22°C, 25°C ve 28°C üç farklı sıcaklıkta tüm bağlayıcı numunelerine uygulanmıştır. Ek olarak, bağlayıcıların farklı şartlar altındaki reolojik davranışlarının tespit edilerek 40°C sıcaklıktaki ana eğrileri (master curve) çizebilmek için yaşlandırılmamış (saf) bitümlü bağlayıcılara dört farklı sıcaklıkta ve 0.1 rad/sn ile 100 rad/sn arasında değişen frekansta DSR cihazı yardımıyla frekans tarama analizi yapılmıştır.

2.6.5. BBR Deneyinin Yapılışı

BBR (Kiriş Eğme Reometresi) deneyi, PAV deneyi sonrası yaşlandırılmış numunelerin düşük sıcaklıklardaki çatlaklara karşı dayanımının belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. ATS marka BBR cihazı uzun süreli yaşlandırılmış numuneler - 6°C ve -12°C sıcaklıklarda 980 ± 50 mN kuvvetinde yük 4 dakika (240 saniye) uygulanmıştır. Deney

süresinin sonunda tüm bağlayıcıların sünme rijitliği (S-değeri) ve sünme oranı (m değeri) değerleri tespit edilmiştir.

2.6.6. Depolama Stabilitesi Deneyi

Modifiye bitümlü bağlayıcıların uzun süreli depolanması durumunda bitüm-katkı arasında meydana gelen faz ayrışmalarının ve dayanımlarında meydana gelen değişimlerin belirlenmesi amacıyla depolama stabilitesi deneyi uygulanmıştır. Alüminyum tüp içerisine doldurularak tüpün üst kısmı hava almayacak şekilde kapatılan numuneler, $180\pm5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, 72 ± 1 saat boyunca etüvde dik bir şekilde bekletilmiştir. Deney sonunda etüvden çıkarılan numuneler soğumaya bırakılmıştır. Modifiye edilen bitümlü bağlayıcının elde edilmesi için alüminyum tüp çıkarılmıştır. Tüpten çıkarılan silindirik şeklindeki numune yatay olarak ısıtılmış kesici yardımıyla 3 eşit parçaya bölünmüştür. Üst ve alt kısımdaki parçalara isimlendirme yapılarak saklanırken, orta kısımdan elde edilen parça ise atılmıştır. Elde edilen alt ve üst kısımdaki numunelere bağlayıcı deneyleri uygulanarak katkı maddesinin depolanabilme özelliği araştırılmıştır. Deneyle ilgili görseller Şekil 42’de verilmiştir.



Şekil 42. Depolama stabilitesi deney aşamaları

2.6.7. MSCR Deneyinin Yapılışı

MSCR Gerilim Sünme-Geri Kurtarma) deneyi, kısa süreli yaşlandırılmış (RTFOT) modifiye bağlayıcıların tekerlek izine karşı direncinin ve performans seviyesinin belirlenmesi amacıyla geliştirilmiştir. Deney, çapı 25 mm olan plaka ve plakalar arası 1 mm boşluk olacak şekilde 64°C sıcaklıkta AASHTO T315 standardına göre hazırlanmış saf ve modifiye bağlayıcılara RTFOT kalıntısı üzerine yapılmıştır. Deney, öncelikle 0.1 kPa ve

ardından 3.2 kPa olarak farklı iki kayma gerilmesi altında birbirinden bağımsız olacak şekilde iki aşamalı olarak 1 sn yükleme ve 9 sn geri dönme şeklinde toplam 10 döngüden meydana gelmektedir. Deney süresi sonunda, bağlayıcı numunelere ait geri dönmeyen (kalıcı) sünme uyumluluğu (J_{nr}) ve yüzdesel geri dönme (R) olmak üzere iki ana parametre belirlenmiştir.

2.6.8. LAS Deneyinin Yapılışı

AASHTO T 391-20 standardına göre, çapı 8 mm olan paralel plaka ve plakalar arası 2 mm boşluk olacak şekilde 25°C’de RTFOT+PAV kalıntısı üzerine LAS (Lineer Genlik Taraması) deneyi yapılmıştır. Her bir bağlayıcı numunesine hem genlik taraması hem de frekans taraması yapılmıştır. 10 Hz frekansta 25°C sıcaklıkta gerinim kontrol modunda salınımlı kesme kullanılarak genlik taraması uygulanmıştır. Hasar tespiti için ise frekans taramasından elde edilen α (alfa) parametresi belirlenmiştir. Elde edilen bu deney çıktılarından, bitümlü bağlayıcıların trafik yükleri nedeniyle yorulma ömürleri tespit edilmiştir.

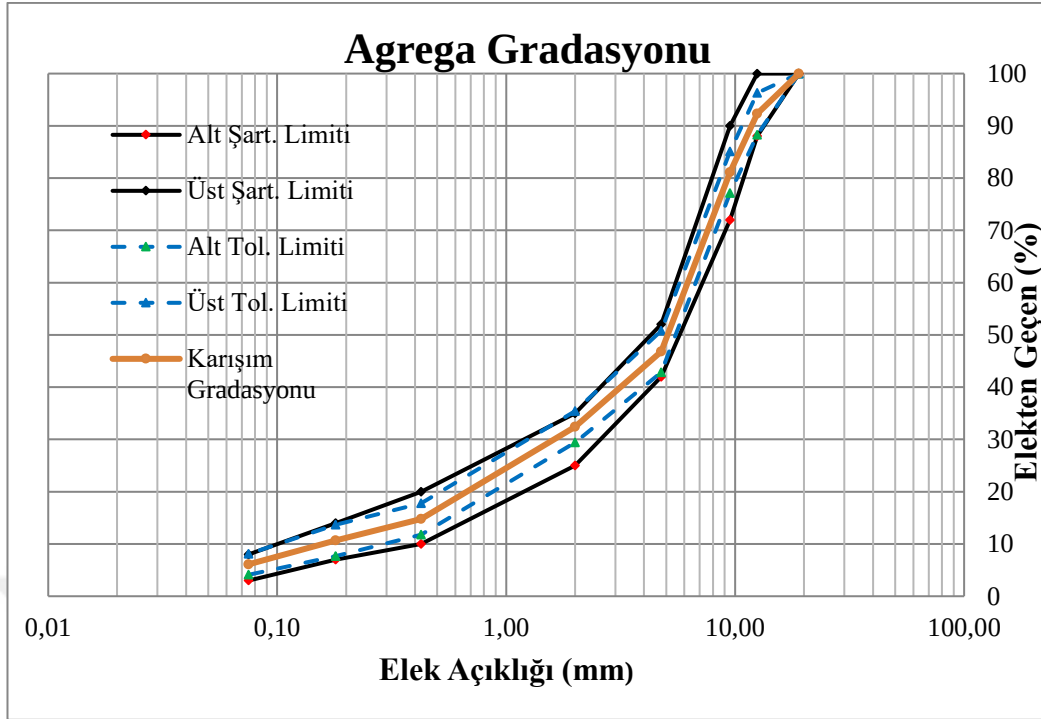
2.7. Bitümlü Sıcak Karışımların Hazırlanması

Çalışmada karışım tasarımı için Gümüşhane ili Bağışlı mevki kalker taşocağından agrega getirtilmiştir. Agravallara ait fiziksel özellikler Tablo 11’de gösterilmiştir.

Tablo 11. Agregaya ait fiziksel özellikler

Özellikler	Standart	Kaba Agrega	İnce Agrega	Filler
Aşınma Kaybı (%) (Los Angeles)	ASTM C131	15	-	-
Donma Kaybı (%) (Mg ₂ SO ₄)	ASTM C88	2	-	-
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)				
Hacim özgül ağırlık	ASTM C127	2.684	-	-
Zahiri özgül ağırlık		2.760		
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)				
Hacim özgül ağırlık	ASTM C128	-	2.621	-
Zahiri özgül ağırlık			2.737	
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)				
Zahiri özgül ağırlık	ASTM D854	-	-	2.831
Su Emme (%)	ASTM C127	1.02	1.85	-
Yassılık İndeksi (%)	BS 812	4	5	-

Karayolları Teknik Şartnamesi'nde (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013) aşınma tabakası için belirtilen Tip-1 gradasyon limitlerine göre saf ve modifiye bağlayıcılarla bitümlü sıcak karışımların tasarımı için agrega gradasyonu belirlenmiştir. Şekil 43'te agrega granülometrisi gösterilirken, sıcak karışımlarda kullanılan agregaların elek analizive granülometri değerleri de Tablo 12' de verilmiştir.



Şekil 43. Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan agrega granülometrisi

Tablo 12. 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. Bitümlü Sıcak Karışım Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu bölümde, bitümlü bağlayıcının agrega ile Marshall tasarımına göre üretilerek elde edilen Marshall briketlerine uygulanan deneyler ifade edilmektedir.

2.8.1. Marshall Tasarım Yöntemi

Bitümlü sıcak karışımların optimum bitüm içeriğinin belirlenebilmesi amacıyla Marshall briketleri üretilmiştir. %0.5 artış miktarına göre altı farklı bitüm içeriğinde (% 4.0, % 4.5, % 5.0, % 5.5, % 6.0 ve % 6.5) ve her bir bitüm içeriğinden üç briket olmak üzere Marshall briketi olarak toplamda on sekiz adet hazırlanmıştır. Briketlere ait yoğunluk-boşluk analizleri tek tek yapılmıştır. Briketlerin boşluk, bitümle dolu boşluk ve agregalar arası boşluk değerleri ayrıca belirlenmiştir. Stabilite ve akma değerleri Marshall stabilite cihazında kırılarak belirlenen numunelerin özgül ağırlık, boşluk değerleri, stabilite ve akma değerlerine göre grafikler çizilmiştir. Elde edilen grafiklerin verilerinden optimum bitüm içeriği hesaplanmıştır. Belirlenen optimum bitüm içeriğine göre her katkı oranından yirmi bir adet, Marshall briketi olarak toplam 105 adet üretilmiştir (Şekil 44). Üretilen bu briketlerden saf bağlayıcı ve her katkı oranından üçer adet kullanılmak üzere; Marshall Stabilite ve Akma, Dolaylı Çekme Mukavemeti, Dolaylı Çekme, Dinamik Sünme ve Dolaylı Çekme Yorulma deneyleri yapılmıştır. Hazırlanan tüm briketlerin yoğunluk-boşluk analizleri belirlenerek boşluk, bitümle dolu boşluk ve agregalar arası boşluk değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 44. Üretilen Marshall briketleri

2.8.2. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyinin Yapılışı

Dolaylı çekme mukavemeti deneyi karışım briketlerinin çekme dayanımlarının belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Bu deneyde kullanılmak üzere saf bağlayıcı ve her katkı oranından üçer adet üretilen Marshall briketleri 24 saat boyunca 25°C'lik su banyosunda bekletilmiştir. Süre sonunda su banyosundan çıkarılan tüm briketler Marshall stabilite

cihazına bütünleşmiş, ASTM D4123 standardında yer alan dolaylı çekme başlığı ile 50 mm/dk hızda kırılmıştır. Şekil 45'te Marshall cihazına takılan dolaylı çekme başlığı ve deney sonrası kırılan numune gösterilmektedir.



Şekil 45. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi ve sonrasında kırılan numune

2.8.3. Modifiye Lottman Deneyinin Yapılışı

Modifiye Lottman deneyi, bitümlü sıcak karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı dirençlerinin saptanması amacıyla yapılmıştır. Deneyde üretilen her katkı oranından üçer adet Marshall briketi koşullandırılmıştır. Numuneler, havayla dolu hacimlerinin %55-80'i, bir vakum cihazında damıtık su kullanılarak vakumlanmıştır. Vakumla işleminin ardından briketler, streçle iyice hava almayacak şekilde sarılarak içinde 10 ml su ilave edilen kilitli poşetlere konulmuştur. Bu numuneler daha sonra 16 saat boyunca -18°C sıcaklıktaki soğutucuda bekletilmiştir. Süre bitiminde soğutucudan alınan briketler 24 saat, 60°C 'ye ayarlanmış su banyosunda bekletilmiştir (Şekil 46). Daha sonra, briketler 2 saat 25°C 'ye ayarlanmış ve doldurulmuş su banyosunda bırakılarak dolaylı çekme mukavemeti deneyi için ölçüm yapılmıştır.



Şekil 46. Su hasarına maruz bırakılan briketlerin koşullandırma aşamaları

2.8.4. Dinamik (Tekrarlı) Sünme Deneyinin Yapılışı

Dinamik (tekrarlı) sünme deneyi için her bir katkı oranında üretilen üçer adet Marshall briketi, 40°C sıcaklıkta yaklaşık 3 saat tutulmuştur. Briketlere, 1000 ms vuruş periyodunun yarısı (500 ms) yüklü diğer yarısı (500 ms) yüksüz olacak şekilde tek eksenli 100 kPa'lık basınç yüküne 12.5 saat (45000 yük tekrarı) maruz bırakılmıştır. Briketlerde meydana gelen kalıcı deformasyon değerlerinin karşılığı olan sünme modülüne ait değerler belirlenmiştir.

2.8.5. Dolaylı Çekme Yorulma Deneyinin Yapılışı

Dolaylı çekme yorulma deneyi Marshall briketi üretilerek, 25°C deney sıcaklığında yaklaşık 3 saat bekletilmiştir. 300 kPa'lık kontrollü gerilme olacak şekilde deney uygulanmıştır. 1500 ms (1.5 sn) yükleme periyodunun 124 ms'si (0.124 sn.) yük uygulanırken geriye kalan 1376 ms (1.376 sn) yük uygulanmayarak dinlenme süresi (rest time) şeklinde belirlenmiştir. Deneye briketler tamamen kırılıncaya kadar devam edilerek kırılma meydana geldiğindeki yük tekrar sayıları saptanmıştır.

3. BULGULAR VE İRDELEME

Tez kapsamında bu bölümde, öncelikle sentezi yapılan katkı maddesinin yapısal analizine ait bulgular irdelenerek yorumlanmıştır. Daha sonra ikinci kısım olan ve tez çalışmasının ağırlıklı kısmı olan tüm bağlayıcılara uygulanan geleneksel ve superpave deneyleri ile sıcak karışımlara uygulanan deneylerden elde edilen bulgulara ait grafikleri verilmekte ve bu grafikler ışığında deney sonuçlarına ait irdeleme ve yorumlamalar yapılmaktadır.

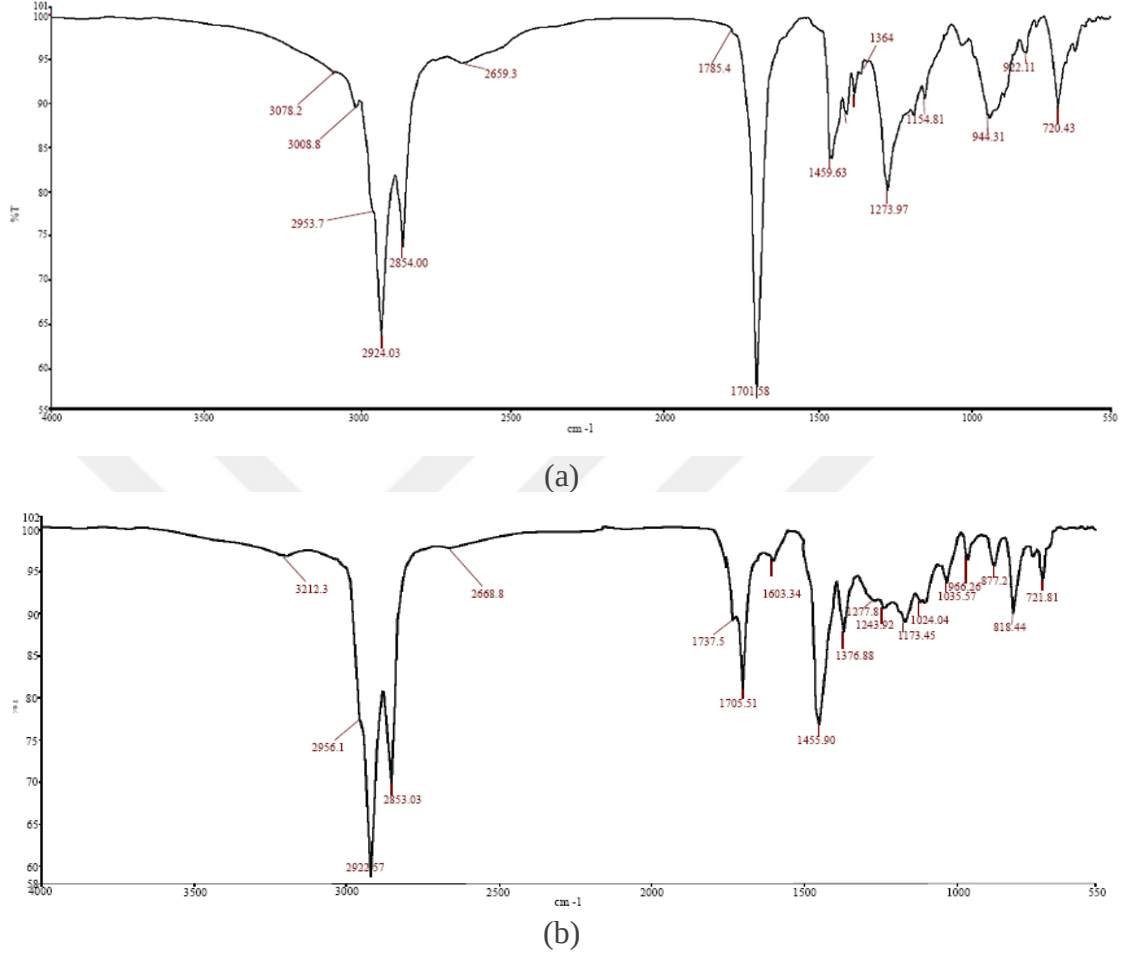
3.1. Katkı Maddesinin Yapısal Analiz Sonuçları

Laboratuvar ortamında kimyasal olarak sentezlenen bor içerikli tall yağı bileşiğinin (TOBO) kimyasal yapısı FTIR ve XRD ile, morfolojik yapısı ise SEM ile belirlenmiştir. Katkı maddesine ait ısı karakterizasyon verileri ayrı ayrı TG ve DSC analizleriyle belirlenmiştir.

3.1.1. FT-IR Analizi

Kimyasal olarak sentezlenen bor katkılı tall yağı bileşiğinin fonksiyonel gruplarındaki değişim FT-IR analizi ile belirlenerek Şekil 47’de tall yağı ve bor esaslı tall yağı bileşiğine ait FT-IR spektrumlarında meydana gelen değişimler verilmektedir. Tall yağında 2921 cm^{-1} ’de vinik C=C-H bağları ve 2821 cm^{-1} ’de alifatik C-H gerilim bağlarının sentezlenen TOBO bileşiğinde yaklaşık aynı seviyede kaldığı görülmektedir. CH_3 ve CH_2 piklerine ait deformasyon bantlarının hem tall yağında hem de TOBO bileşiğinde yaklaşık olarak sırasıyla 1457 cm^{-1} ve 1377 cm^{-1} de kaldığı görülmektedir. Ayrıca, tall yağında 1704 cm^{-1} de görülen karbonil pikinin (C=O gerilim bandı) sentezlenen katkıda kaydığı, birden çok karbonil pikinin (1704 cm^{-1} ve 1735 cm^{-1}) meydana geldiği ve aynı zamanda C=O gerilim bandının oldukça küçüldüğü gözlemlenmektedir. Bu da tall yağı içerisindeki bazı ester bağlarının bor ile reaksiyona girdiğinin en önemli göstergesidir. Diğer önemli gösterge ise tall yağı FT-IR spektrumunda görülen 1273 cm^{-1} esterik karbonil pikinin (O=C-O-C) sentezlenen TOBO bileşiğinde küçüldüğü ya da kısmen kaybolduğudur. Bu da tam olarak

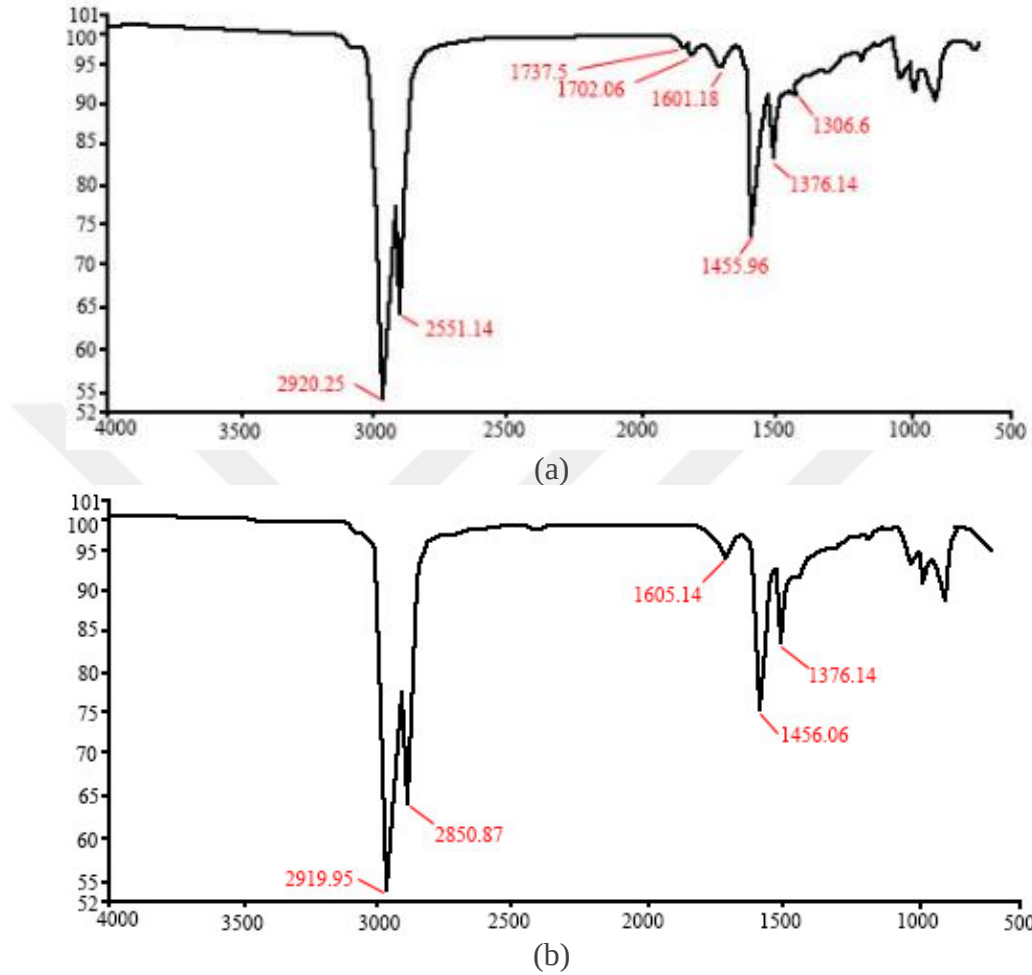
ester fonksiyonunun üzerinde bir değişme olduğunu yani hedef katkının başarılı bir şekilde sentezlendiğini ifade etmektedir.



Şekil 47. Tall yağı (a) ve TOBO katkısına ait (b) FT-IR spektrumu

Saf (a) ve %5 TOBO ile modifiye edilmiş bağlayıcıya (b) ait FT-IR spektrumları Şekil 48’de verilmiştir. Buna göre bitümde var olan alifatik hidrokarbon zincirinden ileri gelen CH gerilim bantları 2920 cm^{-1} ve 2850 cm^{-1} de gözlenirken CH_3 ve CH_2 gruplarına ait deformasyon bantlarının ise $1456\text{--}1376\text{ cm}^{-1}$ aralığında ortaya çıktığı görülmektedir. %5 katkı oranı ile modifiye edilen bağlayıcıdan alınan FT-IR spektrumunda katkı maddesinde var olan 1705 cm^{-1} ve 1737 cm^{-1} karbonil piklerinde kısmi bir kayma görülmektedir. Dolayısıyla literatürdeki diğer araştırmalara benzer şekilde karbonil zirvesinin bor ile etkileşimi ve borun merkezde olması nedeniyle dipol-dipol etkileşiminin oluştuğu ifade edilebilir (Gautam, Yadav, & Singh, 2012; Motke, Yawale, & Yawale, 2002; Alemi, Sedghi, Mirmohseni, & Golsanamlu, 2006). Ayrıca, $1100\text{--}900\text{ cm}^{-1}$ pik değerlerinin B-O gerilme

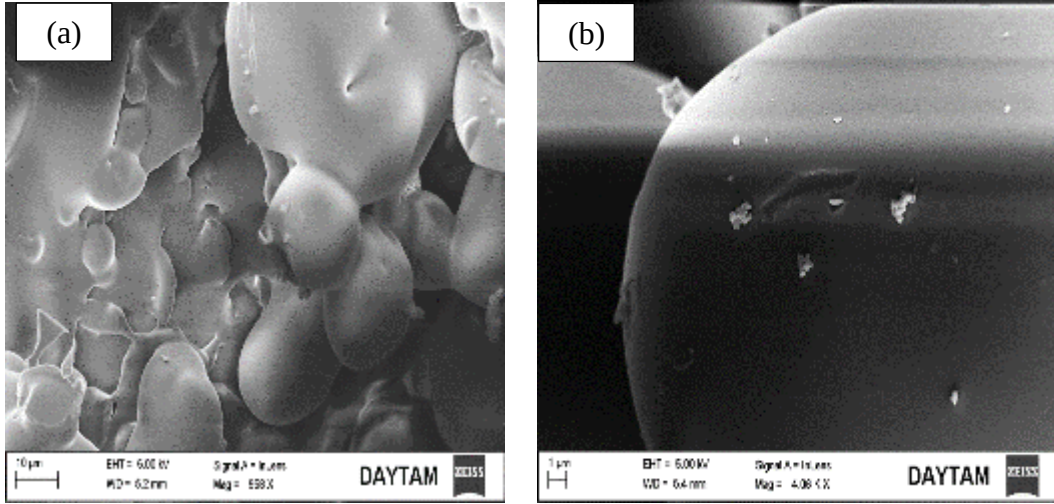
bantlarına ait olduğu düşünülmektedir (Mhareb, Hashim, Ghoshal, Alajerami, Bqoor, Hamdan, Saleh, & Abdul Karim, 2016).



Şekil 48. Saf bağlayıcı (a) ve %5 TOBO ile modifiye edilmiş bağlayıcının (b) FT-IR spektrumları

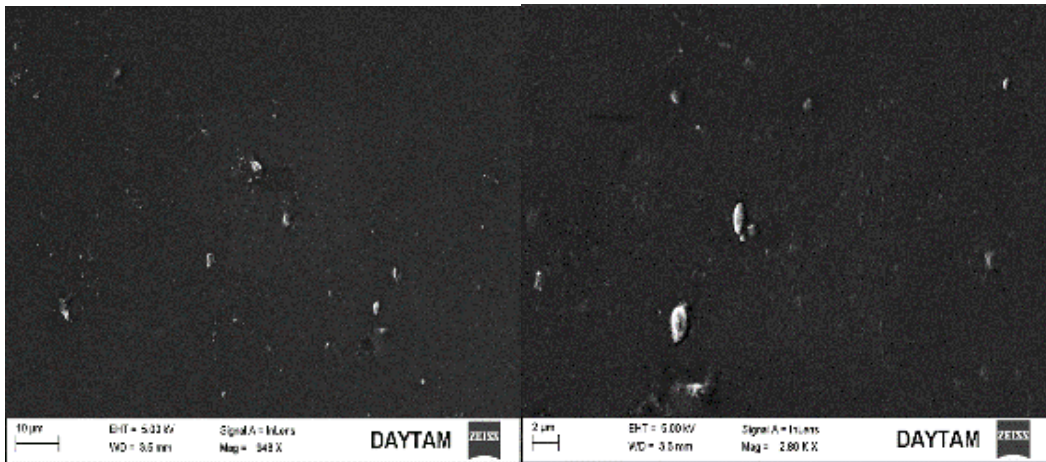
3.1.2. SEM Analizi

Şekil 49'da TOBO katkısına ait SEM görüntüleri 958 X (a) ve 4.06 K (b) büyütme oranları ile verilmektedir. Yapıya genel anlamda bakıldığında ana matrisin tall yağı olduğu dikkate alınarak, yüzeyde küçük kabarcıklar ve yüzey morfolojisini etkileyen damlacık tarzı katılmış formlar görülmektedir. Bu formların bor oksit olduğu düşünülmektedir (Shadab, Jirsa, & Miryala, 2023). TOBO maddesinde olan bu katı formlar bitümle etkileşime girecek yüzey alanının büyümesi şeklinde ifade edilmektedir.



Şekil 49. TOBO maddesinin farklı büyütme oranlarına ait SEM görüntüleri

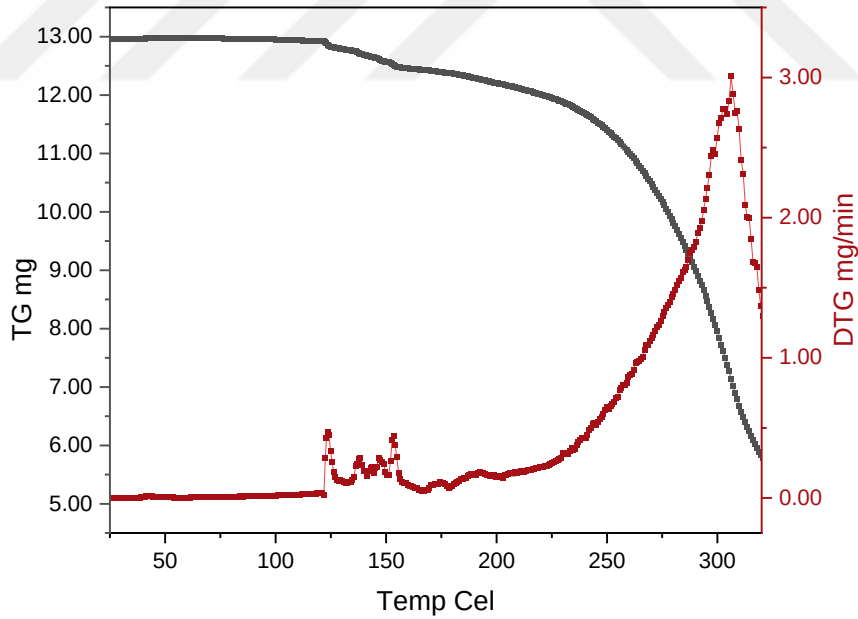
%5 katkı içeren bağlayıcının SEM görüntüleri Şekil 50’de verilmektedir. En yüksek katkı oranı olan %5 TOBO modifiye bağlayıcının seçilme nedeni, TOBO katkı maddesinin bitüm matrisi içindeki dağılımının açık bir şekilde ortaya konulması içindir. Buna göre, katkı maddesinin bitüm matrisi içerisindeki dağılımının makro anlamda nispeten homojen olduğu ama mikro anlamda bölgesel kümelenmeler şeklinde olduğu görülmektedir. Yapıya daha yakın bakıldığında boyutsal dağılım aralığının $0.3\ \mu\text{m}$ den başlayıp $2\text{-}2.5\ \mu\text{m}$ tane boyutuna kadar çıktığı belirlenmektedir. Ayrıca katkı maddesinin bitüm içerisindeki bağdaşıklığının yani bitüm yüzeyinin katkı maddesi ile iyi ıslatıldığını, ara yüzeyde çatlak, kırık vb. bir ayrışıklığın olmadığı gözlenmektedir. Bu da zayıf da olsa bitüm ile katkı maddesi arasında bazı bağların oluşmuş olabileceğini göstermektedir.



Şekil 50. %5 TOBO ile modifiye edilmiş bağlayıcıya ait iki farklı çözünürlükte SEM görüntüleri

3.1.3. TG Analizi

TG analizi, bir numunenin sıcaklıkla kütle miktarındaki değişimin ölçüldüğü bir termal analiz yöntemidir. Bu ölçüm, faz geçişleri, absorpsiyon ve desorpsiyon gibi fiziksel olayların yanı sıra termal ayrışma ve katı-gaz reaksiyonları (örn. oksidasyon veya indirgeme) gibi kimyasal olaylar hakkında bilgi sağlamaktadır (Manavira, Mthabela, Michael, Daramola, 2023). Şekil 51’de katkı maddesinin termal davranışları verilmektedir. TG eğrileri incelendiğinde 252°C sıcaklıkta katkı maddesinin yapısal olarak bozunmasının gerçekleşmeye başladığı ve 350°C sıcaklığa kadar etkin bir şekilde devam ettiği ve maddenin %70’inin ayrıştığı görülmektedir. Ayrıca DTG eğrisine göre maksimum kütle kaybının 325°C sıcaklıkta gerçekleştiği belirlenmiştir. TG eğrileri, TOBO ayrışmasının son derece düzgün olduğunu ve çok fazla karmaşık varyasyon sergilemediğini ortaya koymaktadır (Zhang, Yu & Han, 2011). Bu bulgular, TOBO katkısının kimyasal yapısının bitümlü bağlayıcıların modifikasyon şartlarında ısı ile parçalanmaya karşı dayanıklı olduğunu göstermektedir.

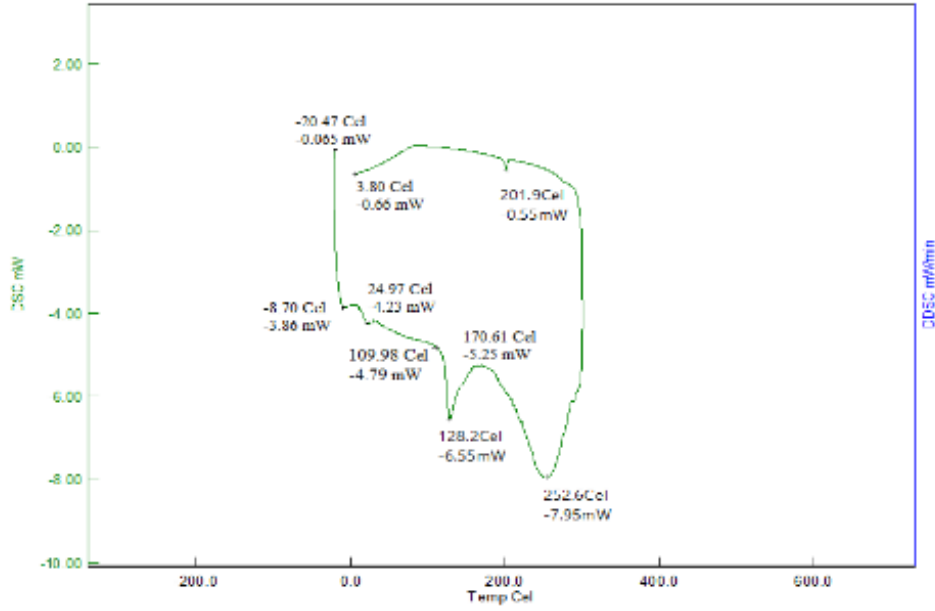


Şekil 51. Bor katkılı tall yağı bileşiğinin TG eğrileri.

3.1.4. DSC Analizi

Dakikada 15°C ısıtma hızında -20°C ile 300°C sıcaklık aralığında TOBO maddesine ait DSC sonuçları Şekil 52’de verilmektedir. DSC analizi ile katkı maddesinin içerisinde

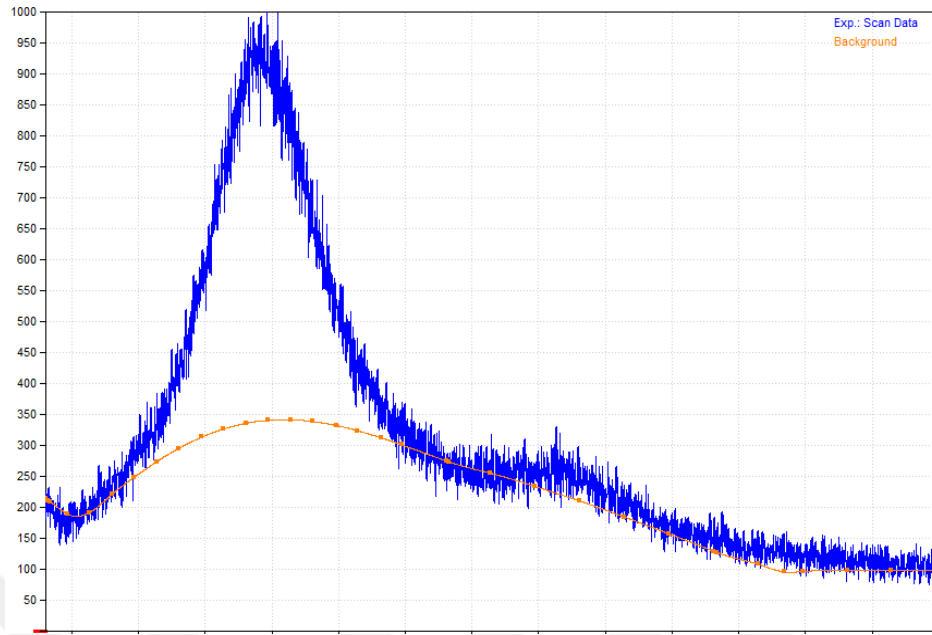
reaksiyona girmeden kalan birçok komponent (uçucu yağlar, halkalı-halkasız esterler, alkoller vb.) olmasına bağlı olarak birden fazla endotermik pik görülmektedir. Katkı maddesinde kristallenmenin meydana geldiği camsı geçiş sıcaklığı -8.70°C , erimenin gerçekleştiği sıcaklık 128.2°C , oksidasyona ait sıcaklık ise 170.61°C dir. Ek olarak katkı maddesinin yapısal olarak bozunmanın başladığı sıcaklık ise 252.6°C olarak belirlenmiştir. Buradan hareketle TG ve DSC analizlerinin bozunma sıcaklığı açısından birbiriyle örtüştüğü açıkça görülmektedir.



Şekil 52. Bor katkılı tall yağı bileşiğine ait DSC eğrisi.

3.1.5. XRD Analizi

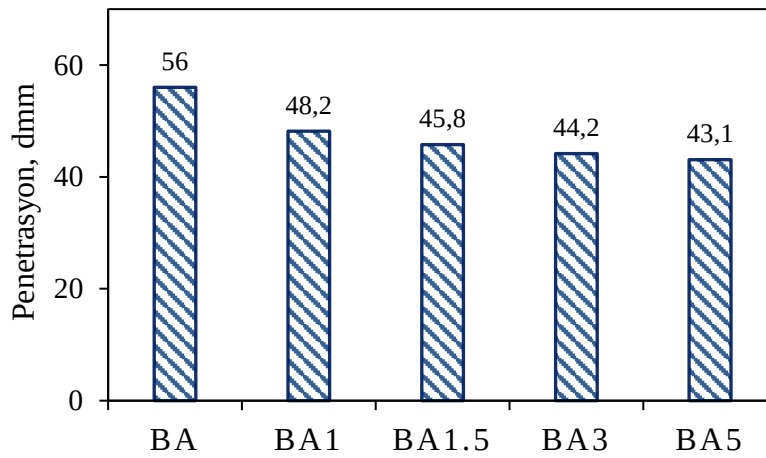
TOBO bileşiğine ait XRD sonuçları Şekil 53'te verilmiştir. TOBO'nun tepe konumundan (d_{001} -yansıması) elde edilen kırınım pikleri $2\theta=20.71^{\circ}$ ve $2\theta=21.18^{\circ}$ de görülmektedir. Bragg formülü yardımıyla X ışınının dalga boylarının katman aralıkları 0.48 nm ($\theta=9.32$ için) ve 0.46 nm ($\theta=9.55$ için) dir. TOBO'nun ana bileşeni olan tall yağı birçok fraksiyondan meydana geldiği için Şekil 53'te elde edilen XRD analizine göre ana kimyasal bileşenin C_{60} olduğu açıkça görülmektedir (Vitry, Kanta, Dille & Delanious, 2012). Ayrıca katkı maddesinde pik varlığı baskın olmadığı için yapının tamamıyla kristalize bir yapı olarak tanımlanamayacağı ifade edilmektedir (Azahar, Jaya, Hainin, Hasan & Shaffie, 2019).



Şekil 53. TOBO katkı maddesine ait XRD grafiği

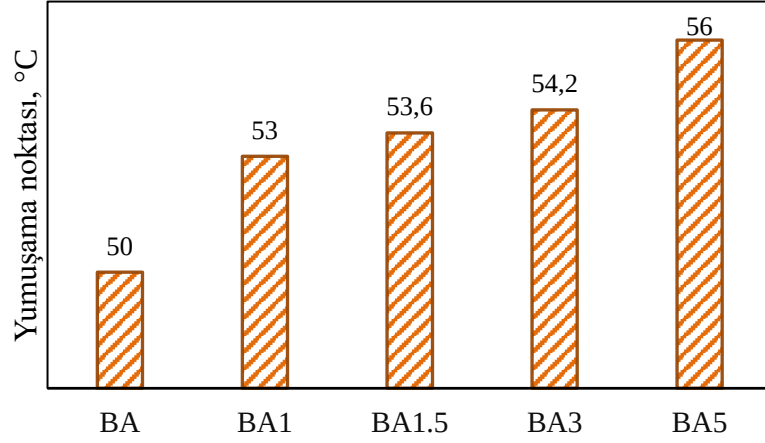
3.2. Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Saf ve TOBO ile modifiye edilmiş bağlayıcılara ait penetrasyon ve yumuşama noktası grafikleri sırasıyla Şekil 54 ve Şekil 55'te verilmektedir. Saf bağlayıcıya katkı maddesinin ilave edilmesiyle modifiye edilmiş bağlayıcıların penetrasyon değerlerinin azaldığı, bu azalma miktarının %1, %1.5, %3 ve %5 katkı içeriğinde sırasıyla yaklaşık olarak %14, %18, %21 ve %23 oranlarında olduğu belirlenmiştir. TOBO katkı maddesinin saf bitümün kıvamını arttırdığı yani bitümü sertleştirdiği sonucuna varılmaktadır.



Şekil 54. Penetrasyon deney sonuçları

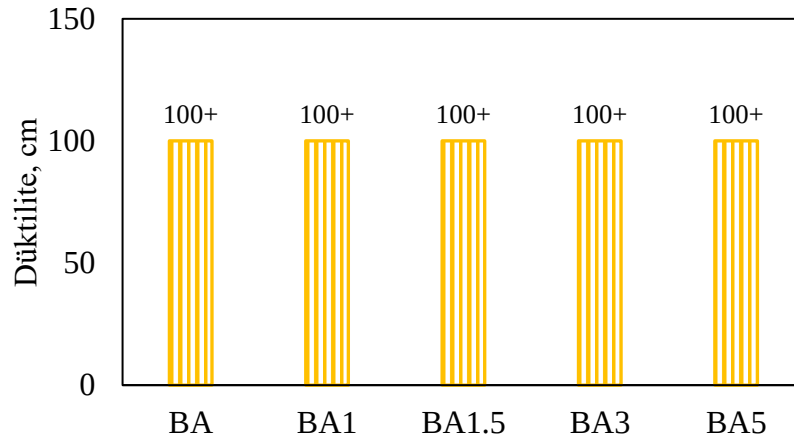
TOBO maddesi ilavesi ile yumuşama noktası değerlerinde artış meydana gelmiş dolayısıyla katkı maddesinin bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki dayanımlarını arttırdığı, sıcaklık hassasiyetini düşürdüğü saptanmıştır. Deney sonuçlarına göre saf bitüme göre yumuşama noktası değerleri sırasıyla %6, %7.2, %8.4 ve %12 oranlarında artmıştır. Katkı oranının %5 olması halinde penetrasyon deneyi ve yumuşama noktası deneyinin her ikisinde de en etkili sonucun elde edildiği belirlenmiştir.



Şekil 55. Yumuşama noktası deney sonuçları

3.3. Düktilite Deney Sonuçları

Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların uzama miktarının ölçüldüğü düktilite deneyinin sonuçları Şekil 56’da verilmiştir.

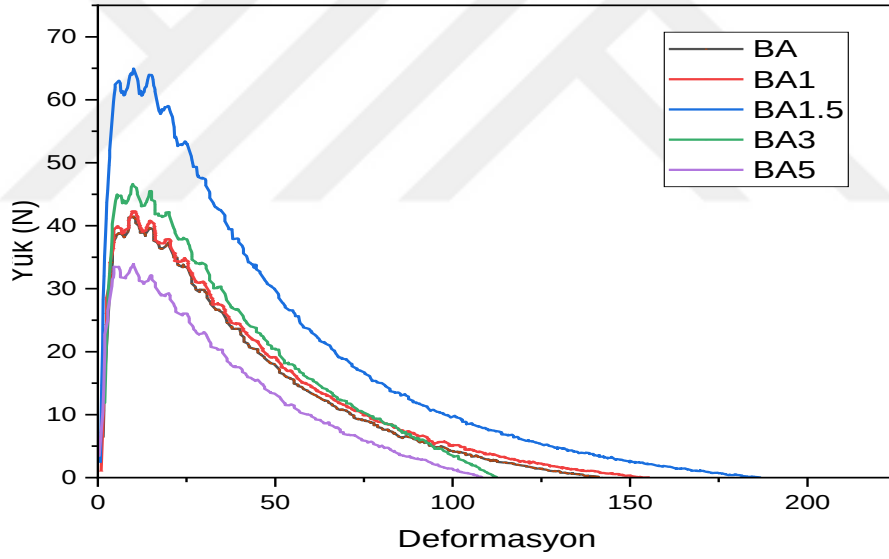


Şekil 56. Düktilite deney sonuçları

Şekil 56’da görüldüğü üzere duktilite değerlerinin saf ve modifiyeli bağlayıcılar için şartname limiti olan 100 cm değerini sağladığı diğer bir deyişle TOBO maddesinin bağlayıcının kohezyonuna negatif bir etki yapmadığı görülmektedir.

3.4. Kuvvet Ölçümlü Duktilite ve Elastik Geri Dönme Deneyi Sonuçları

Çalışma kapsamında saf ve modifiye bağlayıcılara kuvvet ölçümlü duktilite ve elastik geri dönme deneyleri uygulanmıştır. Şekil 57’de tüm numunelerin uzama sırasında gösterdikleri dirençteki değişim verilmektedir. Saf bağlayıcı 140 mm, BA1, BA1.5, BA3 ve BA5 modifiye bağlayıcılar sırasıyla 155 mm, 180 mm, 110 mm ve 105 mm deformasyon seviyeleri elde edilinceye kadar yük alıp bu yüklerden sonra kopmuşlardır. BA1.5 modifiyeli numune en yüksek yük-deformasyon ilişkisini vermiştir.



Şekil 57. Bağlayıcıların yük-deformasyon ilişkisi

Duktilite deneyinden elde edilen yük-deformasyon grafiğindeki eğrinin alanı bitümlü bağlayıcılara ait deformasyon enerjilerini göstermektedir (TS EN 13589). Tüm bağlayıcıların alanları ve elastik geri dönme yüzdeleri Tablo 13’te ifade edilmiştir. TOBO katkısının kullanımının artmasıyla birlikte elastik geri dönme yüzdeleri modifiyeli bağlayıcılar için saf bağlayıcıya göre sırasıyla %20, %50 ve %25 daha yüksek elastik geri dönme değeri verdiği saptanmıştır. Ancak, %5 TOBO modifiyeli bağlayıcı saf bağlayıcıya

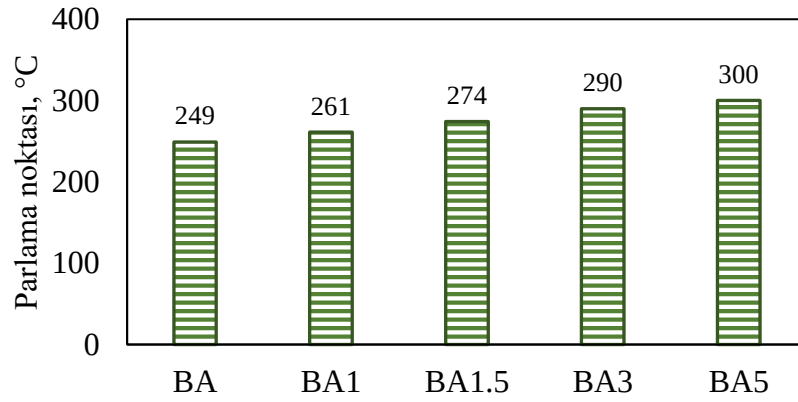
göre daha düşük elastik geri dönme değeri vermiştir. En fazla deformasyon enerjisine BA1.5 modifiyeli bağlayıcının sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 13. Asfalt bağlayıcıların elastik geri dönme ve yüzdeleri kuvvet ölçüm düktilite alanları

Bağlayıcı tipi	Elastik geri dönme (%)	Force düktilite alanı (N.mm)
BA	15	1975.5
BA1	18	2163.8
BA1.5	30	3575.4
BA3	20	2215.9
BA5	12	1497.5

3.5. Parlama Noktası Deney Sonuçları

Saf ve modifiye bağlayıcıların Cleveland açık kap yöntemiyle bulunan parlama noktasına ait sonuçlar Şekil 58’de verilmiştir.

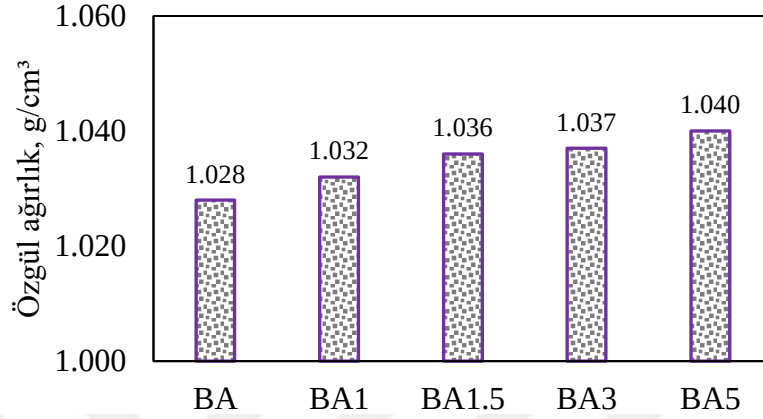


Şekil 58. Parlama noktası deney sonuçları

Şekil 67’de görüldüğü üzere parlama noktası değerleri incelendiğinde saf bağlayıcıya kıyasla tüm modifiye edilmiş bağlayıcıların parlama noktası değerlerinde artış görülmüştür. En fazla artış BA5 bağlayıcıda %20 oranıyla görülmektedir. Bu durum özellikle bitümlü bağlayıcı ile çalışma koşullarında mühendislik açısından büyük önem teşkil etmektedir.

3.6. Özgöl Ağırlık Deney Sonuçları

Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların özgül ağırlık deney sonuçları Şekil 59’da verilmiştir.

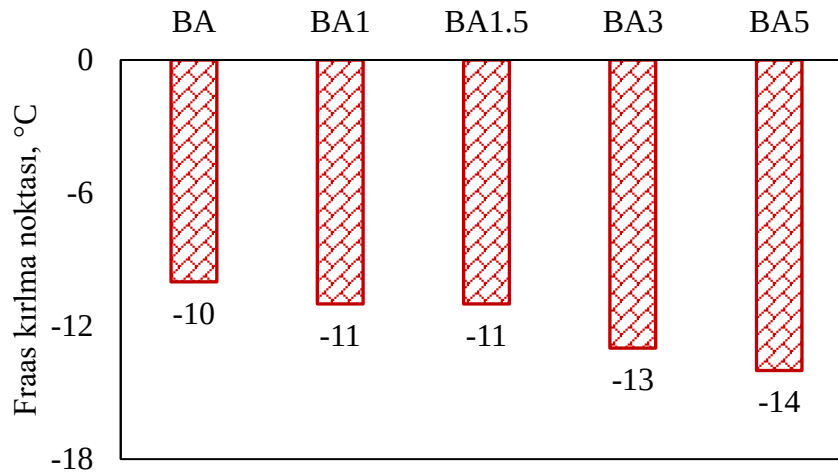


Şekil 59. Özgöl ağırlık deney sonuçları

Şekil 59’a göre özgül ağırlık değerleri incelendiğinde saf bitüm içerisindeki TOBO miktarı arttıkça bağlayıcıların özgül ağırlık değerlerinde artış belirlenmiştir.

3.7. Fraass Kırılma Noktası Deney Sonuçları

Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların fraass kırılma noktası deneyinin sonuçları Şekil 60’te verilmiştir.



Şekil 60. Fraass kırılma noktası deney sonuçları

Deney sonucuna göre, TOBO katkı maddesinin bağlayıcı içerisindeki miktarının artmasıyla saf bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklıklarda meydana gelebilecek çatlakların oluşma eğiliminin azaldığı ve en fazla düşüşün ise %5 katkı miktarında %40 oranında bağlayıcının kırılma sıcaklığının düşüş gösterdiği saptanmıştır.

3.8. Trikloretilende Çözünürlük Deneyi

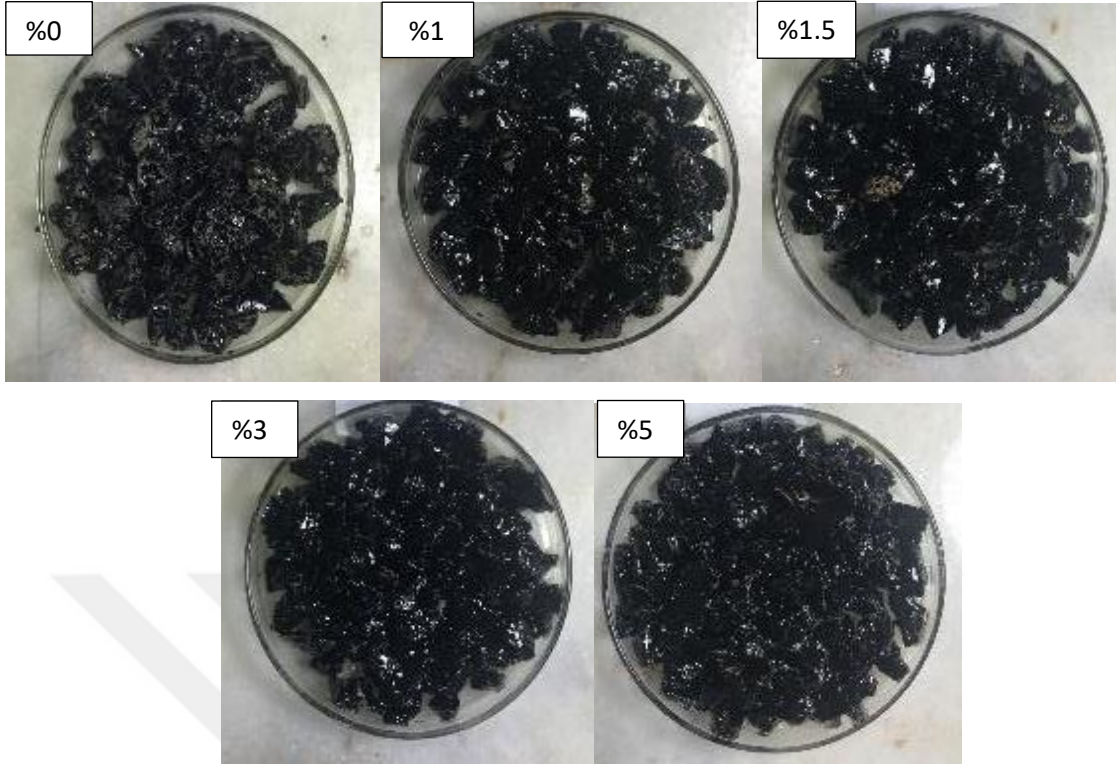
%5 TOBO ile modifiye edilmiş bağlayıcıya uygulanan trikloretilende çözünürlük deneyine ait görseller Şekil 61’de görülmektedir. Karayolları Teknik Şartnamesi’ne göre bitümlü bağlayıcıların trikloretilende en az %99 oranında çözünmesi gerektiği ifade edilmektedir. Çalışma kapsamında yapılan deney sonucuna göre filtre kâğıdı üzerinde herhangi bir kalıntının kalmadığı, saf ve %5 TOBO ile modifiye edilmiş bağlayıcının trikloretilende %99.9 oranında çözündüğü görülmektedir. Bu durum sentezlenen TOBO katkı maddesinin bağlayıcı ile uyum sağladığı şeklinde yorumlanabilir.



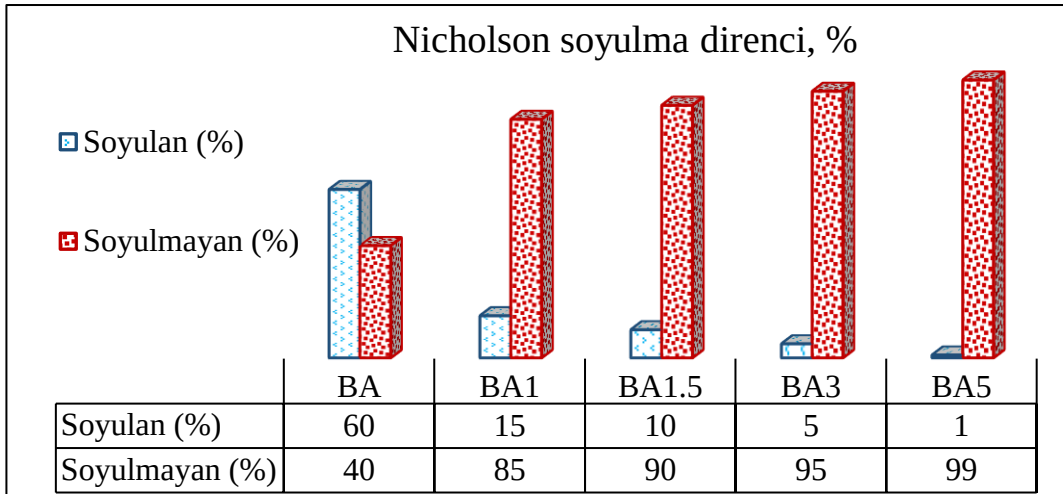
Şekil 61. %5 katkı içerikli bağlayıcının trikloretilende çözünmesi

3.9. Nicholson Soyulma Deney Sonuçları

Bitümlü sıcak karışımlarda bağlayıcı ile agrega arasındaki aderansın su etkisi altındaki değişiminin incelenmesi amacıyla Nicholson soyulma deneyi saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde uygulanmıştır (Şekil 62). Deney sonucunda elde edilen nitel gözlemlerle elde edilen soyulma direnci değerleri Şekil 63’te verilmiştir.



Şekil 62. Nicholson soyulma deneyi sonrası sıkıştırılmamış karışımların görüntüsü

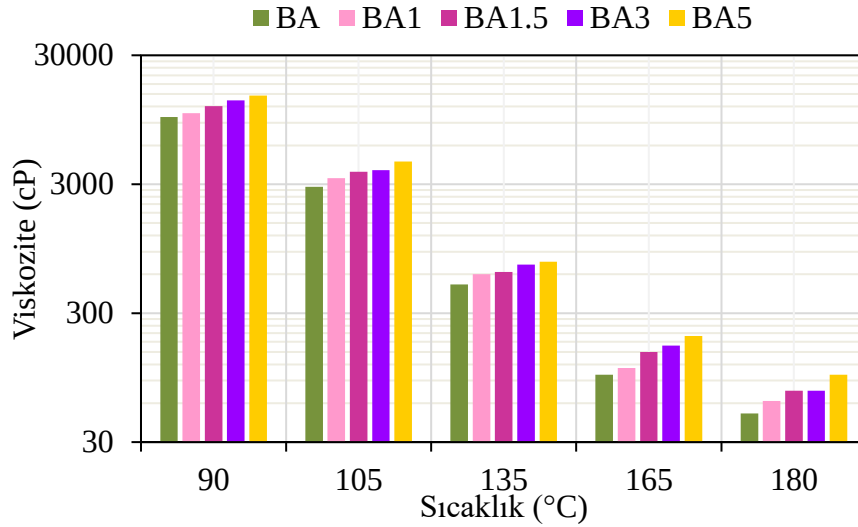


Şekil 63. Bitümlü bağlayıcı karışımların soyulma direnci değerleri

Şekil 63'teki sonuçlar incelendiğinde, modifiyeli bağlayıcılarla yapılan karışımlara ait soyulma dirençlerinin, saf bitüm ile yapılan karışıma göre %1, %1.5, %3 ve %5 TOBO içeriğinde sırasıyla %112.5, %125, %137.5 ve %147.5 oranlarında artış göstermiştir. Bu verilerden sentezlenen TOBO katkı maddesinin, saf bitümün agregayla oluşturduğu adeziv bağı güçlendirip soyulmaya karşı direncini artırdığı açık bir şekilde ifade edilmektedir.

3.10. Dönel Viskozimetre (RV) Deney Sonuçları

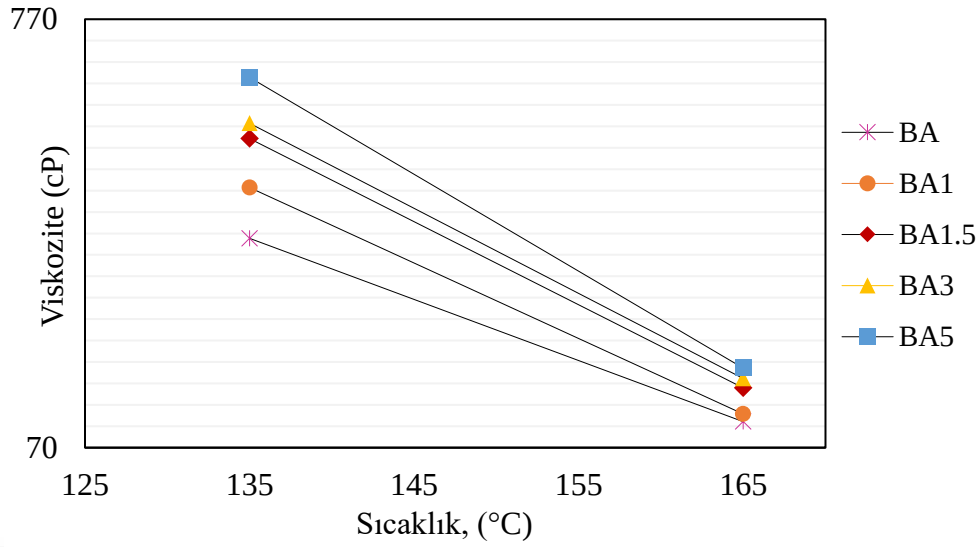
Bitümlü bağlayıcılara 90°C, 105°C, 135°C, 165°C ve 180°C sıcaklıklarda uygulanan dönel viskozite deney sonuçları Şekil 64'te verilmiştir. Katkı maddesi miktarının artmasıyla deneyin yapıldığı her sıcaklıkta saf bağlayıcıya göre modifiye bağlayıcıların viskozite değerleri paralel olarak artış göstermiştir. İşlenebilirlik bakımından bitümlü bağlayıcıların 135°C'deki viskozite değerlerinin 3000 cP sınırını geçmemesi Superpave şartnamesine göre istenmektedir. Deney sonuçlarına göre, 135°C'de modifiye bağlayıcılarda TOBO katkısının miktarındaki artışla birlikte RV değerlerinde bir miktar artış gözlenmiştir. Fakat bu artışın 3000 cP'dan düşük olduğu ve şartname şartlarını işlenebilirlik açısından sağladığı görülmektedir.



Şekil 64. Bitümlü bağlayıcıların RV deney sonuçları

Bitümlü bağlayıcıların agregayla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesinde 135°C ve 165°C'deki viskozite değerlerinden faydalanılmaktadır. Bu iki sıcaklıkta ölçülen viskozite değerleri logaritmik sıcaklık-viskozite grafiğinde yerine konularak çizilir (Şekil 65) ve grafikten karıştırma sıcaklığı olan 170 ± 20 cP ve sıkıştırma sıcaklığı olan 280 ± 30 cP değerlerine karşılık sıcaklık aralığı hesaplanır. Tüm numunelere ait karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları Tablo 14'te verilmiştir.

Şekil 65'te 135°C ve 165°C'de ölçülen viskozite değerlerinden faydalanılarak bağlayıcıların agregayla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının hesaplanarak logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği çizilmiştir.



Şekil 65. Logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği

Tablo 14. Bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları

Numune adı	Karıştırma sıcaklık aralığı (°C)	Sıkıştırma sıcaklık aralığı (°C)
BA	158-161	149-154
BA1	160-163	153-157
BA1.5	163-165	155-159
BA3	164-166	157-160
BA5	166-169	159-162

Tablo 14'teki sonuçlara göre, saf bitümlü bağlayıcıya TOBO katkı maddesi ilave edilmesiyle karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık değerlerinin arttığı görülmüştür. Bu durum, katkı kullanılması ile daha fazla yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulduğu dolayısıyla kullanılan enerji miktarının da daha fazla olacağı anlamına gelmektedir. Buna göre, BA5 modifiyeli bağlayıcının agregayla karıştırılması için yaklaşık 8°C daha yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulacağı saptanmıştır.

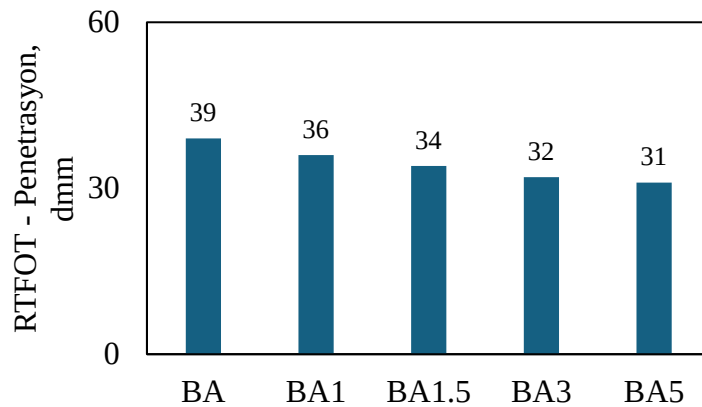
3.11. Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deney Sonuçları

RTFOT deneyi ile kısa süreli yaşlandırılan saf ve modifiye bağlayıcılara, deney sonrasında elde edilen kalıntıya penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite ve DSR deneyleri uygulanırken, ek olarak da kütle kayıpları tespit edilmiştir. RTFOT deneyine ait veriler Tablo 15'te verilmiştir. RTFOT deneyinden kalan kalıntıya yapılan penetrasyon ve

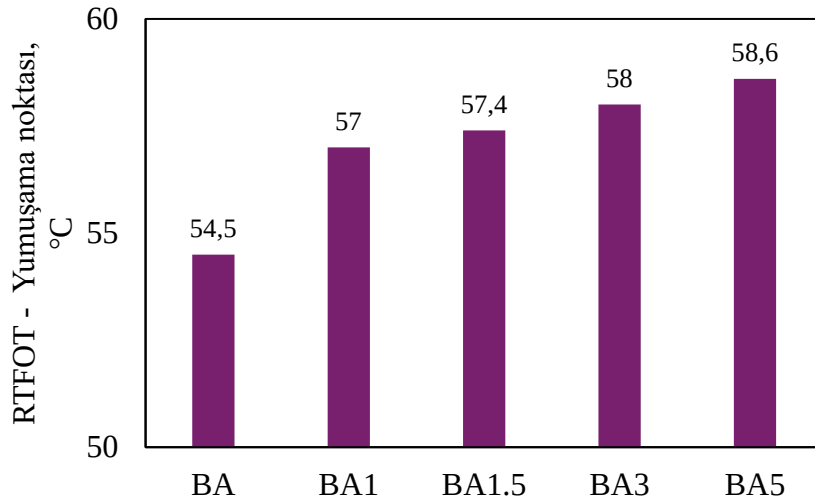
yumuşama noktası deneyler sonuçlarına göre katkı miktarının artmasıyla saf bağlayıcıya göre penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası değerlerinin ise arttığı saptanmıştır (Şekil 66 ve 67). Saf bağlayıcının kalıcı penetrasyon değeri %69.64 iken bu oran %1 TOBO içeriğinde %74.68 değerine ulaşmıştır. %1 katkı oranından sonra kalıcı penetrasyon değeri azalarak %5 katkı içeriğinde %71.19 değerine kadar azalmıştır. ΔS değerlerine bakıldığında, katkı miktarı arttıkça yumuşama noktasındaki sıcaklık farklarının saf bağlayıcıya göre azaldığı ve bu azalmanın %5 TOBO içeriğinde %42.22 oranında olduğu belirlenmiştir (Şekil 68). Modifiye bağlayıcıların kütle kayıplarında ise saf bağlayıcıya kıyasla düşüş meydana geldiği görülmüştür. Kalıcı penetrasyonda artma ve yumuşama noktası sıcaklık farkında meydana gelen azalma katkı maddesinin bağlayıcının yaşlanma etkisini azalttığına bir göstergesidir. AASHTO T240 (ASTM D6373-21A) standardına göre RTFOT deneyi sonrası izin verilen kütle kaybı miktarının %1'den fazla olmaması istenmektedir. Buna göre, kütle kaybı açısından tüm bağlayıcılar şartname şartını sağlamaktadırlar. Kütle kaybında meydana gelen artışın nedeni olarak bitüm-katkı yüzey fazında ağısı bir yapı meydana gelerek bitümün yapısındaki aromatiklerin buharlaşmasının engellenmesiyle kütle kaybı miktarlarının arttığı düşünülmektedir.

Tablo 15. RTFOT deneyi sonrası tüm bağlayıcılara ait fiziksel özellikler

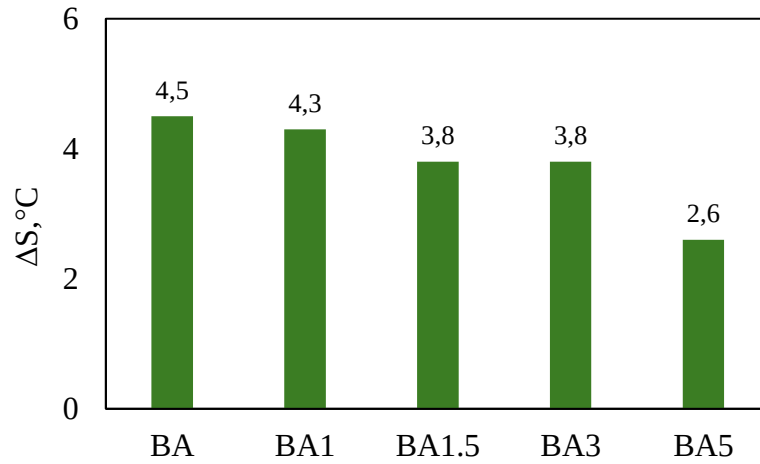
Deneyler	BA	BA1	BA1.5	BA3	BA5
Yumuşama Nok. (°C)	54.5	57.0	57.4	58.0	58.6
ΔS (°C)	4.5	4.3	3.8	3.8	2.6
Penetrasyon (dmm)	39	36	34	32	31
Kalıcı Penetrasyon (%)	69.64	74.68	74.23	72.39	71.19
Düktilite (cm)	100+	100+	100+	100+	100+
Kütle Kaybı (%)	0.055	0.018	0.024	0.028	0.031



Şekil 66. RTFOT sonrası bağlayıcıların penetrasyon sonuçları



Şekil 67. RTFOT sonrası bağlayıcıların yumuşama noktası sonuçları



Şekil 68. RTFOT sonrası yumuşama noktası sıcaklık farkları

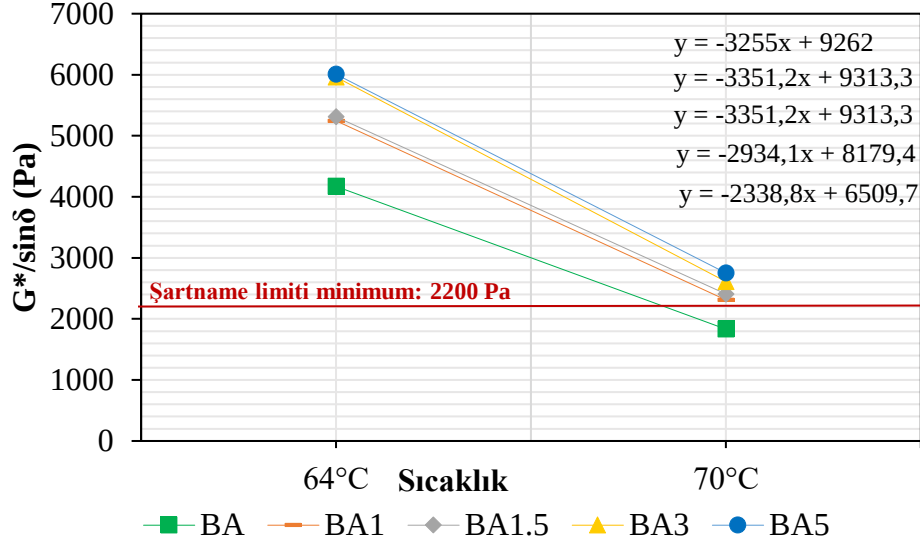
RTFOT deneyi sonrası saf ve modifiye bağlayıcılara DSR deneyi uygulanmıştır. Deneyde, birden çok parametre belirlenmiştir. Deneyde numuneler, 64°C ve 70°C sıcaklıkta kontrollü gerilme (120 Pa) altında, çapı 25 mm olan paralel plaka ve boşluk oranı 1 mm olacak şekilde 1.59 Hz (10 rad/s) frekansta test edilmiştir. Deney sıcaklıkları, DSR deneyi sonrası superpave şartname limitinin istendiği sıcaklıklar baz alınarak seçilmiştir. Tablo 16'da deney sonuçlarına ait veriler gösterilmiştir.

Tablo 16. RTFOT deneyi sonrası DSR test sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G* (Pa)	δ (°C)	G*/sin δ (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	
BA1	64	811.5	5115.8	5180.1	80.96	5245.3	
	70	261.6	2280.9	2295.9	83.44	2311.2	
BA1.5	64	875.2	5162.6	5236.3	80.37	5311.1	
	70	294.7	2371.6	2389.8	82.92	2408.2	
BA3	64	963.8	5801.0	5881.2	80.57	5962.1	
	70	311.3	2573.1	2592.0	83.10	2610.9	
BA5	64	995.7	5868.0	5952.0	80.37	6007.0	
	70	335.7	2710.0	2731.0	82.94	2752.0	

Tablo 16'dan görüleceği üzere, saf bağlayıcıya göre modifiye asfalt bağlayıcıların deneyin yapıldığı sıcaklıklarda G', G'', G* ve G*/sin δ değerlerinin arttığı ve faz açısı değerlerinin de düştüğü görülmektedir.

Şekil 69'da görüldüğü üzere saf bağlayıcıya göre %1, %1.5, %3 ve %5 katkı oranlarında G*/sin δ değerlerinde sırasıyla 64°C'de; %25.75, %27.33, %42.94, %44.02 ve 70°C'de; %26.15, %31.44, %42.50, %50.21 oranlarında artış meydana gelmiştir. Minimum 2200 Pa değeri olan şartname limitini, 64°C sıcaklıkta tüm bağlayıcılar sağlarken, yalnızca saf bağlayıcının 70°C sıcaklıkta sağlamadığı görülmüştür. Superpave yönteminde yüksek sıcaklık değerine göre belirlenen performans seviyesi için hem yaşlandırılmamış hem de kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların aynı sıcaklıkta şartname limitlerini sağlaması istenmektedir. Bu nedenle saf bitümlü bağlayıcıya ait performans seviyesinin yüksek sıcaklıktaki değerinin PG 64-X olduğu, modifiye bağlayıcıların ise PG 70-X olduğu belirlenmiştir. Buna göre, saf bağlayıcıya katkı maddesinin ilavesi ile bağlayıcının performans sınıfının bir üst seviye çıktığı ve katkı maddesinin bağlayıcının tekerlek izine karşı dayanımını arttırdığı gözlenmiştir.

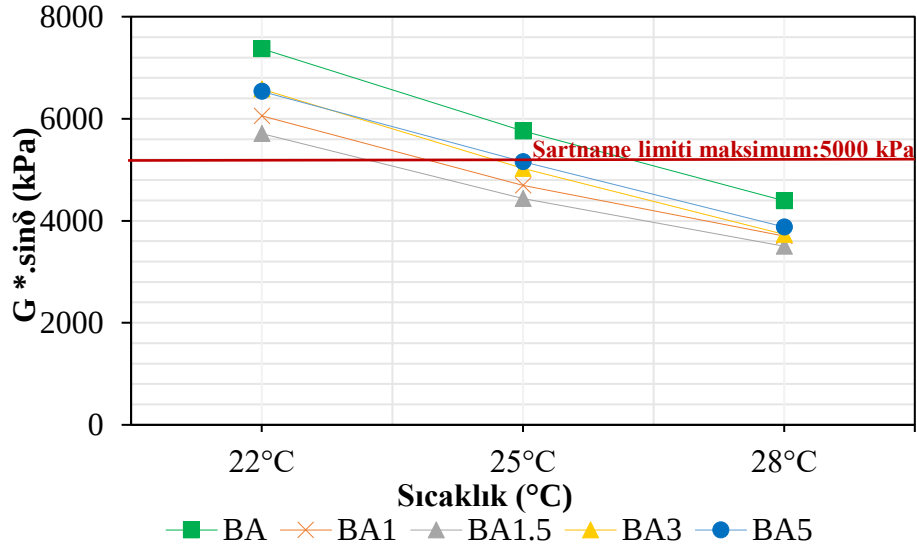
Şekil 69. RTFOT sonrası $G^*/\sin \delta$ değerleri

3.12. Basınçlı Yaşlandırma Kabini (PAV) Deney Sonuçları

PAV deneyinde, RTFOT yöntemi ile kısa süreli yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılarak uzun süreli yaşlanmaya tabi tutulmuştur. Deney sonrasında tüm bağlayıcı numunelere DSR deneyi uygulanmıştır. Deneyde bağlayıcılara ait yorulma direnci parametresi olan $G^* \cdot \sin \delta$ değerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 70’te gösterilmiştir. Ayrıca Tablo 17’de deneye ait veriler verilmiştir.

Tablo 17. PAVdeneyi sonrası DSR test sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	G' (kPa)	G'' (kPa)	G* (kPa)	δ (°C)	$G^* \cdot \sin \delta$ (kPa)	Şartname Limiti (Pa)
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	
BA1 (24.3 °C)	22	8217	6057	10210	36.40	6057	
	25	5947	4692	7575	38.27	4692	
	28	-	-	-	-	-	
BA1.5 (23.6 °C)	22	8194	5709	9986	34.87	5709	
	25	5972	4438	7441	36.62	4438	
	28	-	-	-	-	-	
BA3 (25.1 °C)	22	9831	6580	11830	33.79	6580	
	25	6984	5029	8606	35.75	5029	
	28	4805	3733	6084	37.84	3733	
BA5 (25.3 °C)	22	9322	6535	11380	35.03	6535	
	25	6918	5160	8630	36.72	5160	
	28	4837	3878	6200	38.72	3878	



Şekil 70. PAV sonrası $G^* \cdot \sin \delta$ değerleri

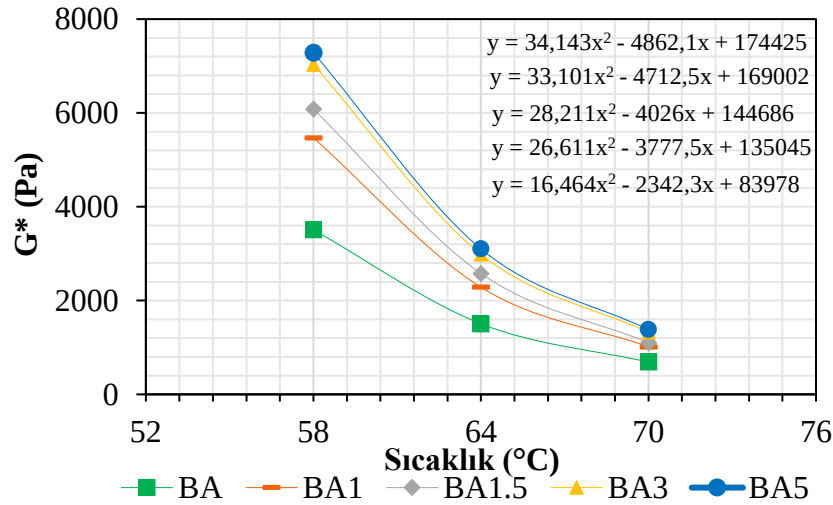
Superpave şartnamesine göre yorulma direnci parametresi ($G^* \cdot \sin \delta$) değerinin 5000 kPa limitini aşmaması gerekmektedir. $G^* \cdot \sin \delta$ değerinin düşük olması, bağlayıcının uzun dönem yaşlanmadan sonra meydana gelen yorulmalara karşı direncinin daha yüksek olması manasına gelmektedir. Şekil 70'te görüldüğü üzere, deney sıcaklığı 28°C sıcaklıkta başlatılarak şartname sınırına kadar devam ettirilmiştir. 22°C sıcaklıkta tüm bağlayıcıların $G^* \cdot \sin \delta$ değerinin şartname sınır değeri olan 5000 kPa'yı aştığı belirlenmiştir. Bu sıcaklığı takip eden 25°C'de sadece BA ve BA5 bağlayıcıların şartname sınırını aştığı, 28°C sıcaklıkta ise gerekli sınır şartını tüm bağlayıcıların sağladığı görülmektedir. Şekil 70'te görüldüğü gibi deneyin yapıldığı sıcaklıklarda TOBO maddesinin artışıyla birlikte, saf bağlayıcının $G^* \cdot \sin \delta$ değerlerinin %1.5 katkı oranına kadar arttığı fakat katkı miktarının daha da arttırılmasıyla azaldığı görülmektedir. Bu duruma katkı maddesinin ana bileşenlerinden biri olan ve içeriğinde bulunan bor oksitten kaynaklı bağlayıcıyı sertleştirmiş olabileceği düşünülmektedir. Saf bağlayıcıya göre %1, %1.5, %3 ve %5 katkı içeriklerinde $G^* \cdot \sin \delta$ değerlerinin, 22°C sıcaklık için sırasıyla %17.83, %22.55, %10.74 ve %11.35; 25°C sıcaklık için %18.58, %22.99, %12.73, %10.46 oranlarında azaldığı belirlenmiştir. 28°C sıcaklıkta ise saf bağlayıcıya göre %3 ve %5 katkı miktarında sırasıyla %15 ve %11.70 oranlarında bir azalma meydana gelirken %1 ve %1.5 katkı miktarlarında bir değer okunmamıştır. Deney sonuçları dikkate alındığında, katkı maddesinin saf bağlayıcının yorulma direncini belirli oranlarda (%1 ve %1.5) arttırdığı, en yüksek yorulma direncini BA1.5 numunesinin verdiği ve şartname limitinin 23.6°C'de sağlandığı belirlenmiştir.

3.13. Dinamik Kesme Reometrisi (DSR) Deney Sonuçları

Superpave yöntemine göre DSR deneyi, 1.59 Hz (10 rad/s) frekans, çapı 25 mm olan paralel plaklar ve plakalar arası 1 mm boşluk olacak şekilde kontrollü gerilme (120 Pa) altında yaşlandırılmamış saf ve modifiye bağlayıcılar üzerinde uygulanmıştır. Tüm bağlayıcılar 3 farklı sıcaklıkta (58, 64 ve 70°C) deney uygulanmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları Tablo 18’de verilmiştir. Şekil 71’de kompleks kayma modülü (G^*) değerlerinin katkı miktarıyla değişimi, Şekil 72’de faz açısı (δ°) değerlerinin değişimi ve Şekil 73’te tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin \delta$) değerlerinin değişimi sırasıyla verilmiştir.

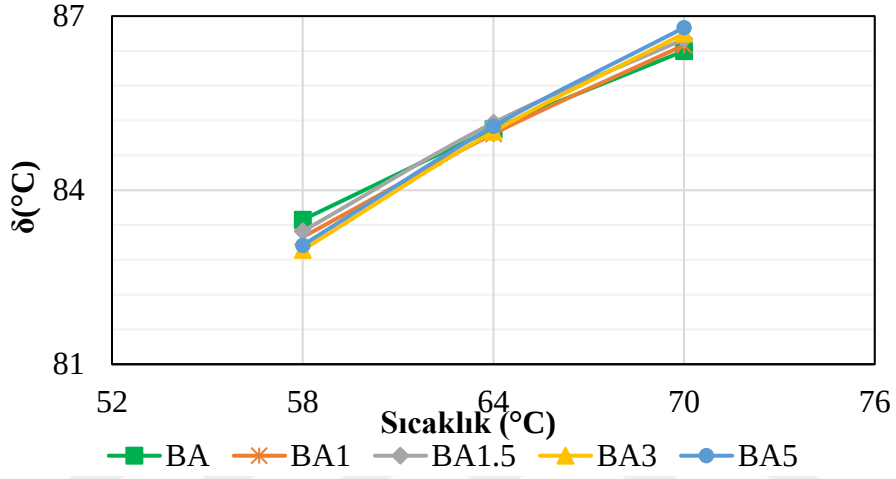
Tablo 18. Tüm bağlayıcıların DSR deney sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G^* (Pa)	δ (°C)	$G^*/\sin \delta$ (Pa)	Şartname Limiti (Pa)
BA (67.7 °C)	58	397.6	3484.8	35072	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	
BA1 (70.2 °C)	58	649.1	5431.8	5470.3	83.19	5509.1	
	64	196.0	2275.9	2284.7	84.97	2293.5	
	70	62.38	1013.2	1015.1	86.49	1017.1	
BA1.5 (71.2 °C)	58	711.0	6040.9	6082.3	83.29	6123.7	
	64	212.8	2567.9	2577.1	85.16	2586.3	
	70	64.9	1101.2	1103.1	86.64	1153.4	
BA3 (72.7 °C)	58	860.4	6978.0	7030.8	82.97	7084.1	
	64	258.9	2974.8	2986.1	85.01	2997.4	
	70	77.9	1322.4	1324.7	86.63	1326.9	
BA5 (73.0 °C)	58	881.0	7228.7	7282.2	83.05	7336.1	
	64	264.7	3091.2	3102.5	85.10	3113.8	
	70	79.2	1378.7	1381.1	86.62	1383.5	



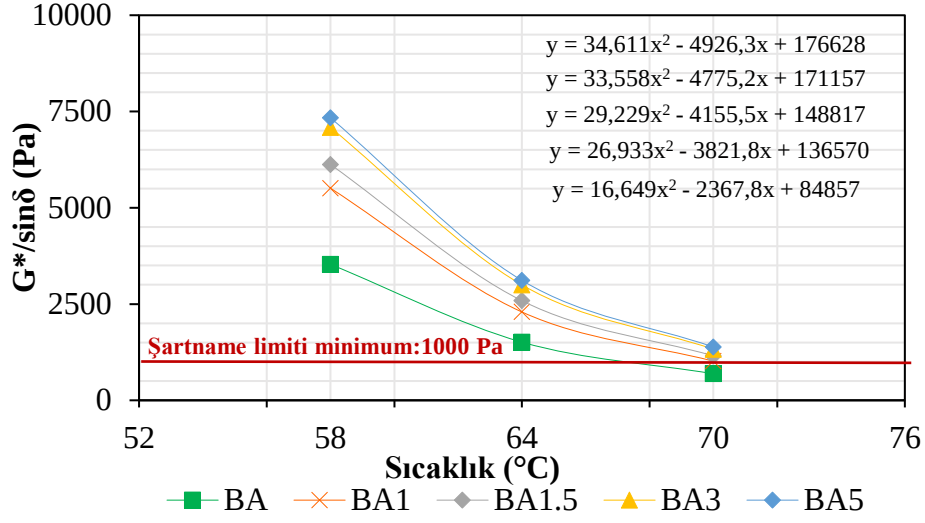
Şekil 71. Bağlayıcıların kompleks modül (G^*) değerleri

Şekil 71'e göre, G^* değerleri sıcaklığın artmasıyla birlikte azalırken katkı oranının artmasıyla bu değerlerin düzenli bir şekilde arttığı, dolayısıyla TOBO katkı maddesinin modifiyer olarak bağlayıcıda kullanımının kaymaya karşı direnç bakımından olumlu sonuçlar elde edeceği söylenebilmektedir. Deney sonuçlarından, 64°C sıcaklıkta %1, %1.5, %3 ve %5 katkı içeriğinde saf bağlayıcının kompleks kayma modülü değeri sırasıyla %55.97, %73.2, %100.46, %107.63 oranlarında arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 72. Bağlayıcıların faz açısı (δ°) değerleri

0°C ile 90°C arasındaki sıcaklıkta değişen faz açısı (δ°) değerinin sıfıra yakın olması elastik davranış, 90°C sıcaklığa yakın olması ise viskoz davranış göstermektedir. Şekil 72'de görüldüğü gibi sıcaklığın artmasıyla faz açısı değerlerinin de arttığı yani bağlayıcıların davranışsal olarak daha viskoz olduğu belirlenmiştir. Bütün deney sıcaklıklarında saf bağlayıcının yüksek δ değerlerine sahip olması katkı maddesinin bağlayıcının elastiklik özelliğini arttırdığını göstermektedir.



Şekil 73. Bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerleri

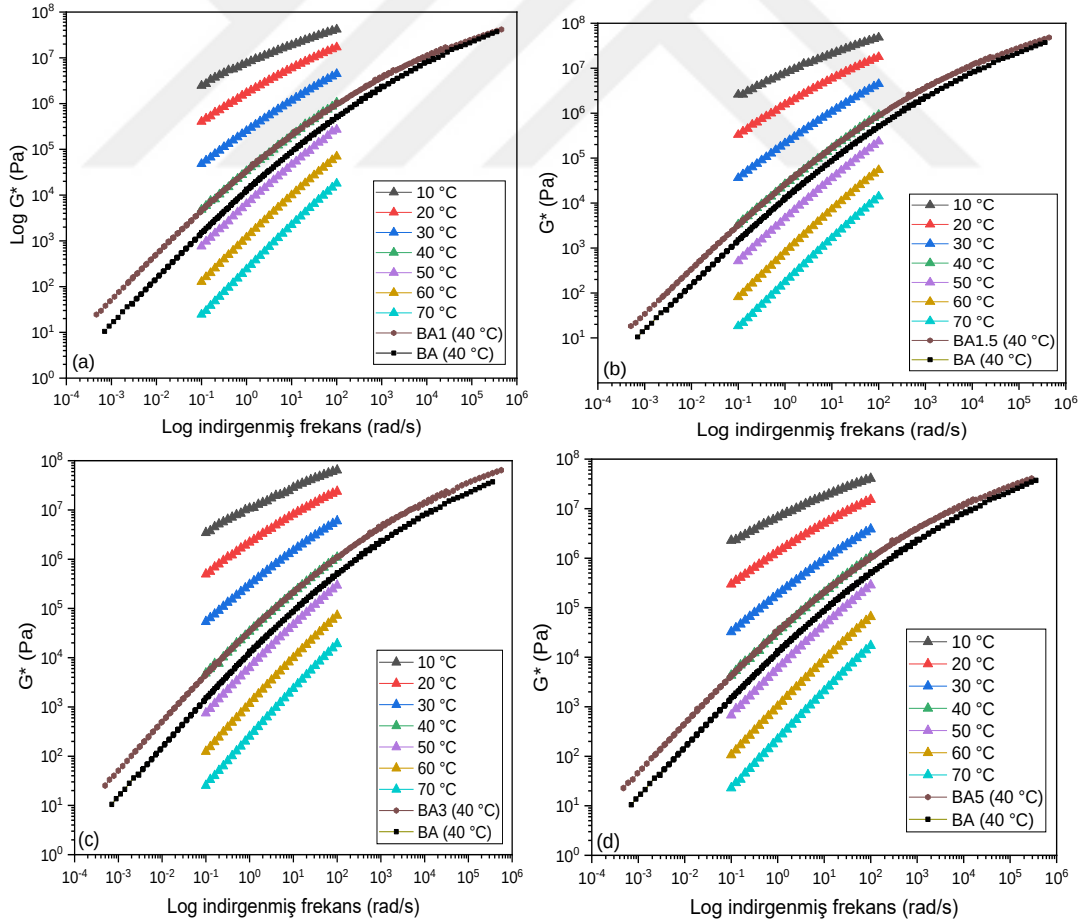
Şekil 73'te tekerlek izi dayanım parametrelerine ($G^*/\sin \delta$) bakıldığında, katkı oranı arttıkça bu parametrelerin de düzenli bir şekilde artış gösterdiği, sıcaklığın artmasıyla ise düzenli bir şekilde azaldığı belirlenmiştir. Superpave yönteminde modifiye edilmemiş bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi dayanımının şartname kriterini olarak minimum 1000 Pa değerini 3 sıcaklıkta bütün bağlayıcıların sağladığı (saf bağlayıcı 70°C hariç) belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan %1 gibi düşük bir oranda TOBO katkı maddesinin kullanımı ile saf bağlayıcının performans seviyesini (PG) 70°C 'ye çıktığı dolayısıyla PG seviyesinin de bir üst dereceye çıktığı tespit edilmiştir. Bu durum özellikle bu katkı miktarında, saf bağlayıcının daha elastik davranış gösterdiğini ve bununla birlikte tekerlek izi direncinin de iyileştiğinin açık bir ifadesidir.

3.14. Frekans Taraması Deney Sonuçları

Frekans tarama testi, malzemenin sabit gerinim altında farklı frekanslarla salınmasını içermektedir. Frekans olarak zamanın tersi esas alındığından, salınım frekansı değiştirilerek bir malzemenin zamana bağlı viskoelastik karakterini değerlendirmek mümkündür. Bu testler doğrusal viskoelastik bölgede gerçekleştirildiğinden malzemenin yapısal bütünlüğü bozulmadan mikroyapısal parmak izi sağlanmış olmaktadır. Deney, Malvern DSR reometre cihazı kullanarak saf ve TOBO katkılı bağlayıcılara, $10-70^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında 10°C sıcaklık artışı ile uygulanmıştır. Deney daha önce yapılan çalışmaya dayanarak, iki farklı sıcaklık aralığı ve iki farklı deney geometrisi kullanılmıştır (Airey 2002). Bitümlü

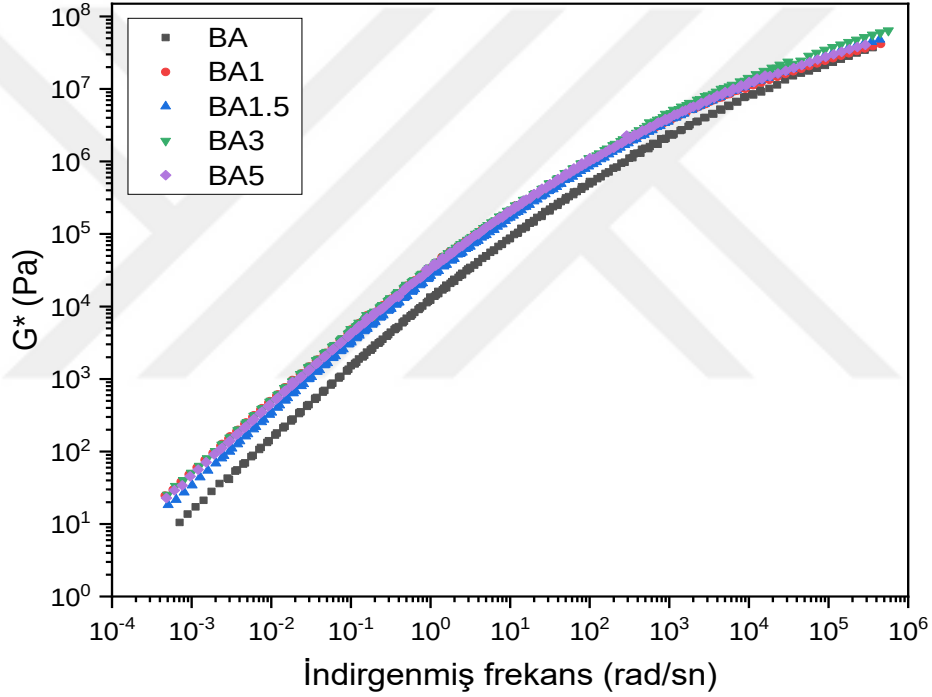
bağlayıcıların doğrusal viskoelastik (LVE) bölgesinde kalacak şekilde deney uygulanmıştır. Frekansın 0.1-100 rad/sn aralığında ve 31 frekans değeri belirlenecek biçimde tasarlanmıştır. Geniş bir frekans aralığındaki viskoelastik davranışı temsil etmek için referans sıcaklığı olarak belirlenen 40°C’de zaman sıcaklık süperpozisyon prensibi (TTSP)’ ne göre kompleks modül (G^*) ve faz açısı (δ) değerlerine ait ana eğrileri (master curve) elde edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında yaşlandırılmamış bağlayıcılar üzerine 7 farklı sıcaklıkta (10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C ve 70 °C) 31 farklı frekansta (0.1-100 rad/s arasında) frekans taraması testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 84-87’de %1, %1.5, %3 ve %5 TOBO katkıli bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki kompleks modüllerinin frekans ile değişimi ve kıyaslamak açısından %1, %1.5, %3 ve %5 TOBO katkıli bağlayıcı ile saf bağlayıcının 40°C referans sıcaklıktaki ana eğrileri verilmiştir. Şekillere göre sıcaklık değeri arttıkça kompleks modüllerde düşüş görülmektedir. Katkıli bağlayıcıların 40°C referans sıcaklıkta bütün frekanslarda saf bağlayıcıdan daha yüksek kompleks modül değeri verdiği belirlenmiştir.



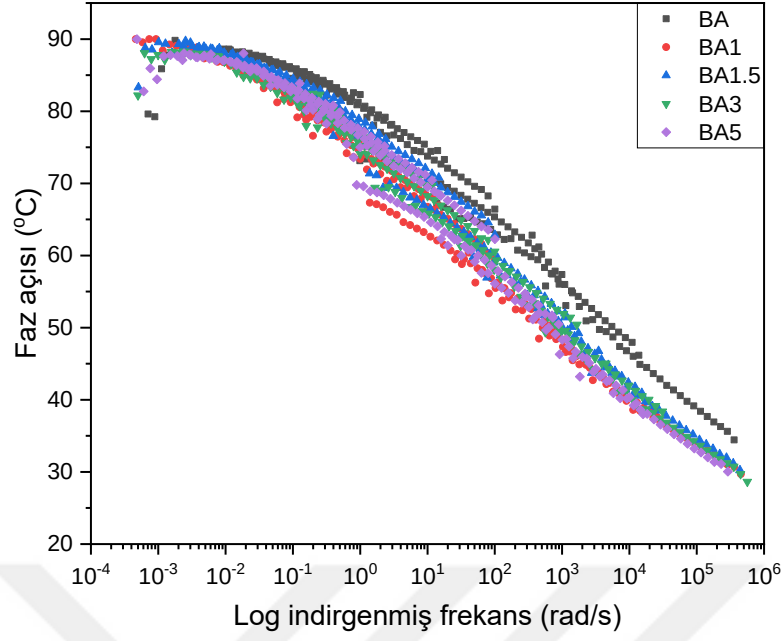
Şekil 74. Saf ve modifiyeli bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki kompleks modüllerinin frekansla değişimi

Şekil 75'te saf ve TOBO katkılı bağlayıcıların 40°C referans sıcaklıktaki ana eğrileri verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere bütün frekanslarda TOBO katkılı bağlayıcılar saf bağlayıcıdan daha yüksek kompleks modül değerleri vererek daha rijit davranış sergilemektedir. Özellikle düşük frekanslarda yani düşük taşıt hızı veya durağan trafikte katkılı bağlayıcılar daha rijit davranış sergileyerek tekerlek izi oluşumuna karşı daha dirençli olduğunu göstermiştir. Frekans değeri arttıkça kompleks G^* değerleri birbirine yaklaşılmaya başlamıştır. Bütün frekans değerlerinde saf bağlayıcının en düşük kompleks modül değerini verdiği belirlenmiştir. En yüksek kompleks modül değerlerinin %3 oranında katkı kullanımı ile sağlanacağı görülmektedir.



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

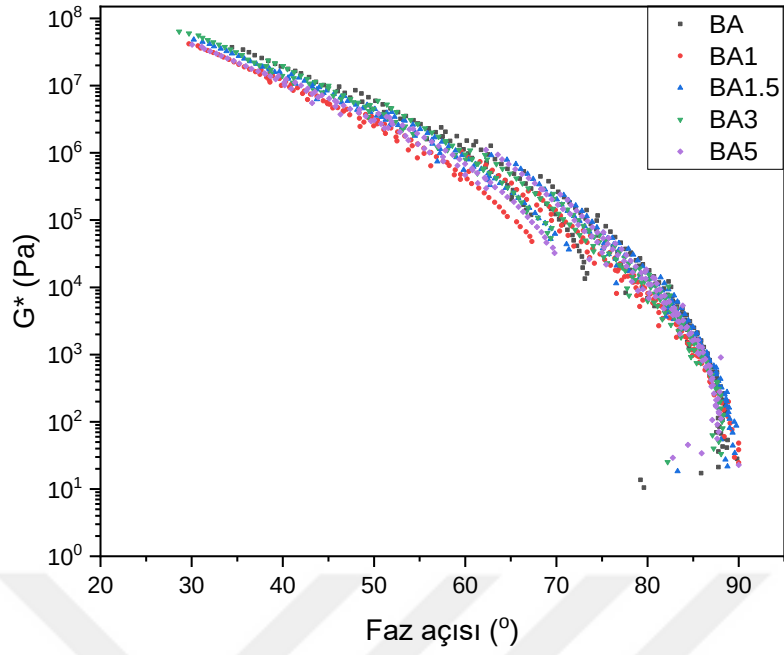
Şekil 76'da saf ve modifiye bağlayıcılara ait faz açılarının frekansla değişimi verilmiştir.



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

Şekil 76’da görüldüğü üzere düşük frekanslarda (düşük taşıt hızı veya durağan trafik) bütün bağlayıcılar benzer faz açısı değerleri vererek viskoz davranış sergilemişlerdir. Ancak frekans değeri arttıkça modifiye bağlayıcıların faz açısı değerinin azalması saf bağlayıcıya kıyasla daha fazla olmuştur ve modifiye bağlayıcılar daha elastik bir davranış sergilemeye başlamışlardır.

Kompleks kayma modülüne karşılık gelen faz açısını Black space diagram (Şekil 77), ifade etmektedir ve modifiye bitümlerin reolojik özelliklerinin tanımlanmasını sağlamaktadır. Çizilen eğrinin karakteristik zaman-sıcaklık süperpozisyonunun ve termoreolojik açıdan basitliğin geçerliliğini tespit etmek için kullanılmaktadır (Qin, Farrar, Turner & Planche, 2015). Genel bir ifadeyle, bağlayıcının esnek davranışının artması düşük kompleks modülü ve buna karşılık düşük faz açısı değeri ile ifade edilmektedir. Saf bitümlü bağlayıcıya kıyasla, her modifiye bitümlü bağlayıcıya ait reolojik verilerinin daha düşük faz açısına doğru kaymasıyla ifade edilen katkı-bitüm karışımı içinde bir ağın var olmasını göstermektedir (kısaca daha elastik davranışın daha büyük olması). Şekilde görüldüğü üzere özellikle düşük faza açısı değerlerinde BA1.5 ve BA3 bağlayıcıları da yüksek kompleks modül değerleri vererek daha elastik bir davranış sergilemiştir. Bu da tekerlek izine karşı dirençte %1.5 ve %3 oranlarının daha etkin olacağını göstermektedir. Yüksek faz açısı değerlerinde ise bütün bağlayıcılar benzer performans sergilemişlerdir.



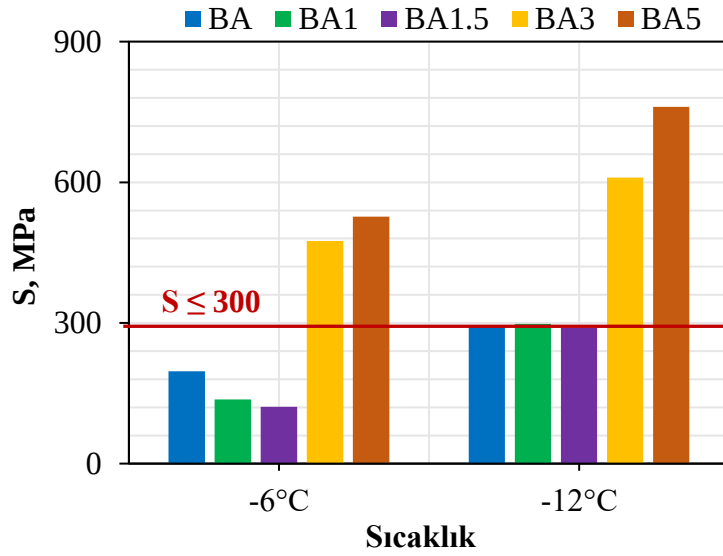
Şekil 77. Siyah (Black) diyagram

3.15. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deney Sonuçları

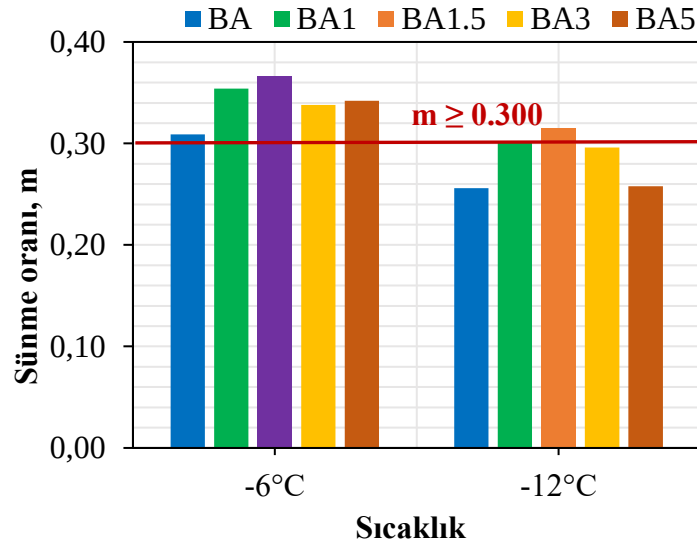
Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyinin sonuna ait veriler Tablo 19’da gösterilmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcılara -12°C ve -6 °C sıcaklıklarda BBR deneyi uygulanarak Şekil 78’de sünme rijitliği (S) ve Şekil 79’da sünme oranı (m) grafiksel olarak ifade edilmiştir.

Tablo 19. BBR deney sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	Sünme Rijitliği S (MPa) ≤ 300 olmalı	Sünme oranı, m ≥ 0.300 olmalı	Defleksiyon (mm)
BA	-6	197.160	0.309	0.354
	-12	294.772	0.256	0.243
BA1	-6	136.923	0.354	0.672
	-12	298.644	0.302	0.159
BA1.5	-6	120.644	0.366	0.568
	-12	290.124	0.315	0.161
BA3	-6	475.218	0.338	0.488
	-12	610.652	0.296	0.204
BA5	-6	526.637	0.342	0.462
	-12	761.260	0.258	0.186



Şekil 78. S değerlerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 79. m değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Superpave şartnamesine göre sünme rijitliği (S) değerinin 300 MPa değerini aşmaması istenmektedir. S değerinin yüksek olması bağlayıcının gevrek davranış göstereceğini ve düşük sıcaklıklarda kaplamalardaki çatlama miktarının daha fazla olacağını göstermektedir. Benzer biçimde, sünme oranı (m) değerinin de Superpave şartname limitlerine göre en az 0.300 olması istenmektedir. Çünkü m değeri ne kadar fazlaysa bağlayıcının sertliği de o derece az demektir. Sünme rijitliği değerlerinin grafiksel olarak ifade edildiği Şekil 78’de, deneyin yapıldığı her iki sıcaklıkta, saf bağlayıcının, %1 ve %1.5 TOBO katkılı

bağlayıcılarda bir azalma gösterirken, %3 ve %5 katkılı bağlayıcılarda şartname limitini aştığı görülmektedir. Buradan hareketle, saf bağlayıcıya %1 ve %1.5 oranında katkı maddesi ilavesiyle bağlayıcının çatlama davranışının her iki deney sıcaklığında da iyileşme gösterdiği belirlenmiştir. -6°C sıcaklıkta %1 ve %1.5 katkı oranlarında sünme rijitliği değerlerinde saf bağlayıcıya göre sırasıyla %30.45 ve %38.57 oranlarında, -12°C sıcaklıkta %1.5 katkı içeriğinde %1.69 oranında azalma görülmüş ve maksimum 300 MPa olan şartname değerinin altında kalmıştır. Şekil 79'daki sünme oranı değerlerine bakıldığında, -6°C sıcaklıkta minimum 0.300 değerini %1, %1.5, %3 ve %5 katkı içeriğine sahip bitümlü bağlayıcıların sağladığı görülürken, -12°C sıcaklıkta %1 ve %1.5 katkı içeriğine sahip bağlayıcılar bu değeri sağlarken, %3 ve %5 katkı içeriği olan bitümlü bağlayıcıların sünme oranları bu değeri sağlamamıştır. Fakat, tüm modifiyeli bağlayıcıların her iki deney sıcaklığında da sünme oranı değerleri saf bağlayıcının sünme oranı değerinden daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bütün bu veriler bir bütün olarak ele alındığında, TOBO katkı maddesinin saf bağlayıcının düşük sıcaklıklarda meydana gelebilecek çatlama karşı direnç kazandırdığı ve en çok etkiyi ise %1.5 katkı oranının sağladığı tespit edilmiştir. Ek olarak, %1 gibi düşük katkı oranında bile bağlayıcının çatlama direncini arttırdığı deney sonuçlarından çıkarılmaktadır.

Ek olarak, BBR deneyi ile bağlayıcıların düşük sıcaklardaki performans sınıfı belirlenmektedir. Saf ve TOBO modifiyeli bağlayıcıların performans sınıfları DSR ve BBR deneylerinin sonuçlarından yararlanılarak belirlenmiş ve Tablo 20'de gösterilmiştir.

Tablo 20. Bağlayıcıların performans sınıfları

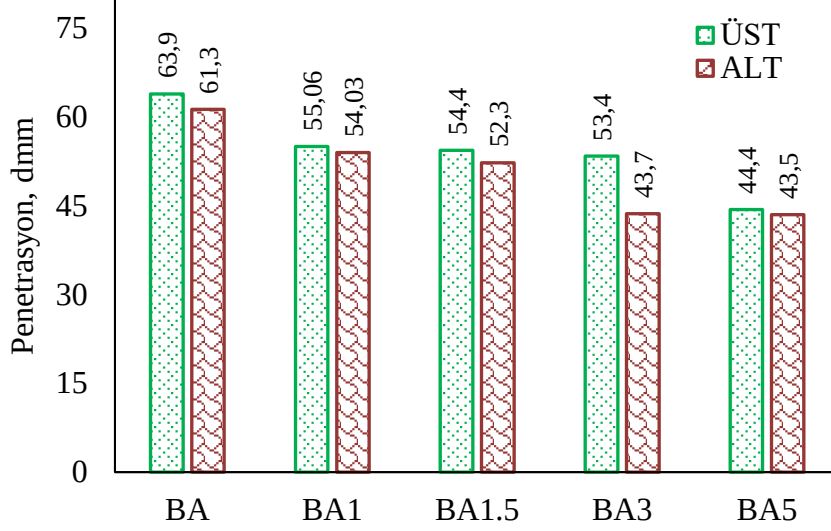
Numune Adı	Performance Sınıfı
BA	PG 64 – 16
BA1	PG 70 – 22
BA1.5	PG 70 – 22
BA3	PG 70 – 10
BA5	PG 70 – 10

3.16. Depolama Stabilitesi Deney Sonuçları

Depolama stabilitesi deneyinden sonra elde edilen alt ve üst tüm bağlayıcı numunelerine penetrasyon, yumuşama noktası, RV ve DSR deneyleri yapılmıştır.

❖ Depolama stabilitesi sonrası penetrasyon deney sonuçları

TOBO modifiyeli bağlayıcılara üzerinde depolama stabilitesi deneyi yapılarak elde edilen tüm numunelere ait penetrasyon deneyi sonuçları Şekil 80’de verilmiştir.



Şekil 80. Depolama stabilitesi sonrası penetrasyon deney sonuçları

Şekil 80’e göre, TOBO içeren bitümlü bağlayıcılarda depolama stabilitesi sonrasında tüplerin üst kısmından elde edilen penetrasyon değerlerinin, tüplerin alt kısımlarından elde edilen penetrasyon değerlerinden fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin tüplerin dibinde biriken katkı maddesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Tüplerin alt ve üst bölgelerinden alınan numuneler karşılaştırıldığında BA bağlayıcı en yüksek penetrasyon değerlerine sahipken BA5 modifiyeli bağlayıcı en düşük penetrasyon değerine sahip olduğu görülmektedir.

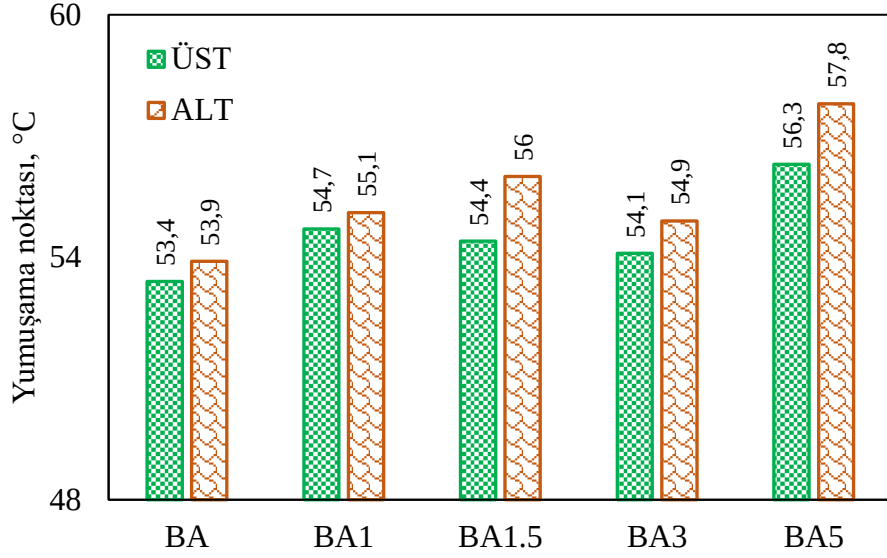
Tüplerin alt ve üst kısımlarına uygulanan penetrasyon deneyinden elde edilen en yüksek değerler saf bağlayıcıda olduğu, en düşük penetrasyon değerinin ise BA5 modifiyeli bağlayıcıda olduğu belirlenmiştir. Depolama stabilitesi sonrası yapılan penetrasyon deneyi ile elde edilen değerler incelendiğinde, TOBO katkı maddesinin katkı oranına bağlı olarak bağlayıcının kıvamını arttırdığı tespit edilmiştir.

Depolama stabilite sonrasında tüplerin üst ve alt kısımları arasındaki penetrasyon farkının BA, BA1, BA1.5, BA3 ve BA5 bağlayıcıları için sırasıyla %4.1, 1.38, %3.86, %18.6 ve %2.02 olarak belirlenmiştir. Hem alt hem de üst kısımdan alınan numunelere ait penetrasyon değerleri arasındaki fark EN 14023 standardına göre 13 mm^{-1} ’den fazla

olmamalıdır. Depolama stabilitesi açısından en kararlı numunenin numunenin %5 TOBO içeren bağlayıcıda olduğu, en karasız ve olumsuz sonuçların ise saf bağlayıcıda elde edildiği görülmüştür.

❖ Depolama stabilitesi sonrası yumuşama noktası deney sonuçları

TOBO modifiyeli bağlayıcılar üzerinde depolama stabilitesi deneyi uygulanarak elde edilen tüm numunelere ait yumuşama noktası deneyi sonuçları Şekil 81’de verilmiştir.



Şekil 81. Depolama stabilitesi sonrası penetrasyon deney sonuçları

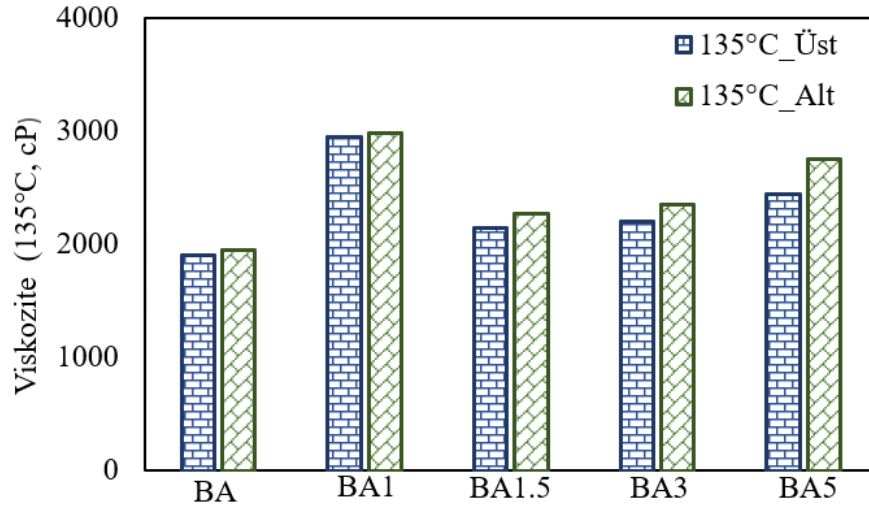
Şekil 81’e göre, TOBO içeren bitümlü bağlayıcılarda depolama stabilitesi sonrasında tüplerin alt kısımlarındaki yumuşama noktası değerlerinin, tüplerin üst kısımlarındaki yumuşama noktası değerlerinden daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durumun depolamadan dolayı katkının tüplerin alt tarafına çökmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Tüplerin alt ve üst bölgelerinden alınan numuneler karşılaştırıldığında BA bağlayıcı en düşük yumuşama noktası değerine sahipken BA5 modifiyeli bağlayıcı en yüksek yumuşama noktası değerine sahip olduğu görülmektedir.

EN 14023 standardında, deneyi sonrasında tüplerin alt ve üst kısımlarının her iki kısmından elde edilen yumuşama noktası deneyi değerleri arasındaki farkın en fazla 5°C olması istenmektedir. Buna göre, deney sonuçlarına göre numunelerin alt ve üst kısımlarının yumuşama noktası değerleri arasındaki en yüksek sıcaklık farkının 1.6 °C olduğu ve BA1.5 modifiyeli bağlayıcının bu farkı sağladığı görülmüştür. Tüm modifiye bağlayıcıların

yumuşama noktası bakımından şartname limitlerini sağladığı ve TOBO katkısını depolama sonrasında yumuşama noktası açısından bir olumsuzluğa sebebiyet vermediği belirlenmiştir.

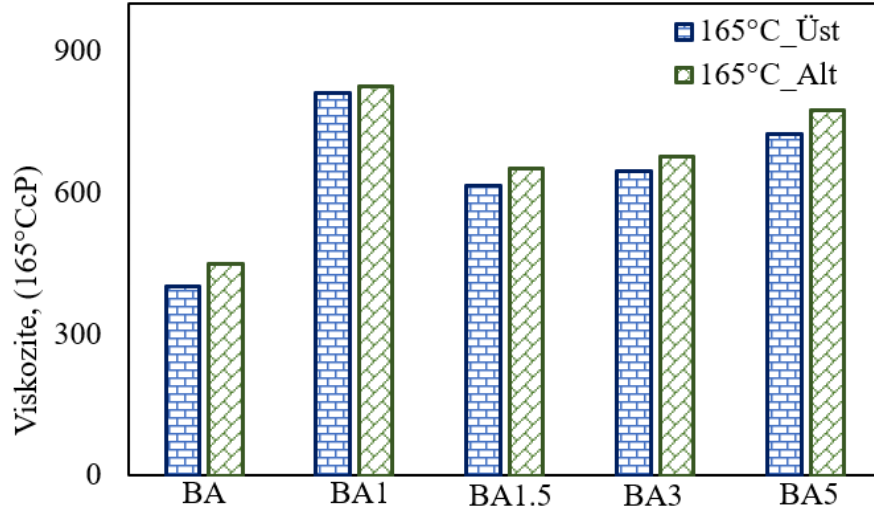
❖ Depolama stabilitesi sonrası RV deney sonuçları

TOBO modifiyeli bağlayıcılara uygulanan depolama stabilitesi deneyi sonucunda elde edilen tüm numunelere ait 135°C ve 165°C'deki viskozite sonuçları sırasıyla Şekil 82 ve Şekil 83'te gösterilmiştir.



Şekil 82. Depolama stabilitesi sonrası bağlayıcıların 135°C'deki viskozite sonuçları

Şekil 82'ye göre, depolama stabilitesi deneyinden sonra tüplerin alt kısmının viskozite değerleri üst kısmının viskozite değerlerinden daha yüksek çıktığı görülmektedir. Saf bağlayıcının viskozite değerlerini TOBO katkı maddesinin arttırdığı fakat tüplerin alt ve üst kısımları arasındaki farkın işlenebilirlik açısından herhangi bir olumsuzluk teşkil etmediği gözlenmiştir. Ek olarak tüm modifiye bitümlü bağlayıcılara ait 135°C'deki viskozite değerleri 3000 cP olan şartname limitini sağladığı görülmüştür.



Şekil 83. Depolama stabilitesi sonrası bağlayıcıların 165°C’deki viskozite sonuçları

Şekil 83’e göre, depolama stabilitesi sonrası en yüksek viskozite değerini BA1 modifiyeli bağlayıcının alt kısmından alınan numune ve en düşük viskozite değerine ise saf bağlayıcının üst kısmından alınan numunenin verdiği tespit edilmiştir. Genel olarak her iki şekil de incelendiğinde, her iki sıcaklıktaki viskozite sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Buna göre, TOBO katkı maddesiyle saf bağlayıcı arasındaki uyumun oldukça fazla olduğu, tüplerin alt ve üst kısımlarındaki viskozite değerleri arasında olumsuzluk teşkil edecek derecede bariz fark görülmediği belirlenmiştir.

❖ Depolama stabilitesi sonrası DSR deney sonuçları

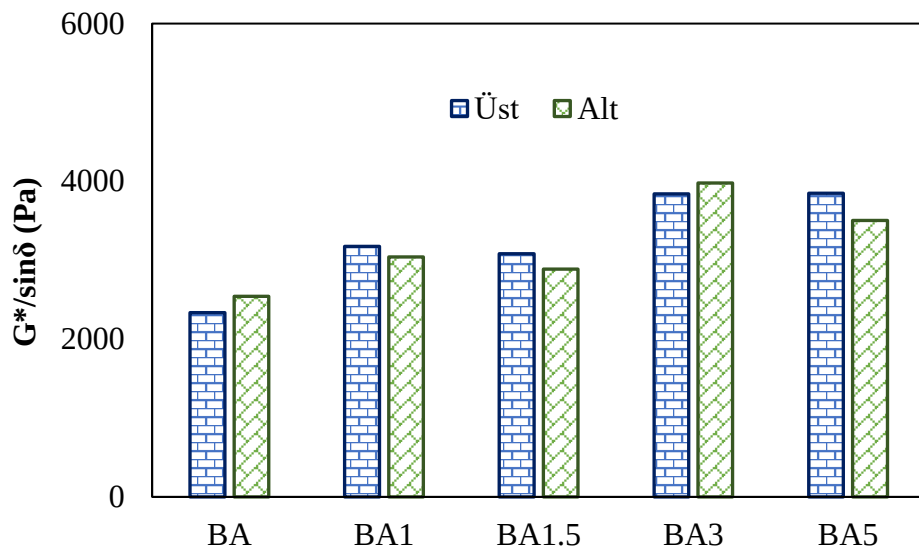
Çalışma kapsamında depolama stabilitesi deneyinden sonra elde edilen alt ve üst kısımlarındaki numunelere kontrollü gerilme (120 Pa) altında, 1.59 Hz (10 rad/s) frekansta, 3 ayrı sıcaklıkta (58, 64 ve 70°C) DSR deneyi uygulanmıştır. DSR deneyi sonucunda elde edilen verilere ait bilgiler Tablo 21’de sunulmuştur. Şekil 84’te depolama stabilitesi sonrası tekerlek izi parametreleri gösterilmiştir.

Tablo 21. Depolama stabilitesi sonrası uygulanan DSR deney sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G* (Pa)	δ (°C)	G*/sinδ (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

Tablo 21'in devamı

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G* (Pa)	δ (°C)	G*/sin δ (Pa)
BA1-ÜST	58	1113	7433	7516	81.49	7100
	64	344	3159	3177	83.79	3061
	70	105.1	1378	1382	85.64	1360
BA1-ALT	58	1036	6945	7022	81.5	7600
	64	337.7	3024	3043	83.6	3196
	70	110.2	1351	1355	85.3	1386
BA1.5-ÜST	58	1126	7617	7699	81.59	7362
	64	326.9	3066	3084	83.91	2904
	70	99.27	1344	1348	85.78	1269
BA1.5-ALT	58	1037	7213	7287	81.82	7783
	64	296.2	2873	2889	84.11	3101
	70	89.66	1263	1266	85.94	1351
BA3-ÜST	58	1627	9414	9553	80.20	9500
	64	478	3804	3843	82.84	3865
	70	145.9	1654	1661	84.96	1667
BA3-ALT	58	1640	9410	9552	80.12	9700
	64	503.1	3948	3980	82.74	4012
	70	156.3	1733	1740	84.85	1747
BA5-ÜST	58	1484	9086	9270	80.72	8922
	64	466.4	3820	3848	83.04	3528
	70	152.1	1693	1699	84.86	1555
BA5-ALT	58	1304	8113	8217	80.87	9329
	64	418.1	3478	3503	83.15	3876
	70	137.5	1543	1549	84.91	1706

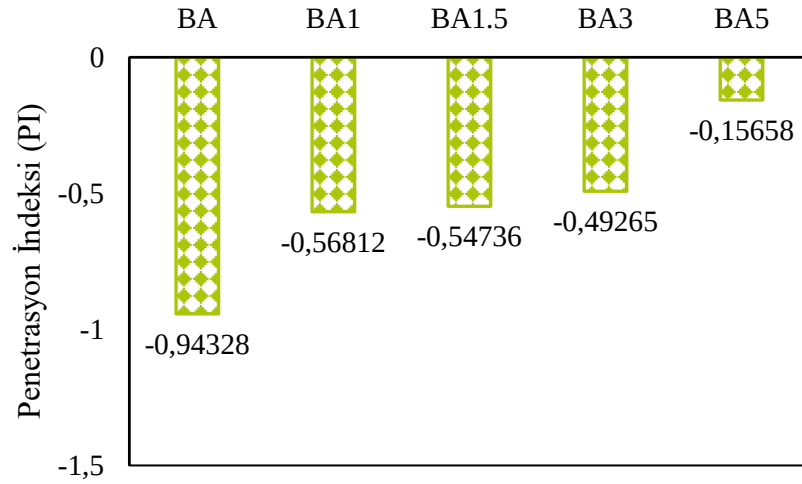


Şekil 84. Depolama stabilitesi sonrası tekerlek izi parametreleri

Şekil 84 incelendiğinde depolama sonrası DSR deneyinden elde edilen tekerlek izi parametrelerinin tüplerin alt ve üst kısımlarının arasında bariz bir farkın olmadığı görülmektedir. Saf bağlayıcıya göre tüm modifiye bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre genel olarak TOBO katkı maddesinin bağlayıcıyla uyum içinde olduğu ve depolanabilirlik açısından olumsuz bir sonuç olmadığı belirlenmiştir.

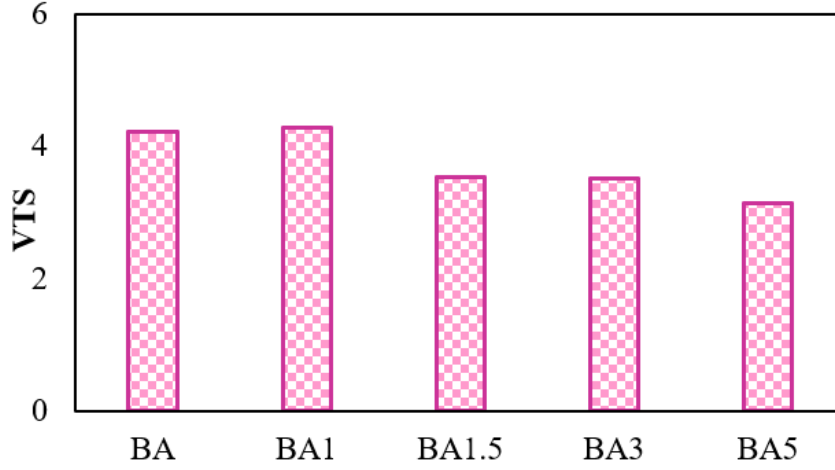
3.17. Bağlayıcının Sıcaklık Hassasiyeti Deney Sonuçları

Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların sıcaklık hassasiyeti Penetrasyon İndeksi (PI), ve Viskozite Sıcaklık Duyarlılığı (VTS) yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Şekil 85'te PI ve Şekil 86'da VST parametrelerinin grafikleri verilmiştir.



Şekil 85. Bağlayıcıların PI değerleri

Saf bağlayıcıya katkı maddesi ilave ettikçe PI değerlerinde artış görülmektedir. En çok artış %5 katkı ilaveli bağlayıcıda yaklaşık %83 oranında olduğu görülmüştür. Yani, %5 TOBO katkılı bağlayıcının düşük sıcaklıklarda çatlamaya ve kalıcı deformasyona karşı daha dirençli yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

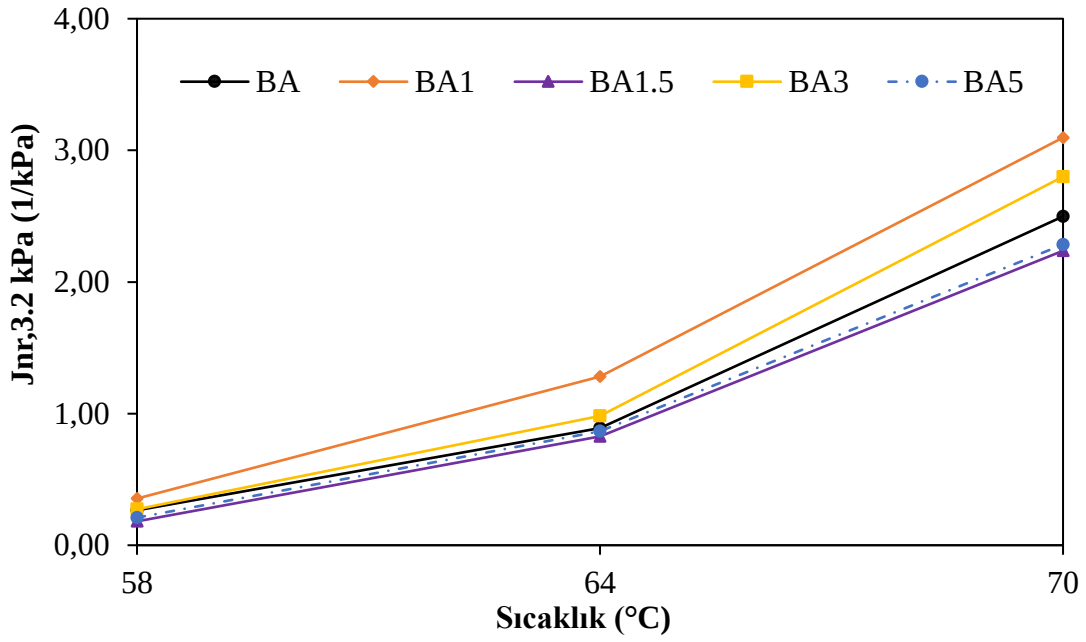


Şekil 86. Bağlayıcıların VTS değerleri

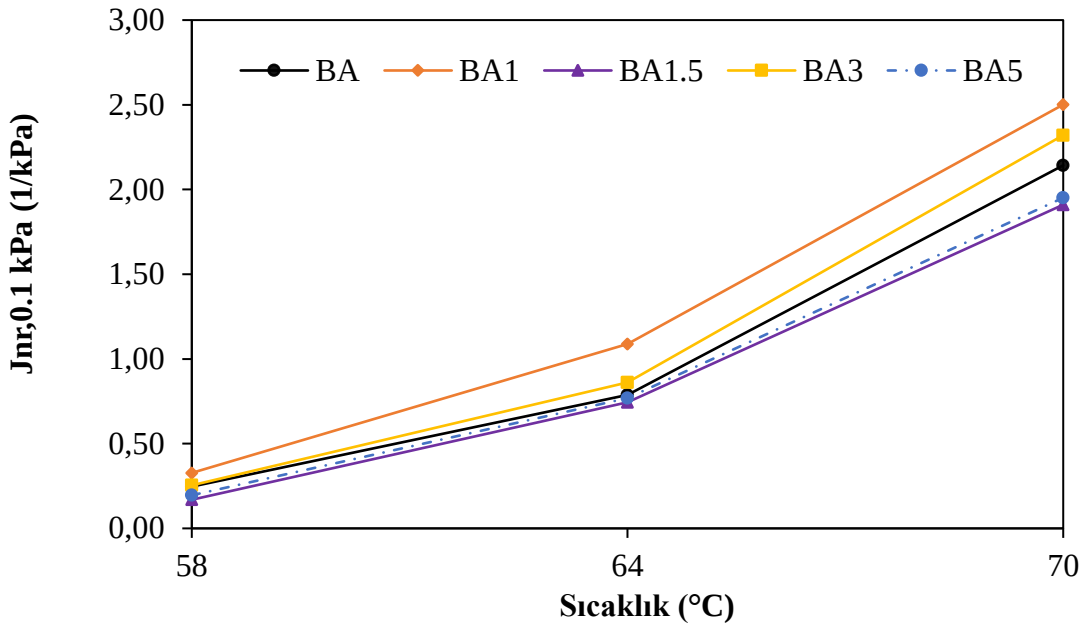
Şekil 86’da VST değerleri 135°C ve 165°C’deki viskozite değerlerine göre hesaplanmıştır. VTS değerleri ile sıcaklık hassasiyeti arasında doğru orantı bulunmaktadır. Katkı oranı arttıkça (%1 katkı oranı hariç) saf bağlayıcıya göre VTS değerlerinde azalma görülmektedir. Modifiye bağlayıcılar içinde sıcaklık hassasiyeti en iyi olan %5 katkı içeriğinde ve yaklaşık %25 oranında azalma ile BA5 numunesinde olduğu tespit edilmiştir.

3.18. Çoklu Gerilme Sünme Geri Dönme (MSCR) Deney sonuçları

Şekil 87 ve 88’de saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların iki farklı gerilme seviyesindeki (3.2 kPa ve 0.1 kPa) sünme uyumu (Jnr) değerleri verilmiştir. 3.2 kPa gerilme seviyesinde düşük Jnr değeri bağlayıcıların tekerlek izine karşı daha dirençli olduğunu ifade etmektedir. Şekil 97’de görüldüğü üzere 58°C’de 3.2 kPa gerilme seviyesinde en düşük sünme uyumunu %1.5 TOBO katkılı modifiye bağlayıcı vermiştir. Bütün sıcaklıklarda hem 0.1 kPa hem de 3.2 kPa gerilme seviyelerindeki Jnr değerlerinin ilişkisi küçükten büyüğe doğru sırasıyla BA1.5, BA5, BA, BA3 ve BA1 şeklindedir. Gerilme ve sıcaklık artışı ile bağlayıcılar arasındaki ilişkinin değişmediği görülmektedir. 58°C’de 3.2 kPa gerilme seviyesinde BA1.5 TOBO katkılı bağlayıcı BA, BA1, BA3 ve BA5 bağlayıcılarına göre %31.6, %48.8, %33.6 ve %13.4 daha düşük Jnr değeri elde edilerek tekerlek izine karşı daha dirençli olacağı saptanmıştır. Bu oran Şekil 98’de görülen 0.1 kPa gerilme seviyesinde ise benzerdir. MSCR deney sonuçlarına göre saf bağlayıcıya göre TOBO katkısının optimum kullanım oranı %1.5 olarak belirlenmiştir.



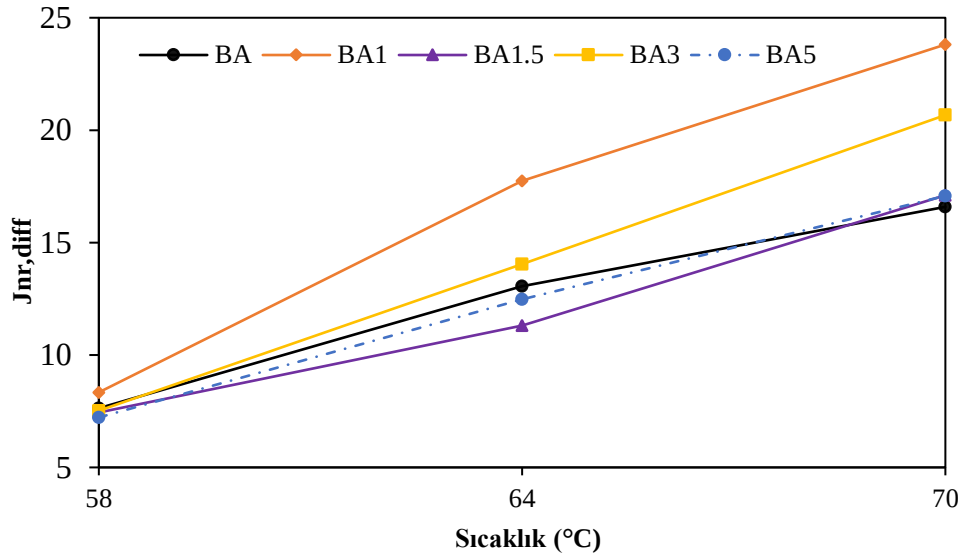
Şekil 87. Saf ve modifiye bağlayıcıların 3.2 kPa gerilme seviyesindeki sünme uyumu ilişkisi



Şekil 88. Saf ve modifiye bağlayıcıların 0.1 kPa gerilme seviyesindeki sünme uyumu ilişkisi

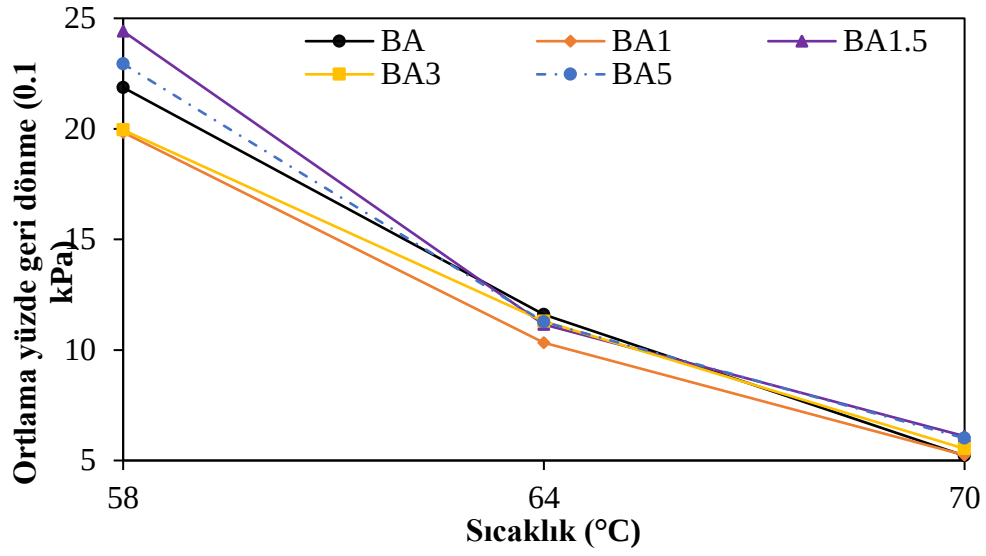
Şekil 89’da saf ve farklı yüzdelerdeki TOBO katkılı bağlayıcılara ait 3.2 kPa ve 0.1 kPa gerilme seviyelerindeki sünme uyumları arasındaki fark yüzde olarak verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere iki gerilme arasındaki sünme uyumu farkı en fazla %1 TOBO katkılı bağlayıcıdır. Bu da gerilme artışından en fazla etkilenen bağlayıcının BA1 olduğunu

göstermektedir. 58°C’de bütün bağlayıcılar benzer sünme uyumu farkı verirken sıcaklık artışıyla birlikte BA, BA1.5 ve BA5 bağlayıcıların sünme uyumu farkı yine birbirine benzer çıkmıştır. Ancak BA1 ve BA3 bağlayıcıların sünme uyumu arasındaki fark belirgin şekilde artmaya başlamıştır. Özellikle 70°C’de bu fark daha belirgin hale gelmiştir. Genel olarak değerlendirildiğine $J_{nr,diff}$ değerinin düşük çıkması bağlayıcının gerilme veya sıcaklık artışından daha ez etkilendiğini ifade etmektedir. Bu nedenle BA1 ve BA3 bağlayıcıları sıcaklık ve gerilme artışından en fazla etkilenen bağlayıcılar olmuştur. Diğer katkılı bağlayıcılar ise saf bağlayıcı ile benzer sonuçlar vermiştir.

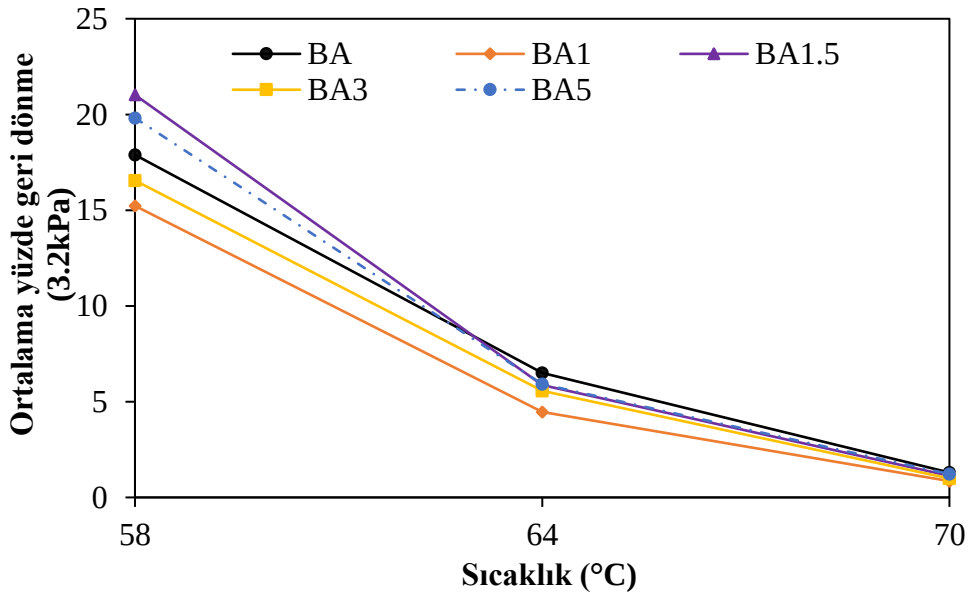


Şekil 89. 0.1 kPa ve 3.2 kPa gerilme seviyelerindeki sünme uyumunun yüzdesel farkları

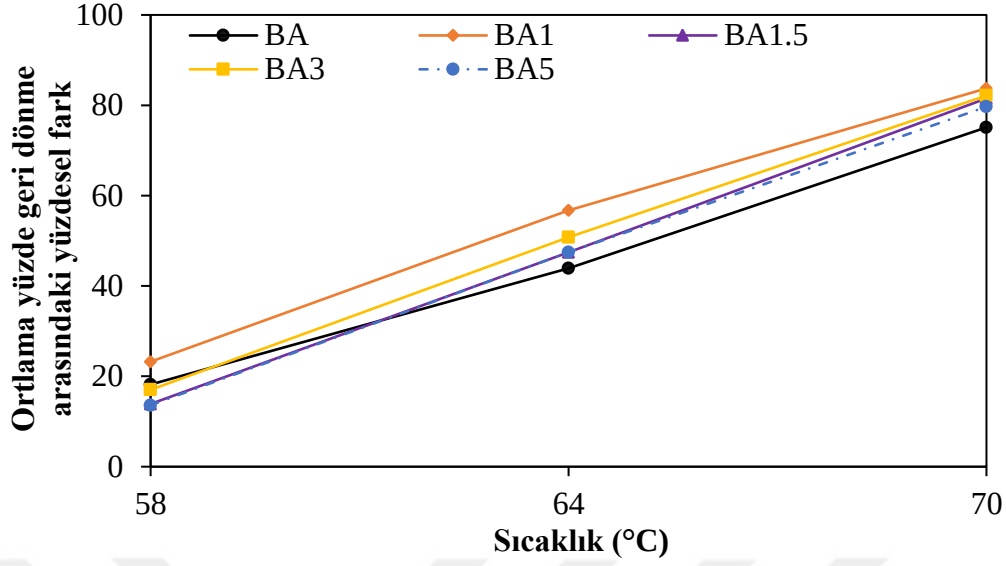
Şekil 90 ve 91’de saf ve TOBO modifiyeli bağlayıcıların 0.1 kPa ve 3.2 kPa gerilme seviyelerindeki ortalama yüzde geri dönme ilişkisi verilmiştir. Şekil 90 ve 91’e göre 58°C sıcaklıkta 0.1 kPa ve 3.2 kPa gerilme seviyelerinde en fazla geri dönme yüzdesine BA1.5 bağlayıcısı sahiptir. Daha sonra en yüksek geri dönme yüzdesine sırasıyla BA5, BA, BA3 ve BA1 bağlayıcıları sahiptir. Sıcaklık arttıkça bütün bağlayıcılar benzer performans sergilemeye başlamışlardır. Şekil 92’de bütün bağlayıcıların ortalama yüzdesel geri dönme arasındaki yüzdesel farklar görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere bütün sıcaklıklarda en yüksek yüzdesel farkı BA1 bağlayıcısı vererek elastik davranışı en düşük bağlayıcı olmuştur. BA, BA1.5 ve BA3 bağlayıcıları diğer deney sonuçlarında olduğu gibi yine benzer elastik özellikler sergilemişlerdir.



Şekil 90. Saf ve modifiye bağlayıcıların 0.1 kPa gerilme seviyesindeki ortalama yüzde geri dönme ilişkisi



Şekil 91. Saf ve modifiye bağlayıcıların 3.2 kPa gerilme seviyesindeki ortalama yüzde geri dönme ilişkisi



Şekil 92. Saf ve modifiye bağlayıcılar 0.1 kPa ve 3.2 kPa gerilme seviyelerinde yüzdesel geri dönme değerleri

Tablo 22’de PG ve MSCR test sonuçlarından bağlayıcılara ait performans seviyeleri gösterilmiştir. MSCR deneyi farklı sıcaklıklarda yapılarak hangi sıcaklıkta hangi taşıt trafiğine veya performansına sahip olduğu belirlenebilir. Tabloda görüldüğü üzere MSCR testine göre bütün bağlayıcılar 58°C’de aşırı ağır taşıt trafiğine hizmet edebilmektedir. 64°C’de ise BA, BA1.5, BA3 ve BA5 çok ağır taşıt trafiğine hizmet verebilirken BA1 bağlayıcısı ağır taşıt trafiğine cevap verememektedir. 70°C’de bütün bağlayıcılar standart taşıt trafiğinde hizmet verebilmektedir.

Tablo 22. PG ve MSCR test sonuçlarına göre bağlayıcı performans seviyeleri

Bağlayıcı Tipi	PG Sınıflandırması	MSCR Sınıflandırması		
		58°C	64°C	70°C
BA	PG64-16	PG58E-16	PG64V-16	PG70S-16
BA1	PG70-22	PG58E-16	PG64H-16	PG70S-16
BA1.5	PG70-22	PG58E-16	PG64V-16	PG70S-16
BA3	PG70-10	PG58E-10	PG64V-10	PG70S-10
BA5	PG70-10	PG58E-10	PG64V-10	PG70S-10

3.19. Lineer Farklı Genlik Tarama (LAS) Deney Sonuçları

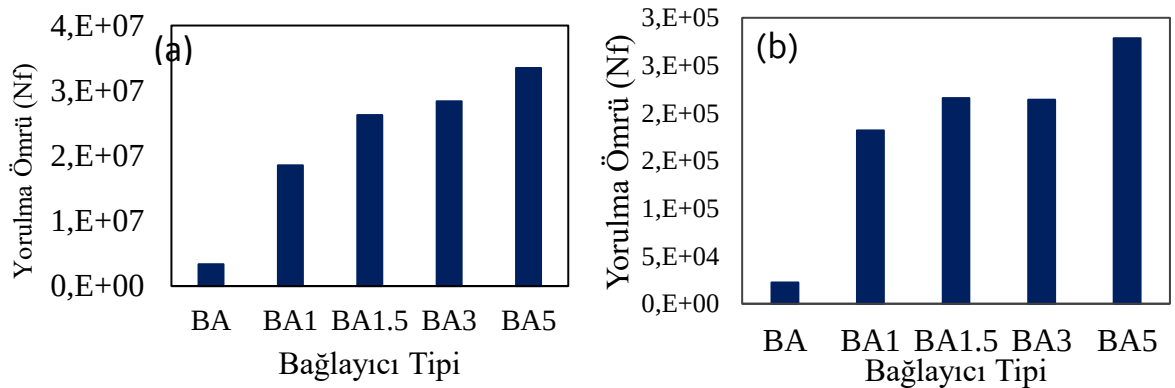
Tablo 23’te VECD teorisine göre hesaplanan yorulma parametreleri görülmektedir. Tablo 23’e göre tüm modifiye bağlayıcılar saf bağlayıcıya göre daha yüksek A parametresi ve daha düşük B parametresi vermişlerdir. TOBO katkı maddesinin kullanılması bağlayıcı

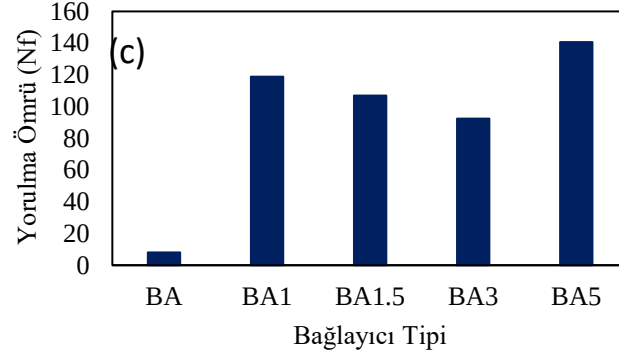
bütünlüğüne ve değişen gerilme seviyelerindeki yorulma direncine karşı olumlu etki ettiği saptanmıştır. En yüksek A ve en düşük B parametresini %1 TOBO katkılı bağlayıcı vermiştir. Buradan en yüksek yorulma ömrünü BA1 numunesinden elde edileceği açıkça ifade edilmektedir.

Tablo 23. Tüm bağlayıcıların VECD yorulma parametreleri

Bağlayıcı Tipi	A	B	C ₀	C ₁	C ₂	α	ID (MPa)	Df
BA	2.552E+09	7.240	18.520	0.220	0.420	3.620	34.590	11780
BA1	8.400E+09	6.674	9.808	0.131	0.437	3.337	17.630	6885
BA1.5	1.497E+10	6.926	11.285	0.144	0.430	3.463	20.550	8841
BA3	1.815E+10	7.051	12.404	0.145	0.432	3.526	23.170	10388
BA5	1.882E+09	6.910	6.173	0.234	0.356	3.455	11.200	3425

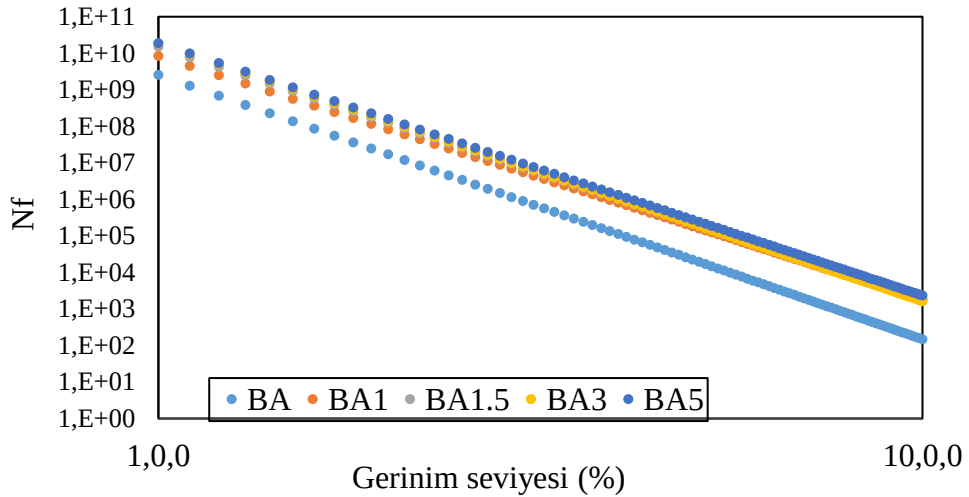
Şekil 93'te bağlayıcıların %2.5, %5 ve %15 gerinim seviyelerine ait yorulma ömürlerindeki değişimler gösterilmektedir. Buna göre %2.5 gerinim seviyesinde katkı içeriği arttıkça yorulma ömürlerinde artış görülmüştür. En yüksek yorulma ömrünü %5 TOBO katkılı bağlayıcı vermiştir. BA1, BA1.5, BA3 ve BA5 modifiyeli bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre sırasıyla 5.5, 7.8, 8.5 ve 10 kat daha fazla yorulma ömrü vermektedir. Bu oran %5 gerinim seviyesinde 8.2, 9.7, 9.6 ve 12.5 kat olurken, %15 gerinim seviyesinde 14.6, 13.2, 11.4 ve 17.3 kat olmaktadır. BA1.5 ve BA3 bağlayıcıları yorulma ömrü açısından benzer performans sergilemişlerdir.





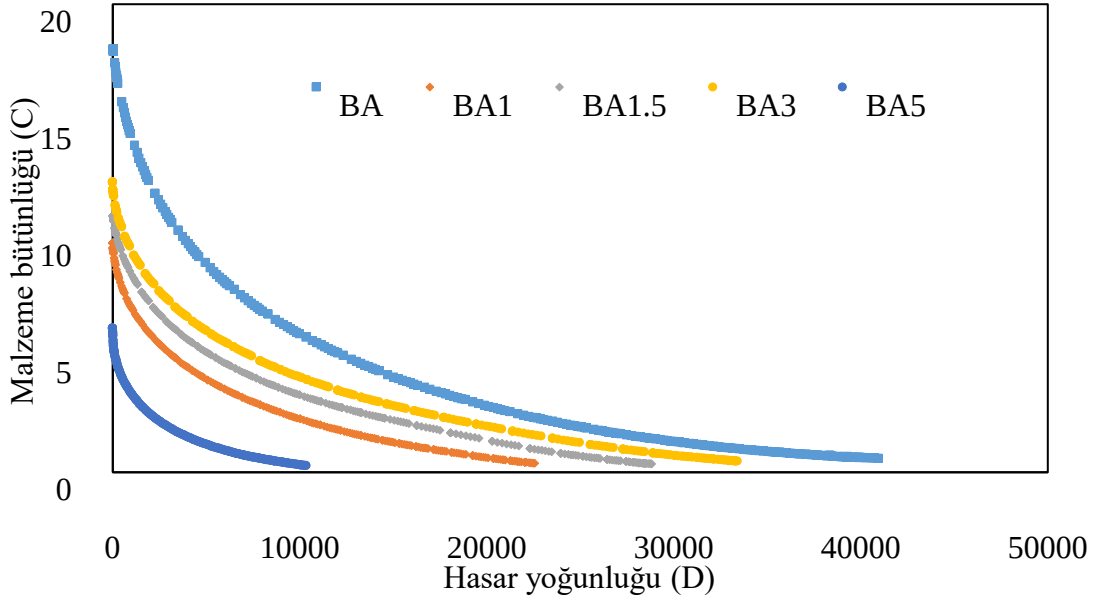
Şekil 93. Saf ve modifiye bağlayıcıların (a) %2.5 ve (b) %5 (c) %15 gerinim seviyelerine ait yorulma ömürleri

Şekil 94’te saf ve modifiye bağlayıcıların %1 ve %10 gerinim seviyesi arasındaki yorulma ömürleri belirtilmiştir. Şekle göre gerinim seviyesi arttıkça saf ve TOBO katkılı bağlayıcıların yorulma ömürlerinde azalma meydana gelmektedir. Gerinim seviyesinin düşük olduğu durumlarda bağlayıcı miktarındaki artış yorulma ömürlerinde de artışa neden olmuştur. Daha yüksek gerinim seviyesinde TOBO ilaveli bağlayıcıların yorulma ömürlerin birbirine gittikçe yaklaşmaktadır. Gerinim seviyesindeki artıştan özellikle %3 TOBO katkılı bağlayıcının en çok etkilendiği saptanmıştır. Kısaca gerinim seviyesinin düşük olması yorulma ömrünün uzun olmasına, gerinim seviyesinin yüksek olması da yorulma ömrünün kısa olmasına işaret etmektedir.



Şekil 94. Farklı gerinim seviyelerindeki yorulma ömürleri

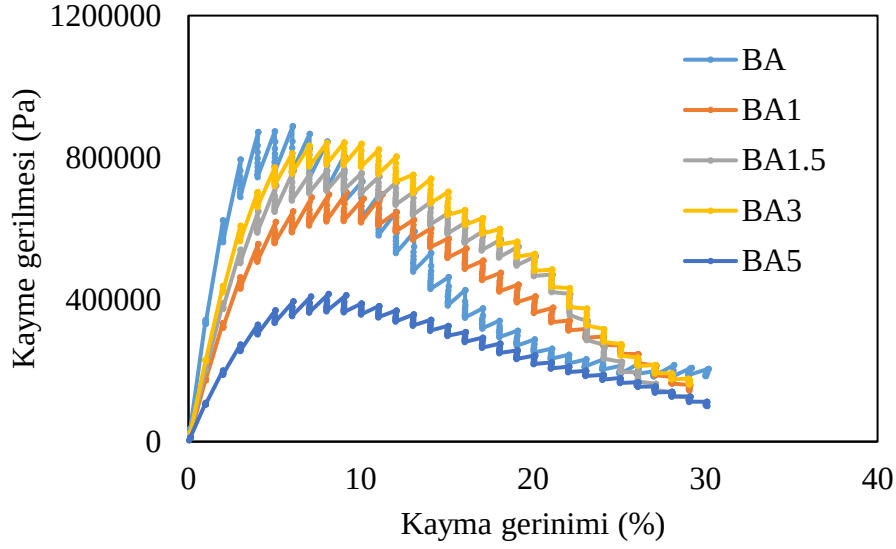
Şekil 95'te saf ve TOBO katkılı bağlayıcıların malzeme bütünlüğü (C) ve hasar yoğunluğu (D) arasındaki ilişki verilmiştir. Buna göre tüm bağlayıcıların malzeme bütünlüğü bozuldukça hasar yoğunluğunda azalma meydana gelmektedir. En yüksek yorulma ömrünü veren BA5 bağlayıcısının malzeme bütünlüğü en yüksek ve hasar yoğunluğu en düşük bağlayıcı olduğu belirlenmiştir. Saf bağlayıcının malzeme bütünlüğündeki hızlı düşüş ile hasar yoğunluğu da en yüksek bağlayıcı olduğu görülmüştür. Katkı oranı arttıkça malzeme bütünlüğünde ve hasar yoğunluğunda iyileşme görülmektedir. Sabit bir hasar yoğunluğunda en yüksek malzeme bütünlüğü sırasıyla BA5, BA3, BA1.5, BA1 ve BA şeklinde bulunmuştur.



Şekil 95. Saf ve modifiye bağlayıcıların malzeme bütünlüğü ve hasar yoğunluğu ilişkisi

Saf ve TOBO modifiyeli bağlayıcıların gerilme şekil değiştirme arasındaki ilişki Şekil 96'da verilmiştir. Gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki yorulma yenilmesi (fatigue failure) üç bölge için karakterize edilip kullanılmaktadır (Al-Mohammedawi & Mollenhauer, 2020). Tepe noktasındaki şekil değiştirme değeri, tepe noktasının plato değeri ve eğrinin dikliği (tepe noktasından önce ve sonra). Şekilde görüldüğü üzere başlangıçta şekil değiştirme arttıkça kayma gerilmeleri artmaktadır. Daha sonra artan şekil değiştirme ile gerilme seviyesindeki artış azalmaktadır. Bu da bağlayıcıların doğrusal olmayan davranış sergilemeye başladığını göstermektedir. Bağlayıcıların her biri farklı şekil değiştirme seviyelerinde maksimum gerilme seviyesine ulaşmaktadır. Tepe noktasından sonra artan şekil değiştirme ile gerilme seviyelerinde düşüş meydana gelerek bağlayıcıların hasar aldığı

görülmektedir. Saf bağlayıcıda bu düşüş daha erken başlarken katkılı bağlayıcılarda daha yüksek gerinim seviyelerinde hasar durumu meydana gelmiştir. Özellikle %5 TOBO katkılı bağlayıcıda ani bir düşüş görülmemiş olup hasar oluşmasına rağmen üzerindeki gerilmeyi taşıyabildiği ve malzeme bütünlüğünün bozulmadığı belirlenmiştir.



Şekil 96. Saf ve TOBO katkılı bağlayıcıların gerilme-şekil değiştirmeleri arasındaki ilişki

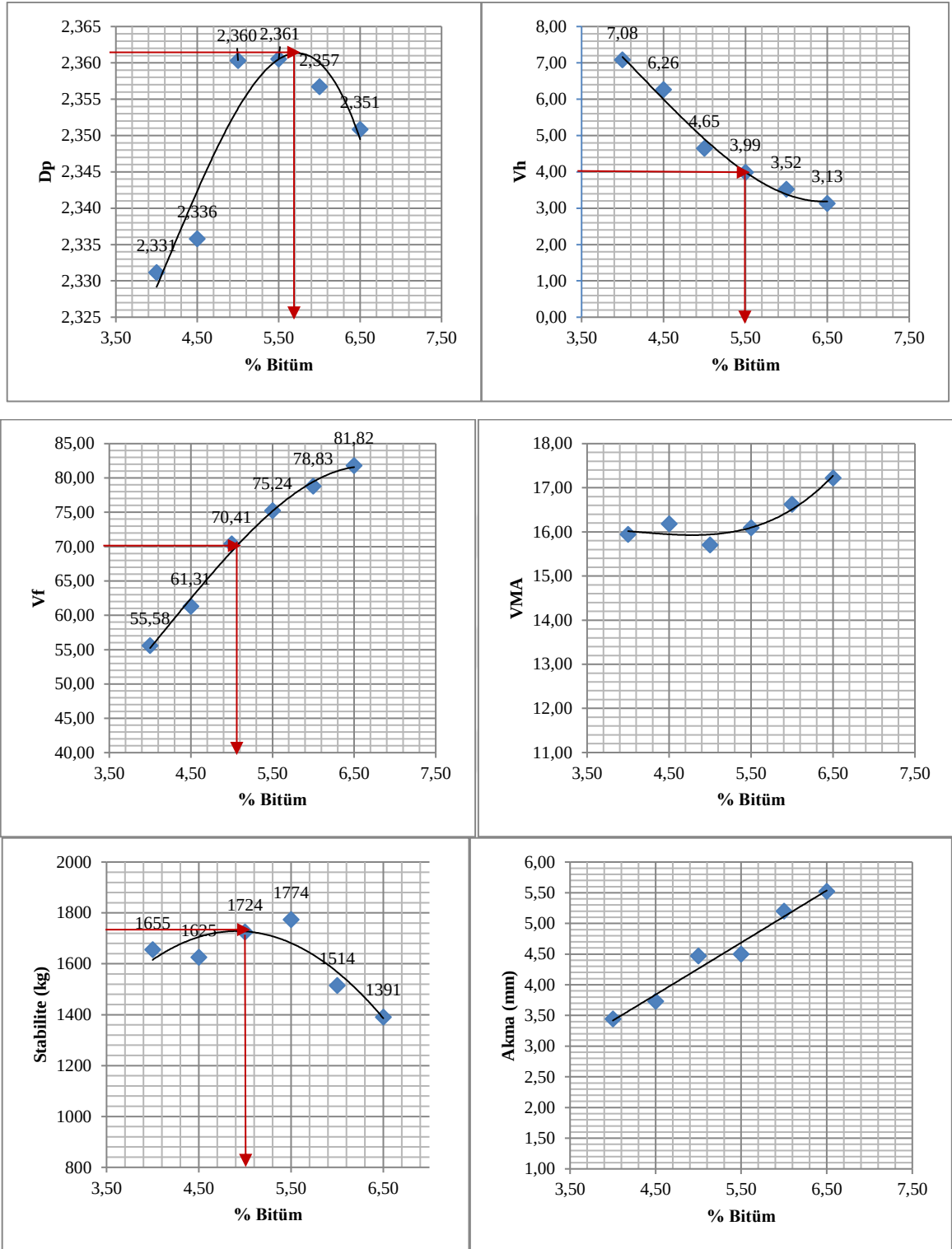
3.20. Marshall Tasarımına Göre Optimum Bitüm İçeriğinin Belirlenmesi

Marshall tasarımı bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan agregaya en uygun bitüm içeriğinin (optimum bitüm içeriği) belirlenebilmesi amacıyla yapılmıştır. Saf bağlayıcı %0.5'lik artışlarla agrega ağırlığının toplam %4-%6.5 oranları arasında kullanılmıştır. Her bağlayıcı içeriği için üçer adet Marshall briketi hazırlanarak, briketlere ait 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. Hesaplanan değerlerin ardından tüm briketlerin stabilite ve akma değerlerinin belirlenmesi için Marshall cihazı kullanılmıştır. Marshall tasarımı ve deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 24'te verilmiştir.

Tablo 24. Saf bağlayıcıyla hazırlanan briketlerin tasarım sonuçları ve şartname limitleri

Karışım özelliği	Şartname Kriterleri		Bitüm İçeriği (%)					
	Min.	Maks.	4	4.5	5	5.5	6	6.5
Hacim özgül ağırlık (D_p -g/cm ³)			2.331	2.336	2.360	2.361	2.357	2.351
Hava Boşluğu (V_h -%)	3	5	7.08	6.26	4.65	3.99	3.52	3.13
Asfaltla Dolu Boşluk (V_f -%)	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

Tablo 24’te görülen verilerden yararlanarak D_p , V_h , V_f , VMA , stabilite, akma değerlerinin bitüm içeriği (%) ile değişimine ait grafikler çizilerek Şekil 96’da verilmiştir. Karayolları Teknik Şartnamesi aşınma tabakası tasarım ölçütlerini göre D_p , V_h , V_f ve stabilite grafiklerinden işaretlenmiştir (Tablo 24). İşaretlenen bu dört farklı bitüm içeriğinin ortalamaları alınarak optimum bitüm içeriği hesaplanmıştır.



Şekil 97. D_p , V_h , V_f , VMA, stabilite ve akma değerlerini gösteren grafik eğrileri.

Şekil 97'ye göre D_p -%Bitüm grafiğinden maksimum D_p değerini sağlayan bitüm değeri W_{a1} , V_f - %Bitüm grafiğinden %70 karşılık gelen bitüm içeriği W_{a2} , V_h - %Bitüm grafiklerinden %4 hava boşluğuna denk gelen bitüm içeriği W_{a3} , Stabilite-%Bitüm

grafiğinden maksimum stabilite değerini sağlayan bitüm değeri W_{a4} olmak üzere, optimum bitüm içeriği aşağıdaki Denklem 12'ye göre hesaplanmıştır.

$$\text{Optimum bitüm içeriği} = (W_{a1} + W_{a2} + W_{a3} + W_{a4})/4 \quad (12)$$

Denklem 12'ye göre optimum bitüm içeriği **%5.3** olarak saptanmıştır. Ek Tablo 1'de Marshall tasarımının Marshall föyü verilmiştir.

3.21. Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları

Belirlenen %5.3'lük optimum bitüm içeriği ve uygun agrega gradasyonu ile karıştırılarak saf ve modifiye bağlayıcılar ile Marshall biriketleri üretilmiştir. Her bir katkı oranından hazırlanan üçer adet briketlerin havada, suda ve doymuş kuru ağırlıkları formüllerle hesaplanmıştır. Hesaplanan toplamda 15 adet Marshall briketine Marshall stabilite deneyi uygulanarak ulaşılan veriler Tablo 25'te gösterilmiştir.

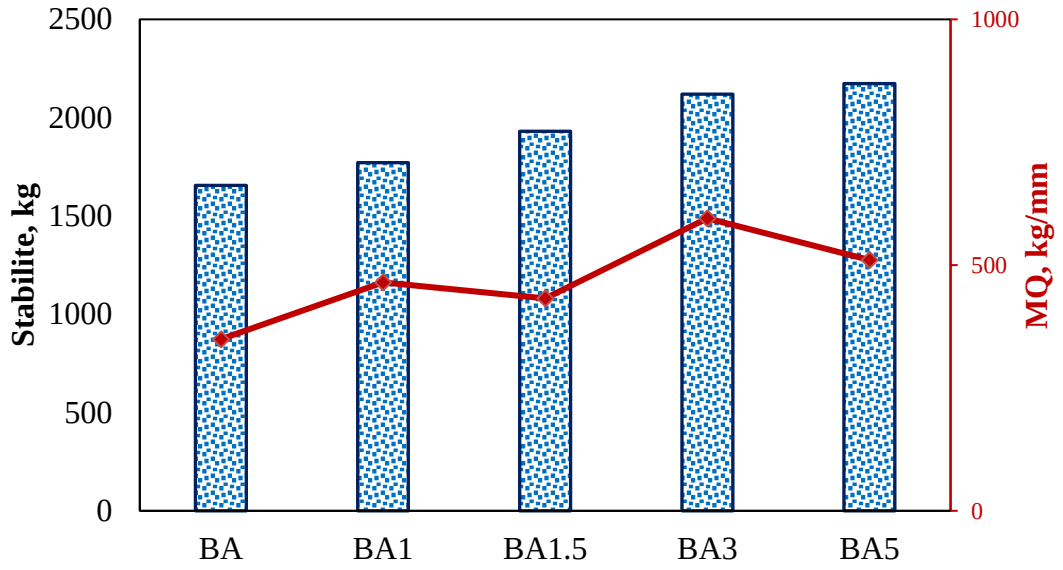
Tablo 25. Marshall stabilite deney sonuçları

Karışım özelliği	Numune Adı				
	Saf Bitüm	BA1	BA1.5	BA3	BA5
Bağlayıcı Özgül Ağırlığı (G_b -g/cm ³)	1.028	1.032	1.036	1.037	1.040
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	2.373	2.374	2.370
Hava Boşluğu (V_h -%)	3.80	3.81	3.85	3.93	3.97
Asfaltla Dolu Boşluk (V_f -%)	75.52	75.44	75.10	74.52	74.53
Agregalar Arası Boşluk (VMA-%)	15.54	15.52	15.47	15.43	15.59
Stabilite (kg)	1655	1771	1931	2119	2173
Akma (mm)	4.74	3.81	4.47	3.56	4.26
Marshall Oranı (kg/mm)	349.2	464.8	432.0	595.2	510.1

Tablo 25'e göre, sıkıştırılan Marshall briketlerinin özgül ağırlık değerlerinde saf ve modifiye bağlayıcılar için ciddi bir değişim görülmemektedir. Tüm Marshall briketlerinin hava boşluğu oranlarına bakıldığında TOBO katkı maddesi miktarının artışıyla hava boşluğu yüzdesinin de arttığı tespit edilmiştir. Briketlere ait akma değerlerinin şartname kriterleri (%3-5) arasında kaldığı, en düşük akma değerinin BA3 modifiyeli bağlayıcıda olduğu belirlenmiştir. Stabilite açısından saf bağlayıcıya TOBO katkısının ilavesiyle elden edilen karışım numunelerinin yine saf bağlayıcıya göre stabilite değerlerinin arttığı ve en yüksek

stabilite değerini BA5 modifiyeli bağlayıcıda olduğu tespit edilmiştir. Tüm deney sonuçları bir bütün olarak ele alındığında, bu yeni sentez katkı maddesinin bitümlü karışımlarda ağır trafik yüklerinde kaplamada oluşabilecek deformasyonlara karşı kaplama direncini önemli ölçüde arttıracadı sonucuna ulaşılmıştır.

Marshall oranı, Marshall stabilitesi değerinin akma değerine oranlanmasıyla ($MQ = \text{stabilite} / \text{akma}$ kg/mm) hesaplanmaktadır. MQ değeri, bitümlü sıcak karışımların servis ömrü boyunca deformasyonlara karşı gösterdiği dirençtir. Tablo 25’te verilen Marshall oranı (MQ) değerine ait grafik şekil 98’de verilmiştir.

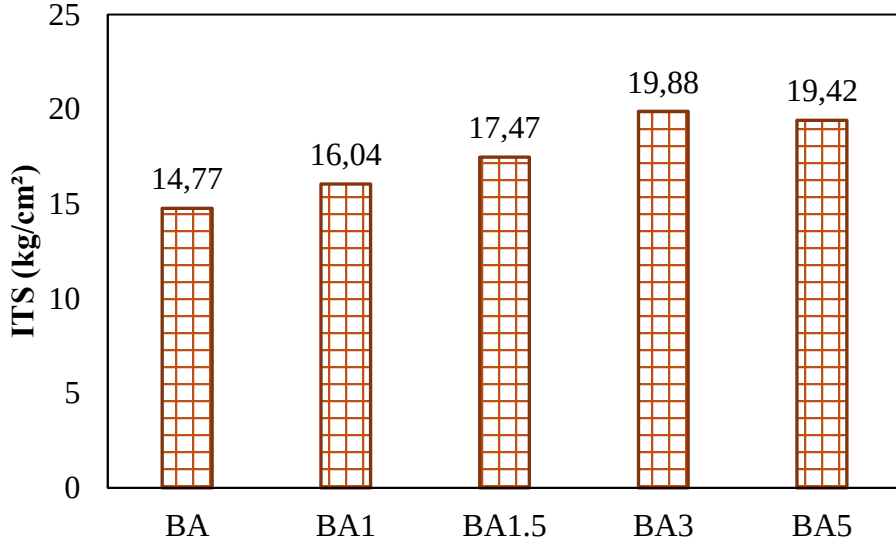


şekil 98. Karışımlarının stabilite ve MQ değerleri

şekil 98’ye ge TOBO katkısı kullanımı ile Marshall stabilite değerleri artmıştır. En yüksek stabilite değerine BA5 modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışım numuneleri sahip olurken, en düşük stabilite değerine ise BA ile hazırlanan karışım numunelerinin sahip olduğu belirlenmiştir. Bitümlü bağlayıcı içerisindeki katkı miktarının artmasıyla, Marshall oranı değerleri artmış ve MQ değerlerinin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %33.10, %23.71, %70.44 ve %46.07 oranlarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. BA3 modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımda en yüksek MQ değerine ulaşılmıştır.

3.22. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Sonuçları

Dolaylı çekme mukavemeti değerlerinin bulunması amacıyla saf ve modifiyeli bağlayıcılarla hazırlanan Marshall briketlerinden her bir katkı oranı için üçer adet olmak üzere toplam 15 adet briquete uygulanmıştır. Üç briketin ortalamaları alınarak deney sonuçları Şekil 99’da gösterilmiştir.



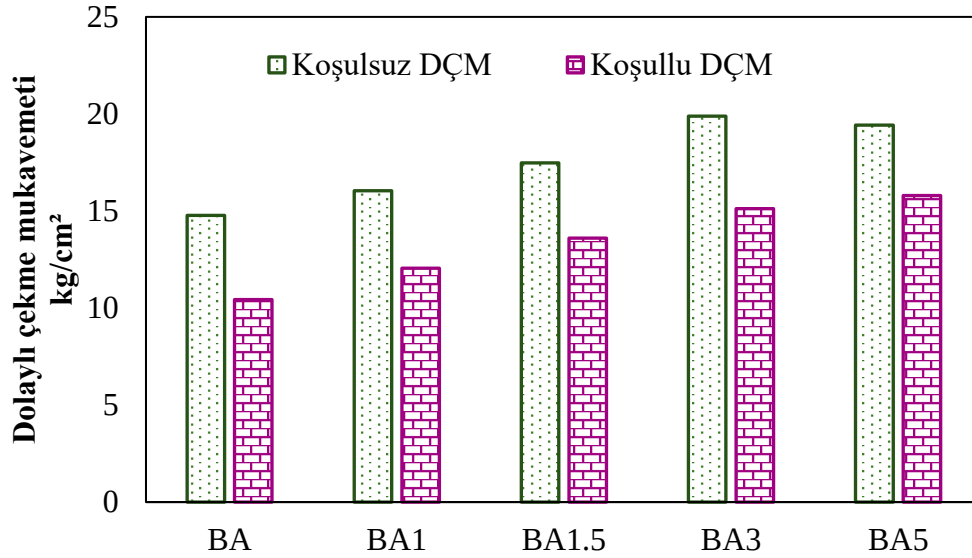
Şekil 99. Dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları

Şekil 99’dan görüleceği üzere katkı miktarının artmasıyla birlikte saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlara göre dolaylı çekme mukavemeti değerleri de artmıştır. Bu artış, saf bağlayıcıya göre %1, %1.5, %3 ve %5 oranında katkı içeren karışımlar için sırasıyla %8.59, %18.28, %34.59 ve %31.48 oranlarında olmuştur. Trafik yükleri ve düşük sıcaklıklarda kaplamalarda meydana gelen çekme gerilmelerine karşı direncin bitümlü sıcak karışımlarda TOBO katkı maddesi kullanımıyla artacağı tespit edilmiştir. Bağlayıcının kohezyonunun bir göstergesi olan ITS değerinin en yüksek BA3 ile yapılan karışımda olduğu belirlenmiştir.

3.23. Modifiye Lottman Deney Sonuçları

Marshall stabilite deneyi sonucunda belirlenen optimum bitüm içeriklerinde her bir katkı oranı için karışım için ayrı ayrı üç tane koşullu ve üç tane koşulsuz toplamda altı tane Marshall briketi hazırlanarak briketlerin koşullu ve koşulsuz dolaylı çekme mukavemeti değerleri tespit edilmiştir. Hesaplanan değerlere göre koşullu ve koşulsuz dolaylı çekme

mukavemeti (Şekil 99) ve dolaylı çekme mukavemeti oranları (Şekil 100) grafikleri çizilmiştir.

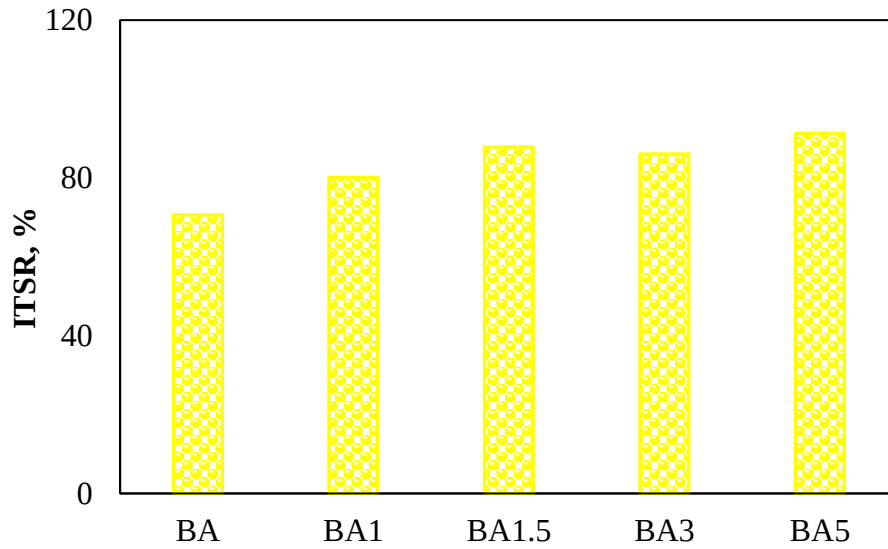


Şekil 100. Koşulsuz ve koşullu dolaylı çekme mukavemeti değerleri

Şekil 100'e göre, TOBO katkısı ile hem koşullandırılmamış hem de koşullandırılmış karışım numunelerinin çekme mukavemeti değerleri saf bağlayıcıya kıyasla artmıştır. Koşullandırma yapılmadan önce modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların dolaylı çekme mukavemeti değerlerinin birbirine yakın değerlerde olduğu, ek olarak yüksek değere %3 TOBO modifiye bitümle hazırlanan karışımların, en düşük çekme mukavemeti değerine saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Modifiye bağlayıcılar ile hazırlanan karışımların çekme mukavemeti değerleri değerlendirildiğinde, koşullandırma yapılmadan önce %3 TOBO > %5 TOBO > %1.5 TOBO > %1 TOBO > Saf Bitüm şeklinde bir sıralama yapılabilmektedir. Koşullandırma işleminden sonra modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların çekme mukavemeti değerlerinin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Koşullandırma yapıldıktan sonra modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemeti değerleri üzerindeki etkinlikleri değerlendirildiğinde %5 TOBO > %3 TOBO > %1.5 TOBO > %1 TOBO > Saf Bitüm şeklinde bir sıralama meydana gelmiştir. Koşullandırma sonrasında TOBO katkı maddesi ile modifiye edilen bağlayıcılarla hazırlanan karışımların çekme mukavemeti değerlerinin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların çekme mukavemeti değerlerine göre sırasıyla %15.53, %30.39, %44.87 ve %51.39 oranlarında arttığı

belirlenmiştir. Bu bulgulara göre, koşullandırma nedeniyle modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların etkinliğinde düşme meydana gelirken, en fazla azalmanın saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımda meydana geldiği saptanmıştır. Kaplamalarda trafik yüklerinden dolayı oluşan gerilmelere ve yorulma çatlakların azalmasına bitümlü sıcak karışımlarda TOBO katkı maddesinin kullanımının neden olduğu düşünülmektedir.

Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numunelerin çekme mukavemeti değerlerinin birbirine oranlanması sonucu ITSR değerleri elde edilmiştir. Şekil 101’de ITSR değerlerine ait grafik gösterilmiştir. Standarda göre ITSR değerinin %70’in üzerinde olması karışımın nem hasarına karşı dayanımının uygun olduğunu göstermektedir.

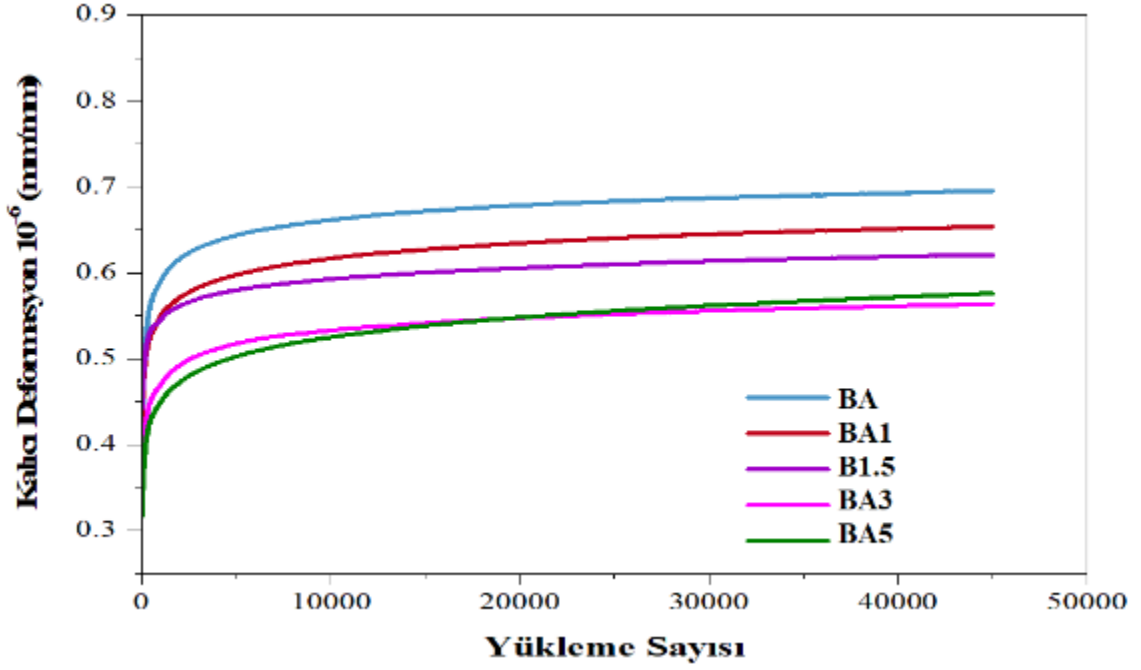


Şekil 101. ITSR değerleri

Şekil 101 incelendiğinde TOBO ile modifiye edilmiş karışımların dolaylı çekme mukavemeti oranlarının saf bağlayıcı ile hazırlanan karışıma oranla arttığı ve Superpave şartname limiti olan %80 değerini sağladığı (BA hariç) gözlenmiştir. Ancak, orijinal Lottman metodunda bu değer en az %70 olması istenmektedir (Kök, Yılmaz & Kuloğlu, 2012). Bu sonuçlara göre TOBO modifikasyonunun bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımını önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. ITSR değeri en yüksek BA5 modifiye bağlayıcılarla üretilen karışımlarda görülmüştür. Tüm bu sonuçlara göre TOBO katkı maddesinin bitüm modifikasyonunda kullanılmasıyla hazırlanan karışım numunelerinin suyun olumsuz etkilerine karşı direnci arttırdığı ifade edilmektedir.

3.24. Dinamik (Tekrarlı) Sünme Deney Sonuçları

Saf ve modifiyeli bağlayıcılarla hazırlanan tüm karışım numunelere 40°C sıcaklıkta dinamik sünme deneyi uygulanmıştır. Şekil 102’de deneyden elde edilen kalıcı deformasyonun yükleme sayısına göre değişimi verilmiştir.



Şekil 102. Karışımların 40°C sıcaklıktaki deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

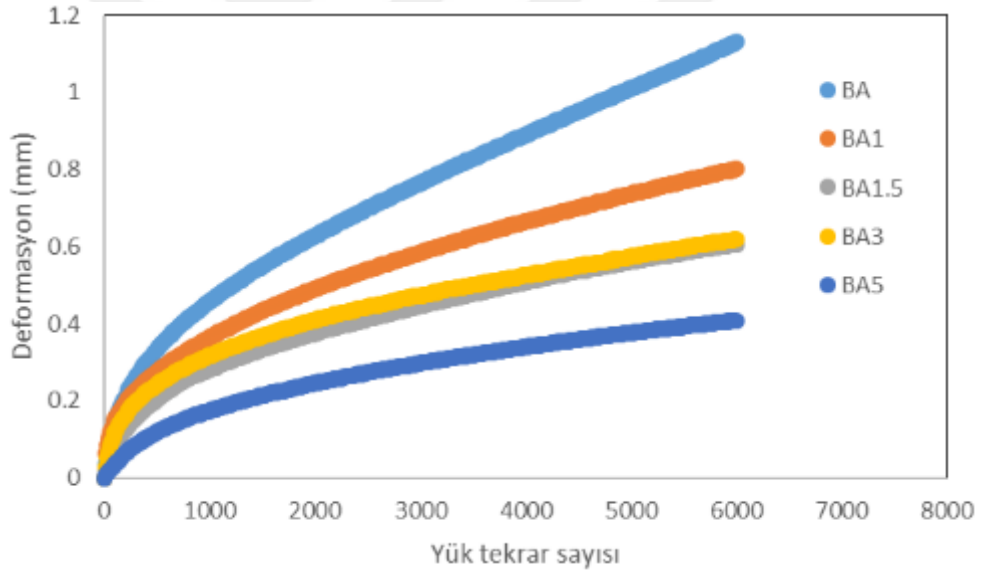
Şekil 102’den, katkı miktarının artışıyla sağ bağlayıcıya göre modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımlarda oluşan kalıcı deformasyonlar azalmıştır. Kalıcı deformasyonu en az BA3 bağlayıcısı ile hazırlanan karışımlarda görülmüştür. Buna göre, TOBO katkı maddesinin saf bağlayıcının yorulma direncini arttırdığı ve karışımlarda meydana gelebilecek kalıcı deformasyonlara karşı direncini arttırdığı şeklindeki verilerden açık bir şekilde görülmektedir.

3.25. Dolaylı Çekme Yorulma Deney Sonuçları

UMATTA deney aleti kullanılarak deney öncesinde numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, uygulanacak gerilme yük periyodu ve yük artış süreleri gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Numune, yükleme çerçevesine yerleştirilmekte, düşey deformasyonu okuyacak sensörler (LVDT)

ayarlanmakta ve deneye başlanmaktadır. Deney, bütün numuneler için tekrarlı yük sayısı 6000 devir oluncaya kadar devam ettirilmiş ve meydana gelen deformasyonlar kıyaslanmıştır.

Şekil 103'te saf ve TOBO katkılı bağlayıcıların 6000 yük tekrar sayısındaki deformasyon değişimi verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 6000 yük tekrarından sonra en düşük deformasyonu %5 TOBO katkılı karışım vermiştir. En yüksek deformasyonu ise saf bağlayıcıya göre BA1, BA1.5, BA3 ve BA5 bağlayıcıları sırasıyla %29, %46, %45 ve %64 daha düşük deformasyon verdiği tespit edilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere BA1.5 ve BA3 karışımları benzer performans sergilemiştir. 0.3 mm deformasyon miktarı dikkate alındığında BA1, BA1.5, BA3 ve BA5 karışımları saf bağlayıcıya göre sırasıyla 1.6, 2.9, 2.2 ve 7.7 kat daha fazla yük tekrarı vermiştir.



Şekil 103. Saf ve modifiye bağlayıcıların deformasyon-yük tekrar sayıları arasındaki ilişki

3.26. TOBO Katkısının SBS Katkısıyla Mali Açıdan Karşılaştırılması

Maliyet analizinde, laboratuvar ortamında sentezlenen ve yeni bir modifiyer olarak kullanılan TOBO katkı maddesinin (%1), tüm dünyada bitüm modifikasyonunda yaygın olarak kullanılan SBS katkısıyla (%4.5) karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla 1 km uzunluğunda, 10 m genişliğinde ve 4 cm kalınlığında bir otoyol için maliyet analizi yapılmıştır. Analizde Marshall stabilite deneyinden elde edilen optimum bitüm içeriği (%5.3) kullanılarak bir briket üretimi için gerekli olan bağlayıcı miktarı hesaba katılmıştır.

Kullanılan agrega miktarı sabit olduğundan agrega için maliyet analizi yapılmamıştır. Maliyet hesabı için 50/70 bitümün TÜPRAŞ Kırıkkale rafinerisinden KDV dahil çıkış fiyatı 13713.78 TL/Ton (16.01.2024 tarihinden itibaren) olarak alınmıştır. KGM/4300/PMB poz numaralı SBS'li bitüm fiyatı Karayolları Genel Müdürlüğü'nün 01.07.2023 tarihi itibarıyla 872,46 TL/Ton olarak hesaplarda kullanılmıştır.

Optimum bitüm içeriği kullanılarak hazırlanan 1 ton karışımın bitüm maliyeti aşağıda belirlenmiştir.

Saf bağlayıcının (BA) 1 ton karışım içerisindeki bedeli;

$$M_{(BA)} = 13713.78 \times 5.3 / 100 = 726.83 \text{ TL}$$

%1 TOBO ve %4.5 SBS ilave edilerek elde edilen modifiye bağlayıcıların 1 ton fiyatı sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$M_{KARIŞIM(BA1)} = [13713.78 \times (100-1)] / 100 = 13576.64 \text{ TL/Ton}$$

$$M_{KARIŞIM(BA+\%4.5SBS)} = [13713.78 \times (100-1) + 872.46 \times (4.5)] / 100 = 13615.90 \text{ TL/Ton}$$

Modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların 1 ton karışım içerisindeki bedeli;

$$M(BA+\%1TOBO) = 13576.64 \times 5.3 / 100 = 719.56 \text{ TL}$$

$$M(BA+\%4.5SBS) = 13615.90 \times 5.3 / 100 = 721.64 \text{ TL}$$

Bu sonuçlara göre, saf bağlayıcının %1 gibi düşük bir oranda TOBO ile modifiye edildikten sonra hazırlanan karışımın %4.5 SBS ile modifiye edilen bağlayıcı kullanılarak hazırlanan karışıma oranla daha düşük maliyete sahip olduğu görülmüştür.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, laboratuvar şartlarında bor oksit ve tall yağı içerikli (TOBO) tamamen yerli ve milli olan, bitüm modifikasyonunda kullanılmak üzere yeni bir katkı maddesi kimyasal olarak sentezlenmiştir. TOBO katkı maddesine ait yapısal karakterizasyonu ve özellikleri belirlendikten sonra bu katkı maddesiyle modifiye edilmiş bağlayıcıların ve hazırlanan karışım numuneleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda özet şeklinde verilmiştir:

- ❖ FT-IR, SEM, TG, XRD ve DSC yöntemleriyle sentez katkı maddesinin yapısı karakterize edilmiştir. Buna göre hedeflenen katkı maddesinin başarılı bir şekilde sentezlendiği ve bitüm modifikasyonunda kullanılabileceği gözlemlenmiştir.
- ❖ FT-IR spektrumuna göre, tall yağından alınan spektrumlar ile TOBO katkı maddesinden alınan spektrumlar karşılaştırıldığında C=O gerilim bandının kaydığı ve esterik karbonil pikinin ($O=C-O-C$) küçülmesi ile katkının kimyasal olarak sentezlendiğini göstermektedir. Ayrıca katkının saf bağlayıcı ile etkileşiminde bağlayıcıda var olan karbonil piklerinin kaymasının borun merkezde olması nedeniyle meydana gelen dipol-dipol etkileşiminden kaynaklandığı ifade edilmektedir.
- ❖ SEM analizi incelendiğinde, TOBO katkısının bitüm içerisinde makro açıdan homojen dağıldığı, ara yüzeyde herhangi bir ayrışmanın meydana gelmediği dolayısıyla bitümle katkı maddesi arasında bazı bağların oluşmuş olabileceği belirlenmiştir.
- ❖ TG ve DSC sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, TOBO katkı maddesinin bozunma sıcaklığının oldukça yüksek olduğu, bitüm modifikasyonu için gerekli sıcaklık şartlarını bozunmadan sağladığı tespit edilmiştir.
- ❖ XRD analizi sonuçlarına göre, tall yağı içerisinde birden fazla komponent olmasından dolayı TOBO katkı maddesinin pik değerlerinin baskın olmaması sebebiyle kristalize bir yapıya sahip olmadığı, amorf bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir.
- ❖ Geleneksel bağlayıcı deneylerinden penetrasyon, yumuşama, duktilite deneylerine bakıldığında, TOBO katkımiktarının saf bağlayıcı içerisindeki oranının artmasıyla penetrasyon değerlerinde azalma, yumuşama noktası

değerlerinde artma tespit edilmiştir. Dolayısıyla TOBO katkısının bağlayıcının kıvamını sertleştirirken sıcaklığa karşı duyarlılığını da azalttığı kaydedilmiştir.

- ❖ Düktilite sonuçlarına göre ise TOBO katkısının bağlayıcının kohezyon özellikleri üzerinde herhangi bir olumsuz etkisinin olmadığı belirlenmiştir.
- ❖ Kuvvet ölçümlü düktilite deneyine göre, TOBO katkısının bağlayıcının deformasyon enerjisini arttırarak kohezyon özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Elastik geri dönme sonuçlarına göre ise, TOBO ilaveli modifiye bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda daha elastik davranış sergilediği ortaya konmuştur. En yüksek deformasyon enerjisi ve geri dönme yüzdesinin %1 TOBO katkılı (BA1) bağlayıcıda gerçekleştiği saptanmıştır.
- ❖ Parlama noktası deney sonucu ile katkı miktarının bağlayıcı içerisinde artmasına bağlı olarak saf bağlayıcının parlama noktası değerinin arttığı ve en fazla artışın BA5 modifiyeli bağlayıcıda olduğu belirlenmiştir. Buna göre TOBO katkısının iş güvenliği açısından güvenli çalışma sıcaklık aralığını attırdığı tespit edilmiştir.
- ❖ Özgül ağırlık deney sonuçlarına bakıldığında, bağlayıcı içerisindeki katkı miktarının artışına paralel olarak modifiye bağlayıcıların özgül ağırlık değerleride artış gözlenmiştir. Buna göre yeni sentez katkı maddesinin bağlayıcının kıvamını yani yoğunluğunu arttırdığı, bu artışın da penetrasyon ve yumuşama noktası sonuçlarıyla uyumlu olduğu saptanmıştır.
- ❖ Bitümlü bağlayıcıların Fraass kırılma noktası deney sonuçlarına göre, sentezlenen yeni modifiyerin saf bağlayıcının düşük sıcaklıklarda meydana gelebilecek çatlaklara karşı direncini arttırdığı ve kırılma sıcaklığını %5 katkı miktarında %40 düzeyinde düşürdüğü tespit edilmiştir.
- ❖ BA5 modifiyeli bağlayıcının trikloretilendeki çözünürlüğü incelendiğinde, filtre kâğıdı üzerinde herhangi bir kalıntıya rastlanmadığı ve bu sonucun TOBO katkı maddesine uygulanan yapısal analiz yöntemleriyle de uyumlu olduğu belirlenmiştir.
- ❖ Nicholson soyulma deneyine göre, TOBO katkı maddesinin agrega ile bağlayıcı arasındaki adeziv bağı güçlendirerek soyulmaya karşı direnci önemli derecede arttırdığı görülmüştür.
- ❖ RV deney sonuçlarına bakıldığında, viskozite değerlerinin katkı miktarının bağlayıcı içerisinde artmasıyla arttığı, bu durumun işlenebilirlik açısından

şartname sınırlarını aşmadığı yani herhangi bir olumsuzluk meydana getirmediği belirlenmiştir.

- ❖ DSR deney sonuçları incelendiğinde, TOBO katkı miktarının artmasıyla yaşlandırılmamış saf ve modifiyeli bağlayıcıların tekerlek izine karşı dirençlerinin arttığı ve bağlayıcının elastik özelliğinin iyileştiği gözlenmiştir. Kısa süreli yaşlandırılarak elde edilen bağlayıcıların tekerlek izi dirençlerinin saf bağlayıcıya göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Yaşlandırılmamış ve kısa süreli yaşlandırılmış numunelerin tekerlek izi dirençleri şartname limitleri dikkate alındığında TOBO katkısının kullanılmasıyla saf bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfının bir üst seviyeye çıkarak PG 70-Y olduğu belirlenmiştir.
- ❖ PAV deneyi ile uzun süreli yaşlandırılan bağlayıcılar 22°C, 25°C ve 28°C sıcaklıklarında DSR deneyi uygulanarak yorulma dirençleri tespit edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, şartname limitini 22°C sıcaklıkta tüm bağlayıcılar, 25°C sıcaklıkta BA1 ve BA1.5 modifiyeli bağlayıcılar, 28°C sıcaklıkta ise tüm bağlayıcıların sağladığı görülmüştür. Buna göre, TOBO katkı maddesinin bağlayıcının yorulma performansını iyileştirdiği gözlemlenmiştir.
- ❖ BBR deney sonuçlarına göre, katkı maddesinin saf bağlayıcının düşük sıcaklıklardaki çatlama eğilimini azaltarak direnç kazandırdığı ve en fazla etkinin %1.5 katkı içeriğinde sağlandığı, buna rağmen %1 katkı içeriğinin bile bağlayıcının çatlama direncini artırdığı görülmektedir. Fraass kırılma noktası deneyi sonuçlarıyla BBR deneyi sonuçları kıyaslandığında her iki deneyin sonuçlarının birbirini desteklediği ve %3 ve %5 oranlarında katkı maddesini kullanımının bağlayıcının hem sertliğini arttırdığı hem de sünekliğini azalttığı görülmüştür.
- ❖ Depolama stabilitesi sonrası yapılan penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları incelendiğinde, penetrasyon değerlerinin azaldığı ve yumuşama noktası değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Şartname limitlerine göre deney tüplerinin alt ve üst kısımlarından alınan numunelerin penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri arasındaki farkın depolanabilirlik açısından olumsuzluğa neden olmadığı görülmektedir. Dolayısıyla TOBO katkı maddesinin bağlayıcı içerisinde çökelmelere neden olmadığı görülmüştür.

- ❖ Depolama stabilitesi deneyi sonrası yapılan RV deneyi sonuçlarına göre, katkı maddesinin saf bağlayıcı ile işlenebilirlik açısından uyum sağladığı ve herhangi bir olumsuzluğun olmadığı saptanmıştır.
- ❖ Depolama stabilitesi deneyi sonrası yapılan DSR deneyinin sonuçlarına bakıldığında, TOBO modifiyeli bağlayıcıların tekerlek izi dirençlerinin saf bağlayıcıya göre daha iyi olduğu ve depolama esnasında herhangi bir ayrışmanın meydana gelmediği tespit edilmiştir.
- ❖ Sıcak hassasiyeti sonuçlarına göre, katkı maddesinin saf bağlayıcının sıcaklığa karşı duyarlılığını iyileştirdiği ve modifiye bağlayıcılar içinde sıcaklık hassasiyeti en iyi olan numunenin BA5 olduğu belirlenmiştir.
- ❖ MSCR deney sonuçlarına göre, saf bağlayıcının tekerlek izine karşı direncinin katkı kullanımı ile arttığı belirlenmiştir. En iyi sonucu %1.5 katkı oranının verdiği tespit edilmiştir. Bütün bağlayıcılar 58°C’de aşırı ağır taşıt trafiğine hizmet edebilmektedir. 64°C’de ise BA, BA1.5, BA3 ve BA5 modifiyeli bağlayıcılar aşırı ağır taşıt trafiğinde kullanılırken BA1 bağlayıcısının ağır taşıt trafiğinde kullanılabildiği belirlenmiştir. 70 °C’de ise bütün bağlayıcıların standart taşıt trafiğinde hizmet verebileceği saptanmıştır.
- ❖ LAS deney sonuçlarına göre, TOBO katkı maddesi kullanımıyla gerinim seviyelerinin artmasıyla saf bağlayıcının yorulma ömrünün arttığı tespit edilmiştir. En yüksek yorulma ömrünü BA5 modifiyeli bağlayıcının verdiği belirlenmiştir.
- ❖ Marshall stabilite ve akma deneyinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, TOBO katkı maddesi ile modifiye edilen bağlayıcılarla hazırlanan karışım numunelerinin stabilite değerlerinin arttığı ve en yüksek stabilite değerini BA5 modifiyeli karışımda olduğu görülmüştür. Akma değerlerinin katkı miktarının artmasıyla azaldığı ve en düşük akma değerinin BA3 modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımda olduğu tespit edilmiştir. Marshall oranı (MQ) değerlerine bakıldığında, bitümlü bağlayıcı içerisindeki katkı miktarının artmasıyla MQ değerlerinin arttığı ve en yüksek MQ değerine BA3 modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımda ulaşılmıştır.
- ❖ Dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçlarına göre, trafik yükleri ve düşük sıcaklıklarda kaplamalarda meydana gelen çekme gerilmelerine karşı direncin bitümlü sıcak karışımlarda TOBO katkı maddesi kullanımıyla artacağı,

bağlayıcının kohezyonunun bir göstergesi olan ITS değerinin en yüksek BA3 ile yapılan karışımda olduğu belirlenmiştir.

- ❖ Karışımların su hasarına karşı dayanımlarını tespit etmek amacıyla yapılan Modifiye Lottman deneyinin sonuçları incelendiğinde, TOBO katkısı kullanımı ile hem koşullandırılmamış hem de koşullandırılmış karışımlarda çekme mukavemeti değerleri saf bağlayıcıya göre artmıştır. En yüksek ITSR değeri BA1.5 modifiye bağlayıcılarla üretilen karışımlarda belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, TOBO katkı maddesinin suyun olumsuz etkilerine karşı direnci arttırdığı görülmüştür.
- ❖ Dinamik sünme deney sonuçlarına bakıldığında, TOBO katkı maddesinin karışımın kalıcı deformasyon değerlerini azalttığı ve yorulma direncini arttırdığı sonucuna varılmıştır.
- ❖ Dolaylı çekme yorulma deney sonuçlarına göre, TOBO katkısı kullanılarak hazırlanan karışımların yorulma dayanımlarının arttığı ve %5 katkı oranında en iyi yorulma direnci değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Yorulma parametresi değerlerinin orta sıcaklıklardaki yorulma parametre değerleriyle uyum sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Yapılan detaylı çalışmalar neticesinde elde edilen veriler bir bütün olarak ele alındığında, bitüm modifikasyonunda daha önce literatürde var olmayan, tamamen yerli, milli, ucuz üretim prosesi ve ülke kaynaklarının sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda kullanımına yönelik olması açısından laboratuvar şartlarında yeni bir katkı maddesi sentezi başarı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yeni katkı maddesinin saf bağlayıcının mevcut fiziksel ve reolojik özelliklerini iyileştirerek kaplama performansı üzerinde olumlu ettiği görülmüştür. TOBO katkı maddesi ile modifiye edilen bağlayıcılardan en iyi performansı; yüksek sıcaklıkta BA5 modifiyeli bağlayıcı, orta ve düşük sıcaklıklarda BA1.5 modifiyeli bağlayıcı göstermiştir.

Bu tez çalışması temel alınarak daha sonraki çalışmalarda yapılması planlanan araştırmalar için aşağıdaki verilen öneriler göz önünde bulundurulabilir:

- ❖ Çalışma üretilen bor oksit ve tall yağı bileşiğinin (TOBO) düşük sıcaklık performansını iyileştirmek için SBS benzeri polimerle birlikte farklı oranlarda bağlayıcı üzerindeki etkileri araştırılabilir.

- ❖ Çalışmadaki sentez katkı maddesi (TOBO) ile hazırlanan bitümlü sıcak karışım numunlerinin taş mastik ve ılık asfalt karışımlar ile hazırlanarak performansı üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- ❖ Çalışma kapsamında kullanılan agrega gradasyonu tipinde ve agrega türünde değişiklikler yapılarak yeni katkıyla farklı granülometriye sahip karışımların fiziksel özellikleri araştırılabilir.



5. KAYNAKLAR

- AASHTO. (2010). Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling. Washington, DC.
- Adnan, A. M. & Wang, J. (2023). Enhancement of Rheological Performance and Compatibility of Tire Rubber-modified Asphalt Binder with the Addition of Graphene. *Construction and Building Materials*, 402, 133038.
- Ağar, E. & Umar, F. (1991). Yol Üstyapısı. İstanbul, 4.Baskı, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası.
- Ahmetzade, P., Alataş, T. & Geçkil, T. (2008). Asfalt Betonunda Siyah Karbonun Filler Olarak Kullanımı, İMO Teknik Dergi, 4493-4507.
- Ahmetzade, P. (2013). The Investigation and Comparison Effects of SBS and SBS with New Reactive Terpolymer on the Rheological Properties of Bitumen. *Construction and Building Materials*, 38, 285-291.
- Ahmedzade, P., Demirelli, K., Günay, T., Biryan, F., & Alqudah, O. (2015). Effects of Waste Polypropylene Additive on the Properties of Bituminous Binder, *Procedia Manufacturing*, 2, 165-170.
- Ahmedzade, P., Fainleb, A., Günay, T. & Olga Grigoryeva, O. (2016). Geri Dönüştürülmüş Atık Polipropilenin Bitümlü Bağlayıcılarda Kullanılması, İMO Teknik Dergi, 456, 7497-7513.
- Airey, G. D. (2002). Use of Black Diagrams to Identify Inconsistencies in Rheological Data, *Road Materials and Pavement Design*, 3(4), 403–424.
- 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, 238-263.
- Aksağan, Z. (2021). Atık Lastiklerden Elde Edilen Siyah Karbonun Bitüm ve Bitümlü sıcak Karışımlara Etkisi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Malatya.
- Alataş, T. & İstek, A. (2020). Farklı Katkılarla Hazırlanan Asfalt Karışımların Sünme Performanslarının İncelenmesi, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 11(2), 745-758.
- Alemi, A., A., Sedghi, H., Mirmohseni, A. R. & Golsanamlu, V. (2006). Synthesis and Characterization of Cadmium Doped Lead-borate Glasses, *Bulletin of Materials Science*, 29, 55-58.
- AlHumaidan, F., S., Hauser, A., Rana, M., S., Lababidi, H., M., S. & Behbehani, M. (2015). Changes in Asphaltene Structure During Thermal Cracking of Residual Oils: XRD Study, *Fuel*, 150, 558-564.,

- Ali, A., Kabir, S., K., Al-Badr, B., Alfalah, A., Xie, Z., Decarlo, C., Elshaer, M. & Mehta, Y. (2022). Laboratory Performance of Dense Graded Asphalt Mixtures Prepared Using Highly Polymer Modified Binders Containing Corn Oil as Softening Agent, *Construction and Building Materials*, 345, 128336.
- Al-Mohammedawi, A. & Mollenhauer, K. (2020). A Study on the Influence of the Chemical Nature of Fillers on Rheological and Fatigue Behavior of Bitumen Emulsion Mastic. *Materials*, 13, 20, 4627.
- Ameri, M., Mansourian, A. & Sheikhmotevali, A. H. (2013). Laboratory Evaluation of Ethylene Vinyl Acetate Modified Bitumens and Mixtures Based Upon Performance Related Parameters, *Construction and Building Materials*, 40, 438-447.
- 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, N. & Hayati, P. (2020). Effects of CuO Nanoparticles as Phase Change Material on Chemical, Thermal and Mechanical Properties of Asphalt Binder and Mixture, *Construction and Building Materials*, 251, 118996.
- Amini, A., Ziari, H., Saadatjoo, S., A., Hashemifar, N., S. & Goli, A. (2021). Experimental Investigation of the Influence of Nano TiO₂ on Rheological Properties of Binders and Performance of Stone Mastic Asphalt Mixtures Containing Steel Slag Aggregate, *Construction and Building Materials*, 267, 120946.
- Aro, T. & Fatehi, P. (2017). Tall Oil Production from Black Liquor: Challenges and Opportunities, *Separation and Purification Technology*, 175, 469-480.
- Arslan, D., Gürü, M., Çubuk, M., K. & Çubuk, M. (2011). Improvement of Bitumen and Bituminous Mixtures Performances by Triethylene Glycol Based Synthetic Polyboron, *Construction and Building Materials*, 25(10), 3863-3868.
- Arslan, D., Gürü, M. & Çubuk, M. K. (2012). Performance Assessment of Organic-based Synthetic Calcium and Boric Acid Modified Bitumens, *Fuel*, 102, 766-772.
- Arslan, D., Gürü, M. & Çubuk, M. K. (2013). Improvement of Hot Mix Asphalt Performance in Cold Regions by Organic-based Synthetic Compounds, *Cold Regions Science and Technology*, 85, 250-255.
- Arslan, D., Gürü, M. & Çubuk, M., K. (2014). Preventing of Rutting and Crackings in the Bituminous Mixtures by Monoethylene and Diethylene Glycol Based Synthetic Polyboron Compounds, *Construction and Building Materials*, 50, 102-107.
- Aryan, V., Maga, D. & Kraft, A. (2019). Quantifying the Impact of Cascading Use: A Comparative Integrated Assessment of the European Pine Chemicals Industry, *Journal of Cleaner Production*, 224, 766-778.
- Asfalt El Kitabı (2002). İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 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.
- Atasağun, N. (2021). Atık Çınar Yaprakları ve Plastik Bardakların Birlikte Pirolizinden Üretilen Piroliz Çarının Bitümün Viskozitesi ve Yüksek Sıcaklık Performans Sınıfı Üzerine Etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36,(3), 1703-1714.
- Avcı, E. (2009). Sıcak İklim Bölgelerinde Kullanılan Asfalt Betonu Karışım Değişkenlerinin Kaplama Tabakası Performansına Etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Azahar, W., N., A., W., Jaya, R., P., Hainin, M., R., Hasan, M., R., M. & Shaffie, E. (2019). X-Ray Diffraction Analysis of Bitumen Containing Untreated and Treated Waste Cooking Oil, *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 353/ 8(, 434-437.
- Bajpai, P. (2018). Brief Description of the Pulp and Papermaking Process, *Biotechnology for Pulp and Paper Processing*, 9-26.
- Balta, İ. (2004). Bitümlü Sıcak Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Duyarlılığı, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Başkent, E. (2016). Investigation of Effect of Bitumen Chemical Compositon, Polymer and Warm Mix Asphalt Additives on the Properties of Bitumen by Using Response Surface Method, İstanbul Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology, M.Sc. Thesis, İstanbul.
- Bayar, G. (2002). Bor Madeni ve Türkiye için Önemi. Ankara: T.C. Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı Türkiye Ekonomisi ve Dış Ticareti Raporları.
- 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.
- Bell, C., A, Wieder, A., J., Fellin, M., J. (1994). Laboratory Ageing of Asphalt-aggregate Mixtures: Field Validation. Washington DC: Strategic Highway Research Program.
- Bideci, Ö. S. (2013). Bor Kaplı Hafif Agregalı Betonların Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Araştırılması Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, Edirne.
- Birliker, R.Y. 1998. Bitümlü Karışımlara Eklenebilecek Katkılar ile Bu Tip Bitümlü Karışımların Davranışlarının Araştırılması ve Bir Yorulma Eğrisi Tahmin Modeli, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 208s.
- Błażejowski, K., Wójcik-Wisniewska, M., Baranowska, W., Ostrowski, P., Černý, R., Jisa, P., Pasetto, M., Partl, M.N. & Tebaldi, G. (2020). Fatigue Performance of Bituminous Binders Tested by Linear Amplitude Sweep Test, *Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (APE)*, 385-394.

- Bostancıoğlu, M. (2012). Bitkisel Atıklardan Elde Edilen Kimyasal Ürünler ile Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Bostancıoğlu, M. & Oruç, Ş. (2016). Effect of Activated Carbon and Furan Resin on Asphalt Mixture Performance, Road Materials and Pavement Design, 17(2), 512-525.
- Boykin, R., O., Glendale, S. & Osborne, P. S. (1964). United States Patent Office, Patent No: 3152093.
- Bozdemir, M., G., Oruç, Ş. & Yeşilçiçek, H. (2022). Physical and Microstructural Properties of New Boron Resin Compound Synthesized Asphalt, Journal of Materials in Civil Engineering, 35(2), 04022426.
- Bozdemir, M., G. (2023). Bor Esaslı Kolofan Reçineli Yeni Bir Katkı Maddesi Sentezlenerek Asfaltın Modifiye Edilmesi ve Karışım Performansının Araştırılması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Cao, X., Wang, H., Cao, X. Sun, W., Zhu, H. & Tang, B. (2018). Investigation of Rheological and Chemical Properties Asphalt Binder Rejuvenated with Waste Vegetable Oil, Construction and Building Materials, 180, 455-463.
- Chen, J. S., Liao, M. C. & Shiah, M. S. (2002). Asphalt Modified by Styrene-butadiene-Styrene Triblock Copolymer: Morphology and Model, Journal of Materials in Civil Engineering, 14(3), 224-229.
- Cortizo, M, S, Larsen, D. O., Bianchetto, H. & Alessandrini, J. L. (2004). Effect of the Thermal Degradation of SBS Copolymers During the Ageing of Modified Asphalts, Polymer Degradation and Stability, 86(2), 275-282.
- Çakmak, A. & Özcan, H. (2022). Bor Oksit Nanoparçacıklarının Dizel Yakıt Katkısı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Journal of Boron, 7(1), 420-429.
- Çalık, A. (2002). Türkiye'nin Bor Madenleri ve Özellikleri. Mühendis ve Makine Dergisi, 508, 36-41.
- Çalışıcı, M., Gürü, M., Çubuk, M., K. & Cansız, Ö., F. (2018). Improving the Aging Resistance of Bitumen by Addition of Polymer Based Diethylene Glycol, Construction and Building Materials, 169, 283-288.
- Çeloğlu, M. F. (2020). Farklı Biyokütlelerin Pirolizinden Elde Edilen Biyoçarların Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elâzığ.
- Çetin, A. (2008). Bitümlü Sıcak Karışımların Deformasyon Direncinin Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deneyi ile İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Çöl. M. & Çöl, C. (2003). Environmental Boron Contamination in Waters of Hisarcik Area in the Kutahya Province of Turkey, Food and Chemical Toxicology, 41(10), 1417-1420.

- Çubuk, M. (2007). Katkı Maddeleri ile Bitümün Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Esnek Kaplama Malzeme Oluşumunda Problemlerin Giderilmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Das, P., K., Tasdemir, Y. & Birgisson, B. (2012). Low Temperature Cracking Performance of WMA with the Use of the Superpave Indirect Tensile Test, *Construction and Building Materials*, 30, 643-649.
- Dede, H. (2023). Farklı Kaynaktan Temin Edilen Agregaların Sathi Kaplama Tasarım Performansına Etkilerinin İncelenmesi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bartın.
- Delibaş, A. (2003). Tall Oilin Değerlendirilmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
- Devlet Planlama Teşkilatı. (2001). 8. 5 Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, Kimya Sanayi Hammaddeleri Cilt II (Bor Tuzları-Trona-Kaya TuzuSodyum Sülfat-Stronsiyum) Çalışma Grubu Raporu (Rapor No: DPT:2608, ÖİK:619, s.11-13). Ankara: Devlet Planlama Teşkilatı
- Doğan, O. (2006). Esnek Üstyapılı Devlet Karayollarındaki Bozulmaların Bulanık Mantık ile Tahmini, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Doyle, P. C., River, R., O., H. E., Falls, C., & Hardman, H. F. (1963). United States Patent Office Patent No. 3094427.
- Ediz, N., & Özdağ, H. (2001). Bor Mineralleri ve Ekonomisi, *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, 002, 133-151.
- EN-13399, T. (2018). Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar- Modifiye Bitümün Depolama Stabilitésinin Belirlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Eriskin, E., Karahancer, S., Terzi, S. & Saltan, M. (2017). Waste Frying Oil Modified Bitumen Usage for Sustainable Hot Mix Asphalt Pavement, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17, 863-870.
- Erkuş, Y., Kök, B. V. & Yılmaz, M. (2020). Evaluation of Performance and Productivity of Bitumen Modified by Three Different Additives, *Construction and Building Materials*, 261, 120553.
- Ertas, M. A. (2019). Asfalt Betonu Aşınma Tabakalarında Kazınmış Asfalt Kaplama Malzemelerinin Yeniden Kullanım Etkinliğinin ve Performansının Araştırılması, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray.
- Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü. (2017). Bor Sektörü Raporu. Ankara: Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı
- Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü. (2018). Bor Sektörü Raporu. Ankara: Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı.

- Fakhri, M., & Norouzi, M. A. (2022). Rheological and Ageing Properties of Asphalt Bio-binders Containing Lignin and Waste Engine Oil, *Construction and Building Materials*, 321, 126364.
- FHWA, 2011, The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure. Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Gao, J., Liu, Y. & Wang, F. (2001). Structure and Properties of Boron-containing Bisphenol-a Formaldehyde Resin, *European Polymer Journal*, 37(1), 207-210
- Gao, J., Su, X. & Xia, L. (2005). Synthesis and Structure Characterization of Boron-Nitrogen Containing Phenol Formaldehyde Resin, *International Journal Polymer Materials*, 54(10), 949-961.
- Gautam, C., Yadav, A. K., & Singh, A. K. (2012). A Review on Infrared Spectroscopy of Borate Glasses with Effects of Different Additives, *ISRN Ceramics*.
- Geçkil, T. (2008). Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elâzığ.
- Geçkil, T. & Seloğlu, M. (2018). Performance Properties of Asphalt Modified with Reactive Polymer, *Construction and Building Materials*, 173, 262-271.
- Geçkil, T. & Alataş, T. (2018). Superpave Yöntemine göre Tasarım Agrega Gradasyonu Seçimi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 195-211.
- Geçkil, T. & Seloğlu, M. (2019). Reaktif Terpolimerin Bitümün Kıvamına ve Sıcaklık Duyarlılığına Etkisi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilgisi Dergisi*, 33(1), 203-213.
- Girimath, S. & Singh, D. (2019). Effects of Bio-oil on Performance Characteristics of Base and Recycled Asphalt Pavement Binders, *Construction and Building Materials*, 227, 116684.
- Gökmen, K. (2017). Tall Yağı Emprenyesi ile Isıl İşlemin Ağaç Malzemenin Özellikleri Üzerine Etkisi, *Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bartın*.
- Gu, B. & Burgess, D. J. (2014). Chapter 20- Polymeric Materials in Drug Delivery, *Natural and Synthetic Biomedical Polymers*, 333-349.
- Gürer, C., Korkmaz, B., Ş., Y. & Rahmany, M. B. (2019). Sıcak Agrega ile Sathi Kaplama Uygulamasının Araştırılması, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19, 401-409.
- Gürer, C. & Karaşahin, M. (2014). Sathi Kaplama Agregalarının Adezyon Özelliklerinin Araştırılması, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10, 1-11.
- Gürü, M., Çubuk, M., K., Aslan, 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), 04016252.

- 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), 570-578.
- Han, M., Tan, Y., Leng, Z., Zou, F., Li, S., Li, J. & Zhang, C. (2023). Performance of Oil-Absorbing Organogel Polystyrene-stearyl Methacrylate as a Fume Suppressant of Asphalt Binder, *Construction and Building Materials*, 404, 133239.
- Harman, T., D'Angelo, J., A. & Bukowski, J. (2002). Superpave: Asphalt Mixture Design Workshop. Federal Highway Administration: Washington D.C.
- 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, 117047.
- He, X., Tan, M., Yang, D., Zhu, X., Tan, S. & Yang, X. (2023). Rheological Properties of SBS-modified Asphalt Containing Aluminum Hydroxide and Organic Montmorillonite, *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02491.
- Helvacı, C. (2004). Türkiye Borat Yatakları: Jeolojik Konumu, Ekonomik Önemi ve Bor Politikası. 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 11-27, İzmir.
- Helvacı, C. (2015). Bor Yataklarını İçeren Neojen Havzaların Jeolojik Özellikleri: Yatakların Genel Değerlendirmesi ve Gelecek Öngörüsü. *MTA Dergisi*, 151, 173-219.
- Hossain, Z., Zaman, M., Hawa, T. & Saha, M.C. (2015). Evaluation of Moisture Susceptibility of Nanoclay-modified Asphalt Binders through the Surface Science Approach, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27, 04014261.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. & Eren, K. (2001). Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı, Asfalt ve Uygulamaları, İsfalt Bilimsel Yayın No:1, İstanbul.
- İnce, C., B. (2019). Geri Kazanılmış Polietilen Tereftalat (Pet)'in Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Malatya.
- İssazoy, A., K. (2021). Sıcak Asfalt Karışımlarının Mekanik Özelliklerinin Araştırılmasında Aramid Poliolefin Liflerinin Etkisinin İncelenmesi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi, (2001). Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları, İstanbul, 280s.
- Karaağaç, A. (2015). Endüstriyel Bor Atıklarından Borun Geri Kazanımı ve Nano Bor Oksit Eldesi. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Bölümü, 64, Ankara.

- Karadağ, Ö. & Saltan, M. (2021). Bitümlü Bağlayıcı ve Agregaların Arasındaki Adezyon Üzerine Cocamide Diethanolamide Kimyasalının Etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(3), 312-317.
- Kaya, D. & Topal, A. (2016). Marshall ve Superpave Tasarım Yöntemleri Arasındaki Farklılıkların Ilık Karışım Asfaltlar Açısından İncelenmesi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(2), 289-302.
- Keçeciler, A. F., & Akkol, G. (1990). Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı. Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Keskin, A. (2005). Tall Yağı Esaslı Biyodizel ve Yakıt Katkı Maddesi Üretimi ve Bunların Dizel Motor Performansı Üzerindeki Etkileri, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Doktora Tezi, Ankara.
- Keskin, A., Gürü, M., & Altınparmak, D. (2007). Tall Yağı Biyodizelinin Dizel Yakıtı ile %90 Oranındaki Karışımının Alternatif Dizel Yakıtı Olarak İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22(1), 57-63.
- Keskin, M. (2011). Superpave ve Marshall Dizayn Yöntemleri ile Üretilmiş Asfalt Numunelerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerindeki Farklılıkların Belirlenmesi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Keskin, M. & Karacasu, M. (2019). Effect of Boron Containing Additives on Asphalt Performance and Sustainability Perspective, Construction and Building Materials, 218, 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, Elâzığ.
- Koral, A., F. (2012). Aynı Performans Seviyesine Sahip Bağlayıcılarla Hazırlanan Bitümlü Sıcak Karışımların Kalıcı Deformasyona Karşı Dayanımlarının ve Yorulma Ömürlerinin Karşılaştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elâzığ.
- Koral, A., F. (2023). Geri Dönüşümlü Asfalt İlavesi ile Modifiye Karışımların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elâzığ.
- Korhonen, M. & A. Kellomaki, A. (1996). Miscibilities of Polymer in Bitumen and Tall Oil Pitch Under Different Mixing Conditions, Fuel, 75(15), 1727-1732.
- Korhonen, M. & A. Kellomaki, A. (1996). Dispersion of Polyolefins in Bitumen by Means of Tall Oil Pitch, and Microscopic Characterization of Mixes, Fuel, 75(7), 896-898.
- Kök, B., V., Yılmaz, M. & Kuloğlu, N. (2012). Asfaltitin Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi, İMO Teknik Dergi, 371, 5813-5826.

- Kök, B., V., Yılmaz, M. & Akpolat, M. (2014). Evaluation of the Conventional and Rheological Properties of SBS + Sasobit Modified Binder. *Construction and Building Materials*, 63, 174-179.
- Köfteci, S., Ahmedzade, P. & Kultayev, B. (2014). Performance Evaluation of Bitumen Modified by Various Type of Waste Plastics, *Construction and Building Materials*, 73, 592-602.
- Kuloğlu, N. (2001). Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğine Etki Eden Parametreler, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*, 25, 61-67.
- Kuloğlu, M. (2006). Bitümlü Sıcak Karışımlarda Bitüm Film Kalınlığının Stabilité ve Rijitliğe Etkisi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elâzığ.
- Kumandaş, A., Çavdar, E., Oruç, Ş., Pancar, E., B. & Kök, B. V. (2022). Effect of WCO Addition on High and Low-temperature Performance of RET Modified Bitumen, *Construction and Building Materials*, 323, 126561.
- Kumar, A., Choudhary, R., & Kumar, A. (2022). Composite Asphalt Binder Modification with Waste Non-tire Automotive Rubber and Pyrolytic Oil, *Materials Today: Proceedings*, 61(2), 158-166.
- Kumar, A., Choudhary, R. & Kumar, A. (2023). Storage Stability Performance of Composite Modified Asphalt with Scrap Non-tire Automotive Rubber, Waste Plastic Pyrolytic Oil and Sulfur, *Journal of Plos One*, 18(4): e0284473.
- Kutuk S., & Kutuk-Sert, T. (2020). An Examination of Nanoparticle Colemanite Mineral Added Warm Mix Asphalt, *Construction and Building Materials*, 243, 118252.
- Lavin, P.G., 2003, *Asphalt Pavements*, Spon Pres, London and New York, 444p.
- Lee, S., Kwak, D. & Le, T., H. (2023). Laboratory Evaluation on the Aging Susceptibility of Reclaimed Asphalt Bitumen Containing Low-viscosity Binder and Cooking Oil Waste, *Construction and Building Materials*, 19, 101260.
- Lei, Z., Bahia, H., Yi-qui, T. & Ling, C. (2017). Effects of Refined Waste and Bio-based Oil Modifiers on Rheological Properties of Asphalt Binders, *Construction and Building Materials*, 148, 504-511.
- Lentz, A. P. (1945). United States Patent Office Patent No. 2375117.
- Liang, M., Ren, S., Fan, W., Xin, X., Shi, J. & Luo, H. (2017). Rheological Property and Stability of Polymer Modified Asphalt: Effect of Various Vinyl-acetate Structures in EVA Copolymers, *Construction and Building Materials*, 137, 367-380.
- Liu, S., Zhou, S., B. & Xu, Y. (2018). Evaluation of Cracking Properties of SBS-modified Binders Containing Organic Montmorillonite, *Construction and Building Materials*, 175, 196-205.

- Liu, X., Li, T. & Zhang, H. (2018). Short-term Aging Resistance Investigations of Polymers and Polyphosphoric Acid Modified Asphalt Binders Under RTFOT Aging Process, *Construction and Building Materials*, 191, 787-794.
- Liu, Z., Li, S., & Wang, Y. (2022). Waste Engine Oil and Polyphosphoric Acid Enhanced the Sustainable Self-healing of Asphalt Binder and its Fatigue Behavior, *Construction and Building Materials*, 339, 130767.
- Lu, P., Ma, Y., Ye, K. & Huang, S. (2022). Analysis of High-temperature Performance of Polymer-modified Asphalts through Molecular Dynamics Simulations and Experiments, *Construction and Building Materials*, 350, 128903.
- Luo, W., Zhang, Y. & Cong, P. (2017). Investigation on Physical and High Temperature Rheology Properties of Asphalt Binder Adding Waste Oil and Polymers, *Construction and Building Materials*, 144, 13-24.
- Lyu, L., Pei, J., Hu, D. & Fini, E. H. (2021). Durability of Rubberized Asphalt Binders Containing Waste Cooking Oil Under Thermal and Ultraviolet Aging, *Construction and Building Materials*, 299, 124282.
- Manavira, J., Mthabela, Z., Michael. O. & Daramola, M. O. (2023). Determining Composition of Bamboo Using Thermogravimetric Analysis (TGA)- Chemometrics technique, *Materials Today: Proceedings*, in Press.
- Martin, C., Hunt, B., J., Ebdon, J., C., Ronda, J., C. & Cadiz, V. (2006). Synthesis Crosslinking and Flame Retardance of Polymers of Boron-containing Difunctional Styrenic Monomers, *Reactive and Functional Polymers*, 66(10), 1047-1054.
- Martin, C., Ronda, J., C. & Cadiz, V. (2006). Boron-containing Novolac Resins as Flame Retardant Materials, *Polymer Degradation and Stability*, 91(4), 747-754.
- Marzocchi, A., Roberts, G., M. & Bolen, C., E. (1982)., United States Patent Office, Patent No: 4360473.
- 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, 91.
- Mhareb, M. H. A., Hashim, S., Ghoshal, S. K., Alajerami, Y. S. Bqoor, M. J., Hamdan, A. I., Saleh, M. A. & Abdul Karim, M. K. B. (2016). Effect of Dy₂O₃ Impurities on the Physical, Optical and Thermoluminescence Properties of Lithium Borate Glass, *Journal of Luminescence*, 177, 66–372.
- Melo, J., V., S. & Triches, G. (2017). Evaluation of Properties and Fatigue Life Estimation of Asphalt Mixture Modified by Organophilic Nanoclay, *Construction and Building Materials*, 140, 364-373.
- Mohammed, I. I. (2014). Investigating Nano Materials Effect on Hot Mix Asphalt Concrete (Using Zycotherm). Fatih University, The Graduate School of Science and Engineering, Master of Science, Istanbul.

- Monero, M., A., Moreno, L., Montiel, R., Monero, O. & Vazquez, H. (2017). Effects of Montmorillonite (Mt) and Two Different Organo-Mt Additives on the Performance of Asphalt, *Applied Clay Science*, 139, 20-27
- Moreno, F., Sol, M., Martin, J., Perez, M. & Rubio, M. C. (2013). The Effect of Crumb Rubber Modifier on the Resistance of Asphalt Mixes to Plastic Deformation, *Construction and Building Materials*, 47, 274-280.
- Motke, S. G., Yawale, S., P. & Yawale, S., S. (2002). Infrared Spectra of Zinc Doped Lead Borate Glasses, *Bulletin of Materials Science*, 25 (1), 75–78.
- Orhan, F. (2005). Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Orhan, F. (2012). Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Okumuş, A. G. (2021). Endüstriyel Atık Boraks Çözeltilisinin Ötektik Donma Kristalizasyonu Yöntemi ile Geri Kazanılmasının İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Oruç, Ş. (1997). Torul Kalker Taş Ocağı 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. & Sancak, K. (2015). Effect of Boron-Containing Additives on Rheological Properties of Asphalt Binder. *Road Materials and Pavement Design*.
- Oruç, Ş., Yılmaz, B. & Sancak, S. (2016). Effect of Boron-containing Additives on Rheological Properties of Asphalt Binder, *Road Materials and Pavement Design*, 17(4), 810-824.
- Oruç, Ş. & Yılmaz, B. (2016). Improvement in Performance Properties of Asphalt Using a Novel Boron-containing Additive, *Construction and Building Materials*, 123, 207-213.
- Öbek, A. (2021). Metil Metakrilat Birimleri Taşıyan Polipropilen Esaslı Graft Kopolimerin Bitüm ve Bitümlü Karışımların Özellikleri Üzerine Etkileri, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Malatya.
- Önal, M. A. & Kahramangil M., 1993, Bitümlü Karışımlar Laboratuar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 200s.
- Öz Kıcı, G. & Saltan, M. (2020). Pirinanın Bitüm Modifikasyonunda Kullanımının Araştırılması, *International Journal of Technological Science*, 12(1), 1-9.

- Öztürk, A., E. & Çubuk, M., K. (2004). Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Bilgisi Dergisi, 19(2), 175-184.
- Padhi, S. & Behera, A. (2022). Chapter 17-Biosynthesis of Silver Nanoparticles: Synthesis, mechanism, and characterization, In Nanobiotechnology for Plant Protection, Agri-Waste and Microbes for Production of Sustainable Nanomaterials, 397-440.
- 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.
- Qurashi, I. A. & Swamy, A. K. (2018). Viscoelastic Properties of Recycled Asphalt Binder Containing Waste Engine Oil, Journal of Cleaner Production, 182, 992-1000.
- Raufi, H. (2018). Bitümlü Bağlayıcı ve Asfalt Karışımlarının Nano Malzemelerle Modifikasyonu, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- 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.
- Sağlık, A. (2009). Türkiye’de Üretilen Rafineri Bitümlerinin Karayolu Üstyapılarında Kullanımı için Performans Sınıflarının Belirlenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Sayın, E. & Tanyıldızı, H. (2006). Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğinin Bulanık Mantık ile Bulunması, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24(4), 645-649.
- Selçuk, S. (2019). Atık Floresan Camlarının Asfalt Betonu Kaplamalarında Filler Olarak Kullanımı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- 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, 1897-1905.
- Shadab, M., Jirsa, M. & Miryala, M. (2023). Tuning of Superconductivity of Bulk MgB₂ by Ball Milling and Sieving the Boron Precursor, Materials Chemistry and Physics, 309, 128348.
- Shell Bitüm El Kitabı, (2004). İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:3, İstanbul, 334s.

- Smith, R. (1995). Boric Oxide, Boric Acid and Borates. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry, A4, 263-280.
- Sönmez, İ., Taştan, Y., Yıldız, K., & Bayraklı, Y. (2018). İki Asfalt Tabakası Arasında Geogrid Kullanımının Asfalt Performansına Olan Etkisi. İSFALT yayınları.
- Sun, Z., Yi, J., Huang Y., Feng, D. & Guo C. (2016). Properties of Asphalt Binder Modified by Bio-oil Derived From Waste Cooking Oil, Construction and Building Materials, 102, 496-504.
- Suo, Z., Yan, Q., Ji, J., Liu, X., Chen, H. & Zhang, A. (2021). The Aging Behavior of Reclaimed Asphalt Mixture with Vegetable Oil Rejuvenators, Construction and Building Materials, 299, 123811.
- Sür, A., Sür, Ö. & Yiğitbaşoğlu, H. (2001). Mineraller ve Kayaçlar. Ankara: Bilim Yayıncılık.
- Sybilski, D. (1994). Relationship Between Absolute Viscosity of Polymer Modified Bitumens and Rutting Resistance of Pavement, Material and Structures, 27, 110-120.
- Şahin, D. (2017). Aspir Yağı ve Borik Asit İçerikli Organik Katkının Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özellikleri Üzerine Etkisi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Şartnamesi, K. T. (2013). Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Şengül, C. E., Oruç, Ş., İskender, E. & Aksoy, A. (2013). Evaluation of SBS Modified Stone Mastic Asphalt Pavement Performance, Construction and Building Materials, 41, 777-783.
- Şimşek, O. (2020). Beton ve Beton Teknolojisi-Çeşitleri-Özellikleri-Deneyleri. Ankara.
- Tazikeh, S, Amin, J., S. & Zendehboudi, S. (2020). Experimental Study of Asphaltene Precipitation and Metastable Zone in the Presence of Polythiophene-coated Fe₃O₄ Nanoparticles, Journal of Molecular Liquids, 301, 112254.
- Tian, Y., Li, H., Zhang, H., Yang, B., Zuo, X. & Wang, H. (2021). Comparative Investigation on Three Laboratory Testing Methods for Short-term Aging of Asphalt Binder, Construction and Building Materials, 266, 121204.
- TMMOB Maden Mühendisleri Odası. (2008). Bor Raporu. Erişim: 20 Mart 2020, http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/6358599b7afb250_ek.pdf?tipi=5&turu=R&sube=0
- TMMOB Metalürji Mühendisleri Odası. (2003). Bor Raporu. Erişim: 21 Mart 2020, https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi134/d134_1158.pdf
- Tombal, T. D., Özkan, Ş. G., Ünver, İ. K. & Osmanlıoğlu, A. E. (2016). Bor Bileşiklerinin Özellikleri, Üretimi, Kullanımı ve Nükleer Reaktör Teknolojisinde Önemi. Bor Dergisi, 1 (2), 86-95.

- Tosun, H. M. (2023). Production and Characterization of Waste Tire Pyrolytic Oil – Investigating Physical and Rheological Behaviour of Pyrolytic Oil Modified Asphalt Binder, *Construction and Building Materials*, 9(1), e12851.
- Tranter, G., E. (2017). FTIR Spectroscopy of Aqueous Solutions, *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry (Third Edition)*, 762-769.
- Tunç, A. (2004). *Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı*, Asil Yayın Dağıtım, Ankara.
- Tunç, A. (2007). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- Turkbay, T., Bongono, J., Alix, T., Laratte, B. & Elevli, B. (2022). Prior Knowledge of the Data on the Production Capacity of Boron Facilities in Turkey, *Cleaner Engineering and Technology*, 10, 100539.
- Umar, F., & Açar, E. (1991). *Yol Üst Yapısı*, İTÜ Rektörlüğü.
- URL-1.(2023, EKİM 5). <https://www.hjoil.com.tw/products.php?getId=6> adresinden alınmıştır.
- URL2. (2023, AĞUSTOS10).https://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/hmec/pubs/module_f/lab_manual_asphalt.pdf adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2024, OCAK 15). <https://www.ibef.net/en/emulsions-2/uses/maintenance-and-rehabilitation/rutting> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2024, ŞUBAT 2). https://www.pavemanpro.com/article/deterioration_asphalt_causes/ adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2024, OCAK, 17). <https://boren.tenmak.gov.tr/tr/bor-elementi.html> adresinden alınmıştır.
- Vitry, V., Kanta A. F., Dille, J. & Delanious, F. (2012). Structural State of Elektroless Nickel-boron Deposits (5wt.% B): Characterization by XRD and TEM, *Surface and Coating Technology*, 206, 3444-3449.
- Wang, D., C., Chang, G., W. & Chen, Y. (2008). Preparation and Thermal Stability of Boron-containing Phenolic Resin/clay Nanocomposites, *Polymer Degradation and Stability*, 93(1), 125-133.
- Wang, L., Wei, J. & Zhang, Y. (2009). Development of Alternative Parameters to Evaluate the Temperature Susceptibility of Asphalt Binders, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2(2), 75-81.
- Walters, R. C. (2013). *Enhancing Asphalt Binders's Rheological Behavior and Aging Susceptibility Using Nano-particles*, North Carolina A&T State University, North Carolina, Greensboro.
- Wetekama, J. & Mollenhauer, K. (20S23). Sample Preparation Method for Quick Characterization of Reclaimed Aphalt by FTIR Spectroscopy, *Transportation Research Procedia*, 72, 3291–3299.

- Whiteoak, D. (2004). Shell Bitüm El Kitabı, Lav, A. H. ve Lav, A. İsfalt Bilimsel Yayın No:3, İstanbul.
- Xu, X., Guo, H., Wang, X., Zhang, M., Wang, Z. & Yang, B. (2019). Physical Properties and Anti-aging Characteristics of Asphalt Modified with Nano-zinc Oxide Powder, *Construction and Building Materials*, 224, 732-742.
- Yamaç, Ö., E. (2015). Stiren-Butadien-Stiren ve Gilsonit'in Birlikte Kullanımının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkileri, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elâzığ.
- Yan, K., Liu, W., You, L., Ou, J. & Zhang, M. (2021). Evaluation of Waste Cooling Oil and European Rock Asphalt Modified Asphalt with Laboratory Tests and Economic Cost Comparison, *Journal of Cleaner Production*, 310, 127364.
- Yan, K., Hong, Z., You, L., Ou, J. & Miljkovi, M. (2021). Influence of Ethylene-vinyl Acetate on the Performance Improvements of Low-density Polyethylene-modified Bitumen, *Journal of Cleaner Production*, 278, 123865.
- Yang, X. & You, Z. (2015). High Temperature Performance Evaluation of Bio-oil Modified Asphalt Binders Using the DSR and MSCR Tests, *Construction and Building Materials*, 76, 380-387.
- Yao, X., Wang, Y. & Xu, T. (2021). Development on Recycling, Aging Simulation and Regeneration Methods of Reclaimed Styrene-butadiene-styrene Modified Asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127767.
- Ye, Q., Wu, S. & Li, N. (2009). Investigation of the Dynamic and Fatigue Properties of Fiber-modified Asphalt Mixtures, *International Journal of Fatigue*, 31, 1598-1602.
- Ye, F., Yin, W., Lu, H. & Dong, Y. (2020). Property Improvement of Nano-Montmorillonite/SBS Modified Asphalt Binder by Naphthenic Oil, *Construction and Building Materials*, 243, 118200.
- Yenialaca, Ç. (2009). Bor ve Kullanım Alanları Gazi Üniversitesi, Ortaöğretim Fen ve Matematik Alanları Eğitimi Bölümü, Fizik Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek lisans tezi, Ankara.
- Yenmez, N. (2009). Stratejik Bir Maden Olarak Bor Minerallerin Türkiye için Önemi, İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Coğrafya Dergisi, 19, 59-94.
- 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, 129510.
- Yılmaz, M. (2011). Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elâzığ.

- Yılmaz, B. (2016). Bor İçerikli Katkıyla Modifiye Edilen Asfaltın Performans Özelliklerinin Araştırılması. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Yin, J. & Wu, W. (2018). Utilization of Waste Nylon Wire in Stone Matrix Asphalt Mixtures, *Waste Management*, 78, 948-954.
- You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J. M., Roy, S., Odegard, G., M., Dai, Q. & Goh, S. W. (2011). Nanoclay Modified Asphalt Materials; Preperation and Characterization, *Construction and Building Materials*, 25(2), 1072-1078.
- 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.
- Zeng, M., Pan, H., Zhao, Yu. & Tian, W. (2016). Evaluation of Asphalt Binder Containing Castor Oil-based Bioasphalt Using Conventional Tests, *Construction and Building Materials*, 126, 537-543.
- Zeng, M., Li, J., Zhu, W. & Xia, Y. (2018). Laboratory Evaluation on Residue in Castor Oil Production as Rejuvenator for Aged Paving Asphalt Binder, *Construction and Building Materials*, 193, 276-285.
- Zhang, P. (1999). Omnibus Test of Normality Using the Q Statistic. *Journal of Applied Statistics*, 26(4), 519-528.
- Zhang, F. & Yu, J. (2010). The Research for High-performance SBR Compound Modified Asphalt, *Construction and Building Materials*, 24(3), 410-418.
- Zhang, W., Liu, C., Ying, Y. & Dong, W. (2010). The Preparation and Characterization of Boron-containing Phenolic Fibers, *Materials Chemistry and Physics*, 121, 89-94.
- Zhang, F., Yu, J. & Han, J. (2011). Effects of Thermal Oxidative Ageing on Dynamic Viscosity, TG/DTG, DTA and FTIR of SBS- and SBS/sulfur-modified Asphalts, *Construction and Building Materials*, 25, 129-137.
- Zhang, Y., Zhou, C., Zou, P., Hu, M. & Cao, P. (2024). A Novel WCO-MDI Reactive Rejuvenation Method for Aged SBS Modified Asphalt Toward Sustainable Asphalt Pavements, *Journal of Cleaner Production*, 434, 140199.
- Zhao, X., Wang, S., Wang, Q. & Yao, H. (2016). Rheological and Structural Evolution of SBS Modified Asphalts Under Natural Weathering, *Fuel*, 184, 242-247.
- Zhao, Z., Wu, S., Xie, J., Yang, C., Yang, X., Chen, S. & Liu, Q. (2023). Recycle of Waste Tire Rubber Powder in a Novel Asphalt Rubber Pellets for Asphalt Performance Enhancement, *Construction and Building Materials*, 399, 132572.

- Zhu, C., Li, D., Zhang, H., Wang, Z. & Li, J. (2023). Synergistic Effect of Surface Modified Nano-zinc Oxide and Organic Vermiculite on Long-term Ultraviolet and Thermal-oxidative Aging Resistance of Different Asphalt Binders, *Construction and Building Materials*, 409, 133832.
- Zou, X., Sha, A., Ding, B., Tand, Y. & Huan, X. (2017). Evaluation and Analysis of Variance of Storage Stability of Asphalt Binder Modified by Nanotitanium Dioxide, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 6319697.
- Zuo, P., Qu, S. & Shen, W. (2019). Asphaltenes: Separations, Structural Analysis and Applications, *Journal of Energy Chemistry*, 34, 186-207.



6. EKLER

Ek Tablo 1. Optimum Bitüm Miktarı İçin Marshall Föyü

Sıra No	Bitüm		Briket Yükseklikleri (mm)				Havadaki	Sudaki	Doygun Yüzey	Hacim (cm ³)	Hacim	Maks.	Boşluk	Agr.Arası	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş
							Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)		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

İlköğrenimini Mehmet Akif Ersoy İlköğretim Okulu'nda, lise eğitimini 2008 yılında Fatih Lisesi'nde tamamladı. 2008-2009 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine kaydolarak 2013 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans yapmaya hak kazandı. 2016 yılında "Kolemanitin zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğinin araştırılması" başlıklı yüksek lisans tezini sunmasının hemen ardından doktora eğitimine başladı. 2014 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Of Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. İyi derece İngilizce bilmektedir.

Yeşilçiçek H., Bozdemir M. G., Oruç Ş., (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, 129510.

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, GRAĞEVINAR 75, 7, 679-694.