



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ORGANİK ESASLI KOLEMANİT
BİLEŞİĞİNİN BİTÜM VE BİTÜMLÜ
KARIŞIMLARIN PERFORMANS
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Ayşegül ÖZSOY

YÜKSEK LİSANS

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ayşegül ÖZSOY tarafından hazırlanan “Organik Esaslı Kolemanit Bileşiğinin Bitüm ve Bitümlü Karışımların Performans Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 19/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Deniz ARSLAN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Mustafa Kürşat ÇUBUK
(Gazi Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ayşegül ÖZSOY

19.06.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ORGANİK ESASLI KOLEMANİT BİLEŞİĞİNİN BİTÜM VE BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN PERFORMANS ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ayşegül ÖZSOY

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Deniz ARSLAN

2025, 136 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Deniz ARSLAN
Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Doç. Dr. Mustafa Kürşat ÇUBUK

Bu tez çalışmasında temel bağlayıcı olarak, 50/70 penetrasyon derecesine sahip Tüpraş Kırıkkale Rafinerisi'nden temin edilen saf bitüm kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında, kolemanit ve monoetilen glikol kullanılarak tarafımızca kimyasal sentezi gerçekleştirilen yeni bir katkı maddesi geliştirilmiş ve bu bileşik “Organik Esaslı Kolemanit Bileşiği (OEKB)” olarak adlandırılmıştır. OEKB, bitümün modifikasyonunda katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Bitüm modifikasyonu sürecinde OEKB, bitüme ağırlıkça %1, %2, %3, %5 ve %8 oranlarında ilave edilmiştir. Modifikasyon işlemi, 150°C sıcaklıkta, 20 dakika boyunca mekanik karıştırıcı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Modifiye edilen bitüm numunelerine, hem geleneksel hem de Superpave yöntemlerine dayalı çeşitli deneyler uygulanmıştır. Geleneksel deney yöntemleri arasında viskozite testi, penetrasyon testi, yumuşama noktası testi, kuvvet ölçümlü düktilite deneyi ve elastik geri dönme deneyi yer almaktadır. Superpave performans deneyleri kapsamında ise Dinamik Kayma Reometresi (DSR), Kiriş Eğme Reometresi (BBR), Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Testi (RTFOT) ve Basıncılı Yaşlandırma Kabı (PAV) testleri uygulanmıştır. Ayrıca, modifiye bitüm kullanılarak hazırlanan bitümlü karışımlar üzerinde Marshall karışım tasarımı, indirekt çekme mukavemeti ve Nicholson soyulma testleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda, OEKB katkısı ile modifiye edilen bitümün saf bitüme kıyasla kıvamının arttığı, penetrasyon testi ve yumuşama noktası testi sonuçları ile doğrulanmıştır. Viskozite deneyi verilerine göre, katkı maddesinin yüksek sıcaklıklarda bitümün kıvamını azalttığı gözlemlenmiştir. DSR testi sonuçları, modifiye bitümün tekerlek izi direncinde önemli bir artış sağladığını ortaya koyarken; BBR testi, düşük sıcaklık performansında iyileşme olduğunu göstermiştir. Bitüme %2 OEKB eklenmesi, yüksek ve düşük performans sınıflarının daha ileri seviyeye geliştirilmesine olanak sağlamıştır.

Marshall tasarımı deneyinde, katkı maddesi sayesinde karışımın stabilitesinde artış gözlemlenmiştir. Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen dolaylı çekme mukavemeti deneyinde özellikle 40°C’de % 8,83 seviyesinde belirgin bir artış tespit edilmiştir. Son olarak, Nicholson soyulma test sonuçları, OEKB katkısı ile hazırlanan bitümlü karışımların soyulma direncinde % 60’tan % 80’e artış sağladığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: bitüm, bitümlü sıcak karışım, kolemanit, modifiye bitüm, monoetilen glikol, organik esaslı kolemanit bileşiği, reoloji, deformasyon direnci

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ORGANIC BASED COLEMANITE COMPOUND ON THE PERFORMANCE PROPERTIES OF BITUMEN AND BITUMINOUS MIXTURES

Ayşegül ÖZSOY

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Deniz ARSLAN

2025, 136 Pages

Jury

**Asst. Prof. Dr. Deniz ARSLAN
Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Assoc. Prof. Dr. Mustafa Kürşat ÇUBUK**

In this thesis study, pure bitumen with a penetration grade of 50/70, supplied from Tüpraş Kırıkkale Refinery, was used as the primary binder. In the laboratory, a new additive was chemically synthesized using colemanite and monoethylene glycol, and this compound was named the “Organic Based Colemanite Compound (OEKB).” The OEKB was used as an additive for bitumen modification. During the modification process, OEKB was added to the bitumen in proportions of 1%, 2%, 3%, 5%, and 8% by weight. The modification was carried out at 150 °C for 20 minutes using a mechanical stirrer. Various tests based on both conventional and Superpave methods were conducted on the bitumen samples modified with OEKB. The conventional test methods included the viscosity test, penetration test, softening point test, force-ductility test, and elastic recovery test. As part of the Superpave performance tests, the Dynamic Shear Rheometer (DSR), Bending Beam Rheometer (BBR), Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), and Pressure Aging Vessel (PAV) tests were performed. Additionally, bituminous mixtures prepared with the modified binders were subjected to the Marshall mix design, indirect tensile strength test, and Nicholson stripping test.

As a result of the experiments, it was confirmed through penetration and softening point test results that the consistency of the bitumen increased when modified with OEKB compared to the pure bitumen. According to the viscosity test data, it was observed that the additive decreased the consistency of the bitumen at high temperatures. DSR test results indicated a significant improvement in rutting resistance of the modified bitumen, while the BBR test results demonstrated enhanced low-temperature performance. The addition of 2% OEKB to bitumen has enabled the development of high and low performance grades to a higher advanced level.

In the Marshall mix design test, an increase in the stability of the mixture was observed due to the use of the additive. In the indirect tensile strength test performed at different temperatures, a notable increase was particularly observed at 40°C as 8.8%. Finally, the results of the Nicholson stripping test showed that the stripping resistance of the bituminous mixtures was improved significantly from 60 % to 80 % with the use of OEKB.

Keywords: bitumen, bituminous hot mix, colemanite, modified bitumen, monoethylene glycol, organic based colemanite compound, rheology, deformation resistance

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince bilgi birikimi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, tüm sorularıma akademik uzmanlığıyla açıklık getiren, kıymetli danışmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Deniz ARSLAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam kapsamında gerçekleştirdiğim geniş ölçekli deneylerin yürütülmesinde sağladıkları yardım ve desteklerden dolayı bağlı bulunduğum Karayolları 4.Bölge Müdürlüğü'ne ve Araştırma ve Geliştirme Başmühendisliği Bitüm Laboratuvarı'nda görev yapan çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme, özellikle akademik anlamda beni cesaretlendirmekten hiçbir zaman vazgeçmeyen babam Hacı Ali TORUN'a, her daim yanımda olan kıymetli eşim ve aynı zamanda meslektaşım Sefa ÖZSOY'a ve bu yoğun süreçte değerli zamanlarından çalmama müsaade eden ve bana güç kaynağı olan evlatlarım Ahmet Mete ÖZSOY ve İlay ÖZSOY'a sonsuz teşekkür ederim.

Ayşegül ÖZSOY
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
3. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	12
3.1. Bitüm.....	12
3.1.1. Bitümün kimyasal bileşimi	14
3.1.2. Bitümün reolojik özellikleri.....	16
3.2. Modifiye Bitüm	17
3.2.1. Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri.....	19
3.2.2. Saf ve OEKB modifiyeli bitümlere uygulanan deneyler	20
3.3. Agrega	21
3.4. Bitümlü Sıcak Karışım (BSK).....	24
3.4.1. Bitümlü sıcak karışımlara uygulanan deneyler.....	25
4. MATERYAL VE METOT	26
4.1. Materyal	26
4.1.1. Organik esaslı kolemanit bileşiği (OEKB)	27
4.1.1.1. Kolemanit.....	28
4.1.1.1.1. Borun kullanıldığı sektörler.....	31
4.1.1.2. Monoetilen glikol	33
4.1.1.2.1. Monoetilen glikolün kullanıldığı sektörler	33
4.2. Metot	34
4.2.1. Deneysel Çalışma	34
4.2.1.1. Viskozite testi.....	34
4.2.1.2. Penetrasyon testi.....	36
4.2.1.3. Yumuşama noktası testi	37
4.2.1.4. Kuvvet ölçümlü duktilite deneyi.....	39
4.2.1.5. Elastik geri dönme deneyi	40
4.2.1.6. Dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi	42
4.2.1.7. Dönel ince film ısıtma kaybı (RTFO) deneyi	44
4.2.1.8. Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi.....	46

4.2.1.9. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi.....	48
4.2.1.10. Marshall tasarım deneyi	51
4.2.1.11. Nicholson soyulma deneyi	53
4.2.1.12. İndirekt çekme mukavemeti (İÇM) deneyi	54
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	55
5.1. Viskozite Test Sonuçları	55
5.2. Penetrasyon Test Sonuçları	59
5.3. Yumuşama Noktası Test Sonuçları	62
5.4. Kuvvet Ölçümlü Düktilite Sonuçları.....	65
5.4. Elastik Geri Dönme Deney Sonuçları	67
5.5. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deney Sonuçları	68
5.6.1. RTFOT sonrası yapılan DSR deney sonuçları.....	72
5.6.2. PAV sonrası DSR deney sonuçları	75
5.7. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney sonuçları.....	78
5.8. Marshall Tasarım Deney Sonuçları	85
5.9. Nicholson Soyulma Deney Sonuçları.....	104
5.10. İndirekt Çekme Mukavemeti Deney Sonuçları	108
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	115
KAYNAKLAR.....	118
EKLER.....	129
EK-1 Deneylere ait diğer görseller	129
EK-2 Nicholson soyulma testinde kullanılan Python programı kod bilgileri.....	132

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Ag_2O_3	: Gümüş oksit
B	: Bor
B_2O_3	: Boroksit
CS_2	: Karbondisülfid
d	: Numune çapı
Dp	: Pratik yoğunluk
Dt	: Teorik özgül ağırlık
EO	: Etilen oksit
G*	: Kompleks kayma modülü
$G^*/\sin \delta$	: Tekerlek izine karşı direnç parametresi
HCl	: Hidroklorik asit
m	: Sünme oranı
N	: Azot
O	: Oksijen
Pmax	: Kırılmaya yol açan maksimum yük
S	: Sünme sertliği
t	: Ortalama numune yüksekliği
Vf	: Asfaltla dolu boşluk yüzdesi
Vh	: Hava boşluğu yüzdesi
VMA	: Agregalar arası boşluk yüzdesi
δ	: Faz açısı
μ	: Viskozite

Kısaltmalar

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Çalışanları Birliği)
BBR	: Eğme kırışi reometresi
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
Cp	: Centipoise
DSR	: Dinamik kayma reometresi
EVA	: Etilenvinil-asetat
İÇM	: İndirekt Çekme Mukavemeti
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
kPa	: Kilopascal
mPa	: Megapascal
OEKB	: Organik Esaslı Kolemanit Bileşiğı
Pa	: Pascal
Pa.s	: Pascal- Saniye
PAV	: Basınçlı yaşlandırma kabı
PE	: Polietilen

PG	: Performans sınıfı
PP	: Polipropilen
PVC	: Polivinil-klorid
RTFOT	: Dönel ince film halinde ısıtma testi
SBS	: Stiren-butadien-stiren
SEBS	: Stiren-etilen-butilen-stiren
SUPERPAVE	: Superior Performing Asphalt Pavement
TFOT	: İnce film halinde ısıtma testi
TS	: Türk Standartları Enstitüsü
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3. 1. Bitümlü bağlayıcının viskoelastik davranışı.....	13
Şekil 3. 2. Bitüm üretim şeması.....	14
Şekil 3. 3. Bitümün kimyasal yapısı.....	15
Şekil 3. 4. Agregada gradasyon tipleri.....	23
Şekil 3. 5. Standart BSK tabakası.....	24
Şekil 4. 1. Katkı maddesinin laboratuvar ortamında sentezlenmesi.....	27
Şekil 4. 2. Organik Esaslı Kolemanit Bileşiği (OEKB).....	28
Şekil 4. 3. Kolemanit mineraline ait görseller	29
Şekil 4. 4. Dünya genelinde sektör bazında bor kullanımı yüzdesi	32
Şekil 4. 5. Brookfield viskozite test cihazı.....	35
Şekil 4. 6. (a) Penetrasyon iğnesi (b) Penetrasyon test cihazı.....	37
Şekil 4. 7. (a) Yumuşama noktası haznesi (b) Yumuşama noktası test cihazı.....	38
Şekil 4. 8. Pirinç kap modeli.....	39
Şekil 4. 9. (a) Düktilite cihazı (b) Tablaların cihaza yerleştirildiği üst kısım (c) Düktilite cihazı su haznesi.....	40
Şekil 4. 10. Dinamik kayma reometresinin şematik diyagramı	42
Şekil 4. 11. DSR deney cihazı.....	43
Şekil 4. 12. RTFOT için hazırlanmış bitüm dolu cam şişeler.....	45
Şekil 4. 13. RTFOT ısıtma kabı.....	45
Şekil 4. 14. PAV basınçlı yaşlandırma kabı.....	47
Şekil 4. 15. BBR deney cihazı ve bilgisayar sistemi.....	48
Şekil 4. 16. Bitüm dolu kiriş numuneleri.....	49
Şekil 4. 17. (a) Yükleme maruz kalan numunenin yerleşimi (b) Deney sonrası kiriş numune görselleri.....	50
Şekil 4. 18. Marshall deney tokmağı.....	52
Şekil 4. 19. Marshall stabilite ve akma cihazı.....	52
Şekil 5. 1. Farklı karıştırma süre ve sıcaklığında hazırlanmış modifiye bitümler.....	55
Şekil 5. 2. Modifikasyon esnasında sıcaklığın takibi.....	56
Şekil 5. 3. Viskozite test sonuçları (°C).....	57
Şekil 5. 4. Viskozite test sonuçları (OEKB %).....	58
Şekil 5. 5. Penetrasyon test sonuçları.....	59
Şekil 5. 6. RTFOT sonrası penetrasyon sonuçları	61
Şekil 5. 7. Yumuşama noktası test sonuçları.....	63
Şekil 5. 8. RTFO sonrası yumuşama noktası sonuçları	64
Şekil 5. 9. Bitüm numunelerin sünme miktarları	66
Şekil 5. 10. Numunelerin geri dönme oranları	67
Şekil 5. 11. Farklı sıcaklıklar için $G^*/\sin\delta$ değerleri	69
Şekil 5. 12. RTFOT sonrası farklı sıcaklıklar için $G^*/\sin\delta$ (Pa) değerleri	75
Şekil 5. 13. Uzun süreli yaşlanma (PAV) sonrası sıcaklık ve $G^*.\sin\delta$ verileri	77
Şekil 5. 14. -12 °C’de sünme oranı (m) değerleri.....	80
Şekil 5. 15. -12 °C’de sünme sertliği (S) değerleri	81
Şekil 5. 16. Düşük sıcaklık sınıfı sonuçları.....	84
Şekil 5. 17. Agreganın belirlenen gradasyona göre hazırlanması.....	86

Şekil 5. 18. Bitüm ve agreganın karıştırılması.....	86
Şekil 5. 19. Karışımın briket kalıplarına dökülmesi.....	86
Şekil 5. 20. Kalıplara dökülmüş briket numuneleri	87
Şekil 5. 21. Doygun yüzey kuru numunelerinin hazırlanışı.....	87
Şekil 5. 22. Briketlere uygulanan Marshall yüklemesi.....	88
Şekil 5. 23. Orijinal bitüm Dp – Bitüm %	90
Şekil 5. 24. Orijinal bitüm VFA – Bitüm %	90
Şekil 5. 25. Orijinal bitüm Stabilite – Bitüm %	90
Şekil 5. 26. Orijinal bitüm Akma – Bitüm %	90
Şekil 5. 27. Orijinal bitüm Vh – Bitüm %	90
Şekil 5. 28. Orijinal bitüm VMA – Bitüm %	90
Şekil 5. 29. %2 OEKB katkılı bitüm Dp – Bitüm %	93
Şekil 5. 30. %2 OEKB katkılı bitüm VFA – Bitüm %	93
Şekil 5. 31. %2 OEKB katkılı bitüm Stabilite – Bitüm %	93
Şekil 5. 32. %2 OEKB katkılı bitüm Akma – Bitüm %	93
Şekil 5. 33. %2 OEKB katkılı bitüm Vh – Bitüm %	93
Şekil 5. 34. %2 OEKB katkılı bitüm VMA – Bitüm %.....	93
Şekil 5. 35. %5 OEKB katkılı bitüm Dp – Bitüm %.....	96
Şekil 5. 36. %5 OEKB katkılı bitüm VFA – Bitüm %.....	96
Şekil 5. 37.%5 OEKB katkılı bitüm Stabilite–Bitüm %.....	96
Şekil 5. 38.%5 OEKB katkılı bitüm Akma–Bitüm. %.....	96
Şekil 5. 39. %5 OEKB katkılı bitüm Vh – Bitüm %.....	96
Şekil 5. 40. %5 OEKB katkılı bitüm VMA – Bitüm %.....	96
Şekil 5. 41. Karışım numunelerinin Stabilite – Bitüm %.....	98
Şekil 5. 42. Karışım numunelerinin Akma – Bitüm %.....	99
Şekil 5. 43. Karışım numunelerinin VMA – Bitüm %.....	100
Şekil 5. 44. Karışım numunelerinin VFA – Bitüm %.....	101
Şekil 5. 45. Karışım numunelerinin Dp – Bitüm %.....	102
Şekil 5. 46. Karışım numunelerinin Vh – Bitüm %.....	103
Şekil 5. 47. Saf , %2 ve %5 katkılı bitümlü karışım numunelerinin soyulma görselleri.....	105
Şekil 5. 48. (a) Saf bitüm (b) %2 OEKB katkılı bitüm (c) %5 OEKB katkılı bitüm numuneleri soyulma görüntüleri.....	105
Şekil 5. 49. Saf bitüm Python soyulma analizi görüntüsü.....	106
Şekil 5. 50. %2 OEKB katkılı bitüm Python soyulma analizi görüntüsü.....	106
Şekil 5. 51. %5 OEKB katkılı bitüm Python soyulma analizi görüntüsü.....	107
Şekil 5. 52. Nicholson soyulma testinde elde edilen soyulma dirençleri (%)......	107
Şekil 5. 53. Briket yanal yüklemesi	109
Şekil 5. 54. 0°C’de ortalama stabilite değerleri.....	110
Şekil 5. 55. 0°C’de ortalama İÇM değerleri.....	110
Şekil 5. 56. 40°C’de ortalama stabilite değerleri.....	112
Şekil 5. 57. 40°C’de ortalama İÇM değerleri.....	112
Şekil 5. 58. 0°C - 40°C’de ortalama stabilite değerleri.....	113
Şekil 5. 59. 0°C - 40°C’de ortalama İÇM değerleri.....	113

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 3. 1. Bitümün kimyasal kompozisyonu.....	16
Tablo 3. 2. BSK katkı maddelerinin genel sınıflandırması.....	20
Tablo 3. 3. Bitüm deneylerinin kullanım amaçları.....	21
Tablo 4. 1. Aşınma tabakası Tip 1 Agrega gradasyonu	26
Tablo 4. 2. Kolemanitin fiziksel özellikleri.....	30
Tablo 4. 3. Kolemanitin kimyasal içeriği.....	30
Tablo 4. 4. PAV deney sıcaklıklarının belirlenme kriterleri.....	47
Tablo 5. 1. Farklı karıştırma süre ve sıcaklık kombinasyonları.....	55
Tablo 5. 2. Viskozite test sonuçları	56
Tablo 5. 3. Penetrasyon test sonuçları	59
Tablo 5. 4. RTFOT sonrası penetrasyon test sonuçları	60
Tablo 5. 5. Numunelerin yumuşama noktası sıcaklık değerleri	62
Tablo 5. 6. Yaşlandırılmış numunelerin yumuşama noktası sıcaklıkları.....	64
Tablo 5. 7. Numunelerin kuvvet ölçümlü düktilite değerleri.....	65
Tablo 5. 8. Numunelerin elastik geri dönme oranları	67
Tablo 5. 9. Farklı sıcaklıklarda G^* ve δ değerleri	69
Tablo 5. 10. Farklı sıcaklıklarda $G^*/\sin\delta$ değerleri	70
Tablo 5. 11. RTFO sonrası farklı sıcaklıklarda G^* ve δ değerleri.....	72
Tablo 5. 12. RTFO sonrası farklı sıcaklıklarda $G^*/\sin\delta$ değerleri.....	73
Tablo 5. 13. PAV sonrası farklı sıcaklıklarda G^* ve δ değerleri	76
Tablo 5. 14. PAV sonrası farklı sıcaklıklarda $G^*.\sin\delta$ değerleri.....	77
Tablo 5. 15. -12°C’de uygulanan BBR deney sonuçları.....	79
Tablo 5. 16. -12°C’de S, m ve S/m parametreleri.....	82
Tablo 5. 17. -18°C’de S ve m değerleri	83
Tablo 5. 18. Bitümlerin Superpave performans sınıfları	84
Tablo 5. 19. Agrega gradasyonu.....	85
Tablo 5. 20. Agrega özgül ağırlık değerleri.....	85
Tablo 5. 21. Orijinal bitüm kullanılarak hazırlanan Marshall tasarım deney sonuçları....	89
Tablo 5. 22. Aşınma Tip-1 dizayn kriterleri	91
Tablo 5. 23. %2 OEKB katkılı bitüm kullanılarak hazırlanan Marshall tasarım deney sonuçları	92
Tablo 5. 24. %5 OEKB katkılı bitüm kullanılarak hazırlanan Marshall tasarım deney sonuçları	95
Tablo 5. 25. Aşınma Tip-1 dizayn kriterlerince Marshall deney sonuçlarının karşılaştırılması	97
Tablo 5. 26. Optimum bitüm oranı.....	104
Tablo 5. 27. İndirekt çekme mukavemeti deney sonuçları	109

1. GİRİŞ

Ulaştırma sektörü, ülkelerarası gelişmişlik düzeyleri kapsamında değerlendirilen hususların başında gelmektedir. Ulaşım, her geçen gün teknolojik değişimlerin desteğiyle toplumu bir üst seviyeye taşıyacak farklı kapılara açılmaktadır. Ulaşım seçeneklerinden biri olan karayolu ulaşımı ise yolcu ve yük taşımacılığında baskın ulaşım türü olma özelliğini geçmişten günümüze kadar istikrarlı bir şekilde korumaya devam etmektedir. Tüm teknolojik gelişmelerin bizleri götürdüğü gelişmişlik seviyesinde de uzun yıllar boyunca önemini koruyacak gibi görünmektedir. Karayolu taşımacılığı, tüm dünya genelinde önemli olmasının yanı sıra Türkiye temelinde taşımacılık tercihlerinde ilk sırayı almaktadır (Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2024). 2024 yılı verilerine bakıldığında Türkiye kapsamında yolcu taşımacılığında karayolu kullanımı %89 oranlarındayken, yük taşımacılığında bu oran %77'dir (UAB, 2024).

İstatistiksel veriler incelendiğinde, nüfusun her geçen gün artmasıyla birlikte trafikte bulunan araç sayısının da artış gösterdiği ve bunun sonucunda karayollarına olan talebin önem kazandığı görülmektedir (TÜİK, 2024). Trafik yoğunluğundaki bu artış, karayollarının maruz kaldığı trafik yüklerinin yoğunlaşmasına ve dolayısıyla bakım ile onarım ihtiyaçlarının artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, teknolojik gelişmelerin ulaşım sektöründeki taleplere yansımaları, karayollarından beklenen seyahat konforunu üst seviyelere taşımaktadır. Karayollarındaki hizmet seviyesini iyileştirmekle ilişkili ekonomik çözümler de giderek değer kazanmaktadır.

Karayolu, altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana bileşene ayrılabilir. Yolun maruz kaldığı trafik yüklerini geniş bir alana yayarak taban zeminine ileten katmana üstyapı denilmektedir. Karayolunda üstyapı tabakası, rijit, esnek ve kompozit olmak üzere üç farklı tipte inşa edilebilir. Türkiye'de rijit üstyapı denemeleri devam etmekle birlikte mevcut durumda esnek üstyapılar tercih edilen ve yaygın olarak kullanılan tek üstyapı türü konumundadır (Tunç, 2001).

Esnek üstyapılar; genel olarak alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşmaktadır. Esnek üstyapılarda kaplama tabakasını oluşturan agrega ve bitüm karışımından oluşan asfalt betonu çevresel koşullar ve trafik yüküne direkt olarak maruz kalan tabakadır. Bu etkilerle kaplama tabakasında belli bozulmalar oluşmaktadır. Düşük sıcaklıklarda

meydana gelen çatlamalar, yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi oturmaları ve tekrarlı dingil yüklemelerinin sebep olduğu yorulma çatlakları esnek üst yapıların başlıca problemleridir. Bu problemler bakım-onarım maliyet giderlerini artırmakta, seyahat konforunu düşürmekte, yol güvenliğini azaltmakta hatta hizmet ömrünü kısaltabilmektedir. Meydana gelen bu bozulmaların önüne geçebilmek için asfalt betonunun performansını iyileştirmeye yönelik çalışmalar her geçen gün önem kazanmaktadır.

Bor madeninin asfalt betonunun özelliklerini geliştirmek amacıyla ilgili çalışmalar mevcuttur. Dünya’da 230’dan fazla bor minerali olduğu bilinmektedir. Bunlardan en yaygın bulunan ve ticari açıdan öneme sahip olan bor çeşitleri kolemanit, tinkal (boraks) ve üleksittir. Kolemanit Türkiye’de Emet, Bigadiç ve Kestelek yataklarında çıkarılmaktadır. Dünya’daki bor rezervinin büyük çoğunluğu Türkiye’de bulunmaktadır. Bu rezerv genel dünya rezervine oranla ortalama %73’tür (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, t.y.).

Üstyapıda oluşan bozulmaların en aza indirilerek daha ekonomik ve uzun vadede kullanılabilir yollar inşa edebilme hedefi doğrultusunda bitüm çeşitli katkı maddeleri ile modifiye edilerek özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmada, yüksek standartlara sahip esnek üstyapıların kaplama tabakalarının performans özellikleri geliştirilmesi ve böylece üstyapının oluşabilecek bozulmalara karşı güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, bitüm modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Bitüm modifikasyonunda Kolemanit ve monoetilen glikol kullanılarak laboratuvar ortamında tarafımızca sentezlenerek Organik Esaslı Kolemanit Bileşiği (OEKB) olarak adlandırdığımız katkı maddesi kullanılmıştır. OEKB’nin bitümün ve bitüm-agrega karışımlarının performans özellikleri üzerindeki etkisi laboratuvar testleri ile araştırılmıştır. Hazırlanan bitüm numunelerine viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası, kuvvet ölçümlü duktilite ve elastik geri dönme deneylerinin yanı sıra Dinamik kayma reometresi (DSR), Dönel ince film halinde ısıtma (RTFO), Basıncılı yaşlandırma kabı (PAV) ve Eğme kirişi reometresi (BBR) gibi gelişmiş Superpave testleri uygulanmıştır. Ayrıca OEKB modifikasyonunun agrega-bitüm karışımları üzerindeki etkileri Nicholson soyulma ve Marshall testleri ile incelenmiştir. Bununla birlikte, bitümlü karışımların farklı iklim koşullarında maruz kalabileceği yüksek ve düşük sıcaklıklardaki performans özelliklerine OEKB ile sağlanacak doping 40°C ve 0°C’lerde İndirekt çekme mukavemeti testleri ile değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde bor madeni türlerinin katkı maddesi olarak kullanımına ilişkin literatür taraması yapılmış ve ilgili kaynaklar özet halinde sunulmuştur. Üçüncü bölümde literatürde araştırması sonucu esnek üstyapı tabakasının ana bileşenleri olan bitüm, agrega ve bitümlü karışımlarla ilgili bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde tez çalışması kapsamında katkı maddesi olarak kullanılan OEKB'nin içeriği olan Kolemanit ve Monoetilen glikolün içerik ve kullanım alanları açıklanmış, ayrıca bitüm ve bitümlü karışımlara uygulanan deneysel çalışmalar da detaylandırılmıştır. Beşinci bölümde, gerçekleştirilen testlerin sonuçları ve elde edilen veriler sunulmuş, bu bulgular literatürle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Altıncı bölümde, bölümde çalışma kapsamında yapılan testler sonucunda elde edilen veriler değerlendirilerek çalışma sonuç ve bulguları sunulmuştur.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Esnek üstyapı tabakasında meydana gelen problemlerin nedenleri ve bu sorunlara yönelik çözüm yöntemleri üzerine uzun yıllardır çeşitli araştırmalar yürütülmektedir. Bu yöntemlerden biri, bitümün modifiye edilerek reolojik özelliklerinin geliştirilmesidir. Literatürde, bitümün belirli katkı maddeleri kullanılarak modifikasyonu ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında ise, bor mineralinin bitümlü karışımlarda kullanımıyla ilgili yapılan araştırmalar aşağıda sunulmuştur.

Erdoğan ve ark. (1998) tarafından yapılan çalışmada atık kolemanitin çimento içeriğinde kullanımı araştırılmıştır. Çimento karışımlarına sertleşme süresi, eğilme, hacim genişlemesi gibi testler uygulanmıştır. Testlerin değerlendirilmesi sonucunda kolemanit atıklarının çimento içeriğinde %5'e kadar kullanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Targan ve ark. (2002) tarafından çimento üretiminde doğal puzolanlardan olan kula cürufu ve bentonit ile birlikte bor çeşitlerinden kolemanit kullanımını araştırılmıştır. Kula cürufu + kolemanit ve bentonit+kolemanit kombinasyonları çimentoya kıyasla %5, %10, %15, %20, %25, %30 oralarından kullanılarak priz süresi, basınç ve eğme dayanımı, hacim genişlemesi gibi özellikler tayin edilmiştir. Sonuçlara göre katkı maddesi içeren çimentoların Türk Standartları ile uyumlu olduğu gözlemlenmiş ve katkı maddelerinin çimento üretiminde kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Gencel ve ark (2010) tarafından yapılan çalışmada kolemanitin betonda agrega olarak kullanımı araştırılmıştır. Numunelere donma-çözünme dayanımı, birim ağırlık, darbe hızı testi, esneklik modülü, çekme dayanımı gibi testler uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, kolemanit miktarının artmasıyla betonun mukavemetinde ve elastisite modülünde azalma, birim ağırlığında ise düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca, beton içeriğinde kolemanit oranının %50'den fazla olması priz süresinin gecikmesine sebep olacağı tespit edilmiştir. İşlenebilirlik ve mukavemet açısından ise kolemanit kullanımının %30'a kadar sınırlandırılmasının fiziksel ve mekanik özellikler bakımından avantaj sağladığı belirtilmiştir.

Arslan (2010), tarafından yapılan doktora tezi çalışmasında bitüm modifikasyonunda 9 farklı katkı maddesi kullanılmıştır. Katkılar arasında laboratuvar ortamında sentezlenen bor içerikli Organik esaslı borik asit bileşiği (OEBAB), Monoetilen glikol esaslı polibor bileşiği

(MEGPB), Dietilen glikol esaslı polibor bileşiği (DEGPB), Trietilen glikol esaslı polibor bileşiği (TEGPB) yer almaktadır. Bitüm numunelerine vizkozite testi, yumuşama noktası testi, düktilite testi, dinamik kesme reometresi (DSR) ve eğilme kirişi reometresi (BBR) testleri uygulanmıştır. Ayrıca bitüm-agrega karışımlarına Marshall ve Nicholson soyulma testleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kullanılan katkı maddelerinin bitüm performansına etki ettiği sonucuna varılmıştır. Katkı maddelerinin uygun oranlarda (%2-%3) kullanılması durumunda, tekerlek izi deformasyonlarına ve düşük sıcaklık kaynaklı çatlaklara karşı direnç sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, OEBAB ve MEGPB katkılarının soğuk iklim koşullarında, TEGPB ve DEGPB katkılarının ise sıcak iklim koşullarında kullanımının daha uygun olduğu; tüm katkı maddelerinin ise ağır trafik yükünün bulunduğu bölgelerde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Arslan ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada bitümün kimyasal olarak sentezlenen trietilen glikol bazlı poliboron (TEGPB) ile modifikasyonu araştırılmıştır. TEGPB ile modifiye edilen bitüm ve bitümlü karışımlar üzerinde yumuşama noktası, Marshall stabilitesi, Nicholson soyulma, dönme viskozitesi (RV), Dinamik Kayma Reometresi (DSR) ve Eğilme Kirişi Reometresi (BBR) testleri uygulanmıştır. Viskozite testi sonuçları, katkı maddesi içeren numunelerde katkı oranı arttıkça viskozite değerlerinin de arttığını göstermiştir. Yumuşama noktası deneyinde ise modifiye bitümlerin yumuşama noktasında artış gözlemlenmiştir. Marshall deneyi sonuçlarına göre, modifiye bitümün stabilite değerinin %9 oranında arttığı tespit edilmiştir. Özellikle TEGPB katkısının bitümün dayanıklılığını artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. DSR testi sonucunda, %2 katkı içeren bitüm numunesinin tüm sıcaklıklarda $G^*/\sin\delta$ değerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. BBR ve Nicholson soyulma testlerinde belirgin bir gelişme gözlenmemekle birlikte, modifiye bitümün sünme özellikleri ve soyulma direncinin olumsuz etkilenmediği görülmüştür. Sonuç olarak, TEGPB ile modifiye edilen bitümün sıcak iklime sahip bölgelerde ve yüksek trafik yükünün bulunduğu alanlarda kullanımı uygun görülmüştür.

Arslan ve ark (2014) tarafından yapılan çalışmada bitüm modifiyesinde monoetilen glikol bazlı poliboron (MEGPC) ve dietlien glikol bazlı poliboron (DEGPC) olmak üzere bor içeren iki katkı maddesi ayrı ayrı kullanılmıştır. Modifiye bitümlere dönül viskozite, yumuşama noktası, Marshall testi, Nicholson soyulma testi ve Superpave deney yöntemleri (DSR, BBR) uygulanmıştır. DEGPC ile bitümün yumuşama noktası artarken MEGPC modifikasyonu ile bir miktar düşmüştür. Marshall stabilitesinin her iki katkı maddesinde de

arttığı görülmüştür. Düşük sıcaklıkta çatlama direnci olarak MEGPC'nin daha iyi düşük sıcaklık performansı sergilediği görülmüştür. DSR sonuçlarında ise DEGPC ile modifikasyonun tekerlek izi direncini artırdığı görülmüştür.

Chai Zhen Hao (2015) tarafından yapılan tez çalışmasında laboratuvar ortamında etilen glikol ve borik asit karışımı katkı olarak (EGBAP) hazırlanmıştır. Bitüme %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında ilave edilerek modifiye bitümler hazırlanmış ve penetrasyon, yumuşama noktası ve süneklik gibi geleneksel yöntemler uygulanmıştır. Modifiye bitümlerde penetrasyon değerinin azaldığı, yumuşama noktasının ise arttığı gözlemlenmiştir. EGBAP katkısının bitümü sertleştirdiği yönünde değerlendirmeler yapılmıştır. Buna karşın, modifiye bitümlerde sünekliğin azaldığı tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, EGBAP katkısının sıcak iklime sahip bölgelerde kullanımının daha uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Morova ve Terzi (2015) tarafından yapılan çalışmada atık kolemanitin sıcak karışım asfaltta agrega olarak kullanımı araştırılmıştır. Çalışmada, kolemanit ve kireç taşı kullanılarak dört farklı agrega türü hazırlanmıştır. Sadece kireç taşı kullanılarak hazırlanan agregada Marshall stabilite değeri en yüksek seviyede elde edilirken, kireç taşına kolemanit eklenmesiyle Marshall stabilitesinde bir azalma gözlenmiş ancak bu değerler ilgili şartname kriterlerini sağlamıştır. Buna rağmen, özellikle kolemanit rezervlerinin yoğun olduğu bölgelerde, kireç taşının taşıma maliyetinin yüksek olması nedeniyle kolemanitin agrega olarak kullanımı daha uygun bir seçenek olarak değerlendirilmiştir.

Gürü ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada bitüm modifiyesinde şeker pancarı melası ve laboratuvar ortamında sentezlenen melas bazlı bor oksit (MBOC) kullanılmıştır. Bitüm numunelerine penetrasyon, viskozite, yumuşama noktası, süneklik, DSR deneyleri uygulanmış ve bitümlü karışımlar için Marshall ve Nicholson deneyleri yapılmıştır. Melas bazlı bor oksitin viskozitesinde ve yumuşama noktasında artış olduğu, penetrasyon değerinin azaldığı ayrıca sünekliğinin de azaldığı tespit edilmiştir. Marshall dayanımı ve soyulma direncinin MBOC ile önemli ölçüde iyileştiği görülmüştür. Ayrıca tekerlek izi ve yorulma dayanımının da arttığı tespit edilmiştir.

Oruç ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada laboratuvar ortamında bor içeren bir katkı maddesi olan siklik borat esteri (CBE) sentezlenmiştir %1, %2, %4 ve %6 oranlarında

katkı içeren modifiye numuneler hazırlanarak penetrasyon, yumuşama noktası, süneklik, parlama noktası, viskozite, DSR, RTFOT, PAV ve BBR deneyleri yapılmıştır. Bor içerikli CBE katkı maddesi içeren numunelerin sertliklerinin, yumuşama noktalarının, viskozitelerinin ve tekerlek izi dirençlerini arttığı, sıcaklık hassasiyetlerinin ise azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca CBE'nin elastikliği ve düşük sıcaklıkta çatlama direncini artırdığı gözlemlenmiştir.

Çelik ve Çakal (2016) tarafından yapılan çalışmada kolemanitin sıcaklığa maruz kaldığında fiziksel ve termal özelliklerindeki değişim gözlemlenmiştir. Bu çalışmada Türkiye Emet yatağından elde edilen kolemanit toz haline getirilmiştir. Kolemanit üzerinde yapılan kimyasal analizler sonucunda %35,8 B₂O₃'ten , %30,5 oranında ise SiO₂'den oluştuğu tespit edilmiştir. Kolemanitin bir bor bileşiği olduğunun kanıtlanmasının yanında içeriğinde yaklaşık %10 oranında smektit ve illit bulunduğu gözlemlenmiştir. Görüntülerle desteklenen analizler sonucunda, kolemanitin gözeneksiz bir yapıya sahip olduğu belirtilmiştir. Yapılan kimyasal analizler genel olarak kolemanit içeriğinde %27,6 silikon (Si) ve %35,4 bor (B) bulunduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca kolemanit numuneleri üzerinde gerçekleştirilen detaylı kimyasal incelemede; silikon (Si), bor (B), oksijen (O), karbon (C) ve alüminyum (Al) gibi ana minerallerin yanı sıra az miktarda magnezyum (Mg), kalsiyum (Ca), demir (Fe) ve sodyum (Na) elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Kolemanitin kütlesi ve kütle yoğunluğunun artan sıcaklıkla birlikte azaldığı gözlemlenmiştir. Isıtma deneylerinde, kolemanitin ağırlık kaybı 350°C'de %1,8 iken 600°C'de %35,7'ye ulaştığı görülmüştür.

Banar ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada bitümlü geomembranların içeriğinde bentonit ve atık lastikle birlikte atık bor kili (CW) kullanımı araştırılmıştır. Çekme mukavemeti, uzama miktarları ve birim alan başına düşen kütle sonuçları değerlendirilerek, maliyetin düşürülmesi ve sürdürülebilirliğin artırılması açısından atık borun kullanımı uygun bulunmuştur.

Demirel ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada bor mineralinin çimento içerisinde kullanımı incelenmiştir. Çalışmada farklı bor çeşitleri (kolemanit, boraks, tinkal, belit) ve atıkları üzerinden çimentonun priz süresine, betonun basınç dayanımına etkileri gözlemlenmiştir. Çalışmanın, bor mineralleri ve atıklarının özellikle inşaat ve çimento sektörlerinde kullanımına yönelik yapılacak araştırmalara yol gösterici olacağı belirtilmiştir.

Çalışıcı ve ark (2018) tarafından yapılan çalışmada bitüm modifikasyonunda laboratuvarında sentezlenen dietilen glikol bazlı polibor bileşiği (DEGPB) kullanılmıştır. Viskozite testi, penetrasyon deneyi, yumuşama noktası deneyi, Marshall stabilite testi, İnce Film Fırın Testi (TFOT) uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre orijinal bitümle yapılan karşılaştırmada viskozite ve yumuşama noktası artarken penetrasyon azalmıştır. Marshall stabilite testi sonucunda ise DEGPB ile iyileşme sağlandığı görülmüştür. Tüm bunların sonucunda DEGPB ile bitüm modifiyesi sonucunda katkı maddesinin yaşlanmayı %41,9 azalttığı sonucuna varılmıştır.

Öcal ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada bitüm modifiyesinde %1, %3, %5 ve %8 oranlarında katkı maddesi olarak nano magnezyum spinel oksit (NMS) ve nano boyutlu kolemanit (NK) kullanılmıştır. Numunelere penetrasyon deneyi, yumuşama noktası deneyi gibi geleneksel deneyler ile Superpave (DSR, RTFOT, PAV ve BBR) deneyleri uygulanmıştır. Yapılan viskozite deneyi sonucunda her iki katkı maddesinin de katkı oranı arttıkça viskozite değerinin arttığı görülmüştür. DSR deneyi sonucunda olan $G^*/\sin \delta$ değerlerinin her iki katkı maddesi için modifiye katkı oranı arttıkça arttığı görülmüştür. RTFO ve PAV koşullandırmaları sonrası tekrar DSR deneyi yapılmış ve $G^*/\sin \delta$ değeri gözlemlenmiş ancak bu sonuçlara göre yorulma dayanımının %5 modifiye bitümde daha yüksek çıktığı görülmüştür. Elde edilen genel sonuçlarda her iki katkının da yakın sonuçlar verdiğini, viskozite ve yumuşama noktasını artırdığı ve penetrasyon değerini düşürdüğü görülmüştür. Yaşlandırılmamış bitümlere uygulanan DSR deneyleri sonucunda NMS ve NK için en yüksek yenilme sıcaklığının %8 katkılı bitümlerde olduğu görülmüştür. Kısa ve uzun dönem yaşlandırılan bitümlere uygulanan DSR deneyi sonucunda ise %5 katkı içeren numunelerin $G^*.\sin \delta$ yorulma direnç parametresi yönünden daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Son olarak BBR deneyi sonucunda her iki katkıda da sünme rijitliğinin arttığı görülmüştür.

Sallı Bideci ve Bideci (2018) tarafından yapılan çalışmada öğütülmüş kolemanit çimento harcı içerisine dahil edilmiştir. Kolemanit katkısı çimentoya göre %1, %3, %5 ve %7 oranlarında kullanılmıştır. Hazırlanan numunelere özgül ağırlık, kıvam deneyi, genleşme deneyi, priz başlama gibi deneylerin yanında numunelerin basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Basınç dayanımları 2, 7 ve 28 gün üzerinden yapılmıştır. Deneyler sonucunda numune içerisindeki katkı oranı arttıkça özgül ağırlık değerinde ve özgül yüzey boyutunda azalma olduğu, priz sürelerinin katkı oranı arttığı ölçüde uzadığı, standart kıvam için gereken

su miktarının arttığı görülmüştür. Numunelerin içeriğindeki kolemanit miktarı arttıkça basınç dayanımlarının azaldığı gözlenmiştir. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde %1,%3 ve %5 katkılı numunelerin çimento harcı içeriğinde kullanılabileceğinin uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Keskin, M. ve Karacasu, M. (2018) tarafından yapılan çalışmada atık bor malzemesinin yol inşaatında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, filler malzeme yerine öğütülmüş atık bor kullanılmıştır. Çalışmada ele alınan farklı bor türleri için %5, %10 ve %15 oranlarında katkı uygulanmıştır. Marshall stabilite deneyleri sonucunda, numunelerdeki bor oranı arttıkça optimum bitüm oranının arttığı gözlemlenmiştir. SB ve BP tipi bor katkılarının karışım dayanımını düşürdüğü ve bu nedenle asfalt betonunda agrega olarak kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. ÖAB katkılı numunelerde ise elde edilen sonuçların katkısız numunelerle oldukça benzer olduğu belirtilmiştir. Her ne kadar belirgin bir performans artışı gözlenmemiş olsa da, olumsuz bir etki de saptanmamış; dolayısıyla atık borların çevresel açıdan bertarafına katkı sağlaması ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi açısından, ÖAB'nin asfalt betonunda kullanımının mümkün ve faydalı olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Kara, C. (2019) tarafından yapılan çalışmada kolemanitin beton yollarda kullanılmasının beton yolun durabilite özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Kolemanit katkısı çimento harcına %1, %2, %3, %4 ve %5 oranında ilave edilmiştir. Farklı kalıplarda hazırlanan (küp, prizma ve silindir) beton numunelerinin 7, 28 ve 90'ıncı günlere ait özellikleri test edilmiştir. Bu özellikler su emme, eğilme, aşınma, Schmidt çekici, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı testleri üzerinden değerlendirilmiştir. Bunlara ek olarak, beton yolların iklim koşullarından ve buz çözücü kimyasallardan etkilenme durumunu incelemek amacıyla, betonun ısınma-kuruma ile donma-çözülme davranışları da araştırılmıştır. Deneyler sonucunda, %5 kolemanit katkısı içeren beton numunesinin istenilen basınç dayanımını karşıladığı gözlemlenmiştir. Dayanım özellikleri dikkate alındığında optimum kolemanit oranının %3 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, bor minerallerinin özellikle kolemanit formunun değerlendirilmesinin uygun olduğu; ayrıca, çimento harcı içeriğinde kolemanit kullanımıyla çimento miktarında azalma sağlanarak hem ekonomik hem de çevresel açıdan tasarruf elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Keskin, M., ve Karacasu, M., (2019) tarafından yapılan çalışmada agrega üç farklı atık bor (CBW, BA ve BP) kullanımı araştırılmıştır. Yapılan Marshall tasarım testi sonucunda üç malzemenin de hava boşluğu ve mineral agrega boşluklarını, akışkanlığı, optimum bitüm içeriğini artırdığı, stabiliteyi ve birim ağırlığı azalttığı ancak ekonomik ve çevresel yönden düşünüldüğünde kullanılmalarının uygun olacağı sonucuna varılmıştır. BA için %5 katkı oranı uygun görülürken BP ve CBW ilaveli numuneler için %10 katkı oranı uygun görülmüştür. En uzun servis ömrünün ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanıklılığın CBW eklenen örneklerde olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Kutuk ve Kutuk Sert (2020), tarafından yapılan çalışmada kolemanit çimentoya %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında ilave edilmiştir. Elde edilen beton numunelerinin aşınmaya karşı dayanıklılıkları Böhme deneyi yapılarak test edilmiştir. Çimentoya ilave edilen kolemanitin taze betonun işlenebilirliğini artırdığı tespit edilmiştir. Numunelerin 7 ve 28 günlere ait aşınma kayıpları gözlendiğinde aşınma kaybının kolemanit içermeyen numunede daha az ve kolemanit içeren tüm numunelerde daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak 90 günlük kayba bakıldığında bu oranın yüzdesi düşük olan numunelerde (%1,%2 ve %3) orijinal numuneye oranla bile daha az olduğu gözlenmiştir. %3'lük katkı oranına kadar numunede beton yaşı arttıkça zamanla dayanım kazandığı sonucuna varılmıştır.

Karlıoğlu ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada bor atıklarının inşaat mühendisliği alanındaki kullanım potansiyeli ortaya konulmuştur. Türkiye'de en çok bulunan bor çeşidinin kolemanit olduğu belirtilmiştir. Türkiye'de bor mineralinin yaygın olarak bulunması ve üretimin artmasıyla birlikte bor atıklarının da artacağı öngörülmektedir. Bu doğrultuda, bor atıklarının inşaat sektöründe değerlendirilmesi birçok fayda sağlayabilir. Yapılan çalışmalarda, bor katkısının ısı ve ses yalıtımı sağladığı, priz süresini uzattığı, hafif betonlarda ve yol temellerinde agrega olarak kullanılabilirdiği belirtilmiştir. Ayrıca, borun yapı malzemelerinin dayanımını artırdığı, mantar oluşumunu engellediği ve yangına karşı direnci yükselttiği tespit edilmiştir. Ayrıca bor atıklarının inşaat sektöründe çatı kaplamasında, hafif betonlarda agrega olarak, asfalt betonunda, yol temelinde kullanılabileceği gibi öngörülmektedir.

Yeşilçiçek ve arkadaşları (2023) tarafından yapılan çalışmada, kimyasal olarak sentezlenen katkı maddelerinin bitüm modifikasyonu üzerindeki etkileri literatür taraması yoluyla incelenmiştir. Çalışma kapsamında bor içeren, süksinimid esaslı ve atık bazlı katkı

türleri değerlendirilmiştir. Farklı sıcaklık ve karıştırma hızlarında sentezlenen katkıların, zaman ve enerji tasarrufu sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu katkıların, sıcaklık hassasiyetini azaltarak tekerlek izi direncini artırdığı; ancak düşük sıcaklıklarda çatlama direncinde bir miktar azalmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, katkıların elastikiyet ve yorulma ömrü gibi reolojik özellikler üzerinde de olumlu etkiler yaratabileceği değerlendirilmiştir.

Çalışıcı ve ark. (2023) tarafından yapılan çalışmada laboratuvar ortamında sentezlenen polimerik trietilen glikol bazlı poliboron (PTEGB) ve organik bazlı magnezyum oksit (OBMO) katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Bağlayıcılar İnce Film Fırın Testi (TFOT) uygulanarak yaşlandırılmıştır. Bağlayıcıların fiziksel özellikleri geleneksel deney yöntemleriyle tayin edilmiş ve Marshall stabilite testi uygulanmıştır. PTEGB ve OBMO'nin bitümün yaşlanmasını sırasıyla %56,7 ve %50,6 oranlarında azalttığı tespit edilmiştir.

Şahan ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada bitüm modifiyesinde boroksit (BO) ve balmumunun (BW) birlikte kullanımını araştırılmıştır. Yapılan önceki çalışmalarda, tek başına bor oksit (BO) katkısı kullanıldığında tekerlek izi direncinin iyileştiği, ancak işlenebilirliğin azaldığı belirlenmiştir. Öte yandan, tek başına borik asit (BW) kullanımıyla işlenebilirlik artarken, yüksek sıcaklık performansında düşüş ve viskozitede artış gözlemlenmiştir. BO ve BW katkılarının birlikte bitüme ilavesiyle, her iki katkının bireysel olumsuz etkilerinin azaldığı ve işlenebilirliği bozmadan bitümün yüksek sıcaklık performansının iyileştirilebildiği tespit edilmiştir.

3. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

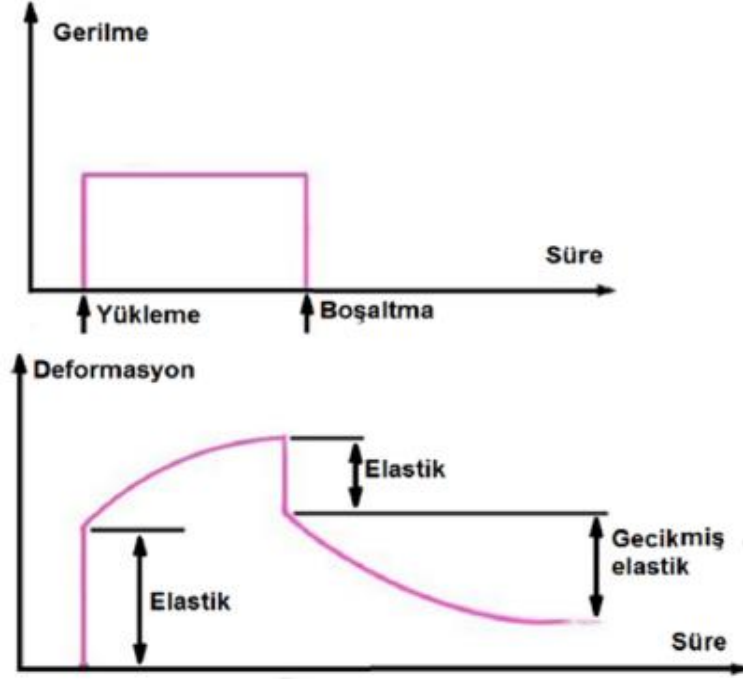
Karayolu esnek üstyapı tabakasının temel bileşenlerini bitüm ve agrega oluşturmaktadır. Bu bölümde, literatür taraması yapılarak bitüm ve agreganın yapısal özellikleri, bileşenleri ve mühendislik açısından taşıdığı önem ele alınmıştır. Ayrıca, yol kaplamalarında yaygın olarak kullanılan bitümlü karışım türlerine de yer verilerek bu malzemelerin performans kriterleri ve kullanım alanları hakkında bilgiler sunulmuştur.

3.1. Bitüm

Bitüm; ham petrolün rafine edilmesinden elde edilen ya da doğal asfalt olarak bulunan, uçucu olmayan, yapışkan ve suya dayanıklı, Karbondisülfid (CS_2) içinde tamamen çözünebilen bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Bitüm akışkan, katı ve yarı katı hallerde bulunabilir. Bitümün ısındıkça kıvamı katıdan sıvıya doğru değişiklik göstermektedir (Gökalp ve ark., 2019; Ilıcalı ve ark. 2001; Tunç, 2004).

Bitüm ve asfalt kelimeleri mühendislikte ve kullanıldıkları diğer sektörlerde çoğu zaman birbirinin yerine kullanılmaktadır. Bitüm kelimesi çoğunlukla Dünya’da daha yaygın olarak kullanılsa da farklı bölgelerde asfalt kullanımı tercih edilmektedir (Orhan, 2021).

Bitüm; termoplastik olması, dayanıklılığı, güçlü yapışma özelliği ve yüksek geçirimsizliği ile birlikte modifiye edilebilir ve geri dönüştürülebilir olması nedeniyle karayolu esnek üstyapı uygulamalarında temel bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. Bitüm, sıcak iklim koşullarında ve sürekli yüklemeler altında viskoz bir sıvı gibi davranarak akışkanlık göstermektedir. Renk açısından ise siyah renkten saman sarısına kadar değişkenlik gösterebilir. Soğuk iklimlerde veya ani yükleme durumlarında ise elastik katı özelliği sergileyerek viskoelastik bir malzeme olarak tanımlanır. Bitüm, belirli bir yüke maruz kaldığında deformasyon geçirir; ancak yük kaldırıldığında elastik davranarak orijinal şekline geri dönebilme yeteneğine sahiptir. Şekil 3.1’de bitümün yük altında viskoelastik davranışı verilmiştir.



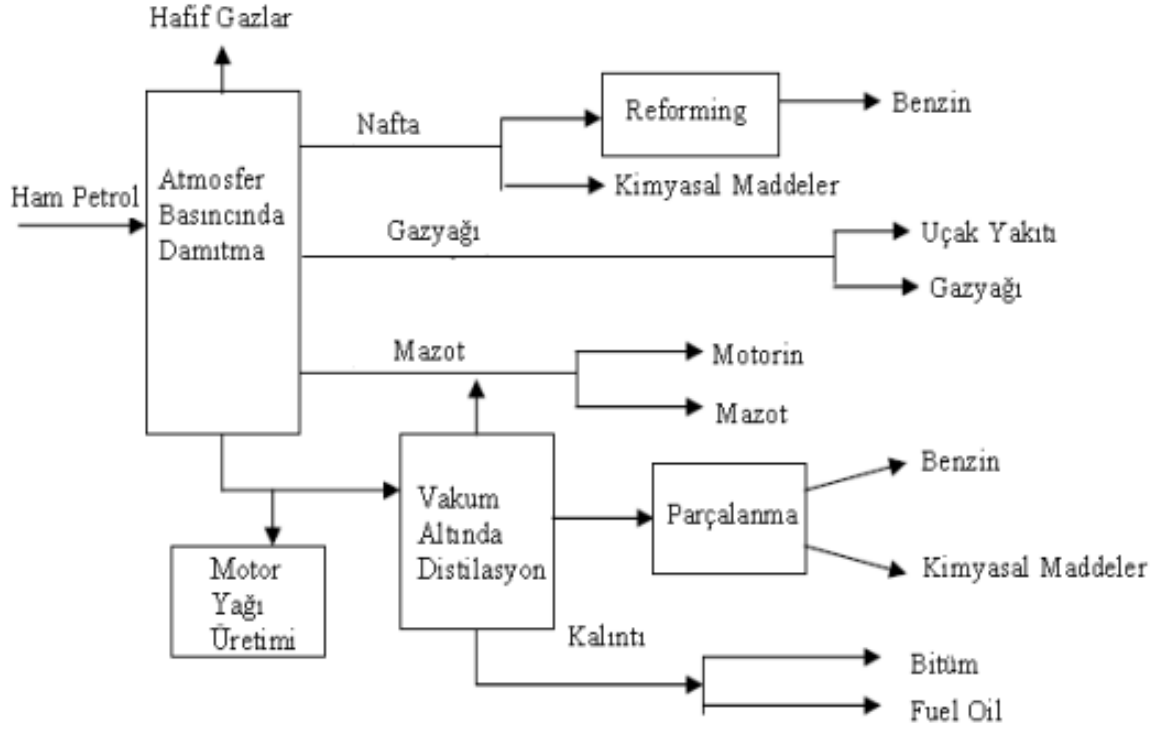
Şekil 3.1. Bitümlü bağlayıcının viskoelastik davranışı (Yeşilçiçek, 2023)

Bitümler, aynı sıcaklık altında farklı kıvamlara sahip olabilirler. Yaygın olarak, bitümlerin kıvamları penetrasyon ve viskozite testleri sonuçlarına göre sınıflandırılmaktadır. Özellikle 25°C sıcaklıkta yapılan penetrasyon testlerinde, bitümlerin 10 ile 300 arasında değişen penetrasyon derecelerine sahip olabildiği gözlemlenmektedir (Orhan, 2021; Whiteoak, 2004; Gedik, 2021).

Bitüm, doğada doğal halde bulunabileceği gibi petrolün rafinasyonu sonucunda da elde edilebilir. Doğal bitümler, yeraltındaki petrolün herhangi bir işleme tabi tutulmadan yeryüzüne çıkmasıyla oluşur. Bu bitümler, yeryüzüne çıktıkları konuma bağlı olarak göl asfaltı veya kaya asfaltı olarak sınıflandırılır. Kaya asfaltı, genellikle kireçtaşı ve nadiren de kumtaşının doğal yollarla bitümü emmesi sonucu meydana gelir. Göl asfaltı ise kaya asfaltına kıyasla daha yaygın bulunur ve daha sert bir yapıya sahiptir. Yeryüzüne çıkan petrolün içeriğindeki uçucu bileşenler buharlaşarak katılaşmaya neden olur. Bu doğal bitümlerin kullanıma uygun hale gelebilmesi için çeşitli işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir (Orhan, 2021; Öztürk, 2017).

Yapay yani rafine bitüm dediğimiz bitümler ise ham petrolün rafine edilmesi sonucu elde edilir. Petrol, çıkarıldığı kuyulardan rafinerilere pompalar yardımıyla taşınır ve burada ısıtılarak damıtma kulelerine sevk edilir. Rafine bitümün fiziksel ve kimyasal yapısı;

üretiminde kullanılan ham petrol kaynağı ve rafinasyon yöntemlerindeki farklılıklara bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bu farklılıklar, bitümlerin reolojik özelliklerinde de belirgin farklar yaratabilir (Arslan, 2021). Şekil 3.2’de ham petrolün türevlerine ayrılarak bitümün elde edilme süreci sunulmuştur.



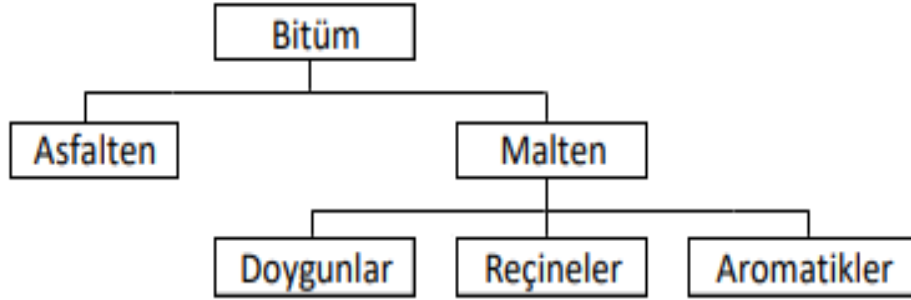
Şekil 3.2. Bitüm üretim şeması (Whiteoak, 2004)

Yüksek standartlı esnek üstyapıların kaplama tabakaları olan aşınma ve binderde kütlece ortalama %93-95 oranında agrega kullanılırken yaklaşık %5-7 oranında bitüm kullanılmaktadır. Bitümün asfalt tabakasında kullanım miktarı agregaya oranla çok düşük olmasına rağmen bitümün agrega taneciklerini birbirine bağlama gibi özelliklerinden dolayı kaplama tabakasının performans özellikleri üzerinde etkisi oldukça yüksektir. Bitüm agrega danelerini birbirine bağlayarak hem düzgün bir yol yüzeyi hem de geçirimsizlik sağlar. Ayrıca karışımın stabilitesini artırır (Gökalp, 2019; İrhan, 2022).

3.1.1. Bitümün kimyasal bileşimi

Bitümün kimyasal içeriği oldukça karmaşık ve değişken olmakla beraber, kimyasal yapısını asfaltenler ve maltenler olmak üzere iki farklı grupta incelemek mümkündür. Ancak maltenlerin de kendi içeriğinde üç başlığa ayrılması sonucu bitümün temel bileşenleri asfaltenler, doymunlar, reçineler ve aromatikler olmak üzere dört ana grup altında

incelenmektedir (Şekil 3.3). Bu grupların kimyasal yapı içindeki miktarları bitümün fiziksel özelliklerini ve yükleme koşullarında sergilediği davranış biçimini etkilemektedir.



Şekil 3.3. Bitümün kimyasal yapısı

Asfaltanlar; siyah ya da kahverengi, karbon, hidrojen, oksijen, sülfür ve nitrojen içeren amorf yapıda katılardır. Bitümün %5-25'ini oluştururlar. Bitüm içeriğinde asfaltan oranının yüksek olması durumunda, bitüm daha viskoz bir yapı kazanır; bu durum penetrasyon değerinin azalmasına ve yumuşama noktasının artmasına neden olur. Ayrıca, bitümlü bağlayıcılarda yaşlanma süreci sonrasında asfaltan oranının arttığı tespit edilmiştir (İrhan, 2022; İskender, 2023).

Doygunlar; düz ve zincir yapılı alifatik hidrokarbonlardır ve bitümün %5-20'sini oluştururlar. Renkleri beyaz veya saman rengi olan viskoz yağlardır. Yaşlanma sonrası bitümlü bağlayıcıda yapılan incelemelerde doyunların oranında asfaltanların aksine azalma olduğu gözlenmiştir (İrhan, 2022; İskender, 2023).

Aromatikler; bitümün %40-65'ini oluştururlar. Kahverengi renkte viskoz yağlardır. Bitümün yaşlanması sonucu içeriğindeki aromatik bileşenlerin miktarında azalma meydana geldiği gözlenmiştir. Bu özelliğiyle doyunlarla benzerlik göstermektedir. Reçineler ise koyu kahverengi, doğada katı ya da yarı katı kıvamda bulunurlar. Reçinelerin içeriğinde çok miktarda karbon ve hidrojenin yanında az miktarda sülfür ve nitrojen bulunur. Elektriksel yapılarından dolayı kuvvetli yapışma özellikleri göstermektedirler (Uncu, 2017).

Bitüm, dışarıdan homojen bir yapıya sahip gibi görünse de, içeriğindeki asfaltanlar ve maltenler birbirleriyle çözünmezlik gösterdiğinden dolayı heterojen bir kolloid yapı oluşturur. Ancak, bitüm içerisindeki reçine ve aromatik bileşenlerin miktarının yüksek olması ve

asfaltlenleri çözme kapasitesine sahip olması durumunda, asfaltlenlerin bazen bu yağlarda çözünbildiği gözlenmektedir (Öztürk, 2017).

Bitüm, moleküler yapısı itibarıyla büyük oranda karbon içermesine rağmen, az miktarda sülfür, oksijen ve azot da içermektedir. Hidrojen ise bitüm yapısında karbonun ardından gelen en önemli elementtir. Farklı ham petrol kaynaklarının analizleri sonucunda, bitüm içeriğindeki moleküler bileşim değişiklik gösterse de, ortalama değerler Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Bitümün kimyasal kompozisyonu (Tunç, 2004).

Element	Kütle yoğunluk oranı (%)
Karbon	82 - 88
Hidrojen	8 - 11
Kükürt (Sülfür)	1 - 6
Oksijen	0 – 1,5
Nitrojen	0 - 1
Az miktarda metaller (tuz, oksit veya metal bulunan organik bileşikler)	

Bitümün kimyasal bileşiminin zamanla değişip değişmediğinin belirlenmesi amacıyla farklı karışım tipleri, farklı bitüm-agrega oranları kullanılarak uzun süreli ve tam ölçekli yol deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda viskozitedeki başlıca değişikliklerin karıştırma ve serme sırasında olduğu ve bağlayıcı özelliğinin hizmet süresi boyunca değişiminin az olduğu görülmüştür. Bunun en önemli nedenleri arasında; karıştırma işlemi esnasında bitüm içeriğindeki asfaltlen oranının artması ve buna karşılık reçine ile aromatik bileşenlerin zamanla azalması yer almaktadır (Orhan, 2021).

3.1.2. Bitümün reolojik özellikleri

Reoloji, bir maddenin akma ve deformasyon özelliklerinin basınç ve zaman içerisinde incelenmesi olarak tanımlanır. Reoloji aslında bitüm gibi hem katı hem de sıvı hallerde bulunabilen viskoelastik malzemeleri araştırır. Bitüm, yüksek sıcaklıklarda sıvı hal alarak viskoz özellik sergilerken, düşük sıcaklıklarda katı halde elastik özellik göstermektedir.

Ayrıca, bitümün viskozite seviyesi, maruz kaldığı yükün hızına bağlı olarak değişiklik göstermektedir; düşük yükleme hızlarında viskoz davranış gösterirken, yüksek hızdaki yüklemeelerde elastik davranış sergiler. Aynı yükleme koşulları altında, bitümlü bağlayıcı farklı süre ve sıcaklıklara maruz kaldığında farklı tepkiler verebilir. Bitüm, sıcaklık ve yükleme süresine bağlı olarak gerilmelere karşı değişken tepkiler göstermektedir. Bu nedenle, bitümün reolojik özellikleri, gerilme, deformasyon, zaman ve sıcaklık arasındaki etkileşimlerin bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır (İskender, 2023).

Bitümün reolojik özellikleri moleküllerinin kimyasal bileşimi ve fiziksel sıralanışı ile belirlenmektedir. Reolojik özellikteki değişim, bitüm içeriğindeki asfaltan oranıyla doğru orantılıdır. Sabit sıcaklıkta, maltenlerin içine karıştırılan asfaltan konsantrasyonu artırıldığında bitüm viskozitesi yükselmektedir. Farklı yerlerden temin edilen bitümlerin içeriğindeki kimyasal yapı, malten asfaltan oranı ve içeriği farklılık göstereceği gibi bitümün üretilme ve işleme aşamaları da reolojik özelliklerinde değişim ortaya çıkarabilir (Yegane, 2023). Sıcak havalarda trafik yüküne maruz kalan bitüm mikroskobik olarak incelendiğinde, tabakalar arası kayarak akış sağladığı görülmüştür (Uncu, 2017).

Bitümün maruz kaldığı yük sebebiyle kopmadan uzayabilme özelliğine kohezyon denir. Bitümlü kaplamalarda kohezyonu bitüm sağlar. Adezyon ise bitüm ve agreganın birbirlerine yapışma özelliğidir. Bitümün viskozitesi arttıkça kohezyon gücü artmakla birlikte, adezyon yeteneği azalmaktadır. Artan viskozite ile bitüm daha kıvamlı hale gelir ve kopmaya karşı direnci yükselir; ancak katılaştıkça yapışma özellikleri zayıflar (Yegane, 2023).

3.2. Modifiye Bitüm

Esnek üstyapılarda oluşan bozulmaları engellemek amacıyla birçok ülkede bu bozulma sebepleri araştırılarak çözüm yolları bulunmaya çalışılmaktadır. Modifiye bitüm de bu çözüm arayışlarından biridir. Bitümün performansını iyileştirmek amacıyla, kullanılacağı koşullara uygun katkı maddeleri ile modifikasyonuna yönelik çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık bölgelerinde bitüme daha yüksek sıcaklıklara kadar stabil kalmasını sağlayabilmek ve tekerlek izi oluşumunu engellemek için kıvam arttırıcı bir katkı maddesi kullanımı daha uygunken düşük sıcaklık bölgesinde bitümün çatlak onarımı ve bölgeyle adaptasyonunun sağlanması için akışkanlığını arttırıcı ve düşük sıcaklıklarda daha dayanıklı bir katkı maddesi kullanılabilir.

Çatlaklar, yük sebebiyle veya yükten bağımsız oluşan çatlaklar olarak iki şekilde oluşmaktadır. Yorulma çatlakları, yük kaynaklı çatlamlar arasında olup üstyapı tabakasının kullanımı sebebiyle oluşan bir çatlak türüdür. Yük dışında oluşan çatlaklar ise daha çok düşük sıcaklıklarda yaşanan gerilmeler sonucu oluşur (Öcal, 2019).

Saf bitümle yapılan kaplamalarda, yolun servis ömrü boyunca meydana gelen bozulmalar nedeniyle ağır bakım ve onarım gereksinimleri artmakta; bu durum, daha ekonomik, şartnamelere uygun ve kullanışlı teknik çözümler geliştirme ihtiyacını ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, saf bitümlü bağlayıcıların mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla bitüme çeşitli katkı maddeleri eklenerek modifikasyon yapılmaktadır.

Modifiye bitümlerde, saf bitüme belli oranlarda katkı maddeleri eklenerek, bitümün kimyasal yapısının veya fiziksel ve mekanik özelliklerinin değiştirilmesi ve bitümlü bağlayıcının davranışının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bitümlü bağlayıcı modifikasyonundaki temel hedef saf bitümün kıvamını değiştirerek özellikle sıcak havalarda oluşabilecek tekerlek izini ve soğuk havalarda meydana gelebilecek çatlamları engellemek, bitüm ve agrega daneleri arasındaki adezyonu artırarak olası soyulma ve sökülmelerin önüne geçebilmek ve asfalt kaplamaların yaşlanma direncini arttırabilmektir. Bunların yanında kayma direnci yüksek kaplama yüzeyi oluşturmak, stabiliteyi arttırmak, kusma ve akma oluşumunu azaltmak, daha uzun ömürlü ve ekonomik kaplamalar oluşturmak, yaşlanmayı geciktirmek, kalitesi düşük agregaları kullanılabilir hale getirmek gibi bazı sebeplerle de bitüm modifiye edilerek özellikleri geliştirmek istenebilir (Gedik, 2021; Demir, 2011).

Bitüm, modifiye edilebilir bir madde olmasından dolayı modifikasyon sürecinde kolaylık sağlamakla birlikte içerdiği kimyasal bileşenlerden ve fiziksel yapısından dolayı her katkı maddesi ve karışımla tam bir uyum içerisinde olamamaktadır. Deney yöntemleri ve akademik bilgiler ışığında çeşitli katkı maddeleri ile hazırlanan karışımlar laboratuvar ortamında defalarca denenerek elde edilen sonuçlar yol gösterici olmaktadır. Doğru modifiye edici katkı maddesini seçmek, bitüm ile en uygun şartlarda karıştırmak ve deneyleri standartlara uygun koşullarda gerçekleştirmek gibi önemli unsurlar bitümün modifiye edilmesi sürecinde zincirleme bir bağlantı ile bütün olarak önem taşımaktadır.

Modifiyer seçiminde sadece bitüm ile olan adaptasyon da yeterli değildir. Seçilen katkı maddesinin literatürde ve asfalt piyasasında kabul görmesi için kolay bulunabilir olması,

mümkünse ekonomik olması, hazırlanma sürecinin zorlayıcı olmaması gibi belli kriterler de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kriterler, deney aşamasını başarıyla tamamlayan katkı maddesinin uygulama aşamasında etkin ve pratik bir şekilde kullanılabilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.

3.2.1. Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri

Saf bitümün tüm iklim ve trafik koşulları altında beklenen performansı sergileyemiyor olmasından dolayı bitümü modifiye ederek özelliklerini istenilen standartlarda değiştirme ihtiyacı doğmaktadır. Örneğin, sıcak iklim ve yoğun trafiğin olduğu yerlerde daha viskoz ve dayanımı yüksek bitüme ihtiyaç duyulurken iklimin soğuk olduğu yerlerde daha elastik ve sünekliği yüksek bitüm tercih edilmektedir. Modifikasyonda kullanılacak katkı maddeleri bitümün kullanım amacına, bitüm kimyasal ve fiziksel özelliklerinin ne yönde değişmesinin istenmesine, bitümün kullanılacağı bölgeye göre değişiklik göstermektedir. Bitümün modifiye edilerek temel yapısı değişmeden performans özellikleri üzerinde iyileştirme amaçlanmaktadır. Ayrıca, modifikasyonun bitümün sıcaklık değişimlerine karşı hassasiyetini azaltması da istenmektedir.

Bitümün modifiye edilerek reolojik özelliklerinin iyileştirilmeye çalışılması uzun yıllardır süre gelen bir konu olmasından dolayı birçok katkı bitüm modifikasyonunda denenmiştir. Piyasada kabul görmüş ve yaygın olarak kullanılan bazı modifiye edici katkı maddeleri bulunmaktadır. Bunların çoğunu plastikler, kauçuklar ve fiberler olarak üç ana sınıfa ayrılacak polimerik malzemeler oluşturmaktadır. Stiren-butadien-stiren (SBS), etilenvinil-asetat (EVA), stiren-etilen-butilen-stiren (SEBS), polietilen (PE) ve polipropilen (PP), polivinil-klorid (PVC) gibi polimerler bitümün kimyasal ve fiziksel özelliklerinde değişiklikler yaparak bitüm modifiyesinde kullanıma elverişli olacak aşamaya gelmişlerdir (Kök, 2011; Yıldırım, 2022).

Tablo 3.2’de görüleceği üzere, bitümden istenen performansa ve özelliğine göre katkı maddesi seçimi değişiklik göstermektedir.

Kullanılacak katkı maddesinin doğru tercih edilmesinde katkı maddesinin ne kadar kullanılacağı da önemli bir tercih konusudur. Aynı katkı maddesinin bitüme farklı oranlarda ilave edilmesi sonucunda elde edilen performans değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, katkı

maddesinin türü ve optimum kullanım oranının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, katkı maddesinin kolay temin edilebilir ve ekonomik olması da tercih edilen özellikler arasında bulunmaktadır.

Tablo 3.2. BSK katkı maddelerinin genel sınıflandırması (Whiteoak, 2004).

Ürün Tipi	Özellikler	Kıvama Etkisi
1.Filler	• Mineral Filler Taş Tozu Kireç Portland Çimentosu Uçucu Kil • 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	• Doğal Kauçuk • SBR • SBS • Dönüştürülmüş Kauçuk	-
4.Plastik	• Polietilen • Pol,propilen • EVA • PVC	Sertleştirme
5.Bileşim	• 3 ve 4'deki polimerlerin karışımı	-
6.Fiber	• Doğal: Asbest Taş Yünü • Yapay:Polipropilen Polyester Fiberglas	Sertleştirme
7.Oksidan	• Magnezyum Tuzu	Sertleştirme
8.Antioksidan	• Kurşun Karışımları • Karbon • Kalsiyum Tuzu	Yumuşatma
9.Hidrokarbon	• Yeniden Kullanma ve Gençleştirme Yağları • Doğal Asfaltlar	Yumuşatma ve Sertleştirme
10.Soyulma Önleyici	• Aminler • Kireç	Yumuşatma

3.2.2. Saf ve OEKB modifiyeli bitümlere uygulanan deneyler

Çalışma kapsamında saf bitüme ve organik esaslı kolemanit bileşiği ile modifiye edilmiş bitüm numunelerine aşağıdaki deneyler uygulanmıştır;

- Viskozite Testi (TS 117)
- Penetrasyon Deneyi (TS 118 EN 1426, ASTM D5)
- Yumuşama noktası Deneyi (TS 120 EN 1427, ASTM D36)

- d. Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deneyi (TS EN 13589)
- e. Elastik Geri Dönme Deneyi (TS EN 13398)
- f. DSR (Dinamik Kesme Reometresi) (TS EN 14770, AASHTO T315)
- g. BBR (Eğilme Kirişi Reometre Deneyi) (TS EN 14771, AASHTO T313)
- h. RTFO (Dönmeli İnce Film Etüvü) (TS EN 12607-1)
- ı. PAV (Basınçlı Yaşlandırma Kabı) (TS EN 14769)

Tablo 3.3’de saf ve modifiye bitümlere uygulanacak bitüm deneyleri ve amaçları verilmiştir.

Tablo 3.3. Bitüm deneylerinin kullanım amaçları

Deneyin Adı	Kullanılacak Bitümün Durumu	Amaç
Viskozite Deneyi	Orijinal Bitüm	İşlenebilme sıcaklığı
Penetrasyon Deneyi	Orijinal Bitüm	Kıvam tayini
	RTFO uygulanmış bitüm	
Yumuşama Nok. Deneyi	Orijinal Bitüm	Akmaya karşı direnç
	RTFO uygulanmış bitüm	
DSR (Dinamik Kesme Deneyi)	Orijinal Bitüm	Yüksek ve orta sıcaklık davranışı, tekerlek izi
	RTFO uygulanmış bitüm	
	PAV uygulanmış bitüm	
RTFO (Dönel İnce Film etüvü)	Orijinal Bitüm	Kısa süreli yaşlandırma
PAV (Basınçlı Yaşlandırma Kabı)	RTFO uygulanmış bitüm	Uzun süreli yaşlandırma
BBR (Bitüm Kiriş Eğilme Deneyi)	PAV uygulanmış bitüm	Düşük sıcaklık davranışı

3.3. Agregalar

Agrega, yol yapımında kullanılan temel malzemelerden biridir. Ağırlık ve hacim olarak yol üst yapısının büyük kısmını oluşturmaktadır. Yola etkiyen yüklerin meydana getirdiği gerilmeleri karşılamada bitümle birlikte önemli role sahiptir. Agregalar doğal agregalar ve yapay agregalar olarak iki gruba ayrılır.

Doğal agregalar; derelerden ve kayalardan agregalar temin edilmesi sonucu oluşmaktadır. Dere malzemeleri kum-çakıl olarak temin edilirken kaya bazlı agregalar kırmataş olarak elde edilmektedir. Dere malzemelerinin fiziksel yapılarından dolayı üstyapı

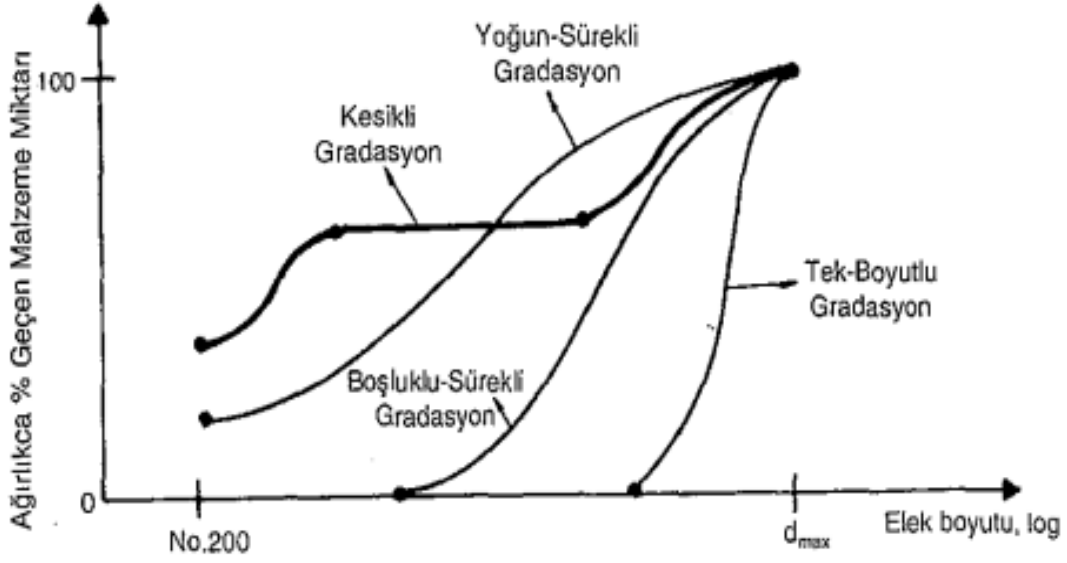
malzemesi olarak kullanımları uygun görülmedikleri gibi konkasörde kırıldıkları zaman ortaya çıkan kırma çakıl-kum malzemesi kullanılabilir (İlıcılı, 2001; Tunç, 2004).

Kırmataşın elde edildiği kayalar kendi içinde metamorfik, sedimenter (tortul) ve magmatik kayalar olarak üçe ayrılmaktadır. Magmatik kayalar, yeraltından yüzeye çıkan magmanın soğuyup kristalleşmesiyle oluşur. Tortul kayalar ise farklı türdeki kayaların su, rüzgar gibi dış etkenlerle parçalanıp taşınması, su ortamlarında birikerek tortullaşması ve sonrasında katılaşması sonucu meydana gelir. Metamorfik kayalar ise tortul veya magmatik kayaların ısı, basınç gibi jeolojik etkiler altında yapısal değişime uğrayarak yeni özellikler kazanmasıyla oluşur. Yol üstyapısında kullanılan en uygun agrega türü, genellikle bu kayalardan elde edilen doğal kırmataşlardır (İlıcılı, 2001; Tunç, 2004).

Yapay agregalar; genellikle yüksek fırın cürufundan elde edilirler. Yapay agregalar, gevrek yapı ve sınırlı üretim gibi sebeplerden dolayı yol malzemesi olarak kullanılmamakla birlikte farklı üstyapı tabakalarında doğal agregalarla birlikte kullanılmasına yönelik çalışmalar literatürde mevcuttur (Tunç, 2004).

Agregalar boyutlarına göre kaba agrega, ince agrega ve filler olarak üç sınıfa ayrılmaktadır. Kaba agrega No. 4 (4,76 mm) eleğinde üzerinde kalan malzeme, ince agrega No.4 elekten geçip No.200 (0,075 mm) elek üzerinde kalan malzeme, filler ise No.200 elekten geçen agrega çeşididir. Bitümlü karışım içerisinde kaba agregalar karışımın daha ekonomik olup kolay yayılmasını sağladığı gibi ayrıca kaplamanın direncini artıracak ana iskelet hattı oluşturmaktadır. İnce agrega ise bu iskelet sistemi içerisindeki boşluklara dolarak kaplamada daha yoğun bir karışım oluşmasını sağlar. Filler ise agreganın genel toplamının az bir kısmını oluştursa da agrega taneleri arasında daha fazla temas sağlayarak karışımın yoğunluğunu artırmaktadır (Deniz, 2010).

Gradasyon, agrega malzemesinin belli boyut ve o boyuta ait içerdiği malzeme miktarını ifade eden bir tane dağılım oranıdır. Agregalar gradasyonlarına göre kesikli gradasyon, yoğun-sürekli gradasyon, boşluklu-sürekli gradasyon ve tek-boyutlu gradasyon olmak üzere dörde ayrılırlar (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Agrega gradasyon tipleri (Tunç, 2001).

Yoğun-sürekli gradasyon minimum boşluk oranına sahiptir. Kaba ve ince agreganın neredeyse tüm boyutları yer aldığı için birbirlerinin boşluklarına dolarak maksimum yoğunluk oluştururlar. Boşluklu-sürekli gradasyon yoğun gradasyona göre daha az ince agrega içerdiğinden boşluk oranı fazladır. Bu sebeple düşük standarda sahip yollarda temel malzemesi olarak kullanılabilirler. Kesikli gradasyona sahip agregalar belli boyutlardaki agregayı içermediği için boşluk oranı yüksektir. Tek boyutlu gradasyona sahip agregalar ise neredeyse tek boyuta sahip agrega içerdiğinden bunlar da düşük standarda sahip yollarda sathi kaplama ya da koruyucu tabakada kullanılabilirler. Şartnamede agrega gradasyonu ile ilgili belli limitler mevcuttur (Tunç, 2001; KTŞ 2023).

Yol kaplamasında kullanılan agreganın dane yüzeyi işlenebilirlik, yoğunluk, stabilite, sıkışma direnci gibi sebeplerden dolayı önem taşımaktadır. Agreganın yüzey pürüzlülüğü arttığı zaman bitümle adezyonu artar ancak işlenebilirliği azalır. Agreganın porozitesi agrega ve bitüm arasında adezyon sağlayacağından önemlidir. Ancak fazla poroz agrega özgül ağırlığı az olacağı için stabiliteyi düşürmektedir (Deniz, 2010).

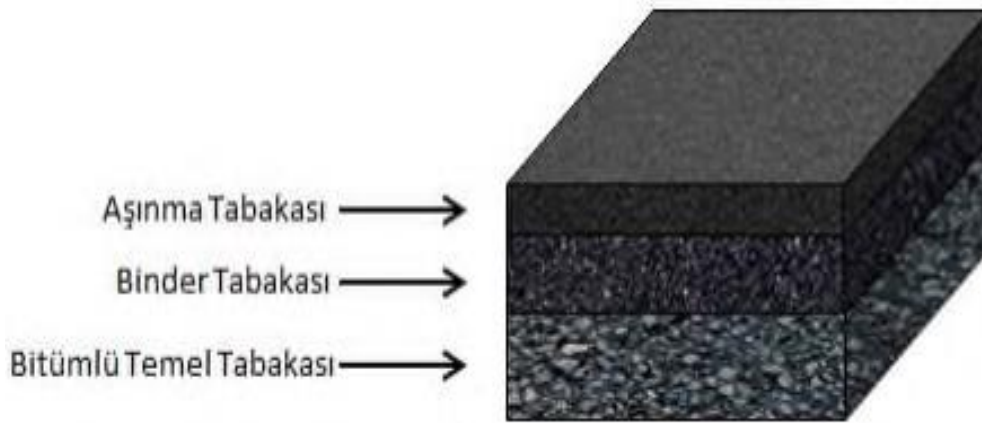
Agregaların sahip olduğu adezyon, durabilite ve stabilite özellikleri kullanılacağı yol kaplamasını etkilemektedir. Stabilite, agregaların aldığı yük sonucu hacim değiştirmesine karşı sergilediği direnç olarak tanımlanmaktadır. Durabilite, agreganın çevresel etkiler ve trafik yükleri sonucunda aşınmaya karşı direncini temsil etmektedir. Durabilitesi yüksek olan agreganın kırılma, aşınma ve parçalanma oranı daha az olur. Adezyon, bitüm-agrega arasında

bağ kuvvetini ifade eder. Adezyon arttıkça bitüm ve agregada daha iyi yapışma özelliği gösterir (İzol, 2020).

Agrega yüzeyinin pürüzlülüğü ve yassılık oranı gibi fiziksel özelliklerin yanı sıra, agregada zararlı maddelerin bulunup bulunmaması da yol kaplamasının performansını doğrudan etkiler. Bitümlü karışımlarda kullanılacak agregaların gradasyonu, maksimum tane boyutu ve tane şekli gibi parametreler stabiliteyi artırarak karışıma avantaj sağlar. Ayrıca agregada porozitesi ve tane yüzey yapısı, bitüm ile adezyonu güçlendirerek karışımın genel stabilitesine katkıda bulunur (İzol, 2020).

3.4. Bitümlü Sıcak Karışım (BSK)

Belli bir gradasyona sahip agreganın bitümle karıştırma tesislerinde yüksek sıcaklıklarda (140 °C – 180 °C) karışım haline getirilmesine bitümlü sıcak karışım adı verilmektedir. Bu karışım da agregada taneleri iskelet yapıyı oluştururken bitüm, agregalar arası boşluklara dolarak karışımı bir bütün halinde yapıştırma görevi görür. BSK'ların yük taşıma kapasiteleri yüksek olduğu için genel olarak trafiğin orta-yüksek yoğunlukta olduğu bölgelerde tercih edilir. BSK'lar genelde temel tabakasının üzerine bitümlü temel, binder ve aşınma tabakası olarak üç ayrı tabaka halinde gerçekleştirilir (Araştırma Ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, 2021).



Şekil 3.5. Standart BSK tabakası (AGDB, 2021).

Yol kaplaması için uygun bir bitümlü sıcak karışımın yüksek stabilitesi, dayanıklı ve ekonomik olması, kırılma ve kayma olmaması tercih edilmektedir. BSK özellikleri; stabilite, durabilite, rijitlik, esneklik, yorulma dayanımı, geçirimsizlik, kayma direnci, işlenebilirlik

olarak sıralanabilir. BSK'nın serileceği yüzey de çok önemlidir. Zeminin zayıf olması üstyapı performansını ve ömrünü de olumsuz yönde etkileyecektir (Taşçı, 2010; Alakara, 2023).

Bitümlü sıcak karışımların stabilitesini agrega ve bitüm ayrı ayrı etkilediği gibi üretim tekniği ve karıştırma standartları da etkilemektedir. Agrega gradasyonu, filler malzeme oranı, bitüm sınıfı, bitüm bağlayıcılık kalitesi, bitümün viskozitesi, karıştırma sıcaklığı gibi parametreler bitümlü sıcak karışım performansını doğrudan etkilemektedir (Morova, 2023).

3.4.1. Bitümlü sıcak karışımlara uygulanan deneyler

Çalışma kapsamında bitümlü sıcak karışımlara aşağıdaki deneyler uygulanmıştır;

- a.** Marshall tasarım deneyi (TS EN 3720/12697, AASHTO T 245, ASTM D 1559)
- b.** Nicholson soyulma deneyi (ASTM D 1664)
- c.** İndirekt çekme mukavemeti deneyi (İÇM) (Brazilian) (ISRM 1981)

4. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan katkı maddesi olan Organik Esaslı Kolemanit Bileşiği (OEKB)'nin içeriği ve sentez yöntemi detaylı olarak açıklanmıştır. Katkı maddesinin ana bileşenleri olan kolemanit mineralinin ve monoetilen glikolün özellikleri ile kullanım alanlarına değinilmiştir. Ayrıca metot kısmında, çalışmada gerçekleştirilen deneylerin kapsamı ve uygulama detayları ayrıntılı şekilde sunulmuştur.

4.1. Materyal

Bu deneysel çalışmada materyal olarak bitüm, agrega ve katkı maddesi olarak OEKB kullanılmıştır. Bitüm-agrega karışımlarında Uğural taş ocağından temin edilmiş bazalt türü agrega kullanılmıştır. Agrega gradasyonu için şartnamede yer alan aşınma tabakası Tip-1 gradasyon limitleri tercih edilmiştir.

Tablo 4.1 Aşınma tabakası Tip 1 Agrega gradasyonu (KTŞ, 2023)

ELEK AÇIKLIĞI		DİZAYN GRAD.	TOLERANS LİMİTLERİ		ŞARTNAME LİMİTLERİ	
mm	inch					
37,5	1 1/2"	100	100		100	
25,4	1"	100	100	100	100	100
19,1	3/4"	100	100	100	100	100
12,7	1/2"	92,3	88,3	96,3	88	100
9,5	3/8"	81,4	77,4	85,4	72	90
4,8	No.4	47,2	43,2	51,2	42	52
2,0	No.10	28,3	25,3	31,3	25	35
0,4	No.40	12,7	9,7	15,7	10	20
0,18	No.80	7,9	4,9	10,9	7	14
0,08	No.200	5,6	3,6	7,6	3	8

Çalışmada 50/70 penetrasyon dereceli bitüm kullanılmıştır. Bitümün özgül ağırlığı 1,029'dur. Kırıkkale Tüpraş Rafinerisi'nden temin edilmiştir.

4.1.1. Organik esaslı kolemanit bileşigi (OEKB)

Bitümün performans özelliklerini artırmak hedefiyle bitüm modifikasyonunda laboratuvar ortamında tarafımızca sentezlenip OEKB olarak adlandırılan yeni bir katkı maddesi kullanılmıştır. Doğal bir bor çeşidi olan filler boyutundaki kolemanit, laboratuvar ortamında monoetilen glikol ile sentezlenmiştir.

Çalışmada kullanılan organik esaslı kolemanit bileşigi (OEKB), monoetilen glikol (MEG) ve kolemanitin uygun oranlarda karıştırılmasıyla laboratuvar ortamında sentezlenmiştir (Şekil 4.1). Kolemanit, öğütülmüş halde filler boyutunda kullanılmıştır. Sentez işleminde, 150 gr monoetilen glikol ve 90 gr kolemanit tartılarak uygun özellikte bir cam beher içerisine alınmıştır. Karışım, sabit sıcaklık kontrollü bir manyetik karıştırıcı ile 150°C sıcaklıkta 45 ile 60 dakika boyunca sürekli karıştırılmıştır. Bu işlem sırasında, kolemanitin monoetilen glikol içerisinde homojen bir şekilde dağılması ve aralarında kimyasal etkileşimin gerçekleşmesi sağlanmıştır.



Şekil 4.1. Katkı maddesinin laboratuvar ortamında sentezlenmesi

Sentez işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen karışım, oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmış kıvamlı bir katkı maddesi elde edilmiştir. Şekil 4.2’de görüleceği gibi bu iki bileşenin sentezlenmesi sonucunda kıvamlı ve yeşil-gri renkte bir malzeme meydana gelmiştir.



Şekil 4.2. Organik Esaslı Kolemanit Bileşiği (OEKB)

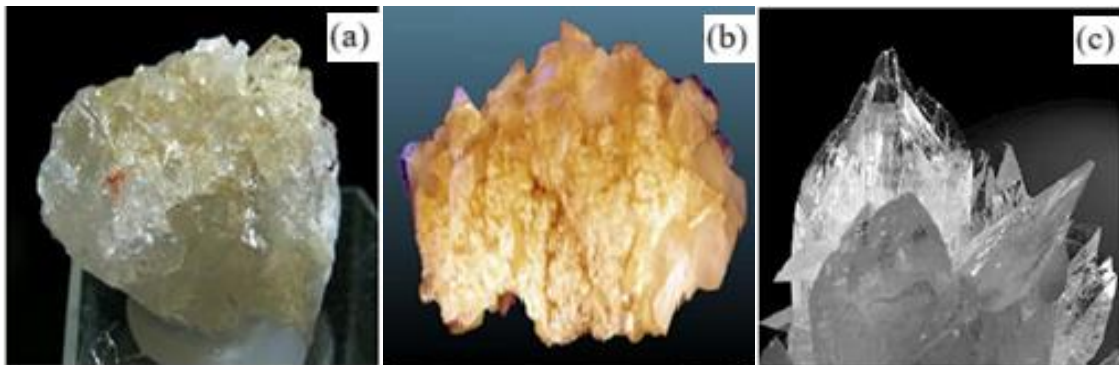
4.1.1.1. Kolemanit

Kolemanit en yaygın bulunan, mineral bakımından zengin bor çeşitlerinden biridir. Bor, Dünya genelinde en çok Türkiye’de bulunan endüstriyel hammadde kaynakları arasındadır. Bor madeni doğada beyaz renkli bir taş olarak görülebilir. Bor mineralleri, doğal

koşullarda serbest element olarak yer almazlar. Oksijen (O) atomları ile kovalent bağ oluştururken azot (N) atomları ile koordine kovalent bağ meydana getirirler. Oksijenle bileşik halde yapılarında farklı oranlarda bor oksit (B_2O_3) içeren doğal bileşiklere dönüşürler. Bor-oksit bileşimlerine genel anlamda borat adı verilmektedir. Bor içeriğindeki bor oksit (B_2O_3) oranına göre mineralin işlenebilirliği ile birlikte ticari değeri de artmaktadır. Ayrıca borlar oksijen dışında çeşitli metal ve ametallerle de bileşikler oluşturabilirler. Bor, periyodik cetvelin 5.elementidir ve simgesi “B” olarak gösterilmektedir. Oda koşullarında elektriği az iletirler ancak ısıtıldıkça iletkenlikleri artış göstermektedir (Karaağaç, 2015; Rusen, 2018; Eyüboğlu, 2013).

Dünya bor rezervinin yaklaşık %73’ü Türkiye’de bulunmaktadır. Bor sektöründeki talebin %57’si Türkiye’den karşılanırken %30’u Amerika’dan karşılanmaktadır. Bu 2 ana üretici ülke dışında Rusya, Şili, Arjantin ve Çin gibi ülkeler de bor pazarında yer almaya başlamışlardır. Bor minerali oksijenle bağ kurmaya yatkın olmasından dolayı doğada birçok oksijenli bileşiği bulunmaktadır. Bu yüzden doğada 230’dan fazla bor minerali bulunduğu bilinmektedir. Rezerv olarak ele alındığında Dünya’da ortalama 1,3 milyar ton B_2O_3 bazında bor bulunduğu tahmin edilmektedir (Demirel, 2017; Medin, 2023; Uslu, 2024).

Kolemanit, Dünya bor lideri Eti Maden tarafından çıkarılarak yüksek teknoloji ile donatılmış konsantratör tesisinde zenginleştirilip öğütülmüş hale getirilmektedir. Kolemanit, Türkiye’de Emet, Bigadiç ve Kestelek yataklarından çıkarılmaktadır. Dünya genelinde ticari açıdan öneme sahip olan bor çeşitleri kolemanit, üleksit ve tinkal (boraks)’dir (Eti maden, 2020).



Şekil 4.3. Kolemanit mineraline ait görseller (Kunt, 2016, Yaltay ve Ekinci, 2013).

Kolemanit yataklarının birçoğunda, içinde boşluk bulunan ve kil mineralleri içerisinde gömülmüş yumru ve patates şeklindeki bantlar halinde bulunur. Kolemanit genellikle beyaz,

şeffaf camsı parlaklıkta ve renksizdir, bir kısmının içerisinde mavi renkli, uzun, ortorombik sölestin kristalleri yer alır (Arslan, 2021).

Tablo 4.2. Kolemanitin fiziksel özellikleri (Eti maden, 2020)

Özgül ağırlık ^a	2,50 g/cm ³
Dökme (yığın) yoğunluğu ^a	0,971 g/cm ³
Molekül ağırlığı	411,08 g/mol
Isı kapasitesi	15,4 J/g°C
Isı iletkenlik	0,526 W/mK
Özgül yüzey alanı	3,30 m ² /g
Yüzey gerilimi	64,78 mN/m (Ağ. %1,0 sulu çözelti)
Renk ölçüm testi	88,53 (ortalama L değeri)

Mineral bakımından oldukça zengin bir bor çeşidi olan Kolemanit, monoklinik sistemde kristallenir. Kolemanit içeriğinde ortalama %50-51 boroksit (B₂O₃) bulunur. Mohs sertlik sınıflandırmasına göre sertliği 4-4,5, özgül ağırlığı 2,42 gr/cm³'tür. Killer içinde cevher boşluklarında iri, parlak, saydam kristaller halinde bulunur. Saf Kolemanit suda yavaş, hidroklorik asitte hızlı çözünür. Tablo 4.3'de Kolemanitin kimyasal içeriği verilmiştir (Feyiso, 2019; Etimaden, 2020, Kolemanit).

Tablo 4.3. Kolemanitin kimyasal içeriği (Eti maden, 2020)

Bileşen	İçerik	
	-45 Mikron	-75 Mikron
B ₂ O ₃	% 40,00 ± 0,50	% 40,00 ± 0,50
CaO	% 2700 ± 1.00	% 2700 ± 1.00
SiO ₂	% 4,00 – 6,50	% 4,00 – 6,50
SO ₄	% 0,60 maks	% 0,60 maks
As	35 ppm maks	35 ppm maks
Fe ₂ O ₃	% 0,08 maks	% 0,08 maks
Al ₂ O ₃	% 0,40 maks	% 0,40 maks
MgO	% 3,00 maks	% 3,00 maks
SrO	% 1,50 maks	% 1,50 maks
Na ₂ O	% 0,50 maks	% 0,50 maks
Kızdırma Kaybı	% 25,00 maks	% 25,00 maks
Nem	% 1,00 maks	% 1,00 maks
Dökme Yoğunluğu	1,00 ton/m ³	1,00 ton/m ³

4.1.1.1.1 Borun kullanıldığı sektörler

Borun çok geniş bir kullanım alanı olduğu vurgulanarak, bor minerallerinin kullanıldığı sektörler ve uygulamalar aşağıda detaylı olarak sunulmuştur.

- **Cam Sanayii:** Borun en çok kullanıldığı alandır. Cam içeriğine bor mineralinin ilave edilmesi camın akışkanlığını artırarak yüzey sertliğini kuvvetlendirmektedir. Düz camlarda ve cam kaplarda bor kullanımı sanıldığı kadar aksine düşüktür ancak özel camlarda kolemanit, borik asit, boraks kullanılmaktadır. İçeriğinde bor bulunan bazı özel camlar nükleer ve uzay sanayi sektöründe kullanılmaktadır (Eti maden, 2020).

- **Seramik Sanayii:** Seramiğin içeriğine ilave edilen bor, ısı genleşme katsayısını dengeleyerek seramiğin ısı düzeyinde uyumlu olmasını sağlar. Seramik sektöründe kullanılan bor çeşitleri kolemanit, boraks, bor oksit ve diğer sodyumlu borlardır (Eti maden, 2020).

- **Temizlik ve Beyazlatma Sanayii:** Bor minerallerinin temizlik ve beyazlatma alanında faydaları; güçlü beyazlatıcı özelliğine sahip olması, antibakteriyel işlev görmesi, lekeleri yok etmesi ve pH değerini dengelemesi olarak sıralanabilir. Deterjanların içeriğinde hızlı çözünme ve depolama koşullarındaki dayanıklılığı sebebiyle sodyum perborat monohidrat kullanımı tercih edilmektedir (Yaltay ve Ekinci, 2013).

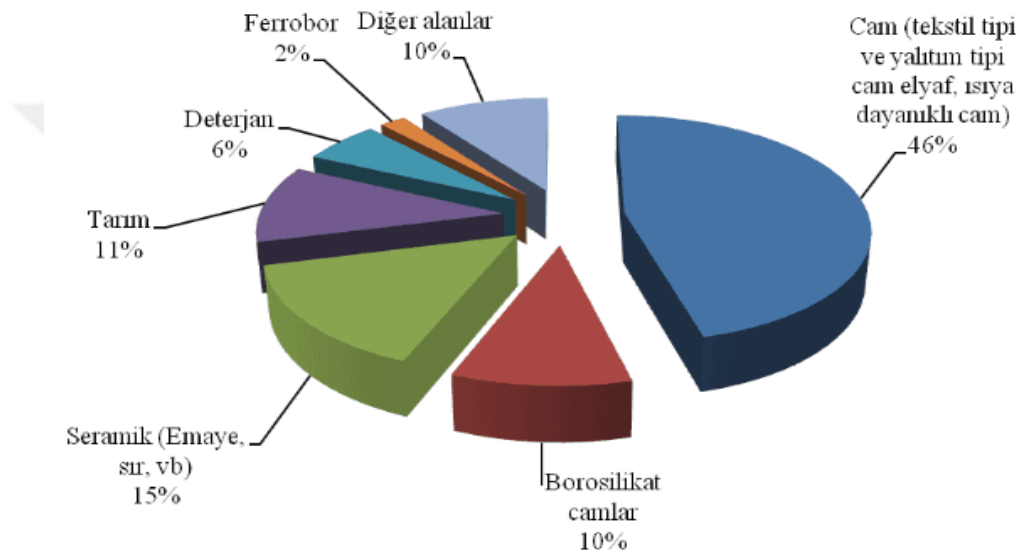
- **Metalurji:** Bu sektörde bor çeşitleri kaplama işlemlerinde kullanılmaktadır. Demir dışındaki metaller olan bakır, kalay, nikel gibi metaller için elektrolit olarak kullanılmaktadır. Erimeyi hızlandırma maddesi olarak da kullanılır. Çelikte sertlik oluşturmak için katkı maddesi olarak kullanılır (Rusen, 2018).

- **İnşaat:** Bor, inşaat sektöründe çimento üretiminde, ses yalıtım malzemesi olarak, termal cam üretiminde kullanılmaktadır. Özellikle çimento üretim aşamasında klinker pişirme sıcaklığını düşürmek için kolemanit kullanılmaktadır (Yaltay ve Ekinci, 2013).

- **Tarım:** Bor, bitkilerin temel ihtiyaçlarını karşılamada, büyüme ve gelişmede yardımcı olur. Köklerinin ve yapraklarının gelişmesini hızlandırır. Ayrıca polen oluşturma, çiçek açma, meyve verme gibi bitkilerin yaşadığı genel gelişim özelliklerini geliştirmektedir (Zengin, 2023).

- **Alev Geciktirici:** Borun tutuşma sıcaklığı çok yüksektir (510-525°C). Bu özelliğinden dolayı alev geciktirici olarak kullanım durumu belli kaynaklarda yer almaktadır. Bu amaçla kullanıldıklarında çevreye zarar verici gazlar ortaya çıkarmazlar. Tekstil sektöründe de borun alev geciktirici olarak kullanımı yaygınlık kazanmaktadır (Zengin, 2023).

Bu sektörler arasında %43 oranla cam sektörü en çok bor tüketen sektördür. Şekil 4.4'de Dünya'da bor tüketiminin sektörlere göre yüzdelik dağılımı sunulmuştur (mta.gov.tr).



Şekil 4.4. Dünya genelinde sektör bazında bor kullanımı yüzdesi (Enerji Sistemleri Mühendisliği, t.y.)

Ülkelere ve ihtiyaçlarına göre borun en çok tüketildiği sektör değişiklik göstermektedir. Örneğin; ABD’de bor en çok izolasyon alanında kullanılırken, Batı Avrupa’da sabun ve deterjan sanayide, Japonya’da ise tekstil sanayiinde kullanılmaktadır (MTA, t.y.).

Türkiye bor rezervi olarak Dünya’nın birinci ülkesi olmasına ve bor kullanım sektörlerinin çok çeşitlilik göstermesine rağmen potansiyelinin hakkını verecek ölçüde borun değerlendirilmediği söylenebilir. Üstelik Türkiye dışındaki bor rezerv kullanım süresinin 50 yıl bile süremeyeceği tahmin edilmektedir. Türkiye için bu öngörü 500 yıl olarak tahmin edilmektedir. Ülkemizdeki tesis yetersizliği ve teknolojik altyapı eksiklikleri, mevcut potansiyelin ortaya çıkarılamamasının başlıca nedenlerindendir. Bu imkanların etkin

kullanımı amacıyla yapılan araştırmalar, borun uygulanabildiği alanların çeşitliliğinin artırılması açısından bk önem taşımaktadır (Yaltay ve Ekinci, 2013).

4.1.1.2. Monoetilen glikol

Monoetilen glikol, kimyasal forml $C_2H_6O_2$ olan etandiol olarak da bilinen, su, aseton ve alkolde çözünebilir renksiz kıvamlı bir sıvıdır. Donma noktası $-13^{\circ}C$, kaynama noktası ise $198^{\circ}C$ 'dir. Donma noktasının düşük, kaynama noktasının ise yüksek olması, bu maddenin çeşitli koşullarda dayanıklılığını artırarak kullanım alanlarını genişletmektedir. Esas olarak polyester elyaf üretimi ve antifriz formülasyonları için hammadde olarak kullanılmaktadır. Kokusuz, renksiz, tatlı tadı olan, viskoz bir sıvıdır. Üretim sürecinde, Etilen Oksit(EO), Etilenin Oksijen(O) veya hava ile bir Gümüş Oksit (Ag_2O_3) katalizör yardımı ile oksitlenerek üretilir. Ham Etilen Glikol, Etilen Oksitin (EO) basınç altında su ile hidrolizi ile üretilir (Kimya Borsası, t.y., Monoetilen Glikol).

4.1.1.2.1. Monoetilen glikolün kullanıldığı sektörler

- Etilenglikol, otomobillerde ve sıvı soğutmalı bilgisayarlarda konvektif ısı transferi için iyi bir ortam sağlar.
- Monoetilen glikolün su ile karışımı, soğutucu ve antifriz çözeltilerine korozyon ve asit bozulmasını engelleme ve ayrıca birçok mikrop ve mantarın büyümesini nleme gibi yan faydalar sağlar.
- Jeotermal ısıtma-soğutma sistemlerinde, monoetilen glikol, jeotermal ısı pompası ile ısıyı transfer eden sıvı olarak kullanılır.
- Monoetilen glikol, soğutucuyu veya hava şartlandırıcılarını dışarıya koyan soğutulmuş su iklimlendirme sistemlerinde veya suyun donma sıcaklığının altında soğuması gereken sistemlerde sıklıkla kullanılır.
- Saf haldeki monoetilen glikol, suyun yaklaşık olarak yarısı kadar özgül ısı kapasitesine sahiptir. Bundan dolayı, donmaya karşı koruma ve daha yüksek bir kaynama noktası sağlarken saf sulara göre su karışımlarının özgül ısı kapasitesini düşürür.
- Sıvı transfer aracı olarak boya endüstrisinde kullanılır (Kimya Borsası, t.y., Mono Etilen Glikol).

4.2. Metot

Bu çalışmada, karayolları esnek üstyapısının özelliklerini iyileştirebilmek amacıyla bitüm, laboratuvar ortamında tarafımızca sentezlenmiş OEKB ile modifiye edilerek performans özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu doğrultuda, bitüme farklı oranlarda ilave edilen katkı maddesinin bitüm özelliklerini nasıl etkilediğini belirlemek amacıyla modifiye bitümler ve saf bitüm üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, OEKB katkısının bitümlü karışımların performans özelliklerine olan etkisini değerlendirmek için de kapsamlı testler uygulanmıştır.

4.2.1. Deneysel Çalışma

Katkı maddesinin (OEKB) performansını test etmek amacıyla gerçekleştirilen deneylerin standartları ve uygulanış biçimleri bu bölümün alt başlıklarında aşağıda sunulmuştur.

4.2.1.1. Viskozite testi (TS 117)

Viskozite (μ), bir maddenin akmaya karşı göstermiş olduğu direncin ölçüsüdür. Bu deney bitümün kıvamını ve yüksek sıcaklıklardaki akma kabiliyetini tayin etmek amacıyla yapılmaktadır. Bitümler genellikle penetrasyon derecelerine göre sınıflandırılrsa da viskozite ölçüsüne hatta SUPERPAVE sistemdeki performanslarına göre sınıflandırılmalar da yapılmaktadır (Tunç, 2001; Gökalp, 2019).

Bitüm, termoplastik bir malzeme olması sebebiyle viskozitesi sıcaklıkla birlikte değişiklik göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda viskoz bir sıvı iken düşük sıcaklıklarda elastik bir katı gibi davranır ve aynı bitüm için sıcaklık yükseldikçe viskozite azalırken sıcaklık düştükçe viskozite artar. Viskozite deneyi bitümlerin sınıflandırılmasında önemli bir ölçüttür (Tunç, 2001; Orhan, 2021, García-Morales ve ark., 2004). Bitümün düşük sıcaklıklarda viskozitesinin arttığı durumda ısı çatlamalara karşı dayanıklı olması için elastikiyetini ve yumuşaklığını koruması ve viskozitesinin azaldığı yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumunu önlemek için sert kıvamda olması gerekmektedir. Ayrıca bitüm yaşlandıkça sertleşmekte ve viskozitesi artmaktadır (Shaikha ve ark., 2024; Zhang ve ark., 2024).

Kaplamada yeterli performans sağlanması için bitümün optimum viskoziteye sahip olması gerekir. Bitümün düşük viskozitesi, yüksek sıcaklıklarda agregayla birlikte kusma riskini artırırken; yüksek viskozitesi ise agreganın yeterince sarılmasını engelleyebilir (Orhan, 2021).

Bu çalışmada, bitüm numunelerinin viskozite ölçümleri için Şekil 4.5’de görülen Brookfield DV3T Extra Viskozimetre test cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.5. Brookfield viskozite test cihazı

Viskozite ölçümlerine başlarken saf bitüm ve daha önce hazırlanmış olan modifiye bitümler etüvde ısıtılmaya başlanır. Etüvde ısıtma işleminin amacı bitümü daha akışkan hale getirerek deneyde kullanımını kolaylaştırmaktır. Etüvden çıkarılan bitümler Brookfield cihazının bir parçası olan metal tüplere 10,5 gr miktarında dökülür. Bu tüpler cihazın orta bölümünde yer alan termosel yerleştirilir ve döndürülerek sabitlenir. Ölçümü gerçekleştirebilmek için silindirik metal çubuğun cihaza takılı olması gerekir ve çubuğun dönüş hızı cihazdan seçilerek ayarlanabilmektedir. Metal çubuk, silindirik metal tüp içinde yer alan bitüme batırılır. Cihazın ısıtma bölümü olan termoselin sıcaklığı test sıcaklığına sabitlenir ve termosel içindeki bitümün istenilen sıcaklığa gelmesi için beklenir. Cihaz çalıştırıldığında, içine takılan metal çubuk bitüm içinde dönmeye başlar ve bu dönüş hareketine karşı bitümün gösterdiği direnç, cihaz üzerinden Centipoise (Cp) cinsinden okunur. (1 Pa.s = 1000 Cp). Okunan bu değer bitümün viskozite değeridir.

İlk etapta bitümün modifiye edilmesi sürecinde en uygun karıştırma süre ve sıcaklığının tespit edilmesi için viskozite testi yapılmıştır. Modifiye bitüm için en önemli parametrelerden biri bitümün modifiye edilmesinde belirlenmiş olan karıştırma süresi ve sıcaklığıdır. Bitüm ve modifiye edici maddenin homojen şekilde karışması istenir. Bu yüzden karıştırma süre ve sıcaklığının doğru belirlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, bitümün ileride ortaya koyacağı performansını etkileyerek üstyapıda istenmeyen bozulmalar oluşmasına sebebiyet verebilir. Modifiye bitümler üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, karıştırma hızının dakikada 600-5000 arasında, karıştırma süresinin ise 2 dakika ile 4 saat arasında değiştiği görülmektedir (Gökalp, 2019).

Karıştırma süre ve sıcaklığının belirlenmesinden sonra bitüm, %1, %2, %3, %5 ve %8 oranlarında modifiye edilmiş ve 5 farklı oranda modifiye bitüm hazırlanmıştır. Hazırlanan modifiye bitümler en az bir gün soğuması ve modifikasyonun tam olarak gerçekleşmesi için oda sıcaklığında bekletilmiştir. Deneye başlamadan önce karışımlar deney için kullanılmak amacıyla uygun akışkanlığa gelebilmesi için etüvde ısıtılmıştır. Etüvden sıra ile çıkarılan bitüm numuneleri karıştırılarak deney tüplerine dökülmüş ve viskozite deney cihazına yerleştirilerek istenilen sıcaklığa gelmesi için beklenmiştir. Modifiye bitümler ve saf bitüm 105 °C, 120 °C, 135 °C ve 150 °C’de viskozite deneyine tabi tutulmuştur. Her sıcaklık değişiminde, cihazın doğru ve stabil ölçüm yapabilmesi için en az 15 dakika boyunca yeni sıcaklığa kalibre olması ve bu sıcaklıkta dengelenmesi için beklenmiştir.

4.2.1.2. Penetrasyon testi (TS 118 EN 1426, ASTM D5)

Penetrasyon ismi, deney esnasında kullanılan iğnenin bitüm numunesine batması olgusundan türemiştir. Penetrasyon deneyi viskozite deneyinde olduğu gibi bitüm kıvamı hakkında bilgi sahibi olmak için yapılır. Penetrasyon testi en çok kullanılan test yöntemlerinden biri olsa da viskozite testine göre daha basit bir yöntemdir.

Penetrasyon testinde, sabit yük (100 g) ve sıcaklık (25 °C) altında belirli boyutlara sahip olan bir iğne 5 saniye boyunca bitüm numunesine batırılır. Penetrasyon değeri, deneyde kullanılan standart iğnenin çapı milimetrenin onda biri (1/10 mm) cinsinden bitüme nüfuz etmesi üzerine mesafe olarak tanımlanabilir. Kullanılan test cihazı Şekil 4.6’da verilmiştir. Önceden ısıtılmış bitüm numunesi penetrasyon kabına dökülür ve oda sıcaklığında soğuması için bekletilir. 25 °C’lik su banyosunda test sıcaklığına gelmiş olan numune kabı penetrasyon

cihazına yerleştirilir. Penetrasyon iğnesi asfalt yüzeyine konumlandırılır ve deneye başlanır. 5 saniye sonunda iğnenin bitüm numunesine batma derinliği desimilimetre (dmm) cinsinden ölçülür. Bu işlem 3 defa gerçekleştirilerek 3 okuma alınır. Bu aşamada yapılan okumalar arasında iğnelerin düzgünlüğü, temizliği ve cihazın doğru kullanımı açısından kontrol yapılması gerekmektedir. Bu işlemler sonucunda yapılan üç ölçümün ortalaması, deneye tabi tutulan bitümün penetrasyon derecesi olarak belirlenir (Taşçı, 2010; Hamzaoui ve ark., 2012; Maisarah ve ark. 2018).

Penetrasyon ölçümleri arasında şartnamede belirtilen sınırlar dışında büyük farklılıklar olması durumunda, geçerli üç ölçüm elde edilene kadar deney tekrarlanır (İlcalı, 2001; Komut ve ark., 2021).



Şekil 4.6. (a) Penetrasyon iğnesi (b) Penetrasyon test cihazı

Penetrasyon deneyinden elde edilen sayısal değerler, bitümün kıvamı hakkında yorum yapmaya olanak sağlar. Bu değer ile bitüm kıvamı ters orantılıdır; penetrasyon değeri arttıkça bitümün kıvamı azalır. Yani, yüksek penetrasyon değeri bitümün daha yumuşak, düşük penetrasyon değeri ise daha katı olduğunu göstermektedir (Tunç, 2001).

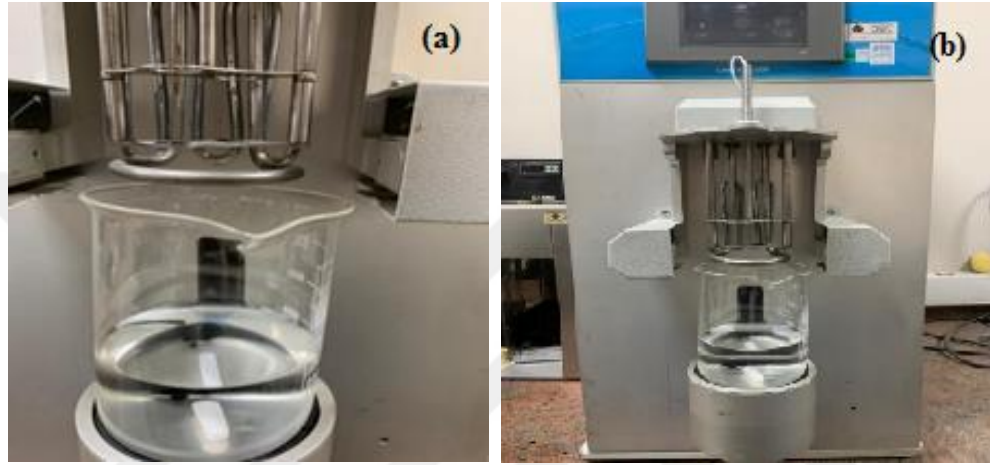
4.2.1.3. Yumuşama noktası testi (TS 120 EN 1427, ASTM D36)

Yumuşama noktası deneyinin amacı bitümün hangi sıcaklıkta yumuşadığını tespit etmek ve bitümün yüksek sıcaklık performansı ile ilgili ön bilgi elde etmektir.

Bitüm, termoplastik bir malzeme olduğu için sıcaklık yükseldikçe yumuşar, düştükçe sertleşmeye başlar ve bitümün bu özelliği sıcaklık duyarlılığı olarak tanımlanır (Oruç ve ark.,

2015). Sıcak havalarda bitümün deformasyona uğradığı görülmektedir. Bunun sebebi bitümün sıcaklık artışıyla yumuşamaya başlamasıdır (Geçkil, 2013).

Aynı penetrasyona sahip olduğu tespit edilmiş olan bitüm numunelerinin yumuşama noktası değerleri farklılık gösterebilir. Bu durumda daha yüksek yumuşama noktası sıcaklığına sahip olan bitüm numunesinin yüksek sıcaklıktaki penetrasyon değerinin daha düşük olduğu söylenebilir (Tunç, 2001).



Şekil 4.7. (a) Yumuşama noktası haznesi (b) Yumuşama noktası test cihazı

Şekil 4.7’de yumuşama noktası test cihazı verilmiştir. Deneyde kullanılacak yüzük şeklindeki pirinç halkalara önceden ısıtılmış bitüm taşmayacak şekilde yerleştirilir ve oda sıcaklığında soğuması için bekletilir. Yüzük halkalardan taşan bitüm spatula ile temizlenir. Halkaların üzerinde 3,5 gram ağırlığında çelik bilyeler yerleştirilir. İçi su dolu beher ayarlanır ve ısıtıcıya yerleştirilir. Başlangıç sıcaklığı 5 °C olacak şekilde deneye başlanır. Beherdeki su sıcaklığı ilk 3 dakika sabit bırakılır daha sonra dakikada 5 °C artacak şekilde ısıtılır. Beher içindeki halkalarda bulunan bitüm, çelik bilyelerin ve sıcaklığın da etkisiyle bu ısıtılma işlemi ile yavaş yavaş yumuşamaya başlayıp halkalardan aşağı sarmaya başlayacaktır. Bitümün tamamen sarkıp tabandaki levhaya temas ettiği andaki sıcaklık bitüme ait yumuşama noktası sıcaklığı olarak termometreden okunur. Deney iki farklı halka ile yapıldığı için ikisinin de ölçümü ayrı ayrı alınır. Şartnameye göre bu iki ölçüm arasındaki sıcaklık farkının yumuşama noktası 80 °C ‘nin altında olan numuneler için 1 °C’den düşük, 80 °C’nin üstünde olan numuneler için ise 2 °C’den düşük olması gerekmektedir. İki sonuç arasındaki fark belirtilen derecelerden fazla olduğu durumda deney tekrarlanır. Uygun olduğu durumda deneyde tespit

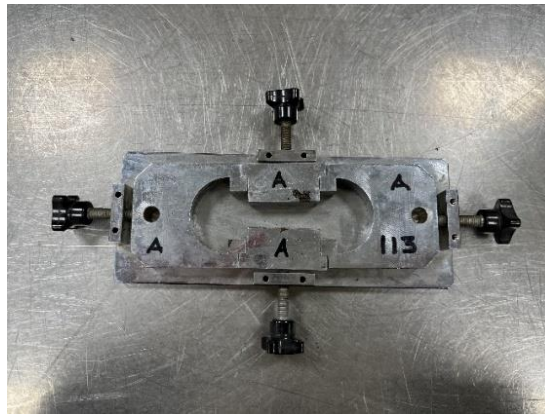
edilen iki ölçümün ortalaması alınır ve bu değer bitüm numunesinin yumuşama noktası sıcaklığı olarak kaydedilir (Komut ve ark., 2021).

4.2.1.4. Kuvvet ölçümlü düktilite deneyi (TS EN 13589)

Düktilite kelime anlamı olarak ‘süneklik’ demektir. Süneklik ise bir malzemenin plastik deformasyona uğrayarak kırılmadan şekil değiştirebilme yeteneğini ifade eder. Düktilite deneyi, bitüm numunelerinin yavaş ve sürekli bir çekme yüküne maruz bırakılması sonucunda, kopma gerçekleşmeden önce ne kadar uzayabildiklerinin belirlenmesine yönelik bir testtir. Bu deney, yalnızca bitümün deformasyon kabiliyeti hakkında bilgi sağlamakla kalmaz; aynı zamanda bitümün sünme davranışı, kohezyon özellikleri ve bağlayıcılık kapasitesi gibi önemli mekanik ve yapısal özelliklerine dair de çıkarımlar yapılmasına olanak tanır (Rodrigues-Alloza ve ark., 2013).

Düktilite deneyi ampirik bir yöntem olması nedeniyle bazı araştırmacılar açısından güvenilirliği konusunda soru işaretleri doğursa da, söz konusu test yöntemi, geleneksel ve yaygın bir uygulama olarak günümüzde geçerliliğini korumaktadır (Pereira ve ark., 2018).

Deneye başlamadan önce bitüm numuneleri etüvde ısıtılarak deney için uygun akışkanlığa getirilir. Numuneler, Şekil 4.8’de görülen ve kenarlarındaki vidalarla sıkıca kapatılan düktilite kaplarına dökülür ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Bu aşamada bitümün deney kaplarına yapışmasını engellemek için yapışma önleyici madde sürmek gibi belli tedbirler alınabilir. Oda sıcaklığında bekletilen numunelerin öncelikle yüzeyleri spatula yardımıyla tıraşlanır ve sonra 5 °C sıcaklıkta 30 dakika boyunca su banyosuna alınır ve orada bekletilir. Numuneler su banyosunda ± 10 dakikalık toleransla yaklaşık 1,5 saat bekletilmektedir.



Şekil 4.8. Pirinç kap modeli

Kalıpların altındaki pirinç tabakaları ve yanlardaki kalıplar söküldükten sonra, numuneler deney için Şekil 4.9’da görülen düktilite cihazına yerleştirilir ve cihaz çalıştırılır. 5 cm/dk’lık sabit çekme hızında cihaz hareket eder ve bitüm numunelerine çekme kuvveti uygular. Uygulanan bu kuvvet sonucunda bitüm numuneleri belirli bir süre sonra kopma (kırılma) meydana gelecek şekilde deformasyona uğrar. Ancak bazı numunelerde, kopma gerçekleşmeyebilir; bu durumda deney, cihazın tanımladığı maksimum uzama sınırına ulaşılan kadar sürdürülür (Erdoğan ve ark., 1998). Numunede kopma olduğu anda cihaz üzerinde bulunan cetvelden bitümün uzama miktarı okunur ve joule cinsinden hesaplanır. Bu değer bitümün sünme kabiliyeti hakkında ön bilgi verir.



Şekil 4.9. (a) Düktilite cihazı (b) Cihaza tablaların yerleştirildiği üst kısım (c) Düktilite cihazı su haznesi

4.2.1.5. Elastik geri dönme deneyi (TS EN 13398)

Elastik geri dönme deneyi, bitümün maruz kaldığı yük sonucu oluşan deformasyonu ne kadar absorbe ederek ilk haline dönme eğilimi gösterdiğini gözlemlemek amacıyla yapılır.

Bitümün, üzerine uygulanan yük kaldırıldıktan sonra gösterdiği elastik geri kazanım davranışı; düşük sıcaklıklarda termal çatlamalara karşı direnci, yüksek sıcaklıklarda ise tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımı artırmaktadır (Porto ve ark., 2018).

Elastik geri dönme deneyi düktilite deneyinde olduğu gibi düktilite deney cihazı ile yapılmaktadır. Bu nedenle deney hazırlık aşaması, düktilite deneyinde olduğu gibidir. Bitüm, istenilen akışkan kıvama ulaşana kadar etüvde ısıtılır ve daha önce Şekil 4.8’de gösterilen kalıplara dökülür. Bu adım öncesinde, kalıplara yapışmayı önleme amaçlı vazelin gibi malzemeler sürülebilir. Kalıptan taşan kısımlar sonradan tıraşlanır. Kalıptaki numunelerin oda sıcaklığına gelmesi için kalıplar bir süre bekletilir. Numuneler oda sıcaklığına geldiğinde deney cihazının su banyosuna alınır ve burada 2,5 saat boyunca bekletilir.

Deneye başlamadan önce, deney cihazının taban plakası çıkarılır ve numuneler düktilite cihazına yerleştirilir. Deney 25 °C’de gerçekleştirilir. Düktilite cihazının tablaları sabit 5 cm/dk çekme hızıyla hareket eder ve bitüm numunelerine çekme kuvveti uygulanır. Numunelerin uzama miktarları, önceden belirlenen deney koşullarına uygun olarak ölçülür ve ± 0.25 cm’lik ölçüm toleransı dahilinde, 20 cm’lik uzama mesafesine ulaşana kadar çekme işlemi sürdürülür. Tablaların çekimi durduğu anda, numuneler uzadıkları kısımların orta noktalarından eşit parçalara kesilir. Bu aşamadan sonra, numunelerin geri dönme oranlarının gözlemlenebilmesi için belirli bir süre geçmesi gerekmektedir. Deneyde bu süre 1 saat olarak ele alınır. Bekleme süresi sona erdiğinde, iki bitüm numunesi ucu arasındaki mesafe ölçülür ve kaydedilir. Aynı bitüm numunesi için iki deney tablası kullanılmış ve bu iki numune sonucunun aritmetik ortalaması alınarak deney sonucu belirlenmiştir.

Numunelerin ilk şekline dönme eğilimini değerlendirebilmek amacıyla, aşağıda verilen formül kullanılmaktadır.

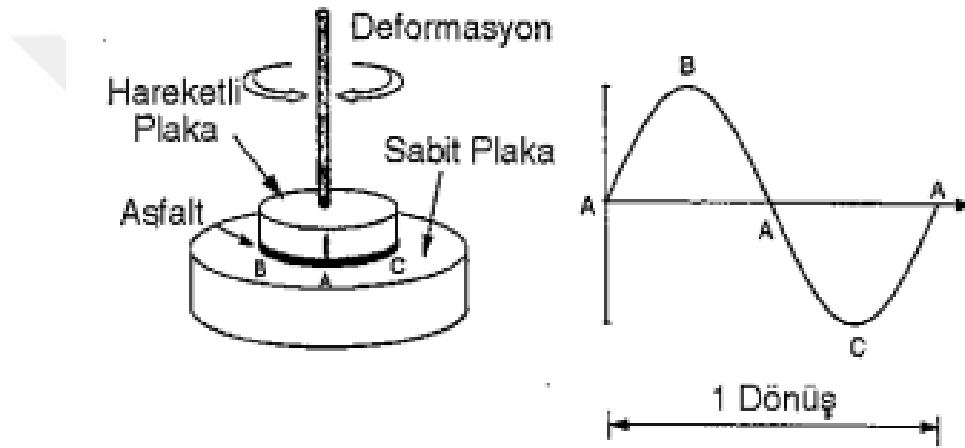
$$\text{Geri kazanım, \%} = \frac{E - X}{E} \times 100 \quad (1)$$

(1) no’lu formül yardımıyla ilk uzama miktarı olan E değerinden 1 saat sürenin sonundaki uzama miktarı olan X çıkarılır ve ilk uzama değerine bölünerek numunenin ne kadar geri dönüşüm sağladığı hesaplanmış olur. Ortaya çıkan değer yüzde olarak bitümün elastik geri dönme oranını verir.

4.2.1.6. Dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi (TS EN 14770, AASHTO T315)

Dinamik kayma reometresi deneyi gelişmiş deney yöntemleri olarak adlandırılan Superpave deney yöntemlerinden biridir. Bu deney, bitümlü bağlayıcının özellikle tekerlek izi deformasyonlarına ve yorulma kaynaklı çatlak oluşumlarına karşı gösterdiği direncin belirlenmesi amacıyla uygulanmaktadır (Köfteci ve ark., 2014).

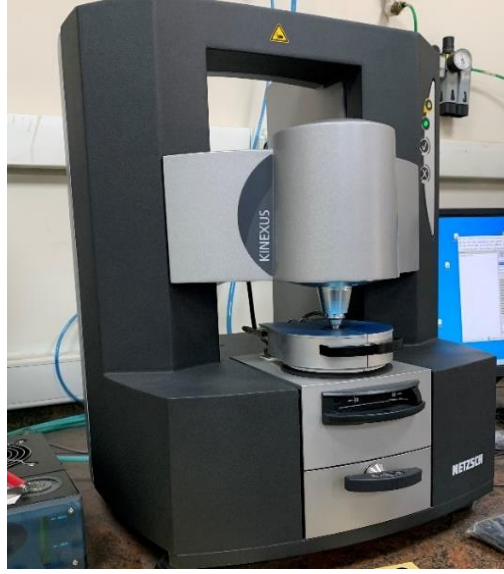
DSR deneyinde sabit bir alt tabaka ve hareket halinde olan bir üst tabaka vardır ve bitüm bu iki tabaka arasına yerleştirilmektedir.



Şekil 4.10. Dinamik kayma reometresinin şematik diyagramı (Tunç, 2001)

Cihaz üzerinde hareket eden hareketli tabaka Şekil 4.10'da görülen A noktasından hareketine başlar. A noktası ile B noktası arasında gidip tekrar A noktasına dönerek, ardından C noktasına ulaşır ve tekrar A noktasına döndüğünde 1 tam devir hareketini tamamlamış olur. Hareketli üst tabakanın 10 devir tamamlaması ile deney sonuçlanır. Deneyde kullanılan cihaz, Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

Bu deney ile bitümlü bağlayıcının faz açısı (δ) ve kompleks kayma modülü (G^*) tespit edilir. G^* , bitümlü bağlayıcının, sürekli yük altında oluşan kesme gerilmelerinde ortaya çıkan deformasyonlara karşı sergilediği direncin bir ölçüsüdür. δ açısı (faz açısı), bitümlü bağlayıcının viskoz deformasyon davranışının bir göstergesidir ve 0° ile 90° arasında değişir. Bu bağlamda, $\delta = 0^\circ$ değeri malzemenin tamamen elastik davranış sergilediğini, $\delta = 90^\circ$ ise tamamen viskoz karakterde olduğunu ifade eder (Gürel, 2022; Airey ve ark., 2002).



Şekil 4.11. DSR deney cihazı

Kayma gerilmesi ve faz açısı arasında bir bağ vardır. Kayma gerilmesine maruz kalan bitüm deformasyona uğrar ve bu deformasyon boyutu faz açısını oluşturur. Yani kayma gerilmesine maruz kalan bitüm elastik özellik gösteriyor ve hemen deforme oluyorsa faz açısı $\delta = 0^\circ$, yani tamamen elastik demektir. Ancak gerilme sonucu $\delta = 90^\circ$ ise bitüm tamamen viskoz özellik gösteriyor demektir. Bitümün viskoelastik özellik gösterdiği orta sıcaklıklarda ise faz açısı değeri $0-90^\circ$ arasında bir değer alır (Airey ve ark., 2002; Zoorob ve ark., 2014).

G^* değerinin yüksek olması bitümün daha sert olduğunun bir göstergesidir. Tekerlek izine karşı direnç parametresi olarak kullanılan $G^*/\sin \delta$ değerinin yüksek olması tercih edilir. Bu durumda iyi performans sergileyen bir bağlayıcının ya sert (yüksek G^*) ya da elastik (düşük δ) olması gerekmektedir (Gürel, 2022; Airey ve ark., 2002, Zoorob ve ark., 2014; Kumar ve Suman, 2017). Hem sert hem de elastik olması ise tekerlek izi bakımından en iyi sonucu verecektir.

Tekerlek izi dayanımının bir göstergesi olan $G^*/\sin \delta$ değerinin yüksek olması deneye tabi tutulan bitüm numunesinin tekerlek izine karşı dayanımının yüksek olduğunu gösterir. Faz açısı (δ) elastik davranışın bir ölçüsü olduğu için düşük faz açısı değeri daha elastik bir bağlayıcının göstergesidir. Ayrıca deney sonucunda bu parametrelere ek olarak şartname kriterleri doğrultusunda deneyde kullanılan bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklık sınıfı (PG) tespit edilir (Oruç ve ark., 2016; Gürel, 2022; Erkuş ve ark., 2020; Maharaj ve ark., 2015).

Deney öncesi etüvde ısıtılarak deney için uygun akışkanlığa getirilmiş olan bitüm deneyde kullanılacak numune kalıbına dökülür ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Soğuyan bitüm kalıplardan çıkarılarak deney cihazının alt tabakasına yerleştirilir. Cihaza yerleştirilen bitüm alt ve üst tabaka etkisiyle bir miktar dışarı taşacaktır. Bu taşan bitümlü kısımlar temizlenir. Alt ve üst tabakanın bu yerleştirme hareketi ile bitüm gerekli sıkışmayı sağlayacaktır. Cihaz çalışmaya başladıktan sonra hareket eden üst tabaka ile birlikte cihaz bitüme hareketli yük uygulamaya başlar. Cihazda her sıcaklık değeri için $G^*/\sin \delta$ değeri hesaplanır. Bir üst sıcaklığa geçiş aşamasında hem numune hem de plakların sıcaklık değişimi için bir müddet beklenir. Deney, şartname kriterlerinin karşılandığı en yüksek sıcaklığa kadar sıcaklık artırılarak devam eder. Şartname kriterlerinin sağlanmadığı sıcaklıkta deney durdurulur. DSR deneyi için yüksek sıcaklık değeri şartname kriterlerinin sağlandığı en son sıcaklık olarak kabul edilir.

Deneyde tekerlek izi dayanım parametresini belirlemek için herhangi bir işlemten geçmemiş bitümlü bağlayıcı ve RTFOT yöntemi ile kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcı kullanılmaktadır. Yorulma parametrelerinin belirlenmesinde PAV yöntemi ile uzun süre yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcı kullanılmaktadır. AASHTO'ya göre orijinal bitüm ve yaşlandırılmış bitümlerin $G^*/\sin \delta$ sınır değerleri belirlenmiştir. Şartnameye göre saf bitümün $G^*/\sin \delta$ değeri minimum 1 kPa olması gerekir. Kısa dönem yaşlandırılmış bitümün $G^*/\sin \delta$ değeri minimum 2.2 kPa olarak belirtilmiştir. Hem RTFOT hem PAV deneyine maruz kalan yani uzun sürede yaşlanmış bitüm numuneleri için $G^* \cdot \sin \delta$ değerinin maksimum 5000 kPa olması istenir (KTŞ, 2023; AASHTO).

4.2.1.7. Dönel ince film ısıtma kaybı (RTFO) deneyi (TS EN 12607-1)

Bitüm, yol kaplamasında kullanılmak üzere hazırlanma sürecinde belli aşamalardan geçmektedir. Bu aşamalar bitümün agrega ile plentte karıştırılması, hazırlanan bitümlü karışımın yola serilmesi ve sıkıştırılması şeklinde sıralanabilir. Bitüm bu süreçte yüksek sıcaklıklara maruz kalarak yaşlanır. Bu deneyin amacı bitümün bahsedilen bu süreçte kısa dönem yaşlanmasını gözlemlemektir (Köfteci ve ark., 2014; Haopeng ve ark., 2020; Luo ve Chen, 2011). RTFO deney cihazında bitüm numuneleri düşey ekseninde daire çizer ve aynı zamanda numunelere hava üflenir. Bu deney California karayolları bölümü tarafından geliştirilmiştir ve TFOT deneyinin ilerletilmiş halidir (Oruç ve ark., 2016; Görkem, 2014).

Deneye başlanmadan önce kullanılacak bitüm numunesi etüvde ısıtılarak deney için uygun akışkanlığa gelmesi sağlanır. Deneyde kullanılacak olan 8 adet cam şişe kullanılmadan önce numaralandırılarak ağırlıkları ölçülür. Bitüm, her bir şişeye 35'er gram olacak şekilde dökülür. Şekil 4.12'de bitüm dolu cam şişe örnekleri gösterilmektedir.

Şekil 4.13'de gösterilen deney cihazı, düşey olarak kendi ekseninde dönen bir sistemden oluşmaktadır. İçerisinde yatay doğrultuda 8 adet silindirik boşluk bulunur ve deney için hazırlanan cam şişeler bu boşluklara yerleştirilir. Daha sonra cihaz çalıştırılır ve taşıyıcı sistemle birlikte dönmeye başlar. Bitüm numuneleriyle dolu cam şişeler, düşey ekseninde en alt konuma geldiğinde cihaz içindeki hava üfleyici, şişelerin içine hava üfler.



Şekil 4.12. RTFOT için hazırlanmış bitüm dolu cam şişeler



Şekil 4.13. RTFOT ısıtma kabı

Deney sıcaklığı $163 \pm 0,5$ °C olarak ayarlanır. Deney, 85 dakika süresince 15 tur dönerek tamamlanır. Süre sonunda, cihazdan çıkarılan numune şişeleri soğutulduktan sonra yeniden tartılır. İlk ölçümde alınan ağırlıklarla karşılaştırılarak aradaki ağırlık değişimi belirlenir. Bu işlem, iki şişe için tekrarlanır. Kalan 6 şişe PAV (Basınçlı Yaşlandırma) koşullandırmasında kullanılmak üzere ayrılır.

$$\text{Ağırlık değişimi, \%} = \frac{\text{İlk ağırlık} - \text{Son ağırlık}}{\text{İlk ağırlık}} \times 100 \quad (2)$$

(2) no.'lu formül ile kütle kaybı yüzdesi tespit edilerek bitümün kısa dönem yaşlanma oranı ile ilgili yorumda bulunulur. Daha sonra, RTFO deneyine maruz kalmış numuneler DSR deneyinde kullanılmak üzere muhafaza edilir.

4.2.1.8. Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi (TS EN 14769)

Bu deneyin amacı, bitümün uzun dönem yaşlanmasını (5-10 yıl) laboratuvar ortamında simüle etmektir. Uzun dönem yaşlanma için PAV uygulanır. Deneyde RTFOT ile kısa dönem yaşlandırılmış bitüm numuneleri kullanılır. Böylece bitümün plentte karıştırma, serme ve sıkıştırma gibi aşamalarındaki kısa dönem yaşlanma süreci deneye dahil edilmiş olur. Bu deney Amerika Stratejik Karayolu Araştırma Programı tarafından geliştirilmiştir (Ahmedzade ve ark., 2008).

PAV cihazı, içerisinde numuneleri yerleştirmek için raflar bulunan seyyar numune rafı olan basınçlı yaşlandırma kabı ve bu kaba basınç oluşturma amacı ile basınçlı kuru hava üfleyen bir silindir sisteminden oluşmaktadır.

RTFOT uygulanan bitüm numuneleri PAV için kullanılacak kıvama gelene kadar etüvde ısıtılır. Yeterince akışkan kıvamda olan numuneler tartılır ve deney kaplarının tabanına yayılacak şekilde 50 gr'lık ölçüde dökülür. Deney kapları, 10 hazneli ve paslanmaz çelikten yapılan numune rafına yerleştirilir. Seyyar numune rafı Şekil 4.14'de gösterilen basınçlı kaba yerleştirilir.



Şekil 4.14. PAV basınçlı yaşlandırma kabı

Bitüm numunelerinin dökülmesi ve yerleştirilmesi aşaması sıcaklık kaybını önlemek amacıyla seri bir şekilde gerçekleştirilir. Basınç kabına yerleştirilmiş olan numuneler 20 saat süreyle 2070 kPa (2,07 MPa) sabit basınçta bekletilir. Deneye başlamadan önce basınç kabı istenilen test sıcaklığına gelene kadar ısıtılır. Bahsedilen bu test sıcaklığı iklim koşullarına göre ayarlanmış olan şartname kriterlerine uygun olarak bağlayıcı sınıfına (PG) göre belirlenir. Şartname koşulları Tablo 4.4’de verilmiştir (Yıldırım, 2022; Gürel, 2022; Zhang ve ark., 2019).

Tablo 4.4. PAV deney sıcaklıklarının belirlenme kriterleri (KTŞ, 2023)

Bağlayıcı Sınıfları	PAV Sıcaklığı (°C)
PG 46-Y	90
PG 52-Y	90
PG 58-Y	100
PG 64-Y	100
PG 70-Y	100-110
PG 76-Y	100-110
PG 82-Y	100-110

Deney sonunda cihaz içerisindeki basıncın dışarıya çıkması için tahliye vanası kullanılır. Bu işlem ortalama 10 dakikada biter. Daha sonra basınç kabı açılır ve numunelerin yer aldığı 10 gözlü raf çıkartılır. Çıkarılan bitüm dolu kaplarda köpürme olabilir. Bu sebeple numuneler ortalama 175 °C sıcaklıkta 30 dakika kadar bunun için uygun olan etüvde bekletilir ve bitümün içine yerleşen hava uzaklaştırılır. PAV deneyi sonucunda etüvden çıkarılan numuneler DSR, BBR ve gerekli olması durumunda DTT deneyleri için muhafaza edilmek üzere bir kenara alınır.

4.2.1.9. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi (TS EN 14771, AASHTO T313)

Düşük sıcaklıklarda yol kaplamasındaki bitümlü karışım büzülme eğilimi gösterir ve bu durum çekme gerilmelerini ortaya çıkarır. Bu gerilme, karışımın mekanik dayanım sınırını aştığında, asfalt kaplamada çatlak oluşumu başlamaktadır. Sıcaklığın daha düşük olduğu kış aylarında bu çatlaklara su dolduğunda donar ve donma kabarmasıyla birlikte buz mercekleri gelişebilir. Bu durum kaplamada ince tane ve boşlukların oluşmasına neden olarak yol kaplamasının yük taşıma kapasitesinin azalması problemini doğurabilmektedir (Sureshkumar , 2011; Geçkil ve ark., 2011).

Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi bitümlü bağlayıcının özellikle iklim şartlarının soğuk olduğu bölgelerde düşük sıcaklık çatlaklarının tespit edilmesi ve düşük sıcaklık davranışının belirlenmesi amacıyla yapılır. Deney, bitüm numunesinin dayanıklılığını ve düşük sıcaklıklarda elastik davranış gösterme yeteneğini belirler (Geçkil ve ark., 2011). BBR deney cihazı Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.15. BBR deney cihazı ve bilgisayar sistemi

Deneye başlamadan önce deney numuneleri belli akışkanlığa gelebilmesi için etüvde ısıtılır. Deneyde kullanılan kalıp birkaç parçadan oluşmaktadır. Deneyde, kiriş kalıpları ve bu kalıpları bir arada tutmak için her kirişte iki adet lastik kullanılmaktadır. Lastiklerin takılmasıyla 125x12,5x6,25mm boyutlarında kiriş numuneleri oluşturulur. Kiriş görünümlü bu kalıplara bitüm numunesi dökülür ve deney için hazırlanmak üzere oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Bitüm dolu kiriş numunesi görselleri Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.16. Bitüm dolu kiriş numuneleri

Soğuyan kalıpların üzerlerinde bitüm fazlalığı oluşursa sıcak spatula ile yüzeyden taşan bitüm temizlenir. Kalıplardan çıkarılan numuneler sıcaklık kontrolü sağlamak için sıvı banyosuna bırakılır. Numuneler sıvı banyosunda 1 saat sabit sıcaklıkta bekletilir. Bu şekilde cihazın içinde yer alan bitüm numunesinin deney sıcaklığına ulaşması sağlanmış olur. Daha sonra deney cihazının yükleme başlığı kiriş şeklindeki numunenin üstüne yerleştirilir.

Deney süresi olan 240 saniye boyunca yükleme başlığı kirişe 980 mN yük uygular. Bu süre zarfında cihaz, kiriş üzerindeki eğilme miktarını ölçer ve elde edilen değerler kaydedilir. BBR deneyi ile bitüm numunesinin sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m) parametreleri cihazla birlikte zamansal olarak gözlemlenmiş olur. Sünme sertliği bitüm numunesinin sünme gerilmelerine karşı gösterdiği direnci temsil ederken, sünme oranı bitüm numunesinin yüklemeye maruz kaldığında sertliğindeki değişimi göstermektedir (Geçkil ve ark., 2011; Wei

ve ark., 2019). Şekil 4.17’de yükleme anındaki ve yükleme tamamlandıktan sonraki kiriş numune görselleri verilmiştir.



Şekil 4.17. (a) Yüklemeye maruz kalan numunenin yerleşimi (b) Deney sonrası kiriş numune görselleri

S ve m değerleri şartname kriterleri ile karşılaştırılır ve bitüm numunesinin soğuk hava koşullarında şartnamenin uygun gördüğü değerler içerisinde kalıp kalmadığı belirlenmiş olur. Bu değerler sünme sertliği (S) için en fazla 300 MPa, sünme oranı (m) için ise en az 0,300 şeklindedir ($S \leq 300$ MPa, $m \geq 0,300$)(KTŞ, 2023). Her deney için şartname limitleri incelenir ve değerler iki parametre açısından da uygunsa bir sonraki sıcaklık aşamasına geçilebilir. Her yeni deneyde yeni bir kiriş numunesi kullanılır. Şartnamenin belirlediği sınırlar aşılanaya kadar deneye devam edilir. Her iki kriteri de (S ve m) sağlayan minimum deney sıcaklığı BBR deneyi için düşük sıcaklık sınıfı olarak tespit edilir.

Bitüm numunesinin iyi bir düşük sıcaklık performansı sergilemesi için sünme sertliği (S) değerinin düşük, sünme oranı (m) değerinin ise yüksek olması istenir (Erkuş ve ark., 2020). Sünme sertliği değerinin 300 MPa'dan fazla olması durumunda bitüm kırılğan bir davranış sergiler ve bu durum bitümün daha fazla çatlamasına sebep olur. Benzer şekilde sünme oranının 0,300 değerinden düşük olması sertliğin arttığını göstermektedir (Oruç ve Yılmaz, 2016; Gürel, 2022).

4.2.1.10. Marshall tasarım deneyi (TS EN 3720/12697, AASHTO T 245, ASTM D 1559)

Marshall tasarım deneyi, bitümlü karışımların kullanılacağı hizmet ömrü süresince çevresel koşullar, iklim koşulları ve trafik yükleri altında istenilen performansı sergileyebilecek ve bunları sağlarken akma ve stabilite sorunu yaşamayacak bir yol kaplaması oluşturmak amacıyla yapılır. Bu yüzden Marshall deneyi ile BSK numunesinin karışım tasarımı için akma-stabilite performansı ölçülür ve hacimsel özellikleri hesaplanır. Stabilite, BSK numunesinin deformasyona karşı gösterdiği dayanımın göstergesidir. Akma ise maksimum yüke erişildiği anda bitümlü karışımında meydana gelen düşey deformasyonu ifade eder. Marshall deneyi karışım hazırlanması, numunelerin sıkıştırılması, numunelerin ağırlık ölçümlerinin yapılması ve numunelere yük uygulanması olmak üzere dört aşamada gerçekleştirilir (Orhan, 2021; Whiteoak, 2004).

Marshall deneyinin amacı;

- Sağlam bir kaplama için optimum bitüm miktarını belirlemek,
- Kaplamanın maruz kalacağı yükler sonucunda deformasyon oluşmayacak düzeyde dayanım sağlamak,
- BSK'nin uygun boşluk içermesi,
- Ekonomik açıdan segregasyon yaşanmadan uygun agrega-bitüm oranı ve agrega gradasyonu belirlemektir (AGDB, 2021).

BSK hazırlama aşamasında gradasyonu belirlenmiş agrega işlenebilirlik ve uygun bir karıştırma için ısıtılır. Diğer yandan bitüm uygun akıcılıkta olması için ısıtılır ve agrega ile mikserde karıştırılarak bitümlü sıcak karışım oluşturulur. Deneye başlamadan önce şartname kriterlerine göre agreganın gradasyonu belirlenir ve bu ölçülere göre ayarlanır. Etüvden çıkarılıp miksere yerleştirilen agregaya hassas terazi yardımıyla farklı oranlarda bitüm ilave edilir. Belirlenen bitüm yüzdeleri arasında %0,5'lik artışlar olacak şekilde yükseltme yapılır. Karıştırma işlemi tamamlanan numuneler bir kürek yardımıyla numune kalıplarına alınır ve şişlenerek yerleştirilir. Belirlenen her bir bitüm yüzdesi için en az 3 briket hazırlanır ve numune kalıplarında oluşturulan bu silindirik briketler şartname kriterlerine göre 75 darbe uygulanarak Şekil 4.18'de verilen deney tokmağında sıkıştırılır.



Şekil 4.18. Marshall deney tokmağı



Şekil 4.19. Marshall stabilite ve akma cihazı

Bu işlem numunenin her iki yüzüne de uygulanır. Tokmaktama işlemi tamamlanan numuneler bir gün oda sıcaklığında bekletilir. Briketler karışmaması için numaralandırma yapılır ve yükseklikleri ölçülür. Ardından briket numuneleri havada, suda ve suya doymun halde ağırlıkça ölçülür. Bu ölçümler kullanılarak briketlerin yoğunluk ve hacimleri hesaplanır. Her bitüm yüzdesi için pratik yoğunluk (D_p), teorik özgül ağırlık (D_t), hava boşluğu (V_h), agregalar arası boşluk (VMA), asfaltla dolu boşluk (V_f) değerleri hesaplanır. Briketler, 60°C sıcaklıktaki su banyosunda 30-40 dakika süreyle şartlandırıldıktan sonra, Şekil 4.19'da gösterilen cihaz kullanılarak stabilite ve akma değerlerinin belirlenmesi amacıyla yüklemeye tabi tutulur (Yıldırım, 2022; AGDB, 2021).

Deney sonuçları Marshall tablosuna işlenir. Bu sayede, farklı bitüm oranlarına sahip numunelere ait stabilite, akma ve yoğunluk gibi mühendislik parametrelerine ilişkin veriler kullanılarak oluşturulan grafikler değerlendirilir ve bu değerlendirme sonucunda, tasarımı yapılan bitümlü karışımın optimum bitüm oranı belirlenir (Arslan, 2010; Yıldırım, 2022).

4.2.1.11. Nicholson soyulma deneyi (ASTM D 1664)

Agrega ve bitüm arasındaki adezyonun su etkisiyle ortadan kalkmasına soyulma denir. Bitümün agrega yüzeyinden ayrılmasına karşı gösterdiği direnç soyulma direnci olarak isimlendirilir. Nicholson soyulma deneyi bitümün agrega yüzeyine yapışma yeteneğini ölçmek için uygulanır (Karadağ ve Saltan, 2021).

Deney için 9.5 – 4.75 mm'lik elekler arasında kalan 100 gr agrega alınır ve yıkanarak etüvde kurutulur. 100 gr agrega beher içerisine alınarak 150°C sıcaklıkta ısıtılır. Isıtılmış agrega üzerine 5 gr bitüm dökülür ve agregaların yüzeyini kaplayana kadar karıştırılır. Üzerine saf su yerleştirilerek ağzı kapatılan beher içindeki numuneler 60°C sıcaklıktaki etüvde 1 gün bekletilir.

Etüvde 1 gün bekletilmiş olan numuneler petri kaplarına alınır. Numunelerin üzerindeki soyulma görsel olarak ve su içindeyken ışık yoluyla tayin edilir. Burada, soyulmamış agrega numunesinin yüzey alanı, deneyde kullanılan toplam agrega yüzey alanına oranlanarak gözlemler yapılır ve numunenin soyulma direnci belirlenir. Karayolu Teknik Şartnamesi'nce (2023) belirlenmiş sınırlara göre agrega numunelerinin en az %60'ının soyulmadan bitümle kaplı kalması gerekmektedir (KTŞ, 2023).

4.2.1.12. İndirekt çekme mukavemeti deneyi (İÇM)(ISRM 1981)

Bu deney bitümlü sıcak karışımların hizmet ömrü süresince, termal ve mekanik etkiler sonucu oluşabilecek çatlaklara karşı dirençlerinin belirlenmesi amacıyla uygulanmaktadır. Ayrıca kaplamanın çekme dayanımı hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Deneyde elde edilen sonuçlar asfalt kaplamanın çatlamaya karşı dayanım performansını değerlendirmede kullanılmaktadır (Topaloğlu ve Çetin, 2018).

Deneyin uygulanmasında Marshall tasarım yöntemi esas alınarak hazırlanmış briket numuneleri kullanılmaktadır. Numuneler, Marshall yöntemine uygun olarak optimum bitüm içeriğinde hazırlanmakta, ardından belirlenen koşullar altında stabilite ve akma değerini ölçen Şekil 4.25’de gösterilen Marshall test cihazı kullanılarak deneye başlanmaktadır.

Deney öncesinde, briketlerin çap ve yükseklikleri kumpas yardımıyla ölçülür. Ölçümleri yapılan briketler deneyin gerçekleştirileceği sıcaklığa ulaşabilmesi amacıyla deney sıcaklığındaki su banyosunda yaklaşık 2 saat süreyle bekletilir. Belirlenen süre sonunda su banyosundan çıkarılan numuneler Marshall cihazına yatay pozisyonda yerleştirilir. Numunelere cihaz tarafından sürekli 50 mm/dk’lık yük uygulanır. Numune içerisinde oluşan düşey çekme gerilmesi, zamanla malzemenin kırılmasına neden olur ve bu kırılmanın gerçekleştiği anda cihaz tarafından ölçülen maksimum yük değeri kaydedilir.

$$İÇM = \frac{2P_{max}}{\pi.t.d} \quad (3)$$

(3) no’lu formül ile indirekt çekme mukavemeti tespit edilerek bitüm numunesinin çekme mukavemeti ile ilgili yorumda bulunulur.

İÇM = İndirekt Çekme Mukavemeti (kg/cm²)

P_{max} = Kırılmaya yol açan maksimum yük (kg)

t = Ortalama numune yüksekliği (mm)

d = numune çapı (mm)

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm deneysel uygulamalara ait sonuçlara yer verilmektedir. Elde edilen veriler, literatürde daha önce yapılmış benzer çalışmaların bulgularıyla karşılaştırılmış; benzerlik ve farklılık gösteren sonuçlar bilimsel bağlamda analiz edilerek değerlendirilmiştir.

5.1. Viskozite Testi Sonuçları

OEKB katkı maddesi ile bitümün uygun karıştırma süre ve sıcaklığını belirlemek amacıyla, viskozite testi kullanılarak ön çalışmalar yapılmıştır. Aynı miktarda (%3) katkı maddesi içeren farklı karıştırma süresi ve sıcaklığına sahip bitüm numuneleri viskozite deneyine tabi tutulmuştur. Bu kapsamda tercih edilen karıştırma süresi ve sıcaklıkları Tablo 5.1’de sunulmuştur.

Tablo 5.1. Farklı karıştırma süre ve sıcaklık kombinasyonları

Karıştırma Sıcaklığı ve Süresi
120 °C’de 10 dakika
120 °C’de 20 dakika
150 °C’de 10 dakika
150 °C’de 20 dakika
150 °C’de 30 dakika

Deneyde yapılan ön çalışmalarda, hazırlanan farklı karıştırma süresi ve karıştırma sıcaklığına sahip bitüm numuneleri Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Farklı karıştırma süre ve sıcaklığında hazırlanmış modifiye bitümler

Hazırlanan beş farklı karışım modelinin, 135°C’de viskozite ölçümleri yapılmıştır. Tüm örnekler için ölçümler 20 rpm ve 150 rpm olmak üzere iki farklı devirde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, OEKB ilavesinin bitüm viskozite değerini azalttığını göstermiştir. Test sonuçlarına göre bitümün OEKB ile modifiye edilmesi için uygun olan karıştırma sıcaklığı 150°C, karıştırma süresi 20 dakika olarak saptanmıştır.

Bitümün modifiye edilmesi sırasında sıcaklık takibi Şekil 5.2’de verilmiştir.



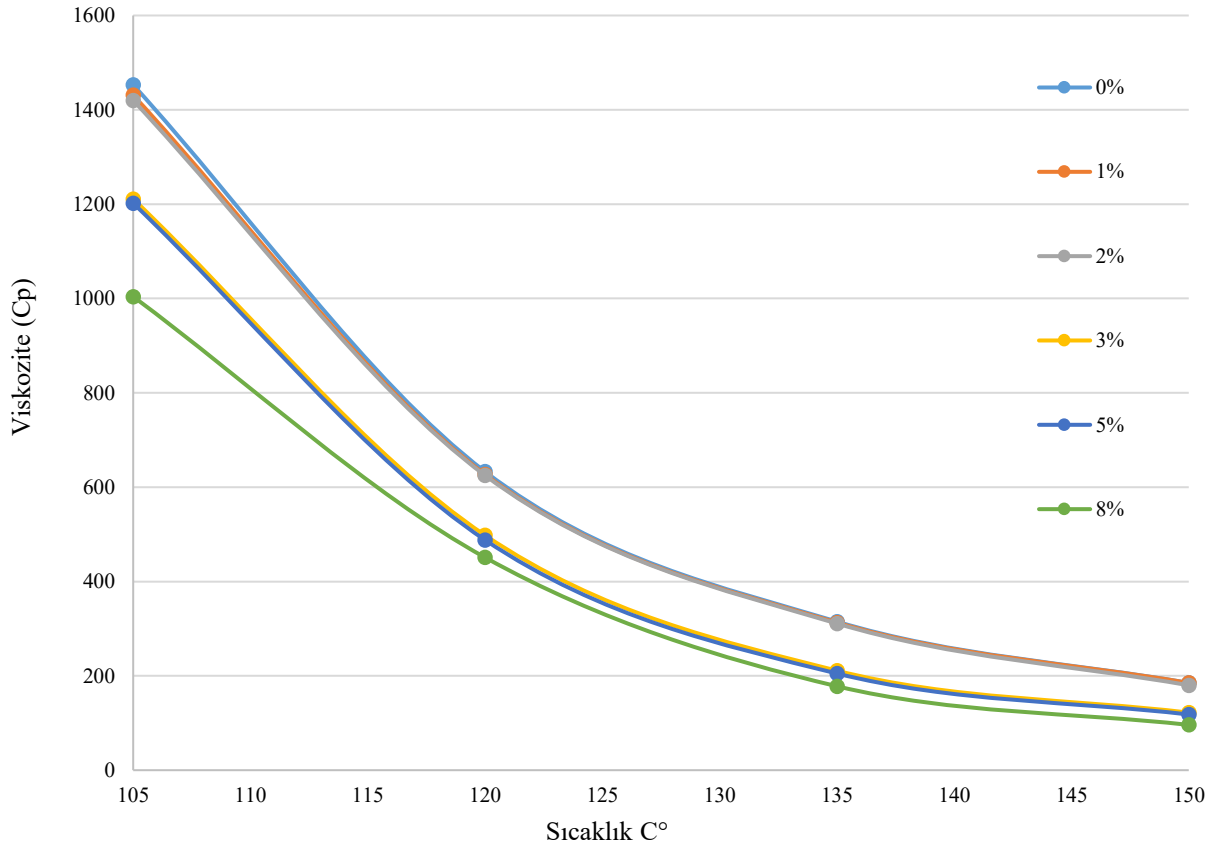
Şekil 5.2. Modifikasyon esnasında sıcaklık takibi

Karıştırma sıcaklığının belirlenmesinden sonra %1, %2, %3, %5 ve %8 oranlarında OEKB içeren numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan bitüm numunelerine 105°C, 120°C, 135°C ve 150°C’de uygulanan viskozite test sonuçları Tablo 5.2’de verilmiştir.

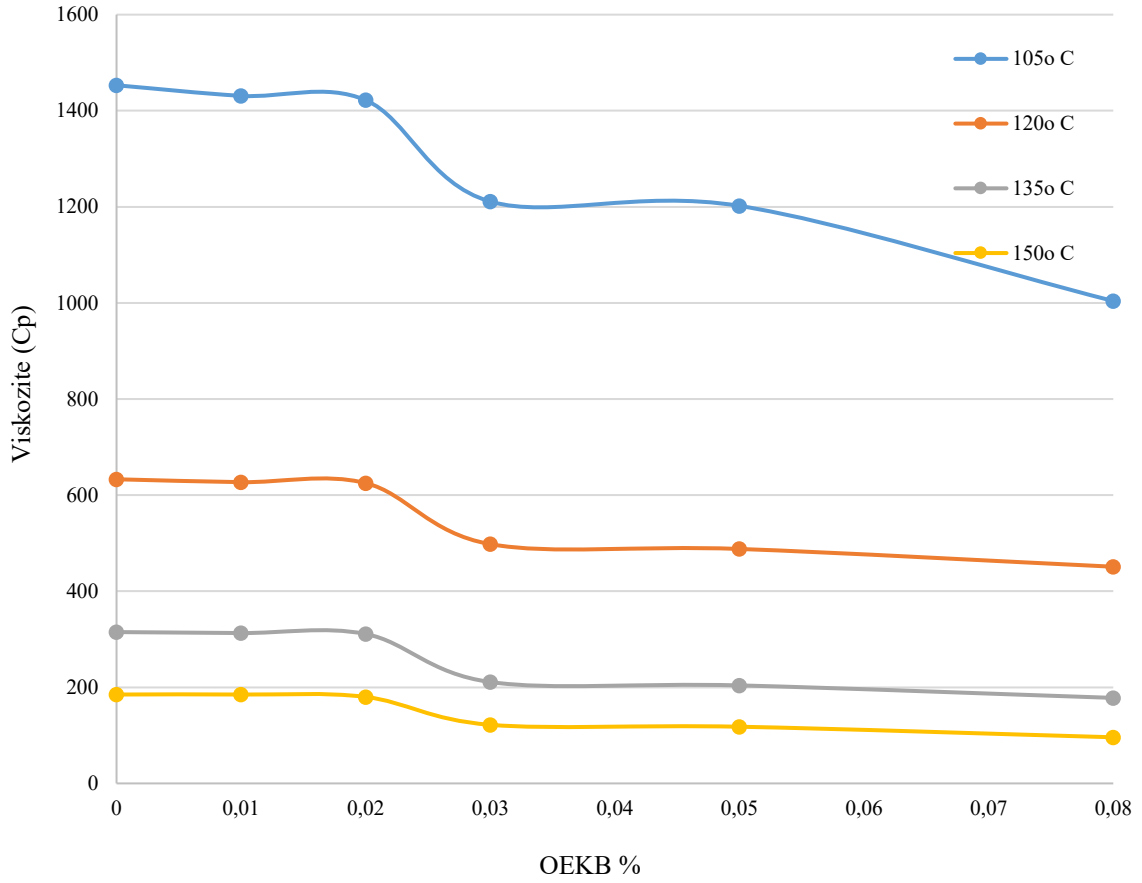
Tablo 5.2. Viskozite test sonuçları (Cp)

	105°C	120°C	135°C	150°C
%0	1453	633	315	185
%1	1431	627	313	185
%2	1422	625	311	180
%3	1211	498	211	122
%5	1202	488	204	118
%8	1004	451	178	96

Saf bitüm ve tüm modifiye bitüm numunelerinde sıcaklık arttıkça viskozitenin azaldığı, dolayısıyla bitümün daha akışkan hale geldiği görülmektedir (Şekil 5.3-Şekil 5.4). %1 ve %2 oranlarında modifiye edilmiş bitüm numunelerinin saf bitüme yakın sonuçlar verirken, %3, %5 ve %8 oranlarında modifiye edilmiş bitüm numunelerinin tüm sıcaklık ölçülerinde (105°C, 120°C, 135°C ve 150°C) saf bitüme göre viskozite değerlerinde önemli azalmalar olduğu görülmüştür. Üstelik OEKB oranı arttıkça bu azalmanın daha da belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. En yüksek viskozite değerleri saf bitümde, en düşük viskozite değerleri ise %8 oranında modifiye edilmiş bitüm numunesinde elde edilmiştir. Yani, bitümde OEKB içeriği arttıkça viskozite değerleri azalmış, bitümün akışkanlığı artmıştır. Çubuk ve ark. tarafından yürütülen çalışmada, bitüm modifikasyonunda organik esaslı magnezyum (Mg) kullanılmış; benzer şekilde, Çavdar ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise SBS (Stiren-Bütadien-Stiren) polimerine atık yağ (WCO) ilavesiyle bitüm modifiye edilmiştir. Her iki çalışmada da katkı oranı arttıkça viskozite değerinde azalma gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, modifikasyonun bitümün sıcaklık karşısındaki akışkanlık özelliklerini olumlu yönde etkilediğini, dolayısıyla işlenebilirliği artırarak enerji tüketimini azalttığını göstermektedir (Çubuk ve ark., 2013; Çavdar ve ark., 2024).



Şekil 5.3. Viskozite test sonuçları (°C)



Şekil 5.4. Viskozite test sonuçları (OEKB %)

Yüksek sıcaklıklarda viskozitenin düşmesi, bitüm numunelerinin plentte agrega ile karıştırılması için gerekli kıvama (ort 0.2 Pa.s) erişme sıcaklığının azalmasına olanak tanıyarak daha düşük sıcaklık maruziyeti sonucu kısa dönemde meydana gelen yaşlanma da azaltacaktır (Şekil 5.3) (ARGE, 2021).

SBS ile modifiye edilmiş bitüme belli oranlarda (%1, %3, %5, %7 ve %9) atık yağ (WCO) ilavesinin sonuçlarının incelendiği çalışmada bitüm içeriğindeki atık yağ oranı arttıkça yüksek sıcaklıklarda viskozitenin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durumun işlenebilirliği artıracığı, enerji tüketimini azaltacağı, bitüm ve agrega arasındaki yapışmayı arttıracığı, soyulma direncini olumlu etkileyeceği ve düşük sıcaklıkta kullanımının uygun olacağı belirtilmiştir (Çavdar ve ark., 2024).

Organik esaslı magnezyum bileşiği bitüm modifiyesinde kullanılmış ve gerçekleştirilen viskozite testleri sonucunda, bu katkı maddesinin OEKB’de olduğu gibi bitüm

viskozitesini azalttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun bitümün işlenebilirliğini artırabileceği belirtilmiştir (Çubuk ve ark., 2013).

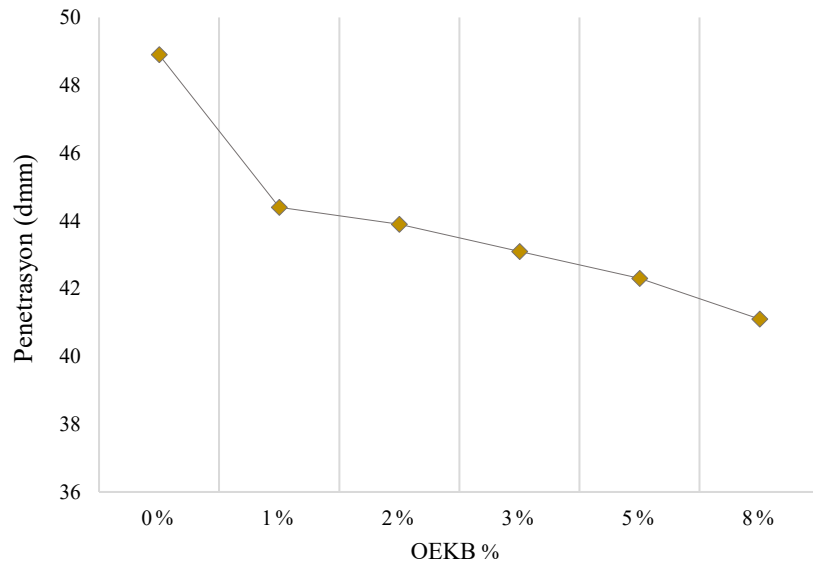
5.2. Penetrasyon Test Sonuçları

Saf bitüme ve OEKB ilavesiyle modifiye edilmiş bitümlere uygulanan penetrasyon test sonuçları Tablo 5.3’de sunulmuştur.

Tablo 5.3. Penetrasyon test sonuçları

OEKB (%)	Penetrasyon (dmm)
0	48,9
1	44,4
2	43,9
3	43,1
5	42,3
8	41,1

Orijinal bitüm için penetrasyon değeri 48,9 dmm olarak ölçülmüştür. OEKB ilave edilen bitümlerde ise penetrasyon değerlerinde kademeli bir azalma gözlemlenmiştir. %1 OEKB içeren bitümde bu değer 44,4 dmm olarak ölçülmüş ve Tablo 5.3’te de görüldüğü üzere katkı maddesi arttıkça penetrasyon değerleri azalarak en düşük değer %8 OEKB içeren bitümde 41,1 dmm olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafik olarak Şekil 5.5’de sunulmuştur.



Şekil 5.5. Penetrasyon testi sonuçları

Bitüm modifikasyonunda kullanılan OEKB oranına bağlı olarak penetrasyon değerinde belirgin bir düşüş meydana gelmiştir. Saf bitüme kıyasla, %1 katkılı bitümde %9,2, %2 katkılı bitümde %10,2, %3 katkılı bitümde %11,86, %5 katkılı bitümde %13,49 ve %8 katkılı bitümde %15,95 oranında azalma gözlenmiştir. Bu durum, OEKB'nin test sıcaklığı olan 25°C'de bitümün sertliğini artırarak penetrasyon değerini azalttığını ve katkı miktarı arttıkça bu etkinin daha belirgin hâle geldiğini göstermektedir.

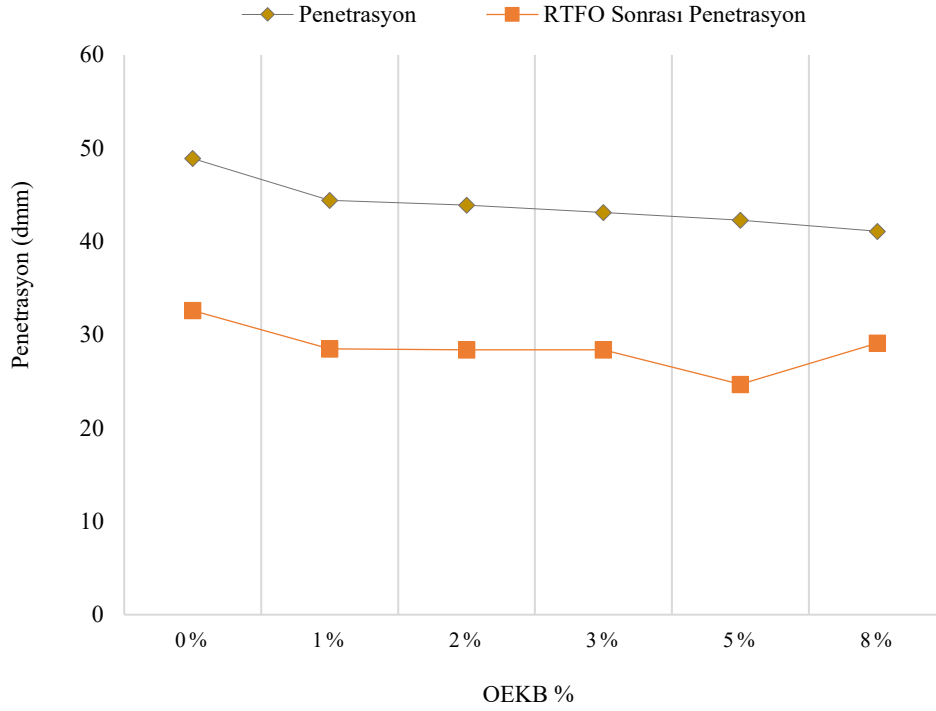
Penetrasyon değeri ile bitümün kıvamı arasında ters orantılı bir ilişki bulunmaktadır; yani penetrasyon değeri azaldıkça bitümün kıvamı artmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, OEKB'nin bitümün kıvamını artırdığı ve bu etkinin katkı oranı yükseldikçe daha belirgin hâle geldiği tespit edilmiştir. Bilindiği üzere, yüksek penetrasyon değerine sahip bitümler daha yumuşak yapıda olup genellikle soğuk iklim koşullarında tercih edilmekte, düşük penetrasyon değerine sahip olan daha sert bitümler ise sıcak iklimlerde daha uygun performans sergilemektedir (Arslan ve ark., 2020). Bu doğrultuda, penetrasyon testi sonuçları OEKB'nin bitümün kıvamını artırarak sıcak iklim koşullarına karşı özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir.

RTFO koşullandırması sonrası kısa dönem yaşlandırılmış bitüm numunelerinin penetrasyon testi tekrar edilmiştir. Sonuçlar Tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablo 5.4. RTFOT sonrası penetrasyon test sonuçları

OEKB (%)	Penetrasyon (dmm)
0	32,6
1	28,5
2	28,4
3	28,4
5	24,7
8	29,1

Yaşlandırılmamış bitüm numunelerine ve kısa dönem yaşlandırılmış bitüm numunelerine ait penetrasyon değerleri karşılaştırıldığında, yaşlandırılmış numunelerin penetrasyon değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler Şekil 5.6'da sunulmuştur.



Şekil 5.6. RTFOT sonrası penetrasyon sonuçları (dmm)

RTFO koşullandırması sonrası penetrasyon değerleri incelendiğinde, saf bitümün 32,6 dmm, %1 modifiye bitümün 28,5 dmm, %2 modifiye bitümün 28,4 dmm, %3 modifiye bitümün 28,4 dmm, %5 modifiye bitümün 24,7 dmm ve %8 modifiye bitümün 29,1 dmm olarak ölçüldüğü belirlenmiştir. Yaşlandırılmış numunelerin penetrasyon değerlerinin yaşlandırılmamış numunelerin ilk ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırıldığında beklendiği üzere daha düşük oldukları görülmüştür. Ayrıca, kısa dönem yaşlanma öncesinde OEKB ile meydana gelen penetrasyon azalma oranlarının yaşlandırma sonrası daha belirgin hale geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, hem orijinal hem de modifiye bitümlerin kısa dönem yaşlanma sonucunda kıvamlarının arttığını göstermektedir. Benzer bir sonuç 2014 yılında yapılan çalışmada ortaya çıkmıştır. 60/70 penetrasyon dereceli bitüm atık lastikle %2 ve %20 aralığında 10 farklı oranda modifiye edilmiştir. Modifiye edilen bitüm numunelerine uygulanan penetrasyon testi sonucunda numunelerin penetrasyon değerlerinin katkı oranı arttıkça azaldığı gözlenmiştir. Bu sonucun bitümü daha kıvamlı hale getirdiği ve bunun tekerlek izi sorununu azaltacağı ancak bitümün daha sert olmasının esnekliğini de düşüreceği değerlendirilmiştir (Oyedepo ve Oluwajana, 2014). Literatürdeki bor içeren çalışmalar incelendiğinde OEKB'ye benzer olarak bitüme yapılan bor ilavelerinin bitümün penetrasyon değerini azalttığı belirlenmiştir (Gürü ve ark., 2016; Çalışıcı ve ark., 2023; Çalışıcı ve ark., 2018; Oruç ve ark., 2015; Oruç ve Yılmaz, 2016).

5.3. Yumuşama Noktası Testi Sonuçları

Saf ve modifiye edilmiş bitümlere uygulanmış olan yumuşama noktası test sonuçları Tablo 5.5’de sunulmuştur.

Tablo 5.5. Numunelerin yumuşama noktası sıcaklık değerleri

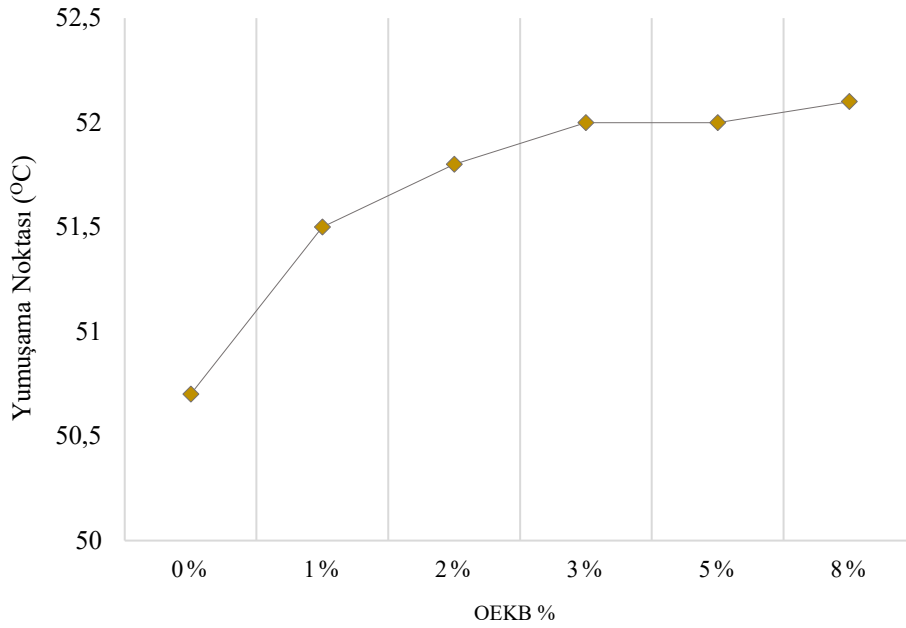
OEKB (%)	Yumuşama noktası (°C)
0	50,7
1	51,5
2	51,8
3	52
5	52
8	52,1

Saf bitüm için yumuşama noktası değeri 50,7 °C olarak ölçülmüştür. OEKB ilave edilen modifiye bitümlerde yumuşama noktasında kademeli bir artış gözlemlenmiştir. %1 OEKB içeren bitümde yumuşama noktası 51,5°C’ye yükselerek saf bitüme göre %1,57 oranında artış göstermiştir. Benzer şekilde, %2 OEKB katkısıyla bu değer 51,8°C’ye (%2,17 artış), %3 katkıda 52°C’ye (%2,56 artış), %5 katkıda yine 52°C’ye (%2,56 artış) ve %8 OEKB katkısı ile 52,1°C’ye ulaşarak %2,76 oranında bir artış kaydedilmiştir.

Elde edilen veriler incelendiğinde bitüm içeriğindeki OEKB miktarı arttıkça yumuşama noktasının arttığı görülmektedir (Şekil 5.7). Bu sonuçlar, OEKB katkısının bitümün yumuşama noktasını artırdığını ve bu etkinin katkı oranı arttıkça belirginleştiğini ortaya koymaktadır. Özellikle %8 katkı oranı ile elde edilen 52,1°C’lik yumuşama noktası, en yüksek artış temsil etmektedir. Bu durum, OEKB katkısının bitümün yüksek sıcaklık dayanımını iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Borun bitüm modifiyeri olarak kullanıldığı literatür çalışmaları incelendiğinde, OEKB modifikasyonunda olduğu gibi, bor ile genellikle yumuşama noktasında artış meydana geldiği görülmüştür. Polibor bileşikleri ve bor içeren reçine bileşikleri bitümün yumuşama noktasında artış meydana getiren borlu katkı maddeleri arasındadır (Arslan ve ark., 2014; Arslan ve ark., 2011; Yeşilçiçek ve ark., 2022; Bozdemir ve ark., 2023). Ancak, borun yumuşama noktasını azalttığı durumlar da dikkat çekmektedir (Arslan ve ark., 2014, Arslan ve ark., 2012). Bu

durum, bor ile farklı iklim koşullarına uygun nitelikte katkı maddelerinin sentezlenebilme potansiyeli olabileceğine yönelik öngörü sunmaktadır.



Şekil 5.7. Yumuşama noktası testi sonuçları

Yumuşama noktasındaki artış, bitümün kıvamında bir artış meydana geldiğini göstermektedir. Bu bulgunun penetrasyon deneyi sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Yumuşama noktası daha yüksek olan bitümler, sıcaklık artışına karşı daha yüksek termal stabiliteye sahiptir. Başka bir ifadeyle, yumuşama noktasının yüksek olması, bitümün artan sıcaklık koşullarında daha az akışkanlık göstereceğinin ve formunu daha iyi koruyacağını bir göstergesidir. Yumuşama noktası yüksek olan bitümler yüksek sıcaklıklarda daha az deformasyon göstereceğinden, bu bitümler ile hazırlanan bitüm-agrega karışımlarında yüksek sıcaklıklarda ortaya çıkan tekerlek izi oturmaları da daha az görülmektedir (Geçkil, 2013).

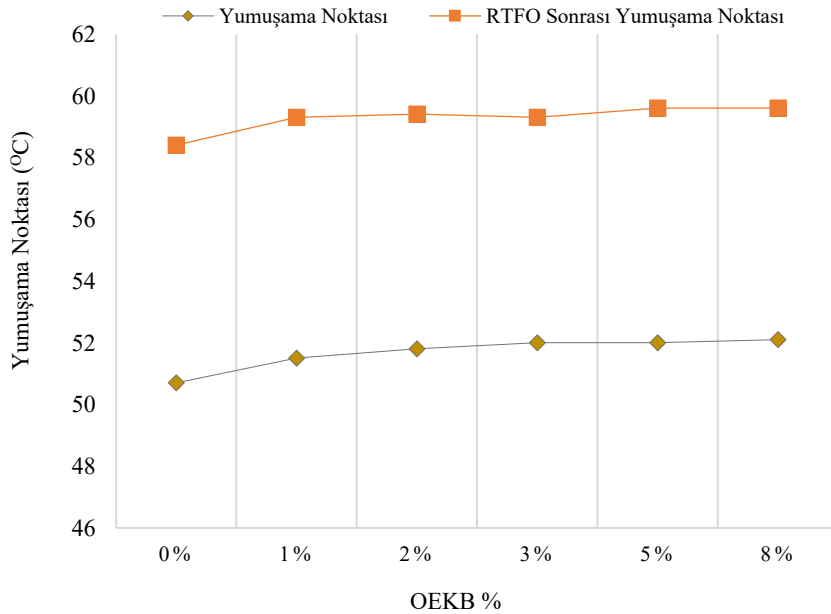
2020 yılında yapılan çalışmada, bitüm üç farklı katkı maddesiyle (atık araç lastiği, SBS ve Sasobit) modifiye edilmiş ve bütün katkı maddeleri ile bitümün yumuşama noktasının arttığı tespit edilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, yumuşama noktası daha yüksek olan bitümün, yüksek sıcaklık koşullarında meydana gelebilecek tekerlek izi oluşumu gibi plastik deformasyonlara karşı daha dirençli olacağı değerlendirilmiştir (Erkuş ve ark., 2020).

Kısa süreli yaşlandırmaya tabi tutulan numunelere tekrar yumuşama noktası testi uygulanmış olup, elde edilen sonuçlar Tablo 5.6'da sunulmuştur.

Tablo 5.6. Yaşlandırılmış numunelerin yumuşama noktası sıcaklıkları

OEKB (%)	Yumuşama noktası (°C)
0	58,4
1	59,3
2	59,4
3	59,3
5	59,6
8	59,6

Orijinal bitümün yumuşama noktası 58,4°C olarak ölçülmüştür. %1 ve %3 oranlarında modifiye edilmiş bitümlerde yumuşama noktası değerleri 59,3°C'ye yükselmiş ve bu durum saf bitüme kıyasla yaklaşık %1,5'lik bir artışa karşılık gelmiştir. %2 katkılı bitümün yumuşama noktası 59,4°C olarak belirlenmiş ve saf bitüme göre %1,7 oranında artış göstermiştir. %5 ve %8 oranlarındaki modifiye bitümlerde ise yumuşama noktası 59,6°C'ye ulaşmış ve bu değer saf bitüme göre yaklaşık %2 oranında artışa işaret etmiştir. Atık bor malzemesinin bitümde katkı maddesi olarak kullanıldığı tez çalışmasında, penetrasyon testleri sonucunda azalma, yumuşama noktası testleriyle ise artış elde edilmiştir. Kısa süreli yaşlanma sonrasında, modifiye bitümlerin özelliklerini koruduğu ve benzer sonuçların devam ettiği gözlemlenmiştir. Yapılan değerlendirmelerde, bor katkısının hem düşük hem de yüksek sıcaklık performansı açısından olumsuz bir etki oluşturmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, borun düşük maliyetli olması nedeniyle katkı maddesi olarak kullanılmasının avantajlı olacağı sonucuna varılmıştır (Gürel, 2022).



Şekil 5.8. RTFO sonrası yumuşama noktası sonuçları

Kısa dönem yaşlanmaya maruz kalan numunelerde de yaşlandırılmamış numune örneklerine benzer şekilde, saf bitüme göre modifiye bitüm numunelerinin yumuşama noktası değerlerinde artış gözlenmiştir (Şekil 5.8).

OEKB ile elde edilen bu sonuçlar 2016 yılında gerçekleştirilen bir çalışma ile desteklenmektedir. Çalışmada kullanılan siklik borat ester (CBE) katkısı %1, %2, %4 ve %6 oranlarında bitüm modifikasyonunda kullanılmıştır. RTFO koşullandırmasının ardından bitüm numunelerinin penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, katkı maddesi oranının artmasıyla penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası değerlerinin ise arttığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, CBE katkısının saf bitümün kıvamını artırdığı ve sıcaklık hassasiyetini azalttığı şeklinde yorumlanmıştır (Oruç ve Yılmaz, 2016).

5.4. Kuvvet Ölçümlü Düktilite Sonuçları

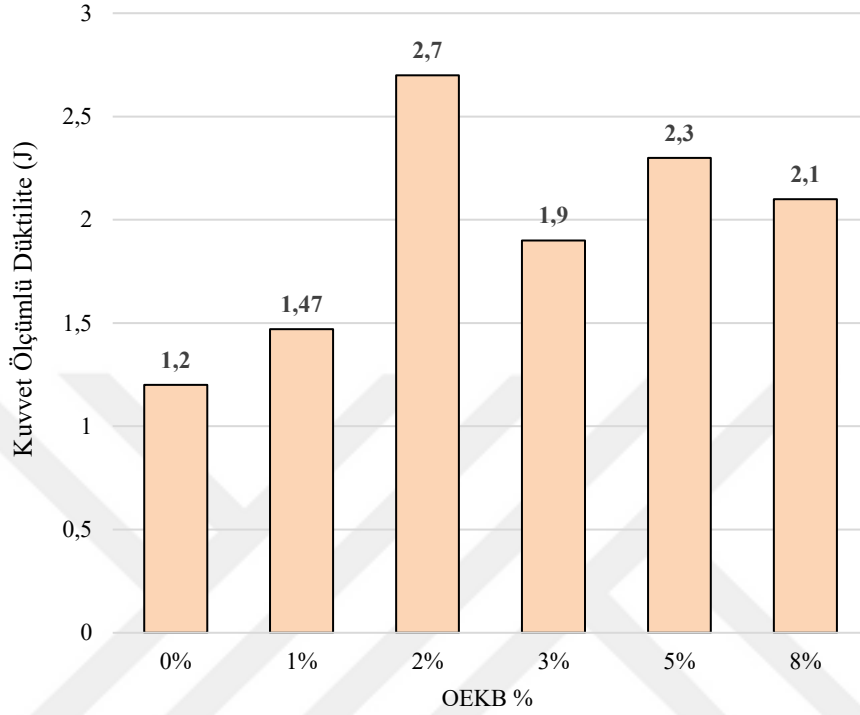
Düktilite deneyi ile bitümün çekme kuvveti sonucu uzayabilme kabiliyeti ölçülmektedir. Tablo 5.7’de, saf ve modifiye bitüm numunelerine ait kopmadan önceki uzama için gerekli olan enerji değerleri verilmiştir.

Tablo 5.7. Numunelerin kuvvet ölçümlü düktilite değerleri

OEKB (%)	Kuvvet Ölçümlü Düktilite (J)
0	1,2
1	1,47
2	2,7
3	1,9
5	2,3
8	2,1

Orijinal bitümün kopma anındaki uzama enerjisi 1,2 joule olarak ölçülmüştür (Şekil 5.9). Modifiye bitümlerde ise bu değer %1 OEKB oranında 1,47 joule, %2 OEKB’de 2,7 joule, %3 OEKB oranında 1,9 joule, %5 ve %8 OEKB oranlarında sırasıyla katkıda 2,3 joule ve 2,1 joule olarak belirlenmiştir. Katkı maddesi ilave edilen bitüm numunelerinin kopması için saf bitüme kıyasla daha fazla enerji gerektiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, OEKB modifikasyonunun bitümün kohezyon özelliğini geliştirdiğini göstermiştir. En yüksek kohezyon artışı %2 OEKB modifiyeli bitümde elde edilmiştir. %2 katkı oranı ile modifiye edilen

bitümde, sünme enerjisinin saf bitüme göre yaklaşık 2,25 kat arttığı gözlenmiştir. %5 katkı içeren numunede ise bu artış 2,3 joule seviyesinde gerçekleşmiş ve saf bitüme kıyasla yaklaşık 2 katına yakın bir yükselme sağlanmıştır.



Şekil 5.9. Bitüm numunelerin sünme miktarları (joule)

Arazi çalışmalarından elde edilen farklı bitüm numuneleri üzerinden yapılan testler sonucunda düşük süneklığe sahip olan bitüm numunelerinde daha çok çatlak oluştuğu görülmüştür (Hasan ve ark., 2023). Bu bulgular doğrultusunda, orijinal bitüme OEKB ilave edilmesiyle düşük sıcaklık koşullarında daha az çatlak oluşacağı düşünülebilir.

OEKB'nin aksine, etilen glikol bazlı borik asitin (EGBAP) ve toz halindeki borun %1-%5 aralığında ayrı ayrı modifiyer olarak kullanıldığı tez çalışmasında uygulanan düktilite testlerinden borun düktilite üzerinde olumsuz etki oluşturabileceği görülmüştür. EGBAP ve toz halinde borun bitümde daha fazla kullanılmasıyla düktilite performansı daha çok azalırken EGBAP'a kıyasla toz halinde borun daha kötü düktilite sonuçları sağladığı tespit edilmiştir (Chai, 2015). Literatürde bulunan bor esaslı katkı maddeleri arasında organik esaslı borik asit bileşiğinin düktilite özelliğinde etkili artış sağladığı görülmüştür (Arlan ve ark., 2012).

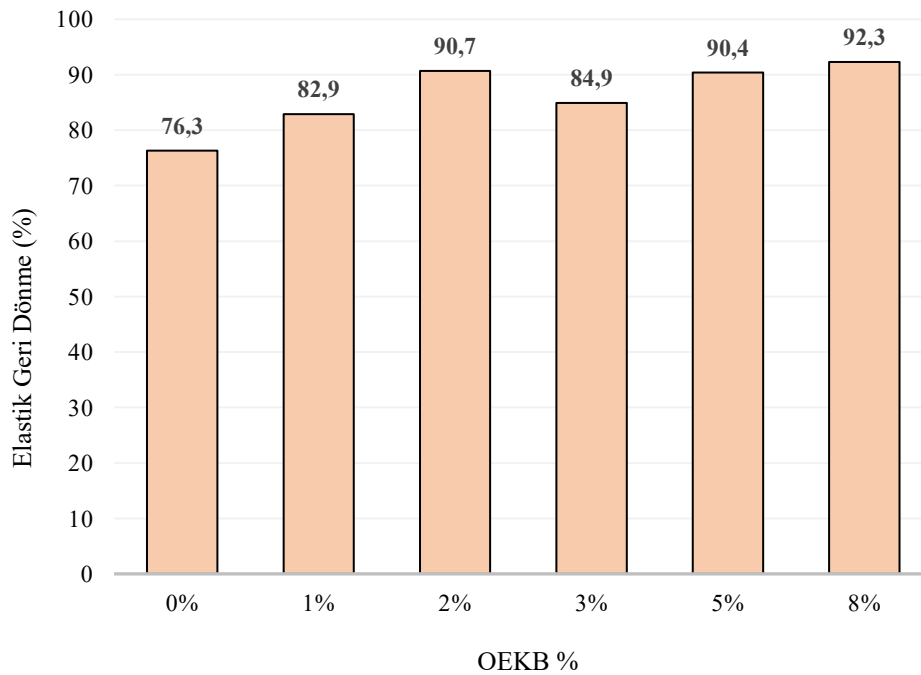
5.5. Elastik Geri Dönme Deneyi Sonuçları

Elastik geri dönme, numunelerin düktilite cihazı kullanılarak iki yönlü çekilmesi ve belli bir uzamadan sonra makasla kesilerek ayrılması işleminden sonra, beklenerek ne kadar miktarının eski haline geri dönebildiğinin belirlenmesidir. Deney sonuçları Tablo 5.8’de verilmiştir.

Tablo 5.8. Numunelerin elastik geri dönme oranları

OEKB (%)	Elastik Geri Dönme (%)
0	76,3
1	82,9
2	90,7
3	84,9
5	90,4
8	92,3

Saf ve modifiye bitümlerin geri dönme oranları incelendiğinde, tüm numunelerin ilgili deney standardının ($> \%70$) üzerinde değerler verdiği gözlenmiştir (Şekil 5.10). Ayrıca, modifiye edilen tüm bitüm numunelerinin geri dönme oranlarının saf bitüme kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.10. Numunelerin geri dönme oranları (%)

Orijinal bitümde elastik geri dönme oranı %76,3 iken, %1 OEKB katkılı bitümde %82,9, %2 katkılı bitümde %90,7, %3 katkılı bitümde %84,9, %5 katkılı bitümde %90,4 ve %8 OEKB içeren bitüm numunesinde %92,3 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, OEKB katkısının bitümün elastik geri dönme yeteneğini artırdığını göstermektedir. En yüksek elastik geri dönme performansı %8 OEKB katkılı bitüm numunesinde elde edilmiştir.

Orijinal bitüme OEKB katkı ilave edilmesinin bitümün elastik geri dönme oranını artırdığı, bunun sonucunda bitüm numunelerini daha elastik hale getirdiği tespit edilmiştir. Benzer sonuçlar Kazakistan’da yapılan bir çalışmada elde edilmiştir. Elde edilen veriler temelinde bitümün modifiye edilmesinin düşük sıcaklıklarda çatlamaya karşı direncini arttıracak ve yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna karşı dayanıklılığını iyileştireceği değerlendirilmiştir (Porto ve ark., 2018). Bir bor minerali olan üleksitin bitüme doğrudan ilave edildiği çalışmada OEKB’de olduğu gibi elastik geri dönme değerlerinin geliştirdiği görülmüştür (Şinforoğlu, 2019).

5.6. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi Sonuçları

OEKB’nin yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi direnci üzerindeki etkileri Dinamik Kayma Reometresi ile incelenmiştir. Çalışmada, numunelere uygulanan deney sıcaklığı 64°C’den başlayarak şartname kriterlerinin sağlandığı sıcaklığa kadar (64°C, 70°C, 76°C) kademeli olarak artırılmış ve deneyler bu sıcaklıklarda tekrarlanmıştır. Şartname kriterlerinin karşılanmadığı en yüksek sıcaklıkta deney sonlandırılarak numunelerin yüksek sıcaklık performansları belirlenmiştir.

DSR deneyi sonucunda elde edilen orijinal ve modifiye bitüm numunelerine ait bitümlü bağlayıcının deformasyonlara karşı sergilediği direncin ölçüsü olan kayma modülü (G^*) ve elastik davranış özelliğinin bir göstergesi olan faz açısı (δ) değerleri Tablo 5.9’da sunulmuştur.

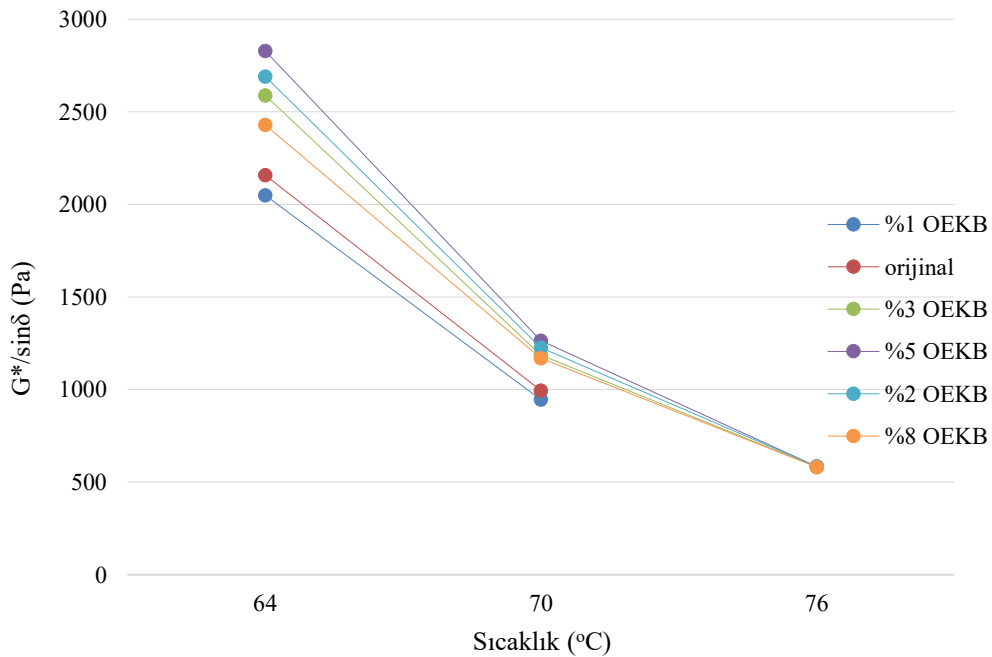
G^* değerinin yüksek olması bitümün daha sert, δ değerinin düşük olması bitümün daha elastik olduğunu gösterir. Tablo 5.9 incelendiğinde sıcaklık yükseldikçe faz açısı (δ) değerinin yükseldiği ancak bu yükselmenin ihmal edilebilecek düzeyde düşük değerlerde gerçekleştiği görülmüştür (En fazla artış 0,8°C ile %2 OEKB katkılı bitümde meydana

gelmiştir). Saf bitümden sonra en düşük δ değeri %5 oranında modifiye edilmiş bitümde görülmüştür (Fark sadece 0,36°C'dir).

Tablo 5.9. Farklı sıcaklıklarda G^* ve δ değerleri

	64°C		70°C		76°C	
	$\delta(^{\circ})$	$G^*(Pa)$	$\delta(^{\circ})$	$G^*(Pa)$	$\delta(^{\circ})$	$G^*(Pa)$
Saf Bitüm	84,26	2147	86,02	992,4	-	-
%1 OEKB katkılı bitüm	84,81	2041	86,51	943,9	-	-
%2 OEKB katkılı bitüm	85,06	2681	86,56	1224	87,75	584,1
%3 OEKB katkılı bitüm	84,66	2578	86,41	1185	87,73	581,9
%5 OEKB katkılı bitüm	84,62	2816	86,37	1262	87,65	584,3
%8 OEKB katkılı bitüm	84,99	2420	86,49	1167	87,64	581,1

%1 oranında modifiye edilmiş bitümün saf bitüme göre G^* değerlerinin küçük bir miktar azaldığı, diğer modifiye numunelerin tamamının tüm sıcaklıklarda saf bitüme göre G^* değerlerinin arttığı görülmüştür. En yüksek G^* değeri tüm test sıcaklıklarında %5 oranında OEKB ile modifiye edilmiş bitümde ortaya çıkmıştır. Bu durum %1 oranında modifiye edilmiş bitüm numunesi hariç diğer oranlardaki tüm modifiye bitüm numunelerinin deformasyona karşı dirençlerinin arttığını göstermektedir. En düşük faz açısı (δ) ve en yüksek G^* değeri %5 oranında modifiye edilmiş bitüm numunesinde ortaya çıktığı için diğer numunelere göre %5 oranında modifiye numunesinin hem daha elastik hem de deformasyonlara karşı daha dirençli olduğu görülmüştür.



Şekil 5.11. Farklı sıcaklıklar için $G^*/\sin(\delta)$ değerleri

Bu test verisi ile hesaplanan $G^*/\sin\delta$ değeri bitümün tekerlek izi direnç göstergesi olarak kullanılmaktadır. Deney sonucunda 64°C, 70°C, 76°C sıcaklıkları için saf bitüm ve modifiye bitümler için elde edilen $G^*/\sin\delta$ parametre değerleri Şekil 5.1’de sunulmuştur.

$G^*/\sin\delta$ değerinin yüksek olması deneye tabi tutulan bitüm numunesinin tekerlek izine karşı dayanımının yüksek olduğunu gösterir. Farklı sıcaklıklarda (64°C, 70°C, 76°C) saf bitüm ve modifiye bitümlerin $G^*/\sin\delta$ değerleri incelendiğinde %1 oranında OEKB içeren bitüm numunesi hariç, bitüm içerisindeki OEKB miktarı arttıkça tekerlek izi dayanım değerinin ($G^*/\sin\delta$) arttığı görülmüştür. Tüm numunelerin, parametre limit değerini sağladığı sıcaklık olan 64°C’de yapılan ölçümler sonucunda; saf bitümün $G^*/\sin\delta$ değeri 2158 Pa olarak belirlenmiştir. Aynı sıcaklıkta, farklı oranlarda modifiye edilmiş bitümlerin $G^*/\sin\delta$ değerleri sırasıyla; %1 oranında modifikasyonda 2049 Pa, %2 oranında 2691 Pa, %3 oranında 2589 Pa, %5 oranında 2829 Pa ve %8 oranında 2430 Pa olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.10). Yani saf bitümün %1 oranında katkılı numune hariç %2, %3, %5 ve %8 oranındaki numune örnekleri için $G^*/\sin\delta$ değerinin arttığı görülmüştür. En yüksek artışın, saf bitüme kıyasla 1,3 kat artışla %5 OEKB içeren numunede ve %31,1 oranında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bunların yanı sıra, OEKB modifikasyonu ile kısa dönem yaşlandırmaya tabii tutulmamış bitüm numunelerinde saf bitüme kıyasla 1 üst sıcaklık sınıfında ölçümlerin yapılabilmesine imkan sağlandığı görülmüştür (saf bitüm ile $G^*/\sin\delta$ kriterinin limit değeri en yüksek 64°C’de sağlanabilirken OEKB ile bu değer 70°C’ye yükselmiştir).

Tablo 5.10. Farklı sıcaklıklarda $G^*/\sin\delta$ değerleri

	64°C	70°C	76°C
Saf bitüm	2158 Pa	994,8 Pa	-
%1 OEKB katkılı bitüm	2049 Pa	945,7 Pa	-
%2 OEKB katkılı bitüm	2691 Pa	1226 Pa	586,7 Pa
%3 OEKB katkılı bitüm	2589 Pa	1188 Pa	582,4 Pa
%5 OEKB katkılı bitüm	2829 Pa	1264 Pa	584,5 Pa
%8 OEKB katkılı bitüm	2430 Pa	1169 Pa	581,6 Pa

70°C’de yapılan ölçümlerde, saf bitümün $G/\sin\delta$ değeri 994,8 Pa olarak belirlenmiştir. Modifiye bitümlerde ise %1 OEKB katkılı bitümün değeri 945,7 Pa ile saf bitüme göre azalma gösterirken, %2 katkılı bitüm 1226 Pa, %3 katkılı bitüm 1188 Pa, %5 katkılı bitüm 1264 Pa ve %8 katkılı bitüm 1169 Pa değerleriyle artış sergilemiştir. Özellikle

%5 OEKB katkılı bitümde, saf bitüme kıyasla %27 oranıyla en yüksek artış gözlenmiştir. Bu sonuçlar, OEKB katkısının bitümün yüksek sıcaklık dayanımını iyileştirdiğini göstermektedir.

76°C’de yapılan deneylerde, saf bitüm ve %1 oranında modifiye edilmiş bitümelerin şartname kriterlerini 70°C’de karşılamamaları nedeniyle bu sıcaklıkta testleri sonlandırılmıştır. 76°C’de %2 oranında modifiye bitümün $G^*/\sin\delta$ değeri 586,7 Pa, %3 katkılı bitüm 582,4 Pa, %5 katkılı bitüm 584,5 Pa ve %8 katkılı bitüm 581,6 Pa olarak ölçülmüştür. 76°C’de yapılan ölçümlerde hiçbir bitüm numunesi şartnamenin öngördüğü 1 kPa sınırını sağlayamamıştır.

Bitümü modifiye etmek amacıyla üç farklı atık plastiği (atık pencere katkı maddeleri, panjur ve atık kablo) katkı maddesi olarak kullanılan çalışmada PVC bazlı malzemeler kullanarak yapılan DSR deneyi sonucunda kayma modülü ve tekerlek izi değerleri sürekli olarak artarken, faz açısının azaldığı belirlenmiştir. Test sonuçları ışığında bitümün hem yüksek sıcaklıklara hem de yoğun trafik koşullarına karşı daha dayanıklı hale geldiği yorumlanmıştır (Köfteci ve ark., 2014).

2023 yılında yapılan bir çalışmada, bitümün sıcak karışım asfalt (WMA) özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla bitüm, %2, %4 ve %6 oranlarında kimyasal katkı maddesi PAWMA ile aynı oranlarda organik katkılar Sasobit ve Kaowax kullanılarak modifikasyon gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 58°C, 64°C, 70°C ve 76°C sıcaklıklarında yapılan DSR testleri sonucunda, tüm katkı maddelerinde $G/\sin\delta$ değerlerinde artışlar tespit edilmiştir. Bu durumun, WMA katkı maddelerinin tekerlek izi direncini artırdığı ve bitüm ile agrega arasındaki yapışma enerjisini yükselterek asfalt performansını iyileştirdiği belirtilmiştir (Hasan ve ark., 2023).

Literatür çalışmaları bor ile modifiye edilmiş bitümelerin $G/\sin\delta$ değerlerinde genel olarak artışlar kaydedildiğini bildirmektedir. Toz halinde olan nano boyutlu kolemanitin bitüme doğrudan ilavesi (Öcal ve ark., 2018) veya Triazol Borat Ester (Oruç ve ark., 2016) melas esaslı bor oksit bileşiği (Aminbakhsh, 2013); Gürü ve ark., 2017), reçine-boroksit bileşiği (Yeşilçiçek ve ark., 2022) gibi bor kullanılarak sentezlenen katkı maddelerinin bitümün tekerlek izi direnç parametresini yükselterek esnek üstyapıların yüksek sıcaklıklarda maruz kaldığı tekerlek izi oluşumlarına karşı daha dirençli hale getirilebileceği ifade edilmiştir.

5.6.1. RTFOT sonrası yapılan DSR deney sonuçları

RTFOT koşullandırmasına tabi tutularak kısa dönem yaşlandırma işlemine maruz bırakılan numuneler üzerinde DSR deneyi gerçekleştirilmiştir.

RTFOT işlemi sonrasında yapılan DSR deneyi sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda, orijinal ve modifiye bitüm numunelerine ait kayma modülü (G^*) ile faz açısı (δ) değerleri Tablo 5.11'de sunulmuştur. Bu parametreler, bitümlü bağlayıcının deformasyonlara karşı gösterdiği direnç ile viskoz deformasyon davranışını değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. G^* değeri bağlayıcının toplam rijitliğini ifade ederken, δ açısı bağlayıcının elastik ve viskoz bileşenleri arasındaki dengeyi göstermektedir.

Tablo 5.11. RTFO sonrası farklı sıcaklıklarda G^* ve δ değerleri

	64°C		70°C		76°C	
	$\delta(^{\circ})$	$G^*(Pa)$	$\delta(^{\circ})$	$G^*(Pa)$	$\delta(^{\circ})$	$G^*(Pa)$
Saf Bitüm	78,7	5831	81,39	2618	83,68	1240
%1 OEKB katkılı bitüm	80,63	5438	83,17	2474	85,18	1175
%2 OEKB katkılı bitüm	79,02	7507	81,82	3428	84,12	1630
%3 OEKB katkılı bitüm	80,56	6509	83,11	2885	85,15	1337
%5 OEKB katkılı bitüm	79,44	7675	82,18	3455	84,42	1586
%8 OEKB katkılı bitüm	78,69	9559	81,62	4103	83,97	1835

Tablo 5.11'de sunulan veriler incelendiğinde, tüm sıcaklık seviyelerinde faz açılarında önemli değişimlerin oluşmadığı, saf bitüme kıyasla değişimlerin 1,93°C ve daha az olduğu tespit edilmiştir. En düşük faz açısı (δ°) değerinin saf bitüm numunesinde elde edilmiştir. Saf bitüm ile karşılaştırıldığında, faz açısı değerinde en yüksek artışın her üç sıcaklıkta da %1 oranında modifiye edilmiş bitüm numunesinde gerçekleştiği belirlenmiştir. Saf bitümden sonra en düşük faz açısı değerleri ise %2 ve %8 oranında modifiye edilmiş bitüm numunelerinde kaydedilmiştir.

Özellikle 64°C ve 70°C sıcaklıklarında, tüm modifiye bitüm numunelerinin saf bitüme kıyasla faz açısı (δ°) değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Bu durum, söz konusu sıcaklıklarda bağlayıcının elastik davranışında bir azalma olduğunu gösterse de faz açısındaki artışın etkili düzeyde olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte, 64°C'de elastikiyetin görece daha yüksek olduğu numuneler %2 ve %8 oranında modifiye edilmiş bitümler olmuştur. Bu

da söz konusu oranlardaki modifikasyonun bağlayıcının elastik özelliklerini saf bitüme kıyasla daha iyi koruduğuna işaret etmektedir.

Kayma modülü bakımından değerlendirildiğinde, %1 oranında modifiye edilmiş bitüm numunesinin tüm sıcaklıklarda saf bitüme göre daha düşük G^* değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık, diğer tüm modifikasyon oranlarında (yani %2, %3, %5 ve %8) G^* değerlerinde saf bitüme kıyasla artış olduğu görülmektedir. Bu durum bitümün OEKB ile modifikasyonunun deformasyon direncini artırdığını göstermektedir. En yüksek G^* değerinin her üç sıcaklıkta da %8 oranında modifiye edilmiş bitüm numunesinde elde edilmesi, %8 OEKB katkılı bağlayıcının en yüksek deformasyon direncine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Saf bitüm ve farklı oranlarda modifiye edilmiş bitüm numuneleri için, RTFO koşullandırması sonrası gerçekleştirilen DSR deneyi sonucunda elde edilen $G/\sin\delta^*$ değerleri Tablo 5.12’de ve Şekil 5.12’de sunulmuştur.

Tablo 5.12. RTFO sonrası farklı sıcaklıklarda $G^*/\sin(\delta)$ değerleri

	64 °C	70 °C	76 °C
Saf bitüm	5947 Pa	2647 Pa	1247 Pa
%1 OEKB katkılı bitüm	5512 Pa	2492 Pa	1179 Pa
%2 OEKB katkılı bitüm	7647 Pa	3463 Pa	1639 Pa
%3 OEKB katkılı bitüm	6598 Pa	2906 Pa	1341 Pa
%5 OEKB katkılı bitüm	7808 Pa	3487 Pa	1594 Pa
%8 OEKB katkılı bitüm	9748 Pa	4147 Pa	1845 Pa

RTFOT sonrası gerçekleştirilen DSR deneylerinde, Şartname kriterlerine göre $G/\sin\delta^*$ değerinin 2,2 kPa’nin altına düşmemesi gerekmektedir. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, hem saf bitüm hem de modifiye bitüm numuneleri için bu kriterin sağlandığı en yüksek sıcaklığın 70°C olduğu, 76°C sıcaklığında ise tüm numunelerde $G^*/\sin\delta$ değerinin 2,2 kPa’nin altına düştüğü belirlenmiştir. Bu durum, 70°C’nin bağlayıcılar için üst performans sınırı olduğunu göstermektedir.

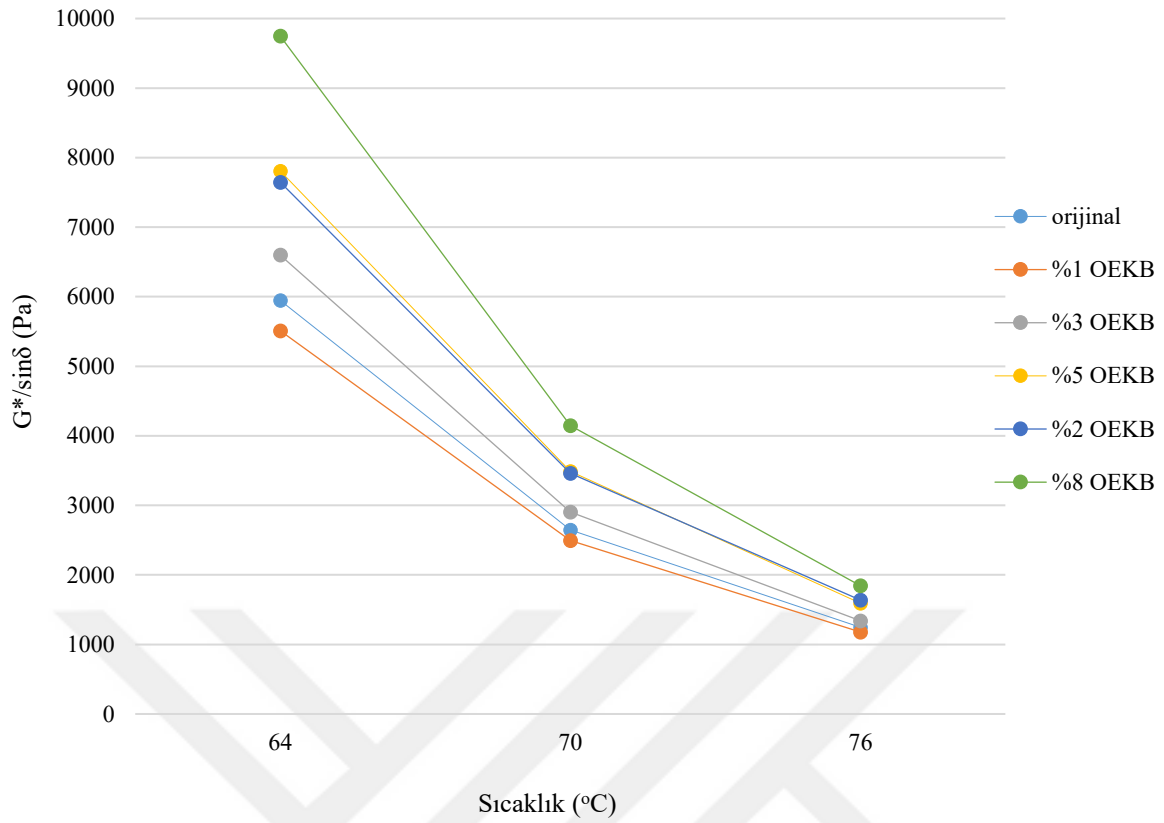
64°C’deki sonuçlar incelendiğinde, %1 oranında modifiye edilmiş bitüm numunesi hariç, tüm modifiye bitüm türlerinde $G^*/\sin\delta$ değerinin saf bitüme göre artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Saf bitüm için $G^*/\sin\delta$ değeri 5947 Pa olarak ölçülürken, %8 oranında

modifiye edilmiş bitümde bu değer %61'lik bir artışla 9748 Pa'ya ulaşmıştır. Bu değeri sırasıyla %5 oranında modifiye edilmiş bitüm 7808 Pa, %2 oranında modifiye edilmiş bitüm 7647 Pa ve %3 oranında modifiye edilmiş bitüm 6598 Pa ile takip etmektedir. Bu sonuçlar, özellikle %8 oranındaki modifikasyonun bağlayıcının deformasyon direncini anlamlı düzeyde artırdığını ortaya koymaktadır.

70°C'de elde edilen verilere göre, yine %1 oranında modifiye edilmiş bitüm dışındaki tüm modifiye numunelerde $G^*/\sin\delta$ değeri saf bitüme kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Saf bitümde 2647 Pa olarak ölçülen bu değer, %8 modifiye bitümde 4147 Pa'ya ulaşarak %63,8 oranında artış göstermiştir. Diğer modifikasyon oranlarında ise %5 modifiye bitüm 3487 Pa, %2 modifiye bitüm 3463 Pa ve %3 modifiye bitüm 2906 Pa değerlerine ulaşmıştır. %1 oranında modifiye edilmiş bitüm numunesinin $G^*/\sin\delta$ değeri ise saf bitümün altında kalmış, dolayısıyla bu oranla yapılan modifikasyonun bağlayıcının yüksek sıcaklık performansını iyileştirmediği gözlenmiştir.

76°C'de yapılan değerlendirmelerde tüm bitüm türlerinin $G^*/\sin\delta$ değerleri şartname limitinin altında kalmıştır. Ancak yine en yüksek değer %8 modifiye bitümde 1845 Pa olarak saf bitümden % 48 daha yüksek ölçülmüştür. Bu değeri sırasıyla %2 modifiye bitüm 1639 Pa, %5 modifiye bitüm 1594 Pa ve %3 modifiye bitüm 1341 Pa ile takip etmektedir. Saf bitümün 1247 Pa olan değeri, %1 modifiye bitüm ile hafif bir azalma göstermiştir. Bu sonuçlar, özellikle düşük modifikasyon oranlarının (örneğin %1) bağlayıcının yüksek sıcaklık performansında sınırlı etkiler yarattığını, buna karşılık %8 oranındaki modifikasyonun 64°C, 70°C ve 76°C sıcaklıklarında bağlayıcının deformasyon direncini anlamlı şekilde artırdığını göstermektedir.

2024 yılında yapılan çalışmada, RTFOT ile yaşlandırılmış bitümler üzerinde yapılan incelemelerde SBSMA ve CRMA ile modifiye edilmiş bitümler değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, CRMA modifiye bitümlerin daha düşük faz açısı ve daha yüksek kayma modülü sergilediği belirlenmiştir. Bu özellikler, CRMA katkılı bitümlerin SBSMA'ya kıyasla tekerlek izine karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, CRMA'nın bitümün elastikiyetini artırarak yüksek sıcaklıklara ve yaşlanmaya karşı dayanımını geliştirdiğini ortaya koymuştur (Zhang ve ark., 2024).



Şekil 5.12. RTFOT sonrası farklı sıcaklıklar için $G^*/\sin(\delta)$ (Pa) değerleri

Bitümün modifiye edilmesi için bor oksit (BO) kullanılan bir çalışmada DSR deneyleri sonucu modifiye bitümlerde $G^*/\sin\delta$ parametresi değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Kısa dönem yaşlandırma sonucu yapılan DSR deneylerinde de benzer durumun devam ettiği tespit edilmiştir. Ayrıca modifiye bitümlerde yüksek sıcaklık sınıflarında iyileşme olduğu gözlemlenmiş ve bu sonucun bitümün yüksek sıcaklık performansını iyileştireceği öngörülmüştür (Şahan ve ark. 2024).

5.6.2 PAV sonrası DSR deney sonuçları

PAV yöntemi ile uzun dönem yaşlandırmaya tabi tutulan bitüm numuneleri, sonrasında DSR deneyi ile test edilmiştir. Bu kapsamda, 22°C, 25°C ve 28°C sıcaklıklarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen G^* ve δ değerleri Tablo 5.13’de sunulmuştur. Söz konusu parametreler, bağlayıcıların uzun dönem yaşlanma sonrası yorulma performansını ve viskoelastik davranışlarını değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

Tablo 5.13. PAV sonrası farklı sıcaklıklarda G^* ve δ değerleri

	22°C		25°C		28°C	
	$\delta(^{\circ})$	$G^*(kPa)$	$\delta(^{\circ})$	$G^*(kPa)$	$\delta(^{\circ})$	$G^*(kPa)$
Saf Bitüm	37,99	9643	40,15	6789	-	-
%1 OEKB katkılı bitüm	-	-	44,43	7309	46,34	5413
%2 OEKB katkılı bitüm	41,28	8705	43,46	5963	-	-
%3 OEKB katkılı bitüm	-	-	42,78	8756	44,87	6208
%5 OEKB katkılı bitüm	-	-	41,97	9321	44,01	6615
%8 OEKB katkılı bitüm	40,54	8828	42,6	6159	-	-

Başlangıç sıcaklığı 25°C olan deneylerde, farklı oranlarda modifiye edilmiş bitüm numunelerine ait faz açısı (δ) değerleri incelendiğinde, en düşük δ değerinin saf bitümde elde edildiği, bunu %5 oranında OEKB ilave edilmiş bitümün takip ettiği belirlenmiştir. δ değerinde en yüksek artış %1 oranında OEKB içeren modifiye bitümde gözlemlenmiştir. Uzun dönem yaşlanma etkisiyle modifiye bitümler arasında %5 OEKB içeren bitümün daha fazla elastik özelliklere sahip olduğu bulunmuş, bunu %8 oranında katkılı bitüm takip etmiştir. Aynı sıcaklıkta (25°C) kompleks kayma modülü (G^*) değerleri incelendiğinde, %1, %3 ve %5 OEKB oranlarında yorulma performansı bakımından istenmeyen durum olan G^* değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir.

22°C’de gerçekleştirilen deneyler saf bitüm, %2 ve %8 oranlarında modifiye edilmiş bitümler üzerinde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, her iki modifiye bitüm numunesinin de saf bitüme kıyasla G^* değerlerinin azaldığı, buna karşılık δ değerlerinde artış meydana geldiği görülmüştür. En düşük G^* ve en yüksek δ değeri %2 katkı oranına sahip bitümde olduğu belirlenmiştir.

28°C’de gerçekleştirilen deneylerde %1, %3 ve %5 oranlarında katkı içeren bitümler incelenmiştir. Bu sıcaklıkta, %1 katkılı numune en düşük G^* değerine ve en yüksek δ değerine sahipken; %5 katkılı bitüm en yüksek G^* değerini ve en düşük δ değerini göstermiştir.

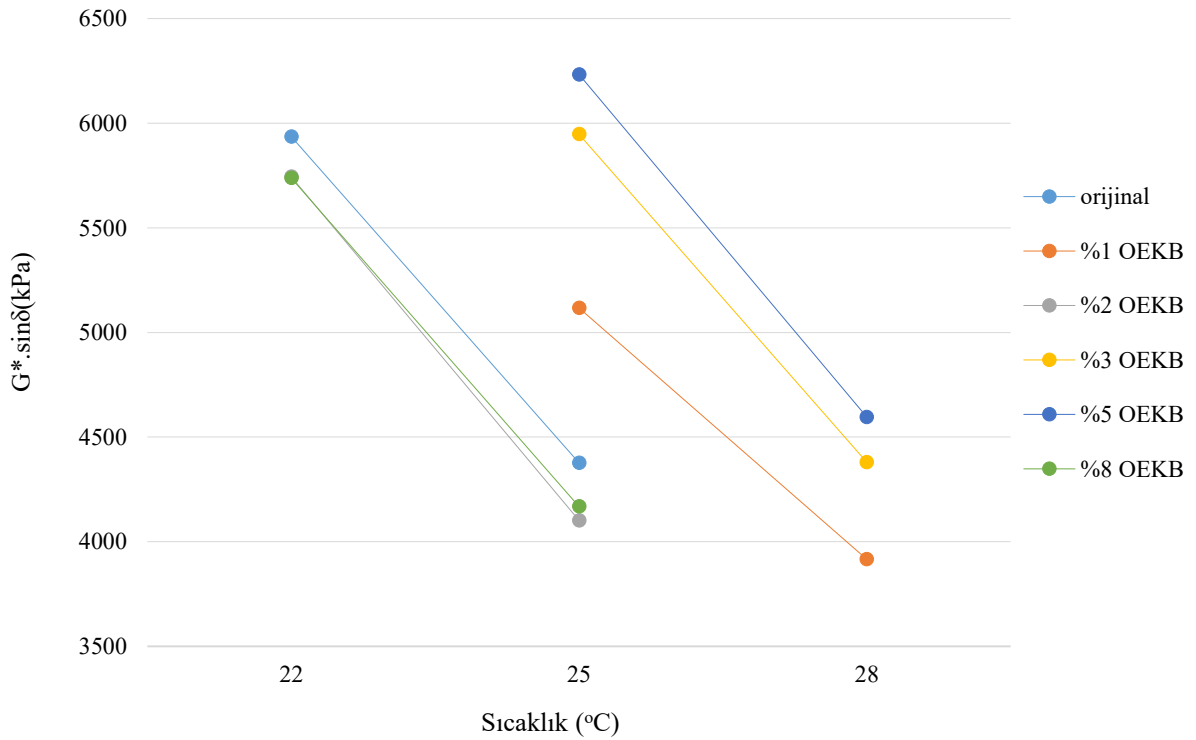
Genel olarak değerlendirildiğinde, orijinal ve uzun süreli yaşlanmaya maruz bırakılmış bitüm numunelerinde G^* değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu artış yorulma bakımından istenmeyen bir durum olsa da, bitümün yaşlanma süreciyle birlikte deformasyonlara karşı direncinin arttığını göstermektedir. Öte yandan, yaşlanmış numunelerde δ değerinde meydana

gelen artış, bitümün zamanla daha viskoz bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır (Zhang ve ark., 2024; García ve ark., 2019).

Tablo 5.14. PAV sonrası farklı sıcaklıklarda $G^* \cdot \sin \delta$ değerleri (kPa)

	22°C	25°C	28°C
Saf bitüm	5935	4377	-
%1 OEKB katkıli bitüm	-	5117	3916
%2 OEKB katkıli bitüm	5743	4102	-
%3 OEKB katkıli bitüm	-	5947	4380
%5 OEKB katkıli bitüm	-	6233	4596
%8 OEKB katkıli bitüm	5738	4169	-

Orijinal bitüm ve modifiye bitümler üzerinde PAV yöntemi sonrası gerçekleştirilen DSR testine ait sıcaklık ve $G^* \cdot \sin \delta$ değerleri Tablo 5.14 ve Şekil 5.13'te sunulmuştur.



Şekil 5.13. Uzun süreli yaşlanma (PAV) sonrası sıcaklık ve $G^* \cdot \sin \delta$ verileri

Bitüm numunelerinin yorulma çatlaklarına karşı direnç parametresi olarak bilinen $G^* \cdot \sin \delta$ değerinin düşük olması istenir. Superpave bağlayıcı şartnamesi bu kriter için 5000 kPa limit değeri belirlemiştir. Çalışma bulgularıyla hesaplanan yorulma direncinin göstergesi

olan $G^* \cdot \sin \delta$ değerleri değerlendirildiğinde; %1, %3 ve %5 katkılı modifiye bitümlerin $G^* \cdot \sin \delta$ değerlerinin orijinal bitüme kıyasla daha yüksek olduğu görölmüştür. Buna karşın, %2 ve %8 oranlarında modifiye edilmiş bitüm numunelerinin $G^* \cdot \sin \delta$ değerlerinin saf bitüme kıyasla azaldığı gözlenmiş olup, bu durum bu numunelerde yorulma çatlağı direncinin arttığını göstermektedir.

2012 yılında yapılan çalışmada bitüm nanokil ile modifiye edilmiştir. Yapılan DSR deneyleri sonucunda bitümde bulunan nanokilin bitümün sertliğini artırdığı ve faz açısını azalttığı, bitümün reolojik parametrelerinde değişikliklere yol açtığı, bu etkiler sonucunda bitümün yaşlanma etkisini azaltacağı sonucundan bahsedilmiştir. Nanokil modifikasyonu sonucunda $G^*/\sin \delta$ değerinin arttığı gözlemlenmiş ve bu artışın, nanokilin miktarına bağlı olarak tekerlek izi direncini artırabileceğı ifade edilmiştir. Ancak aynı çalışmada, nanokil modifikasyonu sonucunda $G^* \cdot \sin \delta$ değerinde meydana gelen artışın, bitümlü karışımın yorulma ömrünü olumsuz etkileyebileceğı, yani azaltabileceğı sonucuna da varılmıştır (Radovskiy ve Teltayev, 2018).

Literatürde borun doğrudan veya borlu bileşikler halinde bitüme ilave edildiğinde OEKB ile elde edilen sonuçlara benzer olarak yorulma direncinin gelişebileceğini gösteren sonuçlar mevcuttur. %10 oranında melas esaslı boroksit bileşiğı ile modifiye edilen bitümün yorulma performansında iyileşme görölmüştür (Aminbakhsh, 2013; Gürü ve ark., 2017). Nano boyutlu kolemanitin doğrudan bitüme ilave edilerek modifiye edildiğı çalışma sonuçlarına göre modifikasyon yorulma performansını pozitif etkilemiştir. En iyi sonuçlar % 5 oranında kolemanit içeren bitümlerde elde edilmiştir (Öcal, 2018; Öcal ve ark., 2018). Bor bileşiklerinin daha düşük oranlarda kullanılması da bitümün yorulma direncini olumlu etkileyebilmiştir. Reçine ve bor oksit ile sentezlenen borlu bileşiğın bitümde % 1,5 oranında kullanılması yorulma direncini geliştirmiştir (Yeşilçiçek ve ark., 2022) Ancak bir çeşit bor bileşiğı olan ve laboratuvar ortamında sentezlenerek elde edilmiş olan siklik borat esterinin bitüm modifikasyonunda daha fazla oranlarda kullanılmasının bitümün yorulma performansını daha fazla iyileştirdiğı dikkatlerden kaçmamalıdır (Yılmaz, 2016).

5.7 Kiriş eğme reometresi (BBR) deney sonuçları

Bitüm numunelerinin, düşük sıcaklıklardaki performansını değerlendirmek amacıyla numunelere Kiriş eğme reometre (BBR, Bending Beam Rheometer) testleri uygulanmıştır.

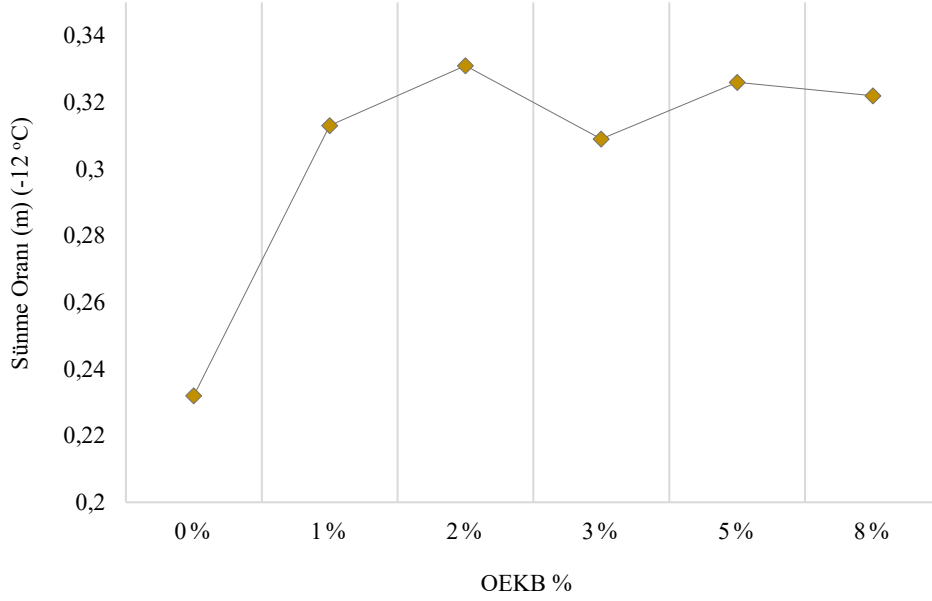
Deneyde Sünme rijitliği (S) ve sünme oranı (m) değerleri ölçülmektedir. Superpave bağlayıcı şartnamesine göre herhangi bir bitümün uygulanan test sıcaklığında başarılı kabul edilmesi için S'nin 300 MPa'dan küçük m'nin 0,3'ten büyük olması gerekmektedir. Bu değerleri sağlayan bitümün BBR testinin uygulandığı sıcaklıktan 10°C daha düşük sıcaklık için düşük sıcaklık sebebiyle oluşan çatlamalara karşı dirençli olduğu kabul edilir. Deneye öncelikle -12°C'de başlanmıştır. Bu sıcaklıkta şartname kriterlerini karşılayan bitüm numuneleri için daha düşük sıcaklık olan -18°C'de deneylere devam edilmiştir. Şartname kriterlerini karşılamayan tek numunenin saf bitüm olduğu tespit edilmiştir. Saf bitüm için deney -6°C'de tekrarlanmıştır. Saf bitümün -12°C'de şartname kriterlerine uymaması nedeniyle bu bitüm numunesine -18°C'de deney uygulanmamıştır.

Tablo 5.15. -12°C'de uygulanan BBR deney sonuçları

-12°C BBR		
	S (sünme sertliği) MPa ($S \leq 300$ MPa)	m (sünme oranı) ($m \geq 0,300$)
Orijinal Bitüm	212	0,232
%1 OEKB katkılı bitüm	222	0,313
%2 OEKB katkılı bitüm	165	0,331
%3 OEKB katkılı bitüm	283	0,309
%5 OEKB katkılı bitüm	236	0,326
%8 OEKB katkılı bitüm	167	0,322

-12°C'de gerçekleştirilen BBR deneyi kapsamında saf bitüm ve modifiye edilmiş bitümlere ait sünme sertliği (S) ile sünme oranı (m) değerleri Tablo 5.15'de sunulmuştur.

Orijinal bitümün -12°C'deki sünme sertliği (S) değeri 212 MPa, sünme oranı (m) değeri ise 0,232 olarak ölçülmüştür. Tablo 5.8'de de görüldüğü üzere, bu değerler doğrultusunda orijinal bitümün -12°C'de yeterli dayanım göstermediği tespit edilmiştir. Özellikle, sünme oranı değeri şartnamede belirtilen minimum 0,3 kriterini sağlamadığından saf bitüm için bu deney -6°C'de tekrarlanmıştır. -6°C'de gerçekleştirilen deneyde saf bitümün S değeri 143 MPa, m değeri ise 0,378 olarak ölçülmüş ve bu sıcaklıkta şartname kriterlerini karşıladığı belirlenmiştir.



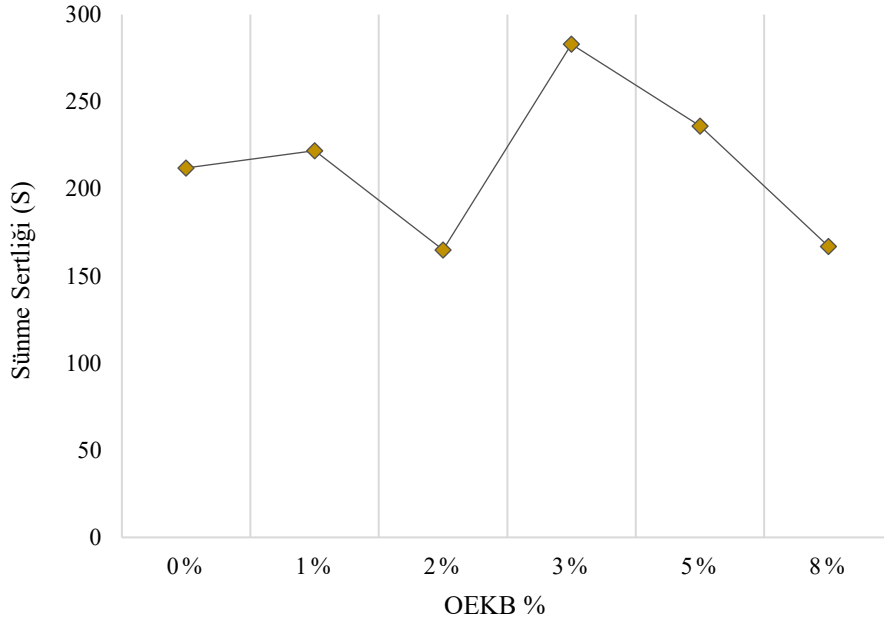
Şekil 5.14. -12°C’de sünme oranı (m) değerleri

Şekil 5.14’de, saf bitüm ve OEKB ile modifiye edilmiş bitümlere ait sünme oranı (m) değerleri sunulmuştur. Modifiye edilmiş tüm numunelerin -12°C’de sünme oranı için şartname kriterlerini sağladığı görülmüştür. Saf bitümün -12°C’de m değeri 0,232 iken, %1 modifiye bitümde 0,313, %2 modifiye bitümde 0,331, %3 modifiye bitümde 0,309, %5 modifiye bitümde 0,326 ve %8 modifiye bitümde 0,322 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, modifiye bitümlerin sünme oranı değerlerinin saf bitüme göre arttığını ve şartnamede öngörülen minimum 0,3 değerinin üzerinde olduğunu göstermektedir.

Sünme oranı (m) numunenin gevşeme yeteneğini yansıtmaktadır. Bu değer yüksek olması, bitümün sertliğinin daha düşük olduğunu ve dolayısıyla kaplamada oluşabilecek çekme gerilmeleri ile termal çatlak riskinin azaldığını ifade eder (Arslan, 2010). Modifiye bitümlerin saf bitüme kıyasla -12°C’de daha yüksek m değerlerine sahip olması, bu numunelerin daha esnek davranış sergilediğini ve gerilmeleri daha etkin şekilde absorbe ederek termal çatlak oluşumunu azalttığını göstermektedir.

Modifiye bitümler arasında sonuçlar genel olarak birbirine yakın olmakla birlikte, m bakımından en yüksek artışın %2 oranında modifiye edilen numunede, onu takip eden %5 ve %8 oranlarında modifiye edilen bitümlerde gerçekleştiği, en düşük artışların ise %1 ve %3 oranlarında modifiye edilen bitümlerde gözlemlendiği belirlenmiştir. Bu bulgular, %2, %5 ve %8

oranlarında modifiye edilen bitümlerin düşük sıcaklıklarda daha esnek bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5.16. -12 °C’de sünme sertliği (S) değerleri (MPa)

-12°C’de saf bitüm ve modifiye bitümlere ait sünme sertliği (S) değerleri Şekil 5.16’da sunulmuştur. İncelenen tüm bitüm numunelerinin, şartnamede belirtilen maksimum 300 MPa olan sünme sertliği kriterini -12°C’de sağladığı görülmüştür. Modifiye numuneler için bir sonraki deney sıcaklığı olan -18°C’de testlere devam edilmiştir; ancak saf bitüm, -12°C’de sünme oranı (m) kriterini karşılamadığı için -18°C’de BBR deneyi uygulanmamıştır.

2016 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada, bor içeren siklik borat esteri (CBE) katkı maddesi bitüm modifikasyonunda kullanılmıştır. %1, %2, %3 ve %6 oranlarında modifiye edilen bitümlere uygulanan BBR deneyleri sonucunda modifiye bitümlerde sürünme sertliği (S) değerlerinin saf bitüme göre azaldığı raporlanmıştır. Ayrıca, sünme oranı (m) değerlerinin modifiye bitümlerde saf bitüme kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, CBE katkı maddesinin düşük sıcaklıklarda asfaltın çatlama eğilimini azalttığı yönünde yorumlanmıştır (Oruç ve Yılmaz, 2016). CBE’ye benzer olarak organik esaslı borik asit bileşiği de bitümün düşük sıcaklıklarda oluşabilecek çatlamalara karşı direncini arttırdığı tespit edilmiştir (Arslan ve ark., 2012). Bitüme %2 oranında ilave edilen monoetilen glikol esaslı polibor bileşiği de (çoklu bağ yeteneğine sahip bor bileşiği) BBR test sonuçlarına göre bitümün düşük sıcaklık performansını iyileştirmiştir (Arslan ve ark., 2014). %1,5 oranına kadar ilave edilen reçine-bor oksit bileşiğinin BBR sonuçlarını iyileştirdiği ancak daha fazla

katkı maddesi kullanılması durumunda sonuçların olumsuz etkilendiği bildirilmiştir (Yeşilçiçek ve ark., 2022). Kolemanitin bitüme doğrudan ilave edildiği çalışmalarda ilave edilen kolemanitin boyutuna bağlı olarak BBR sonuçlarını hem olumlu hem de olumsuz yönde etkileyebildiği tespit edilmiştir (Kutuk-Sert ve Kutuk, 2020). Ancak kolemanitin doğrudan bitüm modifiyeri olarak kullanıldığı başka bir çalışmada nano boyutlu kolemanitin bitüm modifikasyonunda kullanıldığında BBR sonuçlarını olumsuz etkilediği raporlanmıştır (Öcal, 2018).

2024 yılında gerçekleştirilen başka bir çalışmada granül kauçuk ile modifiye edilmiş bitüm numunelerine BBR deneyi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, katkı oranının artmasıyla sertlik modülünün yükseldiğini göstermiştir. Bu durum, katkı maddesi miktarının artmasıyla düşük sıcaklıklarda deformasyon yeteneğinin azaldığını ve dolayısıyla çatlama direncinin düştüğünü ortaya koymuştur (Zhang ve ark., 2024).

Sünme sertliğinin düşük olması, bitüm numunesinin esnekliğinin daha yüksek olduğunu gösterir (Jahromi ve ark., 2012). Buna göre %1, %3 ve %5 oranlarında OEKB ile modifiye edilen bitüm numunelerinin sünme sertliği değerlerinin saf bitüme göre arttığı; ancak %2 ve %8 oranlarında modifiye edilmiş bitümlerde sünme sertliği değerlerinin saf bitüme kıyasla azaldığı tespit edildiğinden %2 ve %8 OEKB modifiye bitüm numunelerinin, saf bitüme göre daha düşük sünme sertliği sergilemesi, bu numunelerin daha esnek olduklarını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, sünme oranı (m) sonuçları ile tutarlılık göstermektedir. Sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m) verileri birlikte değerlendirildiğinde, %2 ve %8 oranlarında modifiye edilen bitümlerin düşük sıcaklıklarda çatlama eğiliminin, saf bitüm ve diğer modifiye oranlarına kıyasla daha düşük olacağı sonucuna varılmaktadır.

Tablo 5.16 -12°C’de S, m ve S/m parametreleri

OEKB oranı (%)	S (MPa)	m	S/m (MPa)
0	212	0,232	913,8
1	222	0,313	709,3
2	165	0,331	498,5
3	283	0,309	915,9
5	236	0,326	723,9
8	167	0,322	518,6

Düşük sıcaklıkta daha iyi gevşeme yeteneği ve esnek davranış için S değerinin düşük m değerinin yüksek olması istenir. OEKB ilavesi ile tüm modifiye bitümlerde m değeri

istenildiği gibi artmış ancak S değeri modifiye bitüm numunelerinin tamamında azalmamıştır. Bu bağlamda iki parametreyi birlikte değerlendirmek amacıyla S/m oranı bitümün düşük sıcaklık performansında kullanılabilir (Arslan ve ark., 2012; Liu ve ark., 2010). -12°C’de numunelerin S/m değerleri Tablo 5.16’da verilmiştir.

Düşük sıcaklıklarda S değerinin düşük m değerinin ise yüksek olması istenir. Bu yaklaşıma göre daha küçük S/m değerine sahip bitümde, çekme gerilmeleri azalarak düşük sıcaklıklarda termal çatlak oluşumu azalacaktır. Tablo 5.16’da görüldüğü üzere, numunelerin hesaplanan S/m değerleri tüm OEKB modifiye bitümlerde saf bitüme göre azalmış, özellikle %2 ve %8 oranında OEKB modifiye bitümlerde düşük sıcaklık performansının belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Organik esaslı borik asit bileşiğinin (OBBAC) modifiye edici madde olarak kullanıldığı çalışmada mevcut çalışmaya benzer şekilde S/m değerleri belirlenmiş ve modifiye bitümlerde bu değerin daha düşük olduğu raporlanmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, düşük sıcaklık performansında iyileşme meydana geldiği belirlenmiştir (Arslan, 2012).

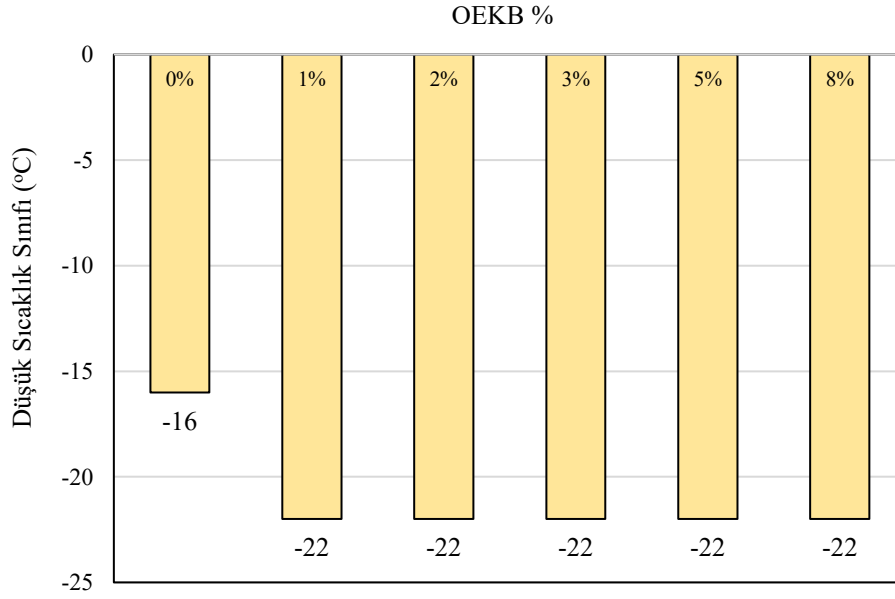
%1, %2, %3, %5 ve %8 oranlarında modifiye edilmiş numunelere son olarak -18°C’de BBR deneyi uygulanmış olup, deney verileri Tablo 5.17’de sunulmuştur.

Tablo 5.17. -18°C’de S ve m değerleri

-18°C BBR		
	S (sünme sertliği) MPa ($S \leq 300$ MPa)	m (sünme oranı) ($m \geq 0,300$)
%1 OEKB katkılı bitüm	384	0,257
%2 OEKB katkılı bitüm	359	0,276
%3 OEKB katkılı bitüm	468	0,248
%5 OEKB katkılı bitüm	370	0,251
%8 OEKB katkılı bitüm	397	0,270

-18°C’de gerçekleştirilen deney verileri incelendiğinde, tüm numune örneklerinin şartnamede belirlenen sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m) kriterlerini karşılayamadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, BBR deneyi burada sonlandırılarak bitüm numunelerinin düşük sıcaklık sınıflandırmaları belirlenmiştir. Numunelere ait düşük sıcaklık sınıfı değerleri Şekil 5.16’da sunulmuştur.

Orijinal bitümün (katkısız bitümün) düşük sıcaklık sınıfının -16°C olduğu; %1, %2, %3, %5 ve %8 oranlarında OEKB ile modifiye edilen numunelerin ise düşük sıcaklık sınıflarının -22°C olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, modifiye bitüm numunelerinin tamamının saf bitüme kıyasla düşük sıcaklık sınıfında bir üst kademeye yükseldiği; dolayısıyla soğuk iklim koşullarında daha az kırılma davranış sergileyerek ısı çatlama riskinin azalacağı değerlendirilmektedir.



Şekil 5.16. Düşük sıcaklık sınıfı sonuçları ($^{\circ}\text{C}$)

DSR deney verileri ile birleştirildiğinde saf ve OEKB modifiyeli bitümlere ait yüksek ve düşük sıcaklık değerleri Tablo 5.18’de verildiği gibidir.

Tablo 5.18. Bitümlerin Superpave performans sınıfları

	PG
Orijinal Bitüm	PG 64-16
%1 OEKB katkılı bitüm	PG 64-22
%2 OEKB katkılı bitüm	PG 70-22
%3 OEKB katkılı bitüm	PG 70-22
%5 OEKB katkılı bitüm	PG 70-22
%8 OEKB katkılı bitüm	PG 70-22

5.8. Marshall Tasarım Deneyi Sonuçları

Marshall deneyleri, KTŞ (2023) raporunda aşınma tabakası için belirlenen Tip-1 gradasyon limitlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan bitümün özgül ağırlığı 1,029 olarak belirlenmiştir. Uğural taş ocağından temin edilen agreganın Marshall testinde kullanılan dizayn gradasyon değerleri ve bu gradasyon ile ilgili limit değerler Tablo 5.19’da sunulmuştur.

Tablo 5.19. Agregada gradasyonu (KTŞ, 2023)

ELEK AÇIKLIĞI		DİZAYN GRAD.	TOLERANS LİMİTLERİ	ŞARTNAME LİMİTLERİ
mm	inch			
37,5	1 1/2"	100	100	100
25,4	1"	100	100 100	100 100
19,1	3/4"	100	100 100	100 100
12,7	1/2"	92,3	88,3 96,3	88 100
9,5	3/8"	81,4	77,4 85,4	72 90
4,8	No.4	47,2	43,2 51,2	42 52
2,0	No.10	28,3	25,3 31,3	25 35
0,4	No.40	12,7	9,7 15,7	10 20
0,18	No.80	7,9	4,9 10,9	7 14
0,08	No.200	5,6	3,6 7,6	3 8

Tablo 5.20’de, deney için seçilen agregaya ait özgül ağırlık değerleri verilmiştir.

Tablo 5.20. Agregada özgül ağırlık değerleri

Agreganın Efektif Özgül Ağırlığı,(G _{ef})	2,690
Agreganın Hacim Özgül Ağırlığı,(G _{sb})	2,673
Agreganın Zahirî Özgül Ağırlığı,(G _{sa})	2,705

Marshall deneyi kapsamında, numunelerde OEKB katkı oranları %2 ve %5 olarak seçilmiştir. Tasarımlarda ise %4, %4,5, %5 ve %5,5 bitüm oranları kullanılmıştır. Orijinal bitüm ile her iki katkı oranındaki bitüm numuneleri için ayrı ayrı 12'şer briket hazırlanmıştır. Saf bitüm dahil olmak üzere her bitüm yüzdesi için üçer briket üretilmiş ve toplamda 36 briket numunesi elde edilmiştir. Briketlerin hazırlanma aşamaları Şekil 5.17 – Şekil 5.21 arasında gösterilmiştir.



Şekil 5.17. Agreganın belirlenen gradasyona göre hazırlanması



Şekil 5.18. Bitüm ve agreganın karıştırılması



Şekil 5.19. Karışımın briket kalıplarına dökülmesi



Şekil 5.20. Kalıplara dökülmüş briket numuneleri



Şekil 5.21. Doygun yüzey kuru numunelerinin hazırlanışı

Bitümlü sıcak karışım olarak hazırlanmış briketlere Şekil 5.22’de görüldüğü gibi stabilite ve akma deneyi uygulanmıştır.

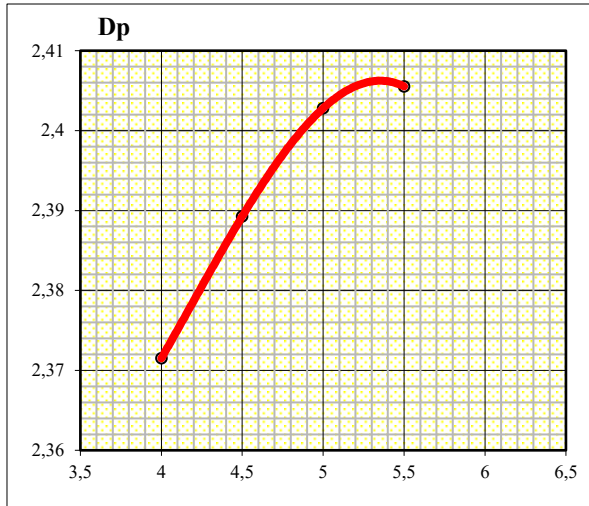


Şekil 5.22. Briketlere uygulanan Marshall yüklemesi

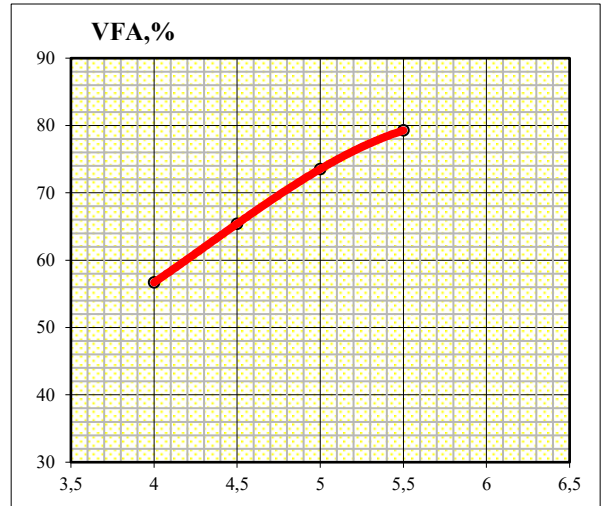
Marshall testi ile karışım numunelerinin maksimum dayanımları ve maksimum yük altında oluşan deformasyon miktarları belirlenmiştir. Marshall tasarım deneyi kapsamında hazırlanan briketlere uygulanan stabilite ve akma değerleri elde edilerek grafikler oluşturulmuştur. Orijinal bitüm için optimum bitüm oranını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen Marshall tasarım deney sonuçları Tablo 5.21’de verilmiştir. Deney verileri kullanılarak, bitüm oranlarına göre hazırlanan stabilite, akma, D_p , V_h , V_f , VMA grafikleri Şekil 5.23 - Şekil 5.28 aralığında sunulmuştur.

Tablo 5.21. Orijinal bitüm kullanılarak hazırlanan Marshall tasarım deney sonuçları

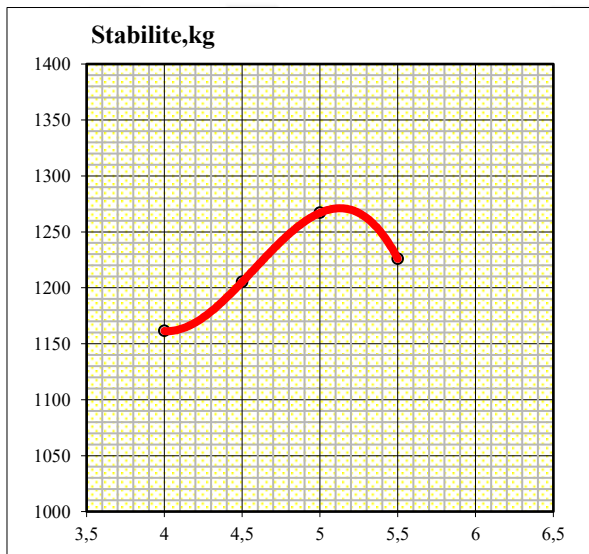
Briket No	Bitüm %			Briket Yüksekliği				Havadaki Ağırlık (g) A	Sudaki Ağırlık (g) C	Doy. Yüz.K. Ağırlık (g) B	Hacim cm ³ V	Hacim Özg Ağırlık D _p	Maks Teo Özg Ağırlık D _T	Boşluk % V _h	VMA %	Asf. Dolu Boşluk % V _f	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltil. Stabilite
	W _a	W _b	gr	1	2	3	ort.													
4,0	4,0	3,8	46,0	62,7	62,7	62,8	62,7	1191,2	693,6	1194,5	500,9	2,378	2,533	6,37	14,69	56,66	2,50	1100,0	1,017	1119
5,0	4,0	3,8	46,0	62,8	62,8	62,7	62,8	1190,7	694,5	1197,2	502,7	2,369					2,40	1140,0	1,020	1162
6,0	4,0	3,8	46,0	62,6	62,6	62,7	62,6	1189,8	693,4	1195,9	502,5	2,368					2,60	1180,0	1,020	1203
2,371																	2,50			1161
7,0	4,5	4,3	51,8	63,2	63,2	63,1	63,2	1195,0	700,2	1200,3	500,1	2,390	2,515	5,01	14,46	65,39	2,80	1210,0	1,009	1221
8,0	4,5	4,3	51,8	63,0	63,0	63,1	63,0	1194,7	699,8	1199,5	499,7	2,391					3,00	1150,0	1,009	1160
9,0	4,5	4,3	51,8	62,9	63,0	63,0	63,0	1196,6	699,2	1200,4	501,2	2,387					2,80	1220,0	1,012	1234
2,389																	2,87			1205
10,0	5,0	4,8	57,5	63,1	63,1	63,2	63,1	1200,4	703,3	1202,8	499,5	2,403	2,498	3,81	14,60	73,91	3,30	1240,0	1,007	1248
11,0	5,0	4,8	57,5	62,9	62,9	62,9	62,9	1201,5	704,0	1203,6	499,6	2,405					3,50	1310,0	1,014	1329
12,0	5,0	4,8	57,5	63,1	63,0	63,0	63,0	1199,9	702,8	1202,7	499,9	2,400					3,50	1210,0	1,012	1224
2,403																	3,43			1267
13,0	5,5	5,2	63,3	63,0	62,9	62,9	62,9	1203,8	704,4	1205,2	500,8	2,404	2,481	3,05	14,70	79,25	3,40	1150,0	1,014	1166
14,0	5,5	5,2	63,3	62,8	62,8	62,7	62,8	1204,4	706,2	1206,8	500,6	2,406					3,70	1270,0	1,020	1295
15,0	5,5	5,2	63,3	62,7	62,6	62,6	62,6	1203,0	704,9	1204,7	499,8	2,407					3,70	1190,0	1,022	1217
2,406																	3,60			1260
														(3-5)	14-16	(65-75)	(2-4)			



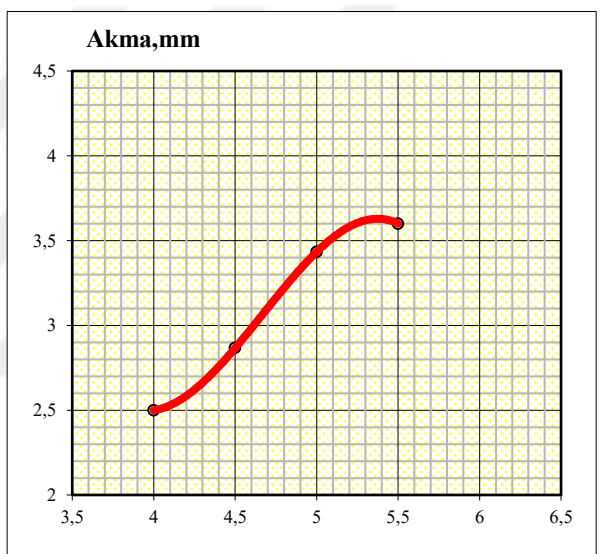
Şekil 5.23. Orijinal bitüm Dp – Bitüm %



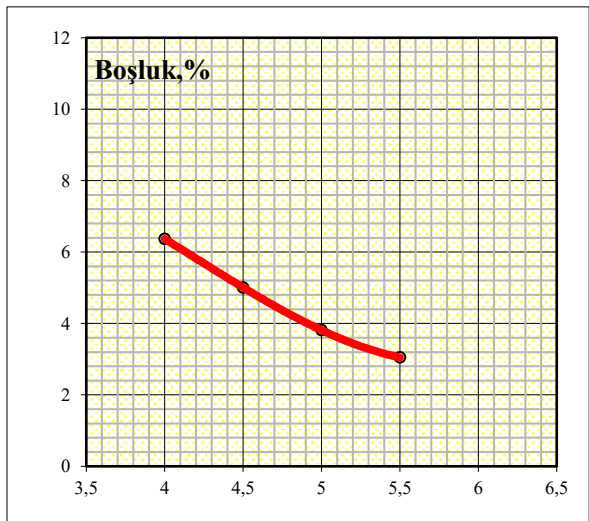
Şekil 5.24. Orijinal bitüm VFA – Bitüm %



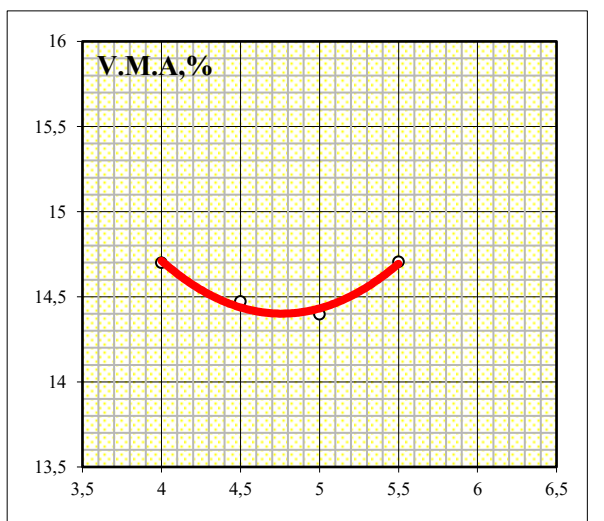
Şekil 5.25. Orijinal bitüm Stabilite – Bitüm %



Şekil 5.26. Orijinal bitüm Akma – Bitüm Oranı %



Şekil 5.27. Orijinal bitüm Vh – Bitüm %



Şekil 5.28. Orijinal bitüm VMA – Bitüm %

Tablo 5.22. Aşınma Tip-1 dizayn kriterleri (KTŞ, 2023)

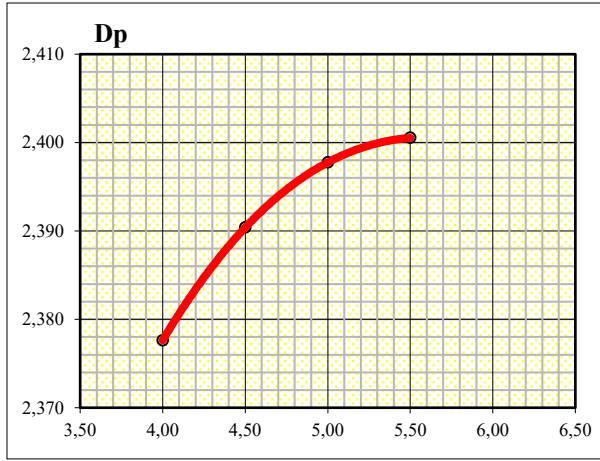
Özellikler	Aşınma , TİP -1	
	Min.	Maks.
Marshall Stabilitesi, kg	900	-
Boşluk, %	3	5
Asfaltla dolu boşluk, %	65	75
Agregalar arası boşluk (VMA) %	14	16
Akma, mm	2	4

Deney verileri sonucunda, V_h (%) grafiği temel alınarak aşınma tabakası için %4 boşluk oranına karşılık optimum bitüm oranı %4,85 olarak belirlenmiştir. Bu bitüm oranı için VMA (agregalar arası boşluk) %14,4 olarak belirlenmiş ve şartname kriterleri olan %14–%16 sınır aralığında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, %4,85 bitüm oranına karşılık gelen VFA (bitümle dolu boşluk oranı) değeri %71 olup, şartname sınırları olan %65–%75 aralığında kalmaktadır. Optimum bitüm oranında akma değeri 3,2 mm (şartname aralığı: 2–4 mm), stabilite değeri ise 1235 kg (şartname minimumu: 900 kg) olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, orijinal bitüm için elde edilen optimum bitüm oranının tüm şartname kriterlerini karşıladığı tespit edilmiştir.

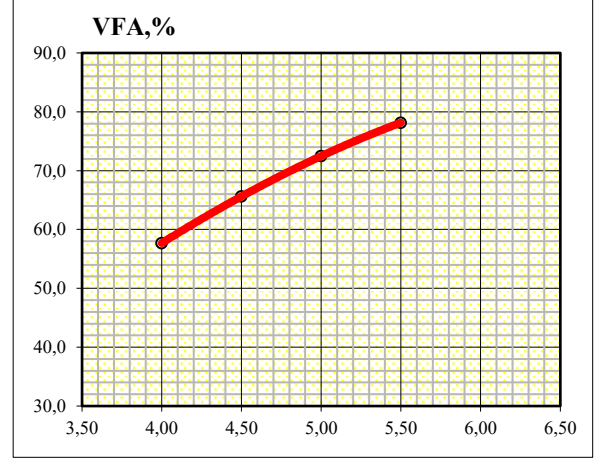
%2 oranında OEKB ile modifiye edilmiş bitüm için optimum bitüm oranını belirlemek amacıyla yapılan Marshall tasarım deney sonuçları Tablo 5.23’de verilmiştir. Deney verileri kullanılarak, bitüm oranlarına göre hazırlanan stabilite, akma, D_p , V_h , V_f , V_{ma} grafikleri Şekil 5.29 - Şekil 5.34 arasında sunulmuştur.

Tablo 5.23. %2 OEKB katkılı bitüm kullanılarak hazırlanan Marshall tasarım deney sonuçları

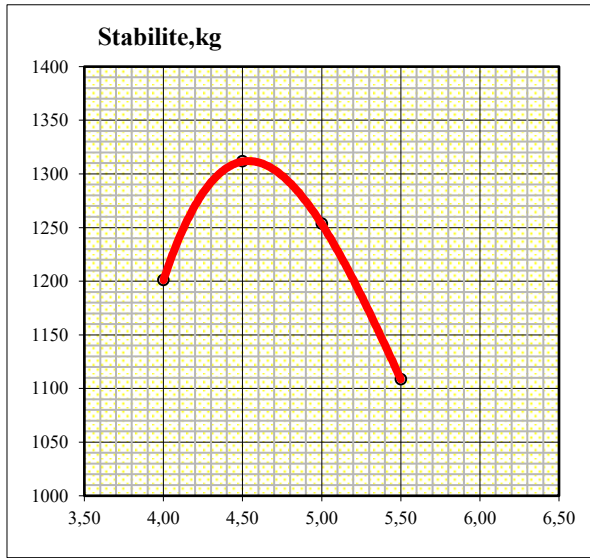
Briket No.	Bitüm %	Wa	Wb	gr	Briket Yüksekliği				Havadaki Ağırlık (g) A	Sudaki Ağırlık (g) C	Doy.Yüz.K. Ağırlık (g) B	Hacim cm ³ V	Hacim Özg Ağırlık D _p	Maks Teo Özg Ağırlık D _T	Boşluk % V _h	VMA %	Asf. Dolu Boşluk % V _f	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltil. Stabilite
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
4,0	4,0	3,8	46,0	62,8	63,0	62,9	62,9	1193,6	694,8	1196,3	501,5	2,380	2,533	6,13	14,47	57,68	3,2	1218,2	1,014	1236	
5,0	4,0	3,8	46,0	62,5	62,7	62,8	62,7	1194,7	694,7	1197,2	502,5	2,378									
6,0	4,0	3,8	46,0	62,7	62,8	63,0	62,8	1194,3	695,4	1198,2	502,8	2,375									
2,378																		3,1			1201
7,0	4,5	4,3	51,8	63,0	63,4	63,1	63,2	1200,4	700,8	1202,8	502,0	2,391	2,515	4,96	14,42	65,60	3,9	1270,4	1,009	1282	
8,0	4,5	4,3	51,8	63,2	63,0	63,2	63,1	1199,4	701,3	1203,2	501,9	2,390									
9,0	4,5	4,3	51,8	63,0	63,1	63,3	63,1	1200,6	701,6	1203,9	502,3	2,390									
2,390																		3,4			1312
10,0	5,0	4,8	57,5	63,5	63,3	63,4	63,4	1203,1	704,3	1206,1	501,8	2,398	2,498	4,01	14,57	72,46	4,0	1225,8	1,002	1228	
11,0	5,0	4,8	57,5	63,4	63,5	63,3	63,4	1203,6	704,6	1206,3	501,7	2,399									
12,0	5,0	4,8	57,5	63,3	63,5	63,6	63,5	1202,4	703,9	1205,6	501,7	2,397									
2,398																		3,8			1254
13,0	5,5	5,2	63,3	63,7	63,8	64,0	63,8	1206,8	706,4	1209,1	502,7	2,401	2,481	3,25	14,88	78,14	4,0	1119,3	0,987	1105	
14,0	5,5	5,2	63,3	64,0	63,9	64,0	64,0	1206,1	705,8	1208,4	502,6	2,400									
15,0	5,5	5,2	63,3	63,6	63,7	63,5	63,6	1205,9	706,1	1208,3	502,2	2,401									
2,401																		4,0			1109
															(3-5)	14-16	(65-75)	(2-4)			



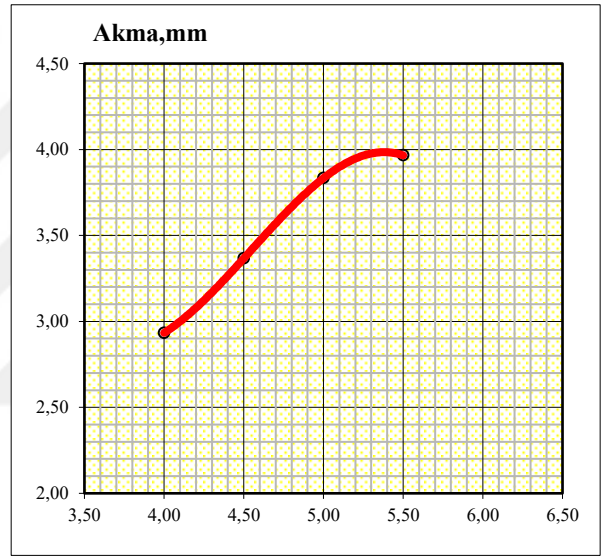
Şekil 5.29. %2 OEKB katkılı bitüm Dp – Bitüm %



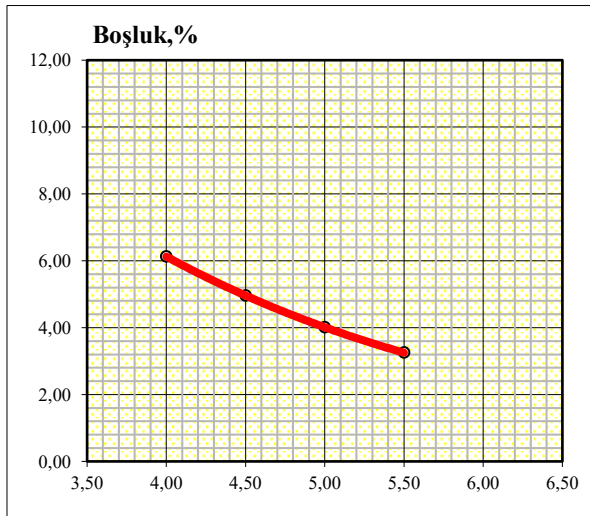
Şekil 5.30. %2 OEKB katkılı bitüm VFA – Bitüm %



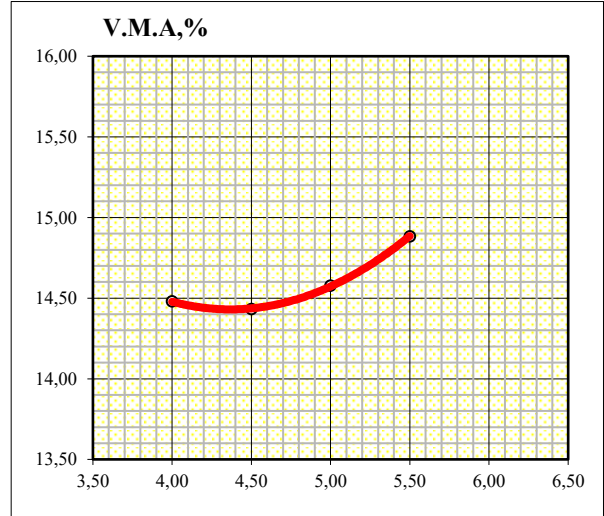
Şekil 5.31. %2 OEKB katkılı bitüm Stabilite – Bitüm %



Şekil 5.32. %2 OEKB katkılı bitüm Akma – Bitüm %



Şekil 5.33. %2 OEKB katkılı bitüm Vh – Bitüm %



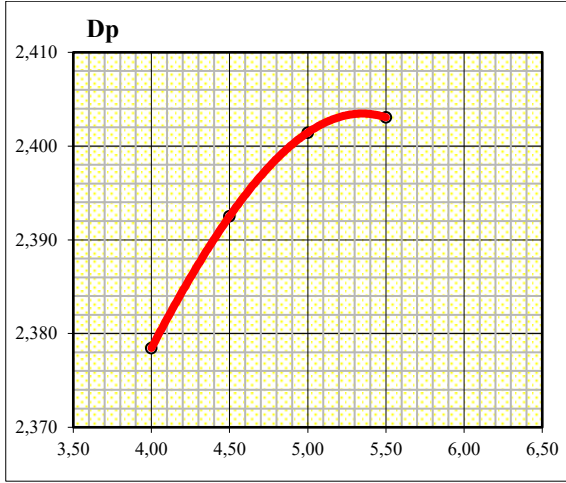
Şekil 5.34. %2 OEKB katkılı bitüm VMA – Bitüm %

Deney verileri sonucunda, V_h (%) grafiği esas alınarak %4 boşluk oranına karşılık optimum bitüm oranı %4,99 olarak belirlenmiştir. Bu bitüm oranı için VMA (agregalar arası boşluk) değeri %14,55 olarak ölçülmüş ve şartname kriterleri olan %14–%16 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, %4,99 bitüm oranına karşılık gelen VFA (bitümle dolu boşluk oranı) değeri %73 olup, şartname sınırları olan %65–%75 aralığında kalmaktadır. Optimum bitüm oranında akma değeri 3,35 mm (şartname aralığı: 2–4 mm), stabilite değeri ise 1255 kg (şartname minimumu: 900 kg) olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, %2 OEKB katkılı bitümlü karışım için elde edilen optimum bitüm oranının tüm şartname kriterlerini karşıladığı tespit edilmiştir.

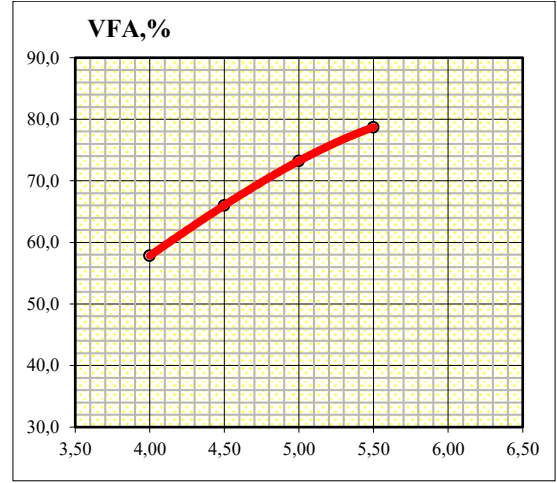
%5 oranında OEKB ile modifiye edilmiş bitüm için optimum bitüm oranını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen Marshall tasarım deney sonuçları Tablo 5.24’de verilmiştir. Deney verileri kullanılarak, bitüm oranlarına göre hazırlanan stabilite, akma, D_p , V_h , V_f , VMAGrafikleri Şekil 5.35 - Şekil 5.40 aralığında sunulmuştur.

Tablo 5.24. %5 OEKB katkılı bitüm kullanılarak hazırlanan Marshall tasarım deney sonuçları

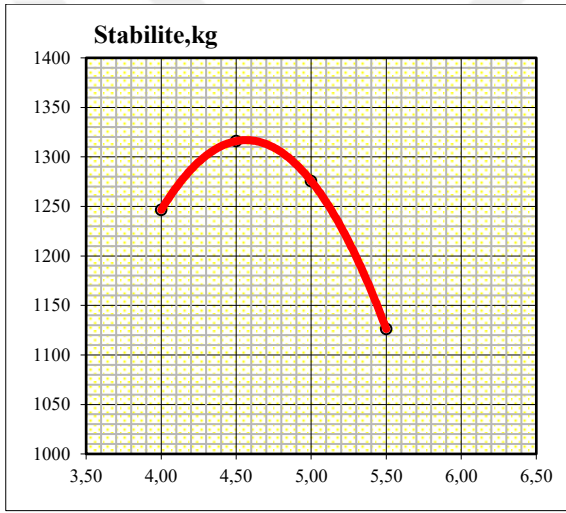
Briket No.	Bitüm %	Wa	Wb	gr	Briket Yüksekliği				Havadaki Ağırlık (g) A	Sudaki Ağırlık (g) C	Doy.Yüz.K. Ağırlık (g) B	Hacim cm ³ V	Hacim Özg Ağırlık D _p	Maks Teo Özg Ağır. D _T	Boşluk %, V _h	VMA %	Asf. Dolu Boşluk % V _f	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltil. Stabilite
					1	2	3	ort.													
4,0	4,0	3,8	46,0		62,9	62,6	62,5	62,7	1193,7	695,8	1197,6	501,8	2,379	2,533	6,09	14,44	57,81	2,20	1314,5	1,025	1347
5,0	4,0	3,8	46,0		62,8	62,5	62,6	62,6	1194,1	696,2	1198,5	502,3	2,377					2,50	1227,0	1,022	1254
6,0	4,0	3,8	46,0		62,8	62,7	63,0	62,8	1193,2	695,4	1196,9	501,5	2,379					2,50	1124,0	1,012	1137
2,378																		2,40			1246
7,0	4,5	4,3	51,8		62,7	63,0	62,8	62,8	1201,6	702,4	1204,1	501,7	2,395	2,515	4,88	14,35	66,01	2,80	1351,0	1,017	1374
8,0	4,5	4,3	51,8		63,2	63,1	63,0	63,1	1200,7	701,8	1203,7	501,9	2,392					2,40	1230,5	1,012	1245
9,0	4,5	4,3	51,8		62,8	62,7	62,6	62,7	1199,4	701,3	1203,1	501,8	2,390					3,10	1300,1	1,022	1329
2,393																		2,77			1316
10,0	5,0	4,8	57,5		63,4	63,3	63,2	63,3	1203,6	704,8	1205,3	500,5	2,405	2,498	3,87	14,44	73,23	3,60	1237,5	1,007	1246
11,0	5,0	4,8	57,5		63,5	63,3	63,2	63,3	1202,2	703,8	1204,8	501,0	2,400					3,60	1300,0	1,007	1309
12,0	5,0	4,8	57,5		63,1	63,4	63,0	63,2	1203,8	704,2	1205,8	501,6	2,400					3,90	1257,9	1,012	1273
2,401																		3,70			1276
13,0	5,5	5,2	63,3		63,8	63,9	63,7	63,8	1205,6	705,8	1208,1	502,3	2,400	2,481	3,15	14,79	78,70	3,90	1201,3	0,994	1194
14,0	5,5	5,2	63,3		63,4	63,3	64,0	63,6	1206,3	707,1	1208,8	501,7	2,404					4,20	1100,7	0,987	1086
15,0	5,5	5,2	63,3		64,1	64,0	64,3	64,1	1204,7	706,7	1207,7	501,0	2,405					4,00	1120,3	0,980	1098
2,403																		4,0			1126
																(3-5)	14-16	(65-75)	(2-4)		



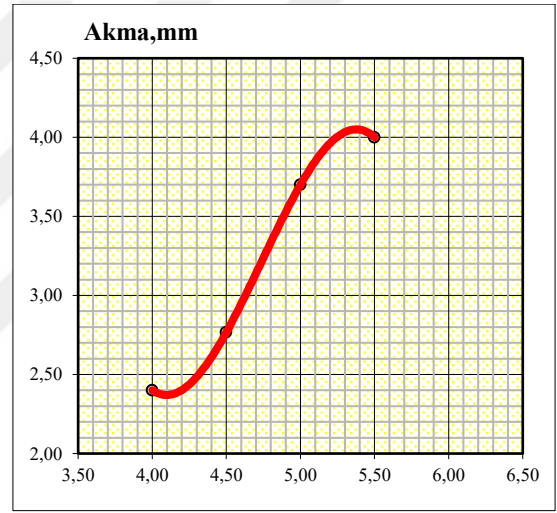
Şekil 5.35. %5 OEKB katkılı bitüm Dp – Bitüm %



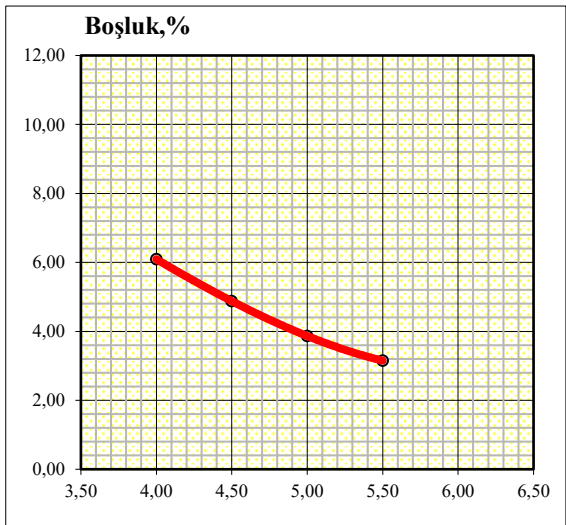
Şekil 5.36. %5 OEKB katkılı bitüm VFA – Bitüm %



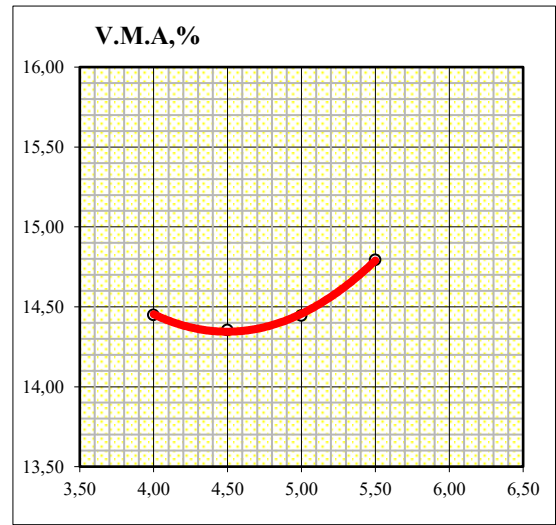
Şekil 5.37. %5 OEKB katkılı bitüm Stabilité–Bitüm %



Şekil 5.38. %5 k OEKB atkılı bitüm Akma–Bitüm %



Şekil 5.39. %5 OEKB katkılı bitüm Vh–Bitüm %



Şekil 5.40. %5 OEKB katkılı bitüm VMA–Bitüm %

Deney sonucunda Vh (%) grafiği temel alınarak %4 hava boşluğu oranına karşılık gelen optimum bitüm oranı %4,90 olarak belirlenmiştir. Bu bitüm oranında, VMA (agregalar arası boşluk) değeri %14,4 olarak tespit edilmiş olup, bu değer %14–%16 aralığındaki şartname kriterlerini sağlamaktadır. Aynı bitüm oranı için VFA (bitümle dolu boşluk oranı) değeri %71,2 olarak hesaplanmış ve bu da şartnamede belirtilen %65–%75 aralığı içerisinde yer almaktadır. Optimum bitüm oranında elde edilen akma değeri 3,55 mm (şartname sınırı: 2–4 mm) ve stabilite değeri ise 1290 kg (şartname minimum değeri: >900 kg) olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, %5 oranında OEKB katkısı içeren bitümlü karışım numunesi için belirlenen optimum bitüm oranının tüm şartname gerekliliklerini karşıladığı tespit edilmiştir.

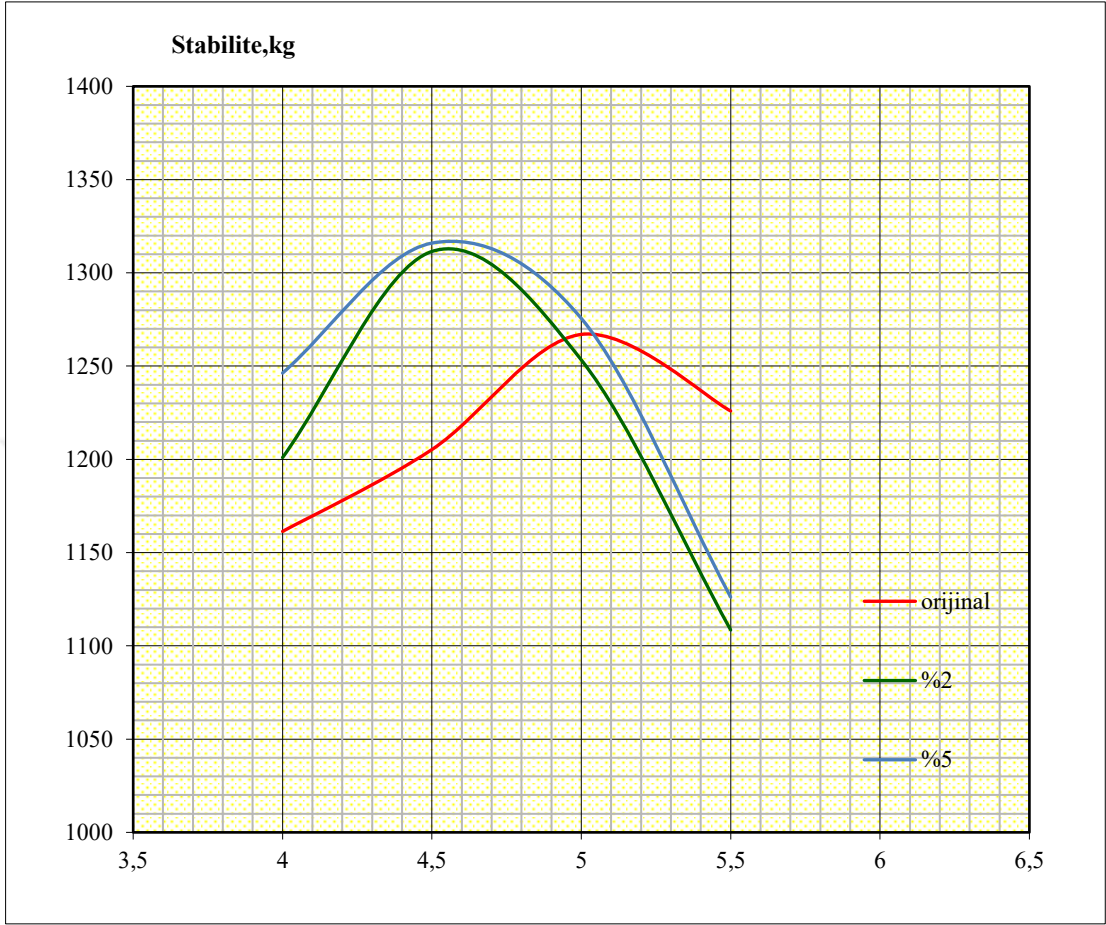
Tablo 5.25. Aşınma Tip-1 dizayn kriterlerince Marshall deney sonuçlarının karşılaştırılması

Optimum bitüm oranında Marshall Parametreleri	Şartname Kriterleri	Orijinal Bitüm	%2 OEKB katkılı bitüm	%5 OEKB katkılı bitüm
Optimum bitüm oranı (%)	4-7	4,85	4,99	4,90
Stabilite (kg)	> 900	1235	1255	1290
Akma (mm)	2-4	3,2	3,35	3,55
VFA (%)	65-75	70,9	73	71,2
VMA (%)	14-16	14,4	14,55	14,5

Tablo 5.25’de sunulan orijinal bitüm ile %2 ve %5 oranlarında OEKB ile modifiye edilmiş bitümlere ait Marshall tasarım sonuçları incelendiğinde, bitüm modifikasyonunun optimum bitüm oranında artışa yol açtığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, stabilite değerlerinde de artış tespit edilmiştir. Ayrıca, VFA ve akma değerlerinde de artış olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak, hem orijinal bitümün hem de OEKB içeren bitümlerin deneyler sonucunda elde edilen tüm parametrelerinin ilgili şartnamede belirtilen sınırlar içerisinde kaldığı belirlenmiştir.

Bitümlü karışımın stabilite değeri, bitüm ve agrega arasındaki içsel sürtünme direnci ile kohezyon özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Stabilite değerinin düşük olması, bitümlü karışımın servis ömrü boyunca tekerlek izi, çökme gibi kalıcı deformasyonlara neden olabilmektedir. Buna karşılık, stabilitenin gereğinden yüksek olması ise karışımın esnekliğini azaltarak, trafik yüklerinin etkisiyle çatlak oluşumuna zemin hazırlayabilmektedir (Çubuk ve ark., 2009). Orijinal bitümle karşılaştırıldığında, %2

OEKB katkılı bitümlü karışımın stabilite değerinde %1,6 oranında, %5 OEKB katkılı karışımında ise % 4,5 oranında artış kaydedilmiştir.

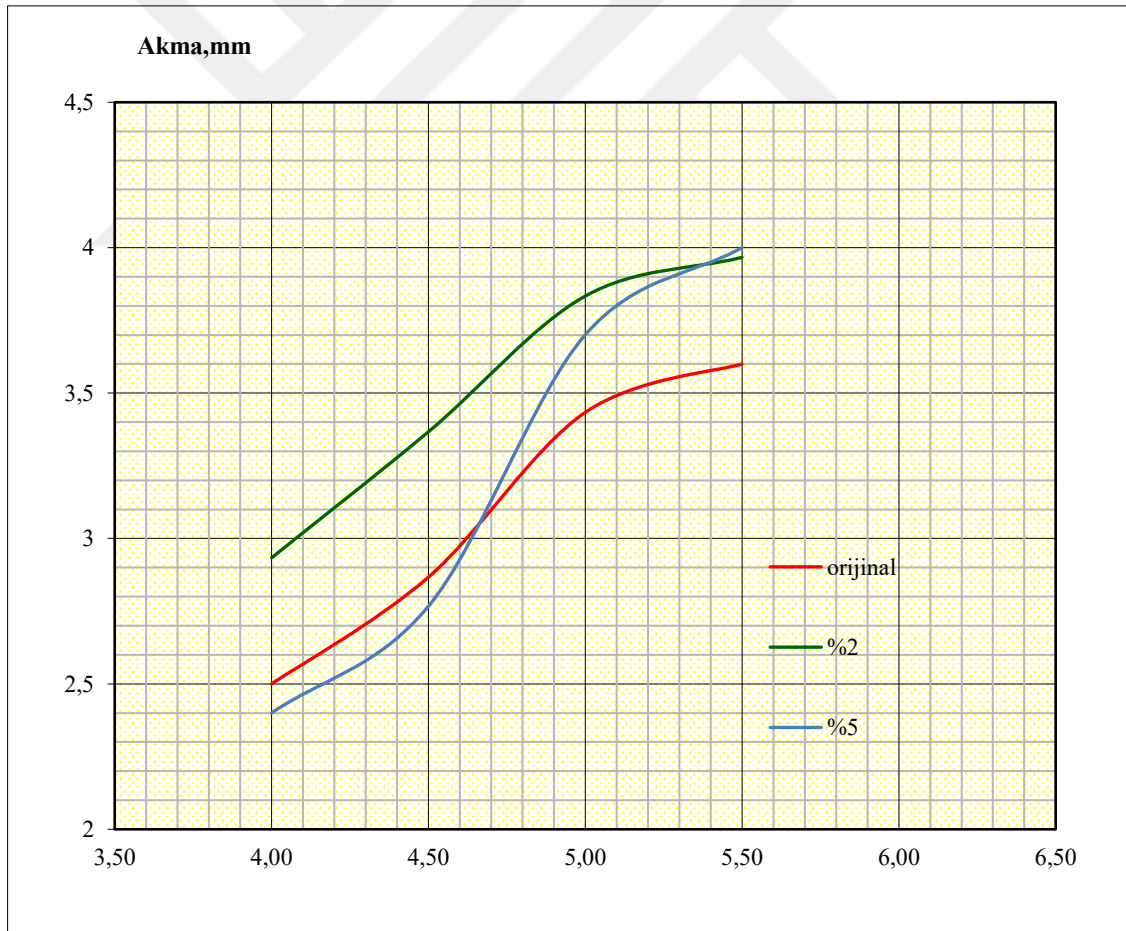


Şekil 5.41. Karışım numunelerinin Stabilite – Bitüm %

2011 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada, bitüm modifikasyonunda trietilenglikol esaslı polibor (TEGPB) katkısı kullanılmış ve yapılan Marshall tasarım deneyi sonuçlarına göre stabilite değerinin %9 oranında arttığı belirlenmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, söz konusu katkı maddesinin bitümlü karışımın dayanıklılığını artırdığı ve özellikle tekerlek izi oluşumu ile çökme gibi kalıcı deformasyonların azaltılmasında etkili olabileceği değerlendirilmiştir (Arslan, 2010).

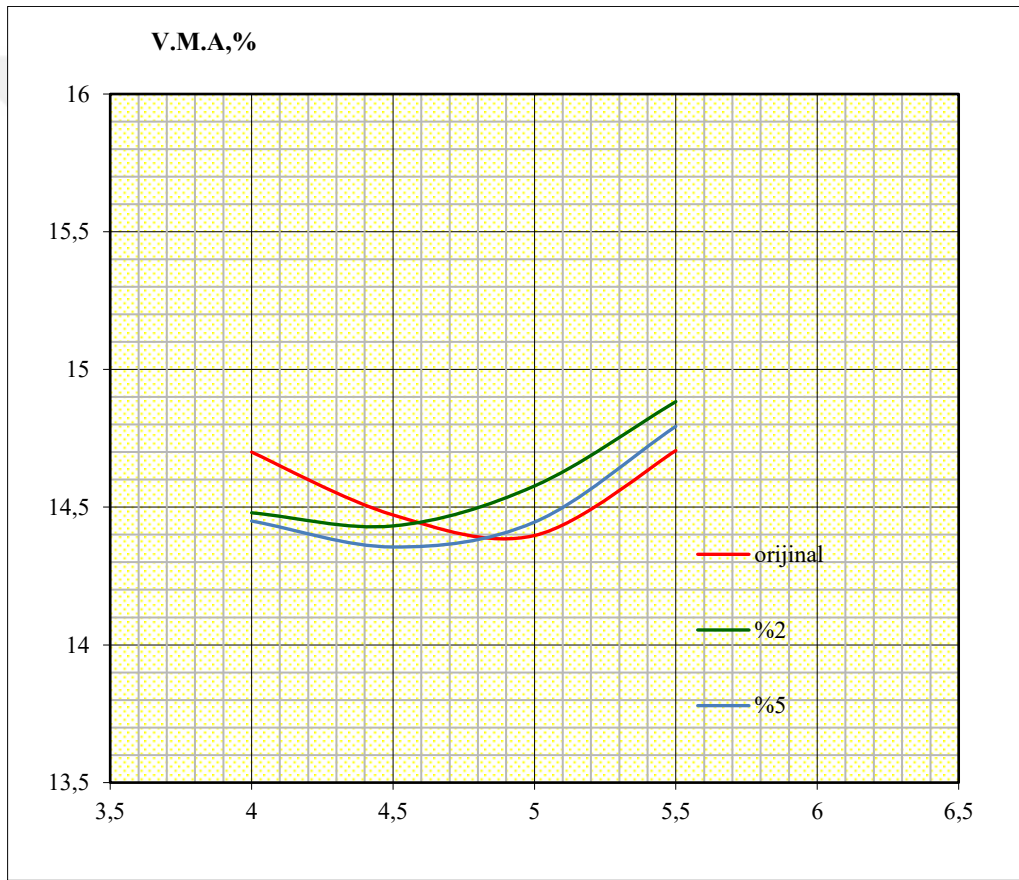
Literatürde borun hem bitümlü karışımlarda agrega olarak hem de bitüm modifiyeri olarak kullanıldığında bitümlü karışım özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Borun agrega olarak kullanıldığında genellikle bitümlü karışım stabilitesini azalttığı tespit edilmiştir. Öğütülmüş halde atık borun, boraks pentahidratın, susuz boraksın toplam agrega içinde ağırlıkça %10-15 seviyelerinde ince agrega ve

filler olarak kullanılması stabiliteyi olumsuz etkilemiştir (Keskin ve Karacasu, 2018; Keskin ve Karacasu, 2022). Kolemanitin bitümlü karışımlarda agrega olarak kullanılmasıyla stabilitenin azaldığı, V_h 'nin arttığı rapor edilmiştir (Morova ve Terzi, 2015). Bir çeşit bor minerali olan tinkal bitümlü karışımlarda filler yerine değişen oranlarda kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre karışımda kullanılan tinkal oranı arttıkça stabilitenin daha çok azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca tinkalin bitümlü karışımın suya olan hassasiyetini arttırdığı tespit edilmiştir (Selman, 2015; Gürer ve Selman, 2016). Filler yerine kullanılan borojipsum da stabilitede azalma yaratırken bitümlü karışımların VMA değerlerinde artışa sebep olmuştur (Kutuk-Sert ve Kutuk, 2013). Borun agrega olarak kullanılmasıyla bitümlü karışımın stabilitesinde artış sadece üleksit ile sağlanmıştır. Ancak üleksit ile akma değerlerinde artış olduğu gözden kaçmamalıdır (Kabadayı, 2019).



Şekil 5.42. Karışım numunelerinin Akma – Bitüm %

Borun bitümlü karışımlarda agrega olarak kullanıldığında karışım özelliklerinde genel olarak sağlanan olumsuzlukların aksine bitüm modifiyeri olarak karışımlara dahil olduğunda mekanik özelliklerin gelişmesine imkan verdiği literatür çalışmaları temelinde tespit edilmiştir. Polibor bileşiklerinin (MEGPC, DEGPC, TEGPB), melas esaslı bor oksitin, nano boyulu kolemanitin, siklik borat esterin (CBE), organik esaslı borik asit bileşiğinin bitüm modifikasyonunda kullanılmasıyla elde edşlen modifiye bitümlerle hazırlanan bitüm-agrega karışımlarının majör değişkeni olan stabiliteyi arttırdığı görülmüştür (Arslan ve ark., 2014; Arslan ve ark., 2011; Gürü ve ark., 2017; Öcal ve ark., 2018; Oruç ve Yılmaz, 2016; Arslan ve ark., 2012).



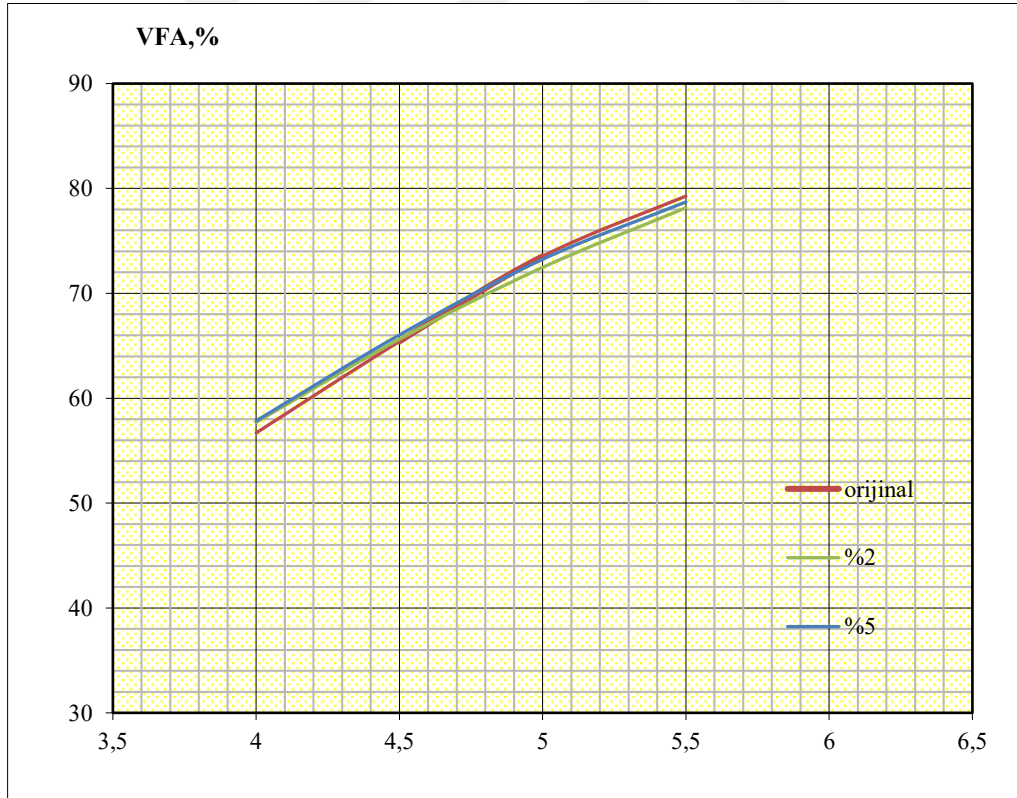
Şekil 5.43. Karışım numunelerinin VMA – Bitüm %

İran’da 2017 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada, bitüm modifikasyonunda %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında gilsonit katkısı kullanılmıştır. Yapılan Marshall tasarım deneyi sonucunda, katkı ilave edilen numunelerin hem stabilite hem de akma değerlerinde artış tespit edilmiştir. Ayrıca, gilsonit oranının artmasıyla birlikte optimum bitüm oranında da paralel olarak artış olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular doğrultusunda,

gilsonit katkısının Marshall kararlılığını artırdığı sonucuna varılmıştır (Jahanian ve ark., 2017).

VMA, sıkışmış karışımda agregalar arasındaki boşluk yüzdesini ifade eder. Beklendiği üzere, VMA değerleri bitüm oranına bağlı olarak önce azalma, ardından ise artış göstermektedir. OEKB ilavesinin VMA üzerinde olumsuz bir etkisi gözlemlenmemiştir. Şekil 5.43’de sunulan grafikte görüldüğü üzere, şartname kriterleri üç karışım numunesi için de sağlanmaktadır.

Asfaltla dolu boşluk oranı (VFA), VMA’nın yüzde kaçının bitümle dolu olduğunu gösterir. Şartnamede belirtilen sınır %65-%75 aralığındadır. Şekil 5.44’de sunulan grafikte görüldüğü üzere, şartname kriterleri üç karışım numunesi için de sağlanmaktadır. Ayrıca, beklendiği üzere bitüm oranının artmasıyla tüm numunelerde VFA değerinde artış gözlemlenmiştir.

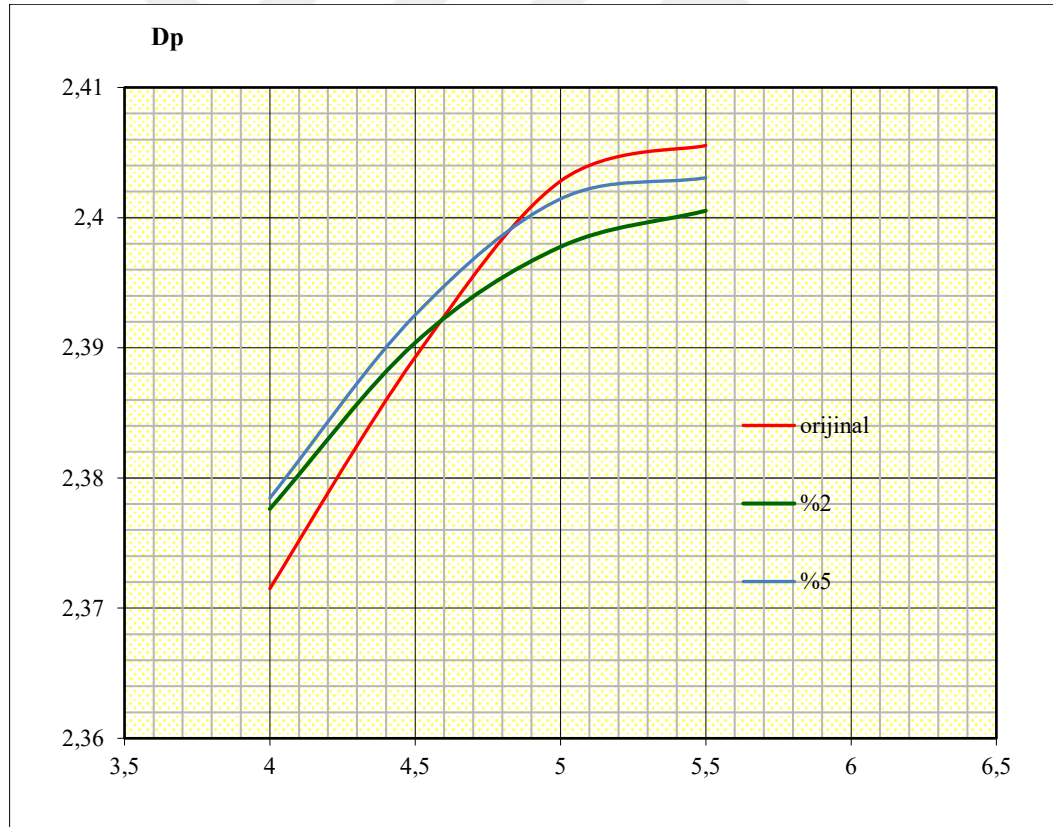


Şekil 5.44. Karışım numunelerinin VFA – Bitüm %

VFA, bitümlü karışımların performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. VFA değerinin istenen aralıkta olmaması, VMA’nın bitümle dolma oranını etkileyerek

karışımın özelliklerinde olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir (Durmaz ve Morova, 2024). Şartname limitlerini aşan VFA değerleri karışımdaki boşluk oranının azalmasına neden olur ve bu durum, sıcak iklim koşullarına maruz kalan bitümlü karışımlarda kuma problemlerine yol açabilir. Tablo 5.25’de sunulan verilere göre, katkıli bitümlerin VFA oranlarında orijinal bitüme kıyasla önemsiz bir artış olduğu ve tüm numunelerin şartnamede belirtilen kriterler dâhilinde kaldığı görülmüştür.

2022 yılında gerçekleştirilen bir tez çalışmasında bitüm modifikasyonunda cam lifi kullanılmıştır. Marshall deneyi sonuçlarına göre, cam lifi oranının artmasıyla hava boşluğu oranı, VMA değeri ve boşluk hacminde artış gözlemlenmiştir. Ancak lif oranının artışıyla birlikte Vf değeri ve stabilite azalmış; stabilite değerinin katkıli numunelerde giderek düştüğü, hatta referans numunenin altına indiği, buna karşın şartnamede belirtilen sınırların sağlandığı tespit edilmiştir (Demir, 2022).



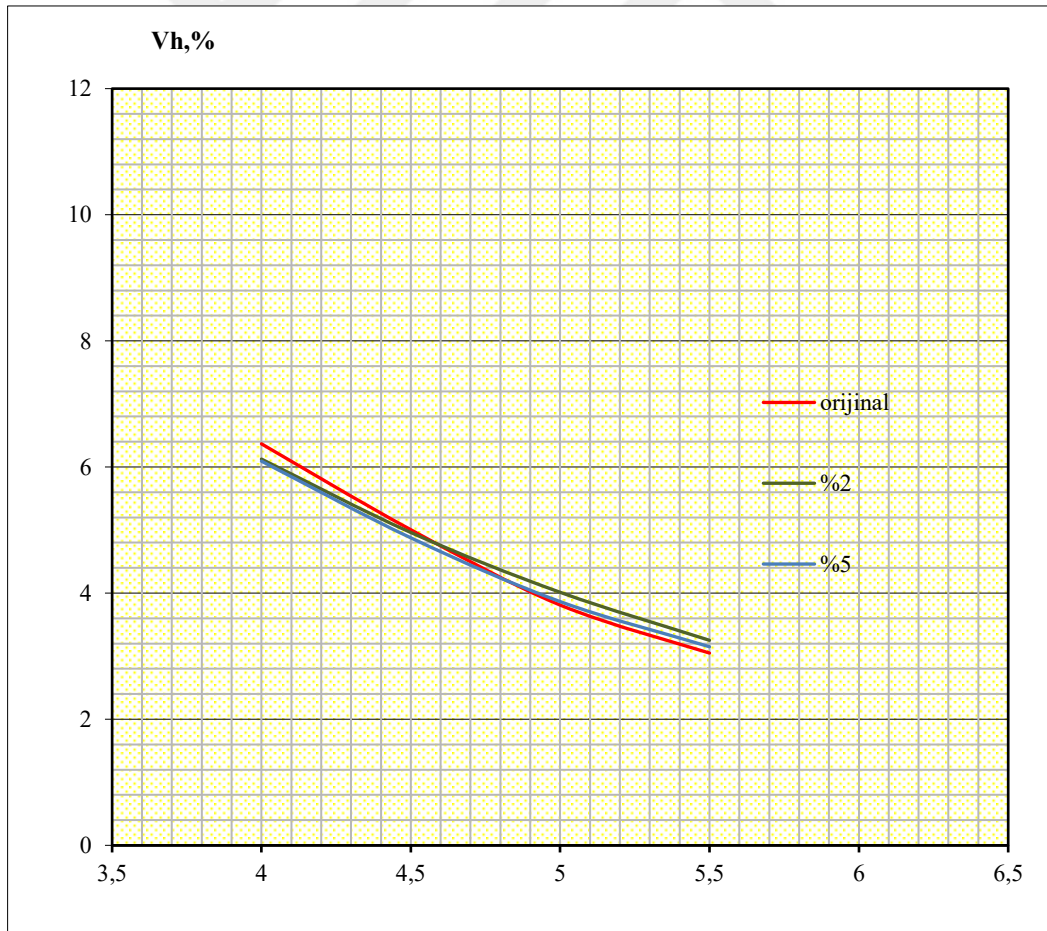
Şekil 5.45. Karışım numunelerinin Dp – Bitüm %

Bir diğer tez çalışmasında ise bitüm modifikasyonunda %15, %20 ve %25 oranlarında kırıntı formulu kauçuk kullanılmıştır. Marshall tasarım deneyi sonucunda,

stabilite ile birlikte VFA ve VMA değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir. Marshall kararlılığı sağlanan numunelerin yeterli mukavemete sahip olduğu belirtilerek katkı numunelerin daha kararlı ve dayanıklı olduğu sonucuna varılmıştır (Abdiqadir, 2023).

Şekil 5.45’de sunulan verilere göre bitüm oranı arttıkça saf bitüm ve katkı bitümlü karışım numunelerinde yoğunluk değerlerinde artış gözlenmiştir. Yoğunluğun yüksek olması, karışımdaki boşluk miktarının azaldığını göstermektedir. Optimum bitüm içeriğinde, %5 OEKB katkıli bitümlü karışım en yüksek D_p (birim hacim ağırlığı) değerine ulaşarak en iyi bitüm agrega sıkışma performansı sağlamıştır.

V_h , bitümlü karışım içerisindeki hava boşluğudur. Asfalt karışımındaki toplam hava boşluğu oranının yüzdesel olarak ifadesidir. Tüm karışımlarda beklenildiği üzere bitüm oranı arttıkça hava boşluğu azalmaktadır. Bu durum, artan bitüm miktarının agregalar arasındaki boşlukları daha fazla doldurmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.46. Karışım numunelerinde V_h – Bitüm % değişimi

Numuneler optimum bitüm oranı bakımından karşılaştırıldığında, OEKB modifikasyonunun optimum bitüm içeriğini arttırdığı tespit edilmiştir. Bu artışın, %2 OEKB katkılı bitümde daha fazla olduğu görülmektedir (Tablo 5.26).

Tablo 5.26. Optimum bitüm oranı

	Orijinal Bitüm	%2 OEKB katkılı bitüm	%5 OEKB katkılı bitüm
Optimum bitüm oranı (%)	4,85	4,99	4,90

2022 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada bitüm modifikasyonunda mermer ve beton atıkları kullanılmıştır. Marshall tasarım deneyi sonuçlarına göre, beton atığı kullanımının stabilite değerlerinde ve optimum bitüm oranında artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Söz konusu atıkların çevresel etkileri dikkate alındığında, optimum bitüm miktarındaki artışların tolere edilebilir olduğu ifade edilmiştir (Alakara ve ark., 2023).

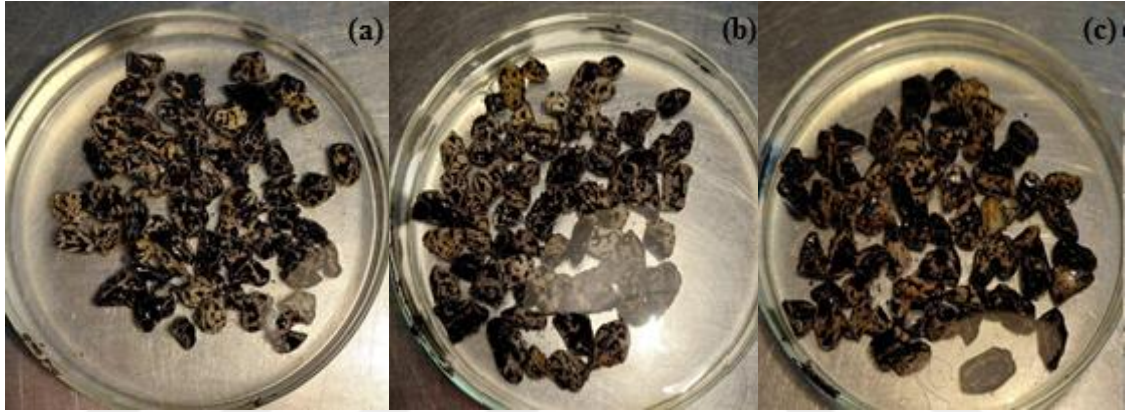
2019 yılında yapılan bir başka çalışmada, atık bor içeren üç farklı katkı maddesi (CBW, BP ve BA) modifiyer olarak kullanılmıştır. Marshall tasarım testi sonucunda, bu üç atık malzemenin hava boşluğu, agregalar arası boşluk, akma değeri ve optimum bitüm oranını artırdığı ancak stabilite değerlerinde azalma meydana getirdiği görülmüştür. Ayrıca, BA (Anhydrous Borax) ve BP (Borax pentahydrate) katkılı numunelerin en yüksek kararlılık değerlerine %5 katkı oranında ulaştığı belirtilmiştir (Keskin ve Karacasu, 2019).

5.8 Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları

Saf bitüm ve OEKB modifiyeli bitüm ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar kapsamında %2 ve %5 OEKB modifiye bitüm oranlarına sahip numunelerde Nicholson soyulma deneyi uygulanmıştır. Deneyde, Uğural taş ocağından temin edilen bazalt tipi agrega kullanılmış olup, bitüm oranı %5 olarak belirlenmiştir. Deney sonucunda numunelerin soyulma durumlarına ait görüntüler Şekil 5.47’de sunulmuştur.



Şekil 5.47. Saf , %2 ve %5 OEKB katkıli bitümlü karışım numunelerinin soyulma görselleri



Şekil 5.48. (a) Saf bitüm **(b)** %2 OEKB katkıli bitüm **(c)** %5 OEKB katkıli bitüm numuneleri soyulma görüntüleri

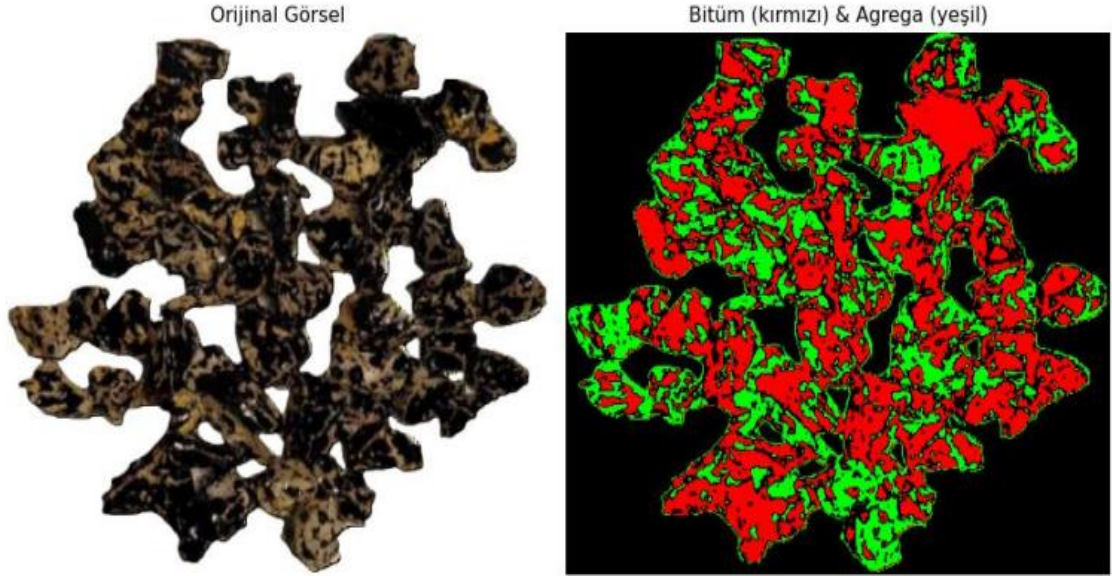
Saf bitüm, %2 OEKB katkıli bitüm ve %5 OEKB katkıli bitüm numunelerine ait soyulma deneyi görüntüleri Şekil 5.48’de sunulmuştur.

Numunelerin soyulmadan kalan bitüm yüzdeleri görsel olarak ve ışık yardımıyla gözlemlenmiş, ayrıca Python yazılımı ile analiz edilmiştir. Python veri analizi sonuçları Şekil 5.49, Şekil 5.50 ve Şekil 5.51’de sunulmuştur. Python analizinde yeşil renk soyulmanın meydana geldiği agrega yüzeylerini, kırmızı renk ise soyulma oluşmayan yüzeyleri göstermektedir. Yazılıma ait kod bigileri EK-2’de verilmiştir. Numunelerin soyulmadan kalan bitüm oranları Şekil 5.52’de sunulmuştur.

Saf bitüme ait Python analizi sonuçları;

Agrega yüzey oranı: %39.39

Bitüm yüzey oranı: %60.61

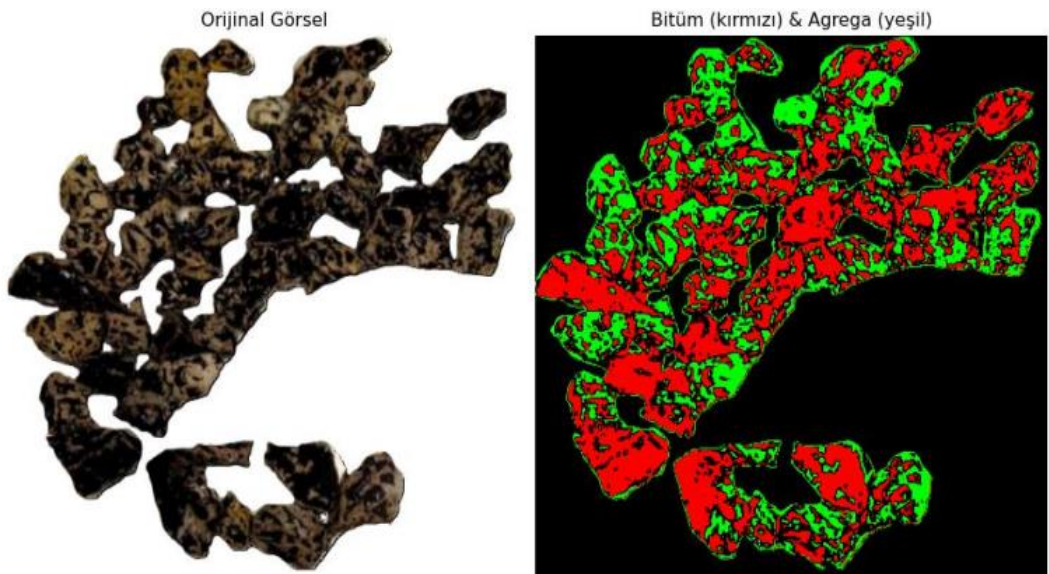


Şekil 5.49. Saf bitüm Python soyulma analizi görüntüsü

%2 OEKB katkıli bitüme ait Python analizi sonuçları;

Agrega yüzey oranı: %40.38

Bitüm yüzey oranı: %59.62

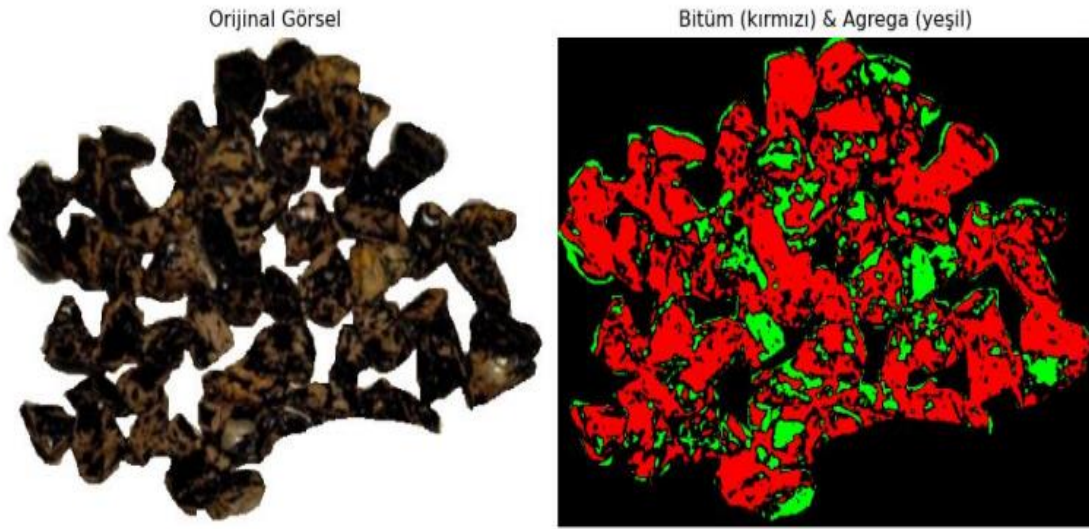


Şekil 5.50. %2 OEKB katkıli bitüm Python soyulma analizi görüntüsü

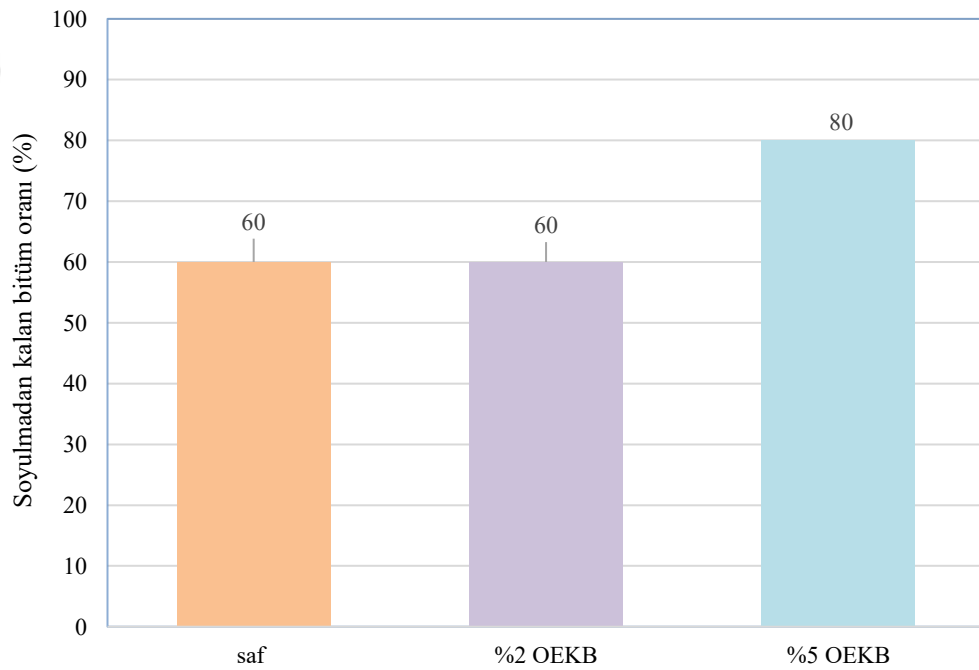
%5 OEKB katkılı bitüme ait Python analizi sonuçları;

Agrega yüzey oranı: %20.31

Bitüm yüzey oranı: %79.69



Şekil 5.51. %5 OEKB katkılı bitüm Python soyulma analizi görüntüsü



Şekil 5.52. Nicholson soyulma testinde elde edilen soyulma dirençleri (%)

Numunelerin soyulma dirençleri sırasıyla %60, %60 ve %80 oranlarında tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, şartnamede belirtilen kriterlerin (minimum bitümle kaplı yüzey %60) tüm numuneler açısından karşılandığı

görülmektedir. OEKB katkılı numunelerin orijinal bitüm numunesine kıyasla soyulma direncinin iyileştiği; özellikle %5 OEKB katkılı bitüm numunesinde, saf bitüme kıyasla soyulma direncinde %60'dan %80'e belirgin bir artış olduğu tespit edilmiştir.

Laboratuvar ortamında sentezlenerek hazırlanan melas bazlı bor oksit (MBOC) bileşiğinin modifiyer olarak kullanıldığı çalışmada, bitüm penetrasyon değerinin azalığı, yumuşama noktasının arttığı, Marshall stabilitesinin ve Nicholson soyulma direncinin önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir. MBOC katkılı numunelerde soyulma direncinin %90'lara kadar çıktığı ve nem hasarının azalacağı değerlendirilmiştir (Gürü ve ark., 2016). Organik esaslı borik asit bileşiği de Nicholson soyulma direnci üzerinde olumlu etkisi olduğu raporlanmıştır. Organik esaslı borik asit bileşiği ile modifiye edilen bitümün kullanıldığı karışımda soyulma direncinin %30'dan %90'a yükseldiği belirtilmiştir (Arslan ve ark., 2012).

Benzer sonuçlar 2013 yapılan bir çalışmada ortaya çıkmıştır. Bitüm laboratuvar ortamında organik esaslı maddeler ile modifiye edilmiştir. Orijinal ve modifiye bitümlere uygulanan soyulma testi sonucunda modifiye bitüm numunelerinde agrega yüzeyinde soyulmanın azaldığı tespit edilmiştir. Elde edilen veriler sonucu, bitüm modifikasyonunun karışımların kalıcı deformasyon ve soyulma dirençlerini arttırdığı değerlendirilmiştir (Arslan ve ark., 2013).

5.9 İndirekt Çekme Mukavemeti Deneyi Sonuçları

Bu çalışmada kullanılan deney numuneleri saf bitüm ile Marshall tasarımı deneyi ve Nicholson soyulma deneyi sonuçlarında en iyi performansı gösteren %5 oranında OEKB içeren bitüm ile hazırlanmıştır. Deneyler, asfalt karışımlarının sıcaklık değişimiyle dayanımlarındaki değişimi incelemek amacıyla, 0°C ve 40°C olarak iki farklı sıcaklık seviyesinde gerçekleştirilmiştir. 0°C'deki testler OEKB'nin düşük sıcaklık sebebiyle meydana gelen çatlaklar üzerindeki etkisinin, 40°C'deki testler ise yüksek sıcaklıklarda görülen tekerlek izi gibi deformasyon türü bozulmalar üzerindeki etkisinin bitüm-agrega karışımları ile değerlendirilmesi için uygulanmıştır. Her sıcaklık düzeyi ve bitüm türü için üçer adet olmak üzere toplamda 12 adet briket numunesi hazırlanmıştır.



Şekil 5.53. Briket yanal yüklemesi

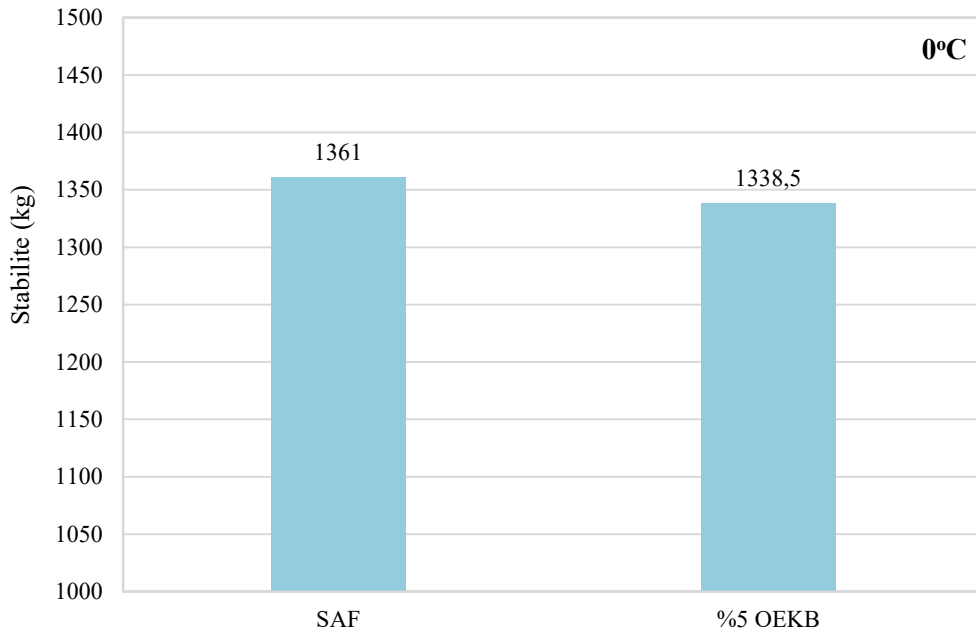
Hazırlanan briketler deney öncesinde uygun sıcaklıktaki su banyosunda yeterli süre bekletilerek termal dengeye ulaşmaları sağlanmıştır. Termal dengeye ulaşan numuneler Şekil 5.53’de gösterildiği gibi yatay pozisyonda deney cihazına yerleştirilerek teste tabi tutulmuştur.

İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) deneyine ilişkin sonuçlar Tablo 5.26’da sunulmuştur. Briket numunelerinin yükseklik, çap ve stabilite değerleri ölçülmüş; bu veriler, İÇM hesaplamasında kullanılan formüle uygulanarak her numuneye ait indirekt çekme mukavemeti değerleri elde edilmiştir.

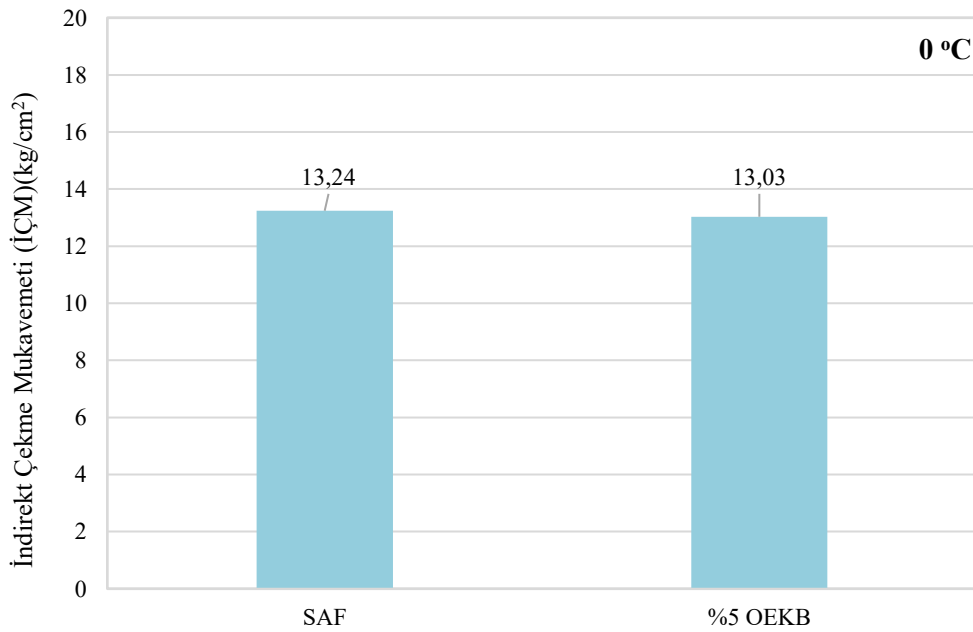
Tablo 5.27. İndirekt çekme mukavemeti deney sonuçları

	°C				40°C			
	Yükseklik (mm)	Çap (mm)	Stabilite (kg)	İÇM (kg/cm ²)	Yükseklik (mm)	Çap (mm)	Stabilite (kg)	İÇM (kg/cm ²)
Saf Bitüm	64,4	101,3	1340,5	13,08	64,7	101,4	796,7	7,73
	64,5	101,3	1378,2	13,43	64,5	101,5	819,4	7,97
	64,8	101,5	1364,3	13,21	64,6	101,3	831,6	8,09
	Ortalama		1361	13,24	Ortalama		815,9	7,93
%5 OEKB katkılı bitüm	64,6	101,3	1355,2	13,18	64,5	101,4	875,3	8,52
	64,7	101,4	1331,7	12,92	64,5	101,5	896,4	8,72
	64,4	101,2	1328,6	12,98	64,4	101,2	887,1	8,67
	Ortalama		1338,5	13,03	Ortalama		886,3	8,63

0°C sıcaklıkta gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen ortalama stabilite ve İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) değerleri sırasıyla Şekil 5.54 ve Şekil 5.55’de sunulmuştur. Elde edilen bulgulara göre saf bitüm numunesi hem stabilite hem de İÇM açısından %5 oranında OEKB katkısı içeren bitüm numunesine kıyasla daha yüksek değerler göstermiştir.



Şekil 5.54. 0°C’de ortalama stabilite değerleri



Şekil 5.55. 0°C’de ortalama İÇM değerleri

Saf bitüm ile %5 OEKB katkılı bitüm arasındaki stabilite değerleri bakımından fark %1,68 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, İÇM değerlerinde ise iki bitüm türü arasındaki fark %1,61 olarak hesaplanmıştır. Yani, OEKB 0°C'deki stabilite ve İÇM değerlerinde azalma meydana getirmiştir. Bu veriler ışığında, katkı maddesinin 0°C'de saf bitüme kıyasla bitümün esnekliğini artırdığı ve düşük sıcaklık performansını iyileştirdiği öngörülmektedir. İÇM testi standart olarak 25°C'de yapılan karışım testidir. Ancak araştırmacılar standart dışında uygulamalar üzerinden karışımların farklı özellikleri üzerinde yorumlar yapabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda daha yüksek rijitlik modülü değerine sahip karışımların düşük sıcaklık sebebiyle oluşan çatlaklara karşı daha az direnç gösterebildikleri ifade edilmiştir (Das ve ark., 2012; Tayfur ve ark., 2007; Arslan ve ark., 2012; Yılmaz, 2016). İÇM sonuçlarına göre 0°C'de OEKB ile sağlanan daha düşük test sonuçları OEKB'nin bitümlü karışımlarda düşük sıcaklık çatlamlarına karşı direnç yeteneğini olumlu etkilediğini gösterir. Test sonuçlarına göre OEKB'nin bu hususta etkisinin sınırlı olduğu düşünülebilir. Bu testin 0°C'den daha düşük sıcaklıklarda uygulanması ile OEKB'nin düşük sıcaklık çatlamları üzerindeki etkisi daha net olarak belirlenebilir.

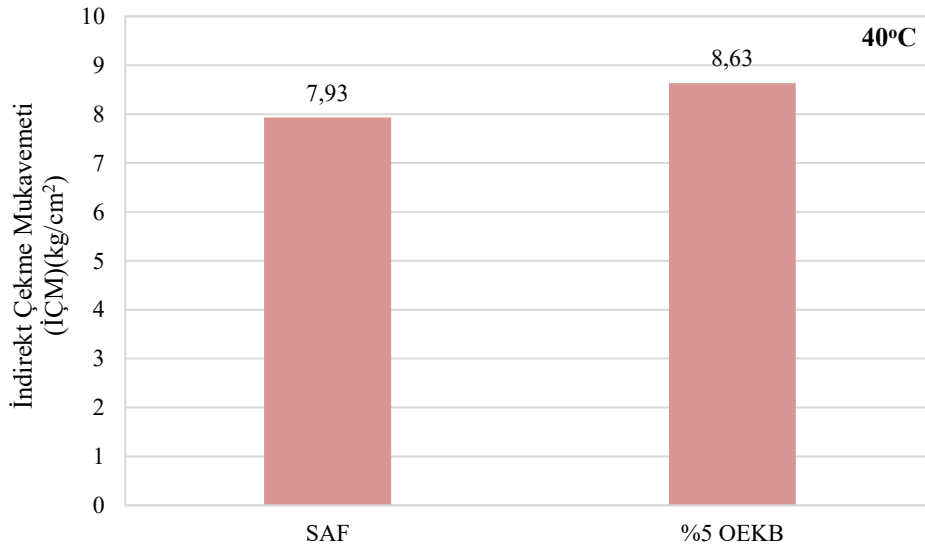
40°C sıcaklıkta gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen stabilite ve İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) değerleri incelendiğinde, her iki numune türü için de 0°C'deki değerlere kıyasla azalma gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, sıcaklık artışına rağmen %5 OEKB katkılı bitüm numunesinin stabilite performansında saf bitüme göre belirgin bir artış tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, %5 OEKB katkılı bitümün ortalama stabilite değeri saf bitüme kıyasla %8,62 oranında daha yüksek bulunmuştur. Benzer şekilde, İÇM değerlerinde de OEKB ile %8,83 oranında bir artış sağlanmıştır. Bu sonuçlar, 40°C sıcaklıkta %5 OEKB içeren bitümlü karışımın tekerlek izi gibi kalıcı deformasyonlara karşı direncinin saf bitüme kıyasla arttığını göstermektedir. OEKB gibi bor içeren halkalı borat ester (CBE) ile modifikasyon sonucu 40°C'deki rijitlik modül değerlerinin arttığı çalışmada CBE'nin bitümlü karışımlarda tekerlek izi direncini arttırdığı yorumlanmıştır (Yılmaz, 2016).

Furtuna ve arkadaşları tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada modifiyer olarak EVA bazlı reçineler olan SBS ve EBR kullanılmış ve indirekt çekme mukavemeti deneyi yapılmıştır. Deney 25°C ve 35°C olarak iki farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Katkılı numunelerin 25°C’de ITS değerleri saf bitüme göre %15 daha yüksek çıkmıştır. Tüm numunelerin 25°C’de çekme mukavemeti değerleri daha yüksek çıkmıştır. Her iki sıcaklıkta da en yüksek mukavemeti SBS katkıli numuneler vermiştir. SBS katkısında 35°C’de saf bitümle olan mukavemet farkı daha yüksek oranda olduğu için sıcaklığa karşı daha az duyarlı olduğu sonucuna varılmıştır.

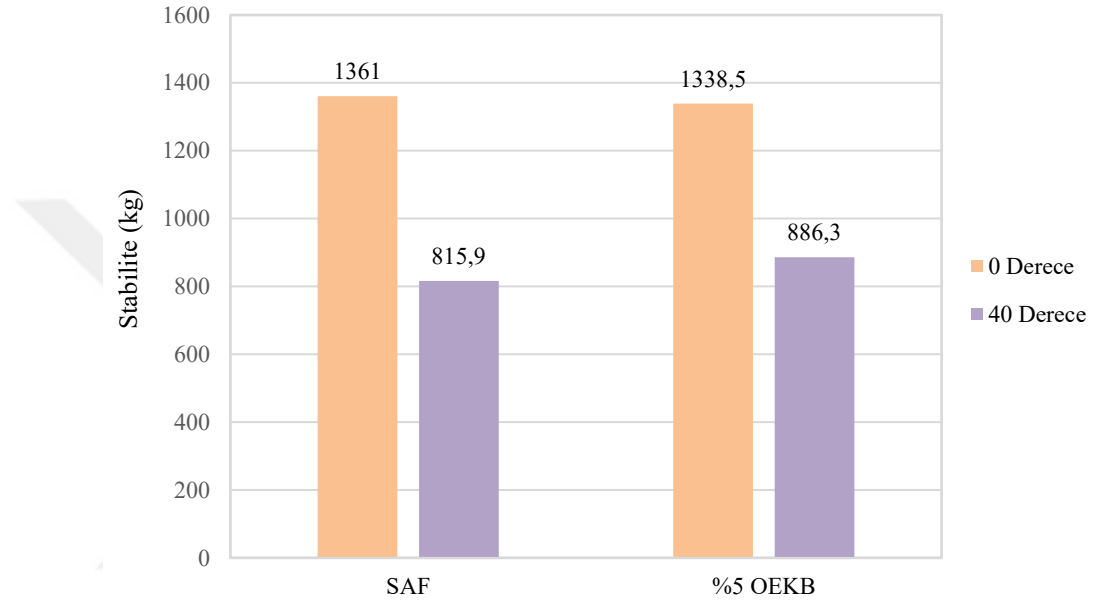


Şekil 5.56. 40°C’de ortalama stabilite değerleri

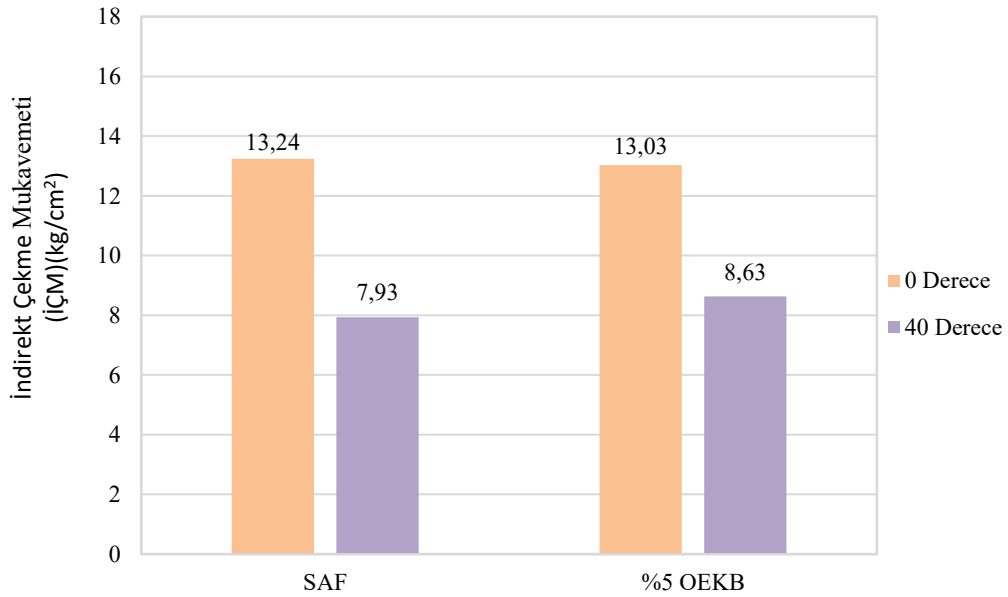


Şekil 5.57. 40°C’de ortalama İÇM değerleri

Şekil 5.58 ve Şekil 5.59’da, 0°C ve 40°C sıcaklıklarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen stabilite ve İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) değerleri birlikte sunulmuştur. Her iki bitüm türünde de sıcaklık artışıyla birlikte stabilite ve İÇM değerlerinde genel bir azalma eğilimi gözlemlenmiştir. Ancak, saf bitüm numunesinde sıcaklık artışına bağlı stabilite kaybının, %5 OEKB katkılı bitümlü karışıma kıyasla daha belirgin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.58. 0°C ve 40°C’de ortalama stabilite değerleri



Şekil 5.59. 0°C ve 40°C’de ortalama İÇM değerleri

Deney verileri ayrı ayrı değerlendirildiğinde, 40°C sıcaklıkta %5 OEKB katkılı bitümlü karışımın hem stabilite hem de İÇM açısından saf bitüme kıyasla üstün performans sergilediği görülmüştür. Buna karşın, 0°C’de OEKB katkılı bitüm numunesinde hafif düzeyde bir stabilite düşüşü gözlemlenmiş olsa da, bu durum düşük sıcaklık koşullarında esnekliğin artması açısından olumlu bir gelişme olarak değerlendirilmektedir.

Bu sonuçlar, %5 OEKB’nin yüksek sıcaklıklarda asfalt karışımının deformasyon dayanımını artırdığını; düşük sıcaklıklarda ise çatlama direncini sınırlı düzeyde geliştirdiğini ortaya koymaktadır.

2008 yılında yapılan çalışmada siyah karbonun bitümlü karışımda filler olarak kullanımı araştırılmış ve birkaç deneyle birlikte indirekt çekme direnci deneyi de uygulanmıştır. Deney 0°C, 20°C ve 40°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda en yüksek direnç 0°C verilerinde çıkarken en düşük direnç 40°C verilerinde görülmüştür. Sıcaklık arttıkça numunelerin ITS değerleri azalmıştır. Ayrıca karbonun filler olarak kullanılmasının indirekt çekme mukavemetini artırdığı ve bu durumun tekerlek izi oluşumuna karşı direnci artıracığı sonucuna varılmıştır (Ahmedzade ve ark., 2008).

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında bitüm modifiyesinde bor malzemesi etkilerini incelemek amacıyla bir bor çeşidi olan kolemanit kullanılmıştır. Kolemanit monoetilen glikol ile laboratuvar ortamında belirlenen oranlarda sentezlenmiş ve OEKB olarak kısaltılan organik esaslı kolemanit bileşiği kimyasal olarak sentezlenmiştir. Çalışmada uygulanan tüm deneylerde, bitüm ve OEKB katkı maddesi en uygun karıştırma koşulları olan 150°C’de 20 dakika süreyle karıştırılmıştır.

Modifiye bitüm deneylerinde OEKB katkı oranları %1, %2, %3, %5 ve %8 olarak uygulanmıştır. Bitümlü karışım deneylerinde, modifiye bitümün performans analizleri sonucunda en yüksek kazanımların elde edildiği %2 ve %5 OEKB oranları esas alınarak çalışmalar sürdürülmüştür.

Uygulanan tüm deneylere ilişkin özet sonuçlar ile bu sonuçlar çerçevesinde yapılan değerlendirmeler aşağıda özetlenmiştir;

- Viskozite test sonuçlarına göre bitümün OEKB ile modifiye edilmesi sonucu viskozitesinde katkı oranının artışıyla orantılı olarak belirgin bir azalma meydana gelmiş, bitüm daha akışkan hale gelmiştir. Bu durum, bitümün işlenebilirliğini artırarak bitümlü karışımların hazırlanması sürecinde plentteki enerji tüketiminin azalmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca, plent sıcaklığının düşmesine neden olarak bitümün kısa dönem yaşlanmasını olumlu yönde etkilemesi beklenmektedir.
- Penetrasyon testi sonuçları, katkı maddesinin bitümün kıvamını artırdığını ortaya koymuştur. Yumuşama noktası testleri, OEKB ilavesinin bitümün yumuşama sıcaklığını artırdığını göstermiştir. Bu sonuçlar, OEKB’nin sıcak iklim koşullarında kullanımı açısından uygun olduğunu desteklemektedir.
- Kuvvet ölçümlü düktilite test sonuçlarına göre OEKB ilave edilen bitüm numunelerinin kopması için saf bitüme kıyasla daha fazla enerji gerektiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, OEKB modifikasyonunun bitümün kohezyon özelliğini geliştirdiğini göstermiştir. En yüksek kohezyon artışı %2 OEKB modifiyeli bitümde elde edilmiştir. %2 katkı oranı ile modifiye edilen bitümde, sünme

enerjisinin saf bitüme göre yaklaşık 2,25 kat artmıştır. %5 katkı içeren numunede ise saf bitüme kıyasla yaklaşık 2 kata yakın bir yükselme sağlanmıştır.

- Elastik geri dönme oranı tüm katkılı numunelerde artış göstermiş olup, en yüksek değerler sırasıyla %2, %8 ve %5 OEKB oranlarında elde edilmiştir. Bu sonuçlar, OEKB modifikasyonu bitümün elastik özelliklerinin geliştiğini gösterir.
- DSR testi sonucunda %1 katkı oranı hariç tüm modifiye bitümlerde $G^*/\sin\delta$ değerlerinde belirgin bir artış kaydedilmiştir. RTFO yaşlandırması sonrası yapılan DSR testlerinde de $G^*/\sin\delta$ değerinde benzer şekilde artış gözlenmiştir. Bu bulgular, katkı maddesinin tekerlek izi oluşumuna karşı direnç sağladığını göstermektedir.
- BBR deneyinde, -12°C 'de test edilen tüm modifiye bitümlerin sünme oranı (m), saf bitüme kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, BBR parametrelerinin birlikte değerlendirilmesini sağlayan S/m oranları, OEKB ilavesiyle birlikte gelişim sağlamıştır. Katkılı bitüm numunelerinin düşük sıcaklık sınıflarında da iyileşme gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, katkı maddesinin düşük sıcaklık performansını artırarak termal çatlak oluşumunu azaltabileceğini göstermektedir.
- Marshall karışım tasarımı sonuçlarına göre, %2 ve %5 oranında OEKB katkısı içeren karışımların optimum bitüm oranları ve stabilite değerleri saf bitüme kıyasla artış göstermiştir. Stabilite değerleri saf bitümde 1235 kg, %2 katkıda 1255 kg ve %5 katkıda 1290 kg olarak ölçülmüştür. Bu bulgular, katkı maddesinin karışımın Marshall dayanımını artırdığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, hem saf hem de katkılı bitüm numuneleri tüm Marshall parametreleri açısından mevcut şartname gerekliliklerini sağlamıştır.
- Nicholson soyulma deneyi sonuçlarına göre, %2 katkı oranına sahip bitümlü karışımın soyulma direnci, saf bitümle aynı seviyede bulunmuştur (% 60). Özellikle %5 OEKB oranı ile hazırlanan karışımda ise soyulma direncinde % 60'tan % 80'e artış gözlemlenmiştir. Bu durum, katkı maddesinin bitüm-agrega adezyonunu iyileştirerek suya karşı dayanımı artırabileceğini göstermektedir.
- İndirekt çekme mukavemeti (İÇM) deneyinde, 0°C sıcaklıkta yapılan testlerde OEKB katkılı bitüm numunelerinde saf bitüme kıyasla stabilite değerlerinde bir miktar azalma gözlemlenmiştir. Bu durum, düşük sıcaklık sebebiyle meydana

gelen çatlak oluşumunu azaltabileceğine işaret etmektedir. Öte yandan, 40°C sıcaklıkta gerçekleştirilen deneylerde OEKB katkılı bitüm numunelerinde stabilite değerlerinde %8,62, İÇM değerlerinde ise %8,83 oranında artış kaydedilmiştir. Bu bulgular, OEKB ilavesinin bitümlü karışımların yüksek sıcaklıklardaki deformasyon direncini arttırarak tekerlek izi direncini geliştirdiğini göstermektedir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, Organik Esaslı Kolemanit Bileşiği bitümlü karışımın dayanımını artıracak ve özellikle sıcak iklim bölgelerinde tekerlek izi gibi kalıcı deformasyonların oluşumunu azaltacaktır. Ayrıca OEKB'nin soğuk iklim koşullarında da yüksek performans sergilediği; esnekliği artırarak termal çatlak oluşum riskini azalttığı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdiqadir, M. A. (2023). *The effect of waste tire modified bitumen on the performance of asphalt concrete* (Yüksek lisans tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.
- Ahmedzade, P., Altaş, T., & Geçkil, T. (2008). Asfalt betonunda siyah karbonun filler olarak kullanımı. *İMO Teknik Dergi*, 19, 4493–4507.
- Ahmedzade, P., Yılmaz, M., & Geçkil, T. (2008). Appropriate binder selection to application region according to superpave system: Bingöl example. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 25(4).
- Airey, G. D., Singleton, T. M., & Collop, A. C. (2002). Properties of polymer modified bitumen after rubber-bitumen interaction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14, 344-354.
- Alakara, E. H., Ağaoğlu, M. N., & Nacar, S. (2023). Investigation of Marshall parameters of bituminous hot mixtures produced with marble and concrete wastes and estimation by ANN. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi (GUFBD/GUJS)*, 13(2), 333–349.
- Alakara, E. H., Ağaoğlu, M. N., & Nacar, S. (2023). Mermer ve beton atıkları ile üretilen bitümlü sıcak karışımların Marshall parametrelerinin incelenmesi ve YSA ile tahmin edilmesi. *GUFBD / GUJS*, 13(2), 333-349.
- Al-Khateeb, G., Sukkari, A., Ezzat, H., Nasr, E., & Zeiada, W. (2024). Rheology of crumb rubber-modified warm mix asphalt (WMA). *Polymers*, 16(906).
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (t.y.).
- Aminbakhsh, S. 2013. *Bitüm ve bitümlü karışımların özelliklerinin şeker pancarı melası kullanılarak geliştirilmesi*. MSc Dissertation, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü. (2021). *Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı*. Ankara.
- Arslan, D. Ş. (2021). Türkiye’de farklı yörelerde bulunan kolemanit minerallerinin fiziksel, kimyasal ve termal özelliklerinin tayini. *GÜFBED/GUSTIJ*, 11(4), 1225-1234.
- Arslan, D., & Köse, H. (2023). Investigating the effects of aggregate gradation on Marshall parameters of bituminous hot mixtures. *Gazi University Journal of Science, Part C*, 11(2), 486-497.
- Arslan, D., (2010). Esnek üstyapıların performans özelliklerinin sentetik metal ve polibor katkı maddeleriyle geliştirilmesi (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi

- Arslan, D., Gürü, M., Çubuk, M.K., and Çubuk, M. 2011. Improvement of bitumen and bituminous mixtures performances by triethylene glycol based synthetic polyboron. *Construction and Building Materials*, 25: 3863-3868.
- 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.
- Arslan, D., Gürü, M., Çubuk, M. K., Çubuk, M., & Farshbafian, F. K. (2020). Investigation of rheological and mechanical properties of kaolin-clay modified bitumen. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(3), 1409-1419.
- Arslan, D., Gürü, M., Çubuk, M.K., (2012). Performance assessment of organic-based synthetic calcium and boric acid modified bitumens. *Fuel* 102.766-772.
- Asim, H. A., Mashaan, M. R., & Karim, N. S. (2013). Investigations of physical and rheological properties of aged rubberised bitumen. *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 239036.
- Banar, M., Güney, Y., Özkan, A., Günkaya, Z., Bayrakçı, E., & Ulutaş, D. (2016). Utilization of waste clay from boron production in bituminous geosynthetic barrier (GBR-B) production as landfill liner. *International Journal of Polymer Science*, 2016, Article ID 1-8. <https://doi.org/10.1155/2016/2850215>
- Bideci, Ö. S., & Bideci, A. (2018). Öğütülmüş kolemanit katkısının çimento harçlarına etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 133-138.
- Bor Elementi. (t.y.). Boren. <https://boren.tenmak.gov.tr/tr/calisma-alanlari/bor-elementi.html>
- Bozdemir, M.G., Oruc, S., and Yesilcicek, H. (2023). Physical and microstructural properties of new boron resin compound synthesized asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(2): 04022426, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004611.
- Chai, Z. H. (2015). *An investigation study on usage of boric powder and ethylene glycol based synthetic boric acid polymer as bitumen modifiers* (Unpublished master's thesis). Faculty of Engineering and Green Technology.
- Çalışıcı, M., Gürü, M., & Çubuk, M. K. (2023). Improving asphalt binder and hot mix asphalt aging properties by adding synthetic polyboron and organic magnesium oxide. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48, 4711–4718.

- 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.
- Çavdar, E., Kumandaş, A., Şahan, N., Kabadayı, E., & Oruç, Ş. (2024). Investigation of rheological and physical properties of SBS and WCO composite modified bitumen. *Turkish Journal of Civil Engineering*.
- Çelik, A. G., & Çakal, G. O. (2016). Characterization of Espey colemanite and variation of its physical properties with temperature. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 52(1), 66–76.
- Çubuk, M., Gürü, M., & Çubuk, M. K. (2009). Improvement of bitumen performance with epoxy resin. *Fuel*, 88, 1324–1328.
- Çubuk, M., Gürü, M., Çubuk, M. K., & Arslan, D. (2013). Bitümün özelliklerinin organik esaslı magnezyum katkı maddesi ile geliştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(2), 257-264.
- Das PK, Tasdemir Y, Birgisson B. Low temperature cracking performance of WMA with the use of superpave indirect tensile test. *Constr Build Mater* 2012;30:643–9.
- Demir, E. (2022). *Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan farklı lif boylarının karışımın fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi* (Yüksek lisans tezi). Düzce Üniversitesi.
- Demir, M. (2011). *SBS, EVA ve reaktif terpolimer kullanılarak bitüm modifikasyonu* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Demirel, B., & Nasıroğlu, S. (2017). Bor mineralleri ve atıklarının çimentoda kullanılma stratejileri. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(1), 95-100.
- Deniz, M. T., & Lav, A. H. (2010). Asfaltlarda bitümle birlikte granüler sülfür kullanımının stabiliteye etkisi. *İTÜ Dergisi/D*, 9(6), 137-148.
- Dias, A., Silva, H., Palh, C., & Oliveria, J. (2021). Low-temperature performance of polymer-modified binders in stone mastic asphalts. *Infrastructures*, 6, 58.
- Durmaz, A. C., & Morova, N. (2024). Investigation of performance properties of milled carbon fiber reinforced hot mix asphalt. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 30(1).
- Enerji Sistemleri Mühendisliği. (t.y.). Bor. <https://boren.tenmak.gov.tr/tr/calisma-alanlari/bor-elementi.html>
- Erdoğan, Y., Zeybek, M. S., & Demirbaş, A. (1998). Cement mixes containing colemanite from concentrator wastes. *Cement and Concrete Research*, 28(4), 605–609.

- 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.
- Etimaden. (t.y.). *Etimaden Resmi Sitesi*. <https://www.etimaden.gov.tr>
- Etimaden. (t.y.). *Kolemanit*. <https://boren.tenmak.gov.tr/tr/calisma-alanlari/bor-elementi.html>
- Eyüboğlu, S. (2013). *Kolemanit konsantratör atıklarının çimento üretiminde değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Feyiso, J. E. (2019). *Bor minerallerinden PEM yakıt pili uygulamaları için sodyum borhidrür sentezi ve karakterizasyonu* (Yüksek lisans tezi). Samsun.
- Furtuna, B., Yalçın, E., Kök, B. V., & Yılmaz, M. (2019). EVA bazlı reçine modifiyeli bitümlü karışımların mekanik özellikler bakımından SBS modifikasyonu ile karşılaştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(2), 497-506.
- García, A. J., Aguiar-Moya, P., Salazar, D. J., Baldi, S. A., & Loría, S. L. (2019). Methodology for estimating the modulus of elasticity of bitumen under different aging conditions by AFM. *Road Materials and Pavement Design*, 1-15.
- García-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., Martínez-Boza, F. J., & Gallegos, C. (2004). Bitumen modification by waste polymers. In *Progress in Rheology of Biological and Synthetic Polymer Systems* (ss. 363-369). Spain.
- Geçkil, A. (2013). *Öğütülmüş araç lastiğinin bitüm ve bitümlü sıcak karışımların düşük sıcaklık ve elastik özelliklerine etkisi*. Fırat Üniversitesi. (Yüksek lisans tezi).
- Geçkil, T., Alataş, T., & Ahmedzade, P. (2011). Superpave sisteminde bölge meteorolojik hava verileri kullanılarak performans dereceli (PG) bağlayıcı sınıfı seçimi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(1), 88-106.
- Gedik, A. (2021). Soğuk bölgelerde kullanılacak saf bitümün modifikasyonu ve beton asfalt üretiminde kullanımı: B70/100 bitüm örneği. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15, 548-559.
- Gencel, O., Brostow, W., Özel, Ç., & Filiz, M. (2010). An investigation on the concrete properties containing colemanite. *International Journal of Physical Sciences*, 5(3), 216-225.
- Gökalp, İ., Çetin, H. M., Özinal, Y., Gündoğan, H., & Uz, V. E. (2019). Polimer modifiye bitüm modifikasyonuna etki eden parametreler üzerine bir literatür araştırması. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 954-964.

- Gökalp, İ., Yıldız, A. U., Eren, M. B., & Uz, V. E. (2019). Atık motor yağı modifiyeli bitümün mühendislik özelliklerinin araştırılması. *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University*, 27(3), 184-193.
- Görkem, İ. Ç. (2014). *Orta sıcaklıktaki asfalt karışımlarının performanslarının değerlendirilmesi* (Doktora tezi). İzmir.
- Gürel, İ. (2022). *Atık bor malzemesinin bitümde katkı maddesi olarak kullanımının araştırılması* (Yüksek lisans tezi). İzmir.
- Gürer, C., and Selman, G.Ş. 2016. Investigation of Properties of Asphalt Concrete Containing Boron Waste as Mineral Filler. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 22(1): 118-125.
- Gürü, M., Çubuk, M. K., Arslan, D., & Aminbakhsh, S. (2017). Effects of sugar beet molasses and molasses-based boron oxide compound on bitumen properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001485](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001485)
- Hamzaoui, R., Guessasma, S., & Bennabi, A. (2012). Penetration testing and thermal behavior of bitumen 35/50 and modified bitumen 13/40. *European Physical Journal Applied Physics*, 59, 10201.
- Hasan, W. M., Yousif, R. A., Jasim, A. F., & Tayh, S. A. (2023). Enhancing bitumen properties through worm mix asphalt additives: A study on physical and rheological characteristics. *E3S Web of Conferences*, 427, 03027.
- Ilıcalı, M. S., Tayfur, H., Özen, İ., Sönmez, K., & Eren, K. (2001). *Asfalt ve uygulamaları* (s. 1-3). Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.
- İrhan, B. (2022). *Atık fotopolimerin bitümün geleneksel ve reolojik özelliklerine etkisi* (Yüksek lisans tezi). Fırat Üniversitesi.
- İskender, C. (2023). *Nanokil-SBS/EVA-bitüm modifikasyonunda optimum modifikasyon parametrelerinin araştırılması* (Doktora tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- İzol, E. (2020). *Taş mastik asfalt yapımında mineral filler olarak mermer tozunun kullanılması* (Yüksek lisans tezi). Harran Üniversitesi, Şanlıurfa.
- Jahanian, H. R., Shafabakhsh, G., & Divandari, H. (2017). Performance evaluation of hot mix asphalt (HMA) containing bitumen modified with Gilsonite. *Construction and Building Materials*, 131, 156–164.
- Jahromi, S. G., Ahmadi, N. A., Vossugh, S., & Mortazavi, M. (2012). Effects of nanoclay on rutting and fatigue resistance of bitumen binder. *International Journal of Materials Research*, 103.

- Kabadayı, E. 2019. *Üleksitin taş mastik asfalt karışımlarda filler olarak kullanılabilirliğinin araştırılması*. MSc Dissertation, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye
- Kara, C. (2019). *Kolemanit ikameli beton yolların durabilite özellikleri* (Yüksek lisans tezi). Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize.
- Karaağaç, A. (2015). *Endüstriyel bor atıklarından borun geri kazanımı ve nanoboroksit eldesi* (Yüksek lisans tezi). Balıkesir Üniversitesi.
- 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.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2023). Karayolları teknik şartnamesi: Yol üstyapıları. *Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları*.
- Karşlıoğlu, A., Onur, M. İ., & Balaban, E. (2022). Investigation of boron waste usage in civil engineering applications. *NÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(3), 727-735.
- Keskin, M., & Karacasu, M. (2018). Atık bor içeren asfalt betonlarının performanslarının değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(2), 185-192.
- Keskin, M., & Karacasu, M. (2019). Effect of boron containing additives on asphalt performance and sustainability perspective. *Construction and Building Materials*, 218, 434-447.
- Keskin, M., and Karacasu, M. 2022. Artificial Neural Network Modelling for Asphalt Concrete Samples with Boron Waste Modification. *Journal of Engineering Research*, 10(4B): 26-45
- Kimya Borsası. (t.y.). *Mono etilen glikol*. <https://www.kimyaborsasi.com.tr/tr/m/mono-etilen-glikol>
- Komut, M., Yüknü, K., & Öztürk, T. (2021). *Bitümlü bağlayıcılar laboratuvar el kitabı*. Araştırma ve Geliştirme Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Köfteci, S., Ahmedzade, P., & Kurtayev, B. (2014). Performance evaluation of bitumen modified by various types of waste plastics. *Construction and Building Materials*, 73, 592-602.
- Kök, B. V., Yılmaz, M., & Geçkil, A. (2013). Evaluation of low-temperature and elastic properties of crumb rubber– and SBS-modified bitumen and mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(2).

- Kök, B. V., Yılmaz, M., & Kuloğlu, N. (2011). Asfaltit ve SBS modifiyeli bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 14(3), 193-197.
- Kumandaş, A. (2021). *Bitkisel atık yağ ilavesiyle reaktif polimer ve polifosforik asit modifiyeli bitümün, düşük sıcaklık performansının ve işlenebilirliğinin geliştirilmesi* (Yüksek lisans tezi). On Dokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun.
- Kumar, A., & Suman, S. K. (2017). Experimental investigations on nanoclay (Cloisite-15A) modified bitumen. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 11(2).
- Kunt, K. (2016). *Borik asit üretim atığı olan borjipsin yapı sanayinde değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Kutuk-Sert, T., Kutuk, S. 2020. An examination of nanoparticle Colemanite mineral added warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 243: 118252, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118252>
- Kutuk-Sert, T., and Kutuk, S. 2013. Physical and Marshall Properties of Borogypsum Used as Filler Aggregate in Asphalt Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(2): 266-273
- Liu, S., Ma, C., Cao, W., Fang, J. (2010). Influence of aluminate coupling agent on low-temperature rheological performance of asphalt mastic. *Construction and Building Materials* 24. 650-659.
- Luo, W., & Chen, J. (2011). Preparation and properties of bitumen modified by EVA graft copolymer. *Construction and Building Materials*, 25, 1830-1835.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (t.y.). *Bor mineralleri*. <https://mta.gov.tr>
- Maharaj, C., Maharaj, R., & Maynard, J. (2015). The effect of polyethylene terephthalate particle size and concentration on the properties of asphalt and bitumen as an additive. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 31(1).
- Maisarah, R., Norhidayah Abdul, H., Mohd Rosli, H., Ramadhansyah, P. J., Nurul Athma Mohd, S., Mohd Ezree, A., & Nurul Hidayah Mohd, K. (2018). Engineering properties of bitumen modified with bio-oil. *MATEC Web of Conferences*, 250, 02003.
- Medin, C. (2023). *Borik asit içerikli tuz çözeltilerinin bipolar membranlı elektrodializ ile proseslenmesinde borik asit davranışının incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Morova, N., and Terzi, S. 2015. Evaluation of Colemanite waste as aggregate hot mix asphalt concrete. *Suleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Science*, 19(2): 8-15

- Morova, H. V. (2023). Atık cam tozunun bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak değerlendirilmesi. *Teknik Bilimler Dergisi*, 13(1), 29-33.
- Morova, N., & Terzi, S. (2015). Kolemanit atıkların sıcak karışım asfalt betonda agrega olarak değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Science*, 19(2), 8-15.
- Orhan, F. (2021). *Bitümlü karışımlar laboratuvarı çalışmaları*. Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Oruç, Ş., & Yılmaz, B. (2016). Improvement in performance properties of asphalt using a novel boron-containing additive. *Construction and Building Materials*, 123, 207-213.
- Oruç, Ş., Yılmaz, B., & Sancak, K. (2015). Effect of boron-containing additives on rheological properties of asphalt binder. *Road Materials and Pavement Design*, 17(4): 810-824.
- Oyedepo, O. J., & Oluwajana, S. D. (2014). Evaluation of properties of bitumen modified with waste tyre. *Nigerian Journal of Technology*, 119-124.
- Öcal, A., Gürü, M., & Karacasu, M. (2018). Improvement of bitumen performance properties with nano magnesium spinel and colemanite. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(3), 939-951.
- Öcal, A. 2018. *Nano Malzemelerin Bitümlü Sıcak Karışımların Marshall ve Superpave Karakteristikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması ve Modellenmesi*. PhD Dissertation, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.
- Öztürk, Ş. (2017). *Melas ve uçucu külün bitüm özelliklerine etkisi* (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi.
- Pereira, L., Freire, A. C., da Costa, M. S., Antunes, V., Quaresma, L., & Micaelo, R. (2018). Experimental study of the effect of filler on the ductility of filler-bitumen mastics. (ss. 1045-1053). Portugal.
- Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Eskandarsefat, S., Teltayev, B., & Oliviero Rossi, C. (2018). Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances. Kazakhstan.
- Radovskiy, B., & Teltayev, B. (2018). Viscoelastic properties of asphalts based on penetration and softening point. In *Structural Integrity* (Vol. 2). Springer.
- Rodriguez-Alloza, A. M., Gallego, J., & Perez, I. (2013). Study of the effect of four warm mix asphalt additives on bitumen modified with 15% crumb rubber. Spain.
- Rusen, A. (2018). Investigation of structural behavior of colemanite depending on temperature. *Romanian Journal of Materials*, 48(2), 245–250.

- Selman, G.Ş. 2015. *Bor atıklarının asfalt kaplamalarda mineral filler olarak kullanılabilirliği*. MSc Dissertation, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- Sert, T. K., Kara, C., & Kütük, S. (2020). Öğütülmüş kolemanit minerali ikameli beton yollardaki aşınma kaybının araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20, 287-295.
- Shaikha, A., Memon, N. A., Kumar, A., & Shaikhb, G. Y. (2024). Optimized use of pyrolyzed plastic waste in bitumen. *Journal of Tongji University*, 27(1).
- Sureshkumar, M. S. (2011). *Polymer modified asphalt nanocomposites (PMAN)* (Doktora tezi). Università di Pisa.
- Şahan, N., Oruç, Ş., Çavdar, E., Kumandaş, A., Kabadayı, E., & Kök, B. V. (2024). Investigation of the effect of boron oxide and beeswax on workability and high-temperature performance of bitumen. *Arabian Journal for Science and Engineering*.
- Şinoforoğlu, F. 2019. *Bor mineralinin bitüm katkı malzemesi olarak kullanılmasının taş mastik asfaltların mühendislik özelliklerine etkisi*. MSc. Dissertation, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2025). *Bor*. Erişim tarihi: 26 Mayıs 2025, <https://enerji.gov.tr/bilgimerkezi-tabiiKaynaklar-bor>
- Tabatabaee, H., Clopotel, C. S., Arshadi, A., & Bahia, H. (2013). Critical problems with using the asphalt ductility test as a performance index for modified binders. *Journal of the Transportation Research Board*, 84-91.
- Targan, Ş., Erdoğan, Y., Olgun, A., Zeybek, B., & Sevinç, V. (2002). Kula cürufu, bentonit ve kolemanit atıklarının çimento üretiminde değerlendirilmesi. In *I. Uluslararası Bor Sempozyumu* (pp. 259–265). Kütahya.
- Taşçı, A. (2010). *Piroliz edilmiş atık araç lastiklerinden elde edilen atık yağ ve karbon siyahı ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının reolojik özellikleri* (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Tayfur S, Ozen H, Aksoy A. Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Constr Build Mater* 2007;21:328–37.
- Topaloğlu, S., & Çetin, A. (2018). Ferrokrom cürufunun agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 6(2), 73-80.
- Tunç, A. (2001). *Yol tasarımının esasları ve uygulamaları*. Atlas Yayın Dağıtım.
- Tunç, A. (2004). *Yol tasarımının esasları ve uygulamaları* (253 s.). Asil Yayın Dağıtım.

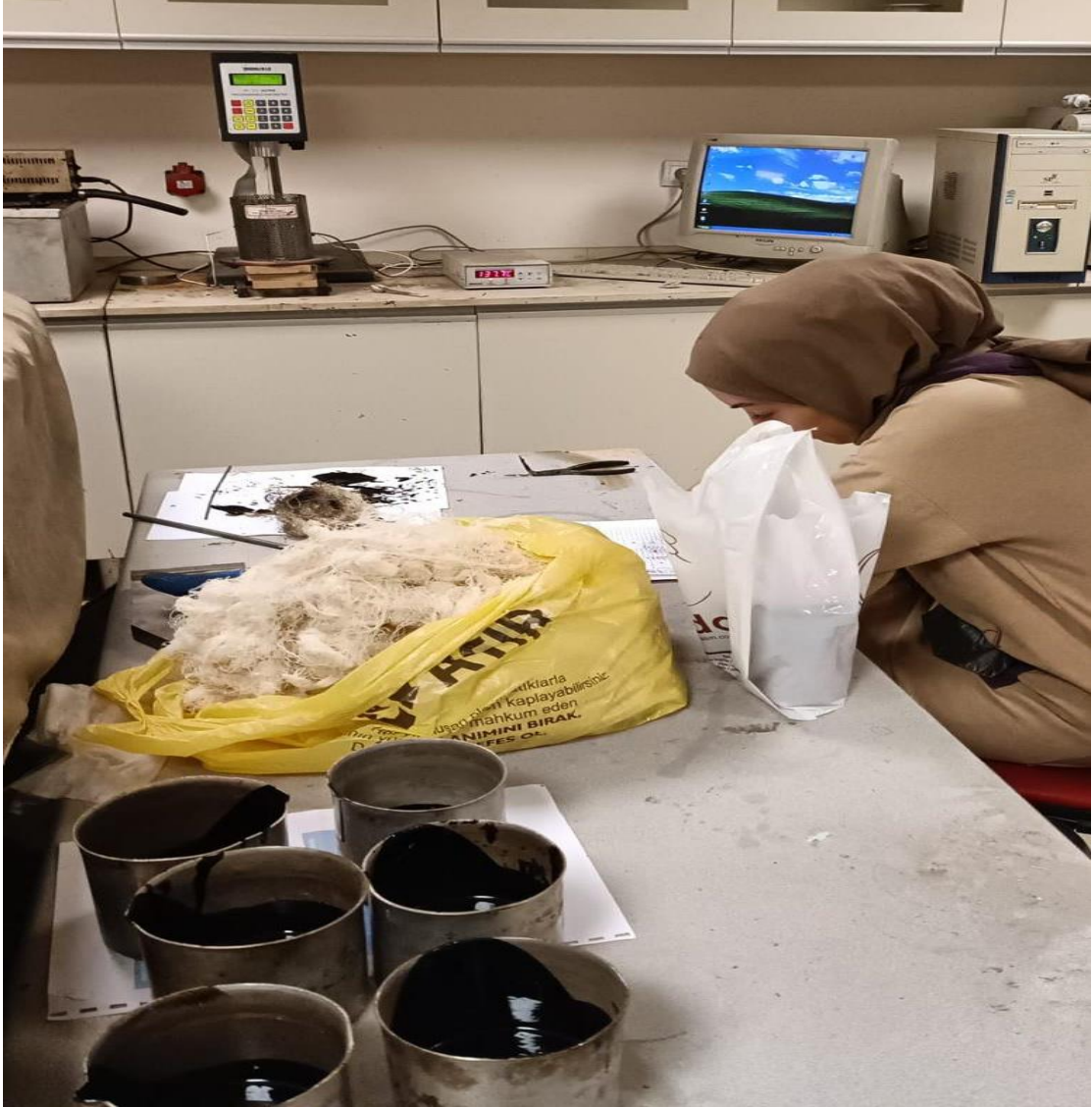
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2024). *Ulaştırma istatistikleri*. <https://www.tuik.gov.tr>
- Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2024). *2024 yılı ulaştırma istatistikleri*. <https://www.uab.gov.tr>
- Uncu, D. (2017). *Polimer modifiye bitüm özelliklerinin nanomalzemeler kullanılarak iyileştirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Uslu, K. (2024). *Borakstan çinko borat sentezi ve ürünün alev geciktirici olarak kullanılabilirliğinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi.
- Wang, H., et al. (2020). Effect of laboratory aging on chemistry and rheology of crumb rubber modified bitumen. *Materials and Structures*.
- Wei, H., Bai, X., Qian, G., Wang, F., Li, Z., Jin, J., & Zhang, Y. (2019). Aging mechanism and properties of SBS modified bitumen under complex environmental conditions. *Materials*, 12, 1189.
- Whiteoak, D. (2004). *Shell bitüm el kitabı* (Yayın No:3). İsfalt Bilimsel Yayınları.
- Yaltay, N., & Ekinci, C. E. (2013). Kolemanit katkılı ve pomza agregalı hafif betonların yüksek sıcaklık altındaki basınç mukavemeti özelliğinin tahribatsız yöntemle incelenmesi. *SDU International Technologic Science*, 5(2), 30-41.
- Yegane, M. (2023). *Farklı atık malzemelerden elde edilen biyo-kömür ile bitüm ve bitümlü sıcak karışımların modifikasyonu* (Doktora tezi). Ege Üniversitesi, İzmir.
- Yeşilçiçek, H., Bozdemir, G. M., & Oruç, Ş. (2023). Rheological properties of synthesised additives in hot mix asphalt. *Grağevinar*, (7), 679-694.
- Yeşilçiçek, H., Oruç, Ş., and 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, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129510>
- Yıldırım, K. (2022). *Kısa ve uzun dönem yaşlandırmanın modifiye bitümlerin reolojik özelliklerine etkisi* (Yüksek lisans tezi). Fırat Üniversitesi.
- Yılmaz, B. 2016. *Bor içerikli organik katkıyla modifiye edilen asfaltın performans özelliklerinin araştırılması*. PhD Dissertation, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon Türkiye)
- Zengin, A. İ., Aka, B., Gençay, S., & Uzun, M. (2023). Bor madeni ve endüstriyel uygulamaları. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (46), 161-178.
- Zhang, H., Lv, S., Pang, J., Chen, J., & Xuan, W. (2024). Effects of aging on rheological properties and microstructural evolution of SBS modified asphalt and crumb rubber modified asphalt binders. *Buildings*, 14(1722).

- Zhang, H., Zhang, Y., Chen, J., Liu, W., & Wang, W. (2024). Influence of preparation parameters on rheological properties and relation analysis of waste rubber modified bitumen mastic. *Frontiers in Materials*. <https://doi.org/10.3389>
- Zhang, Y., Xueyan, L., Apostolidis, P., Gard, W., Ven, M., Erkens, S., & Jing, R. (2019). Chemical and rheological evaluation of aged lignin-modified bitumen. *Materials*, 12(24), 4176.
- Zoorob, S. E., Kamaruddin, I. B., & Napiiah, M. B. (2014). The use of bitumen linear viscoelastic properties to assess rutting sensitivity. *Applied Mechanics and Materials*, 567, 755-762.



EKLER

EK-1 Deneylere ait diğ r görseller







EK-2 Nicholson soyulma testinde kullanılan Python programı kod bilgileri

Saf bitüm;

```
import cv2

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

# Görseli yükle

image_path = "C:\\Users\\Lenovo\\Downloads\\Nicholson Saf bitüm.png"

image = cv2.imread(image_path)

image_rgb = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2RGB)

gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

# Piksel koşulları

bitumen_mask = (gray >= 0) & (gray <= 20)

aggregate_mask = (gray >= 70) & (gray <= 229)

# Piksel sayısı

bitumen_pixels = np.sum(bitumen_mask)

aggregate_pixels = np.sum(aggregate_mask)

total_pixels = bitumen_pixels + aggregate_pixels

# Yüzde oranları

bitumen_ratio = bitumen_pixels / total_pixels * 100

aggregate_ratio = aggregate_pixels / total_pixels * 100

print(f"Agrega yüzey oranı: %{aggregate_ratio:.2f}")

print(f"Bitüm yüzey oranı: %{bitumen_ratio:.2f}")

# Görselleştirme için renkli maske

visual_mask = np.zeros_like(image_rgb)

visual_mask[bitumen_mask] = [255, 0, 0] # Bitüm: kırmızı

visual_mask[aggregate_mask] = [0, 255, 0] # Agregat: yeşil
```

```

# Görselleri karşılaştırmalı göster

plt.figure(figsize=(10, 5))

plt.subplot(1, 2, 1)

plt.imshow(image_rgb)

plt.title("Orijinal Görsel")

plt.axis('off')

plt.subplot(1, 2, 2)

plt.imshow(visual_mask)

plt.title("Bitüm (kırmızı) & Agregat (yeşil)")

plt.axis('off')

plt.tight_layout()

plt.show()

%2 OEKB katkılı bitüm;

import cv2

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

# Görseli yükle

image_path = "C:\\Users\\Lenovo\\Downloads\\Nicholson %2 OEKB.png"

image = cv2.imread(image_path)

image_rgb = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2RGB)

gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

# Piksel koşulları

bitumen_mask = (gray >= 0) & (gray <= 20)

aggregate_mask = (gray >= 70) & (gray <= 229)

# Piksel sayısı

bitumen_pixels = np.sum(bitumen_mask)

```

```

aggregate_pixels = np.sum(aggregate_mask)

total_pixels = bitumen_pixels + aggregate_pixels

# Yüzde oranları

bitumen_ratio = bitumen_pixels / total_pixels * 100

aggregate_ratio = aggregate_pixels / total_pixels * 100

print(f'Agrega yüzey oranı: %{aggregate_ratio:.2f}%')

print(f'Bitüm yüzey oranı: %{bitumen_ratio:.2f}%')

# Görselleştirme için renkli maske

visual_mask = np.zeros_like(image_rgb)

visual_mask[bitumen_mask] = [255, 0, 0] # Bitüm: kırmızı

visual_mask[aggregate_mask] = [0, 255, 0] # Agregat: yeşil

# Görselleri karşılaştırmalı göster

plt.figure(figsize=(10, 5))

plt.subplot(1, 2, 1)

plt.imshow(image_rgb)

plt.title("Orijinal Görsel")

plt.axis('off')

plt.subplot(1, 2, 2)

plt.imshow(visual_mask)

plt.title("Bitüm (kırmızı) & Agregat (yeşil)")

plt.axis('off')

plt.tight_layout()

plt.show()

```

%5 OEKB katkılı bitüm;

```

import cv2

import numpy as np

```

```

import matplotlib.pyplot as plt

# Görseli yükle

image_path = "C:\\Users\\Lenovo\\Downloads\\Nicholson %5 OEKB.png"

image = cv2.imread(image_path)

image_rgb = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2RGB)

gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

# Piksel koşulları

bitumen_mask = (gray >= 0) & (gray <= 20)

aggregate_mask = (gray >= 70) & (gray <= 229)

# Piksel sayısı

bitumen_pixels = np.sum(bitumen_mask)

aggregate_pixels = np.sum(aggregate_mask)

total_pixels = bitumen_pixels + aggregate_pixels

# Yüzde oranları

bitumen_ratio = bitumen_pixels / total_pixels * 100

aggregate_ratio = aggregate_pixels / total_pixels * 100

print(f'Agrega yüzey oranı: %{aggregate_ratio:.2f}%')

print(f'Bitüm yüzey oranı: %{bitumen_ratio:.2f}%')

# Görselleştirme için renkli maske

visual_mask = np.zeros_like(image_rgb)

visual_mask[bitumen_mask] = [255, 0, 0] # Bitüm: kırmızı

visual_mask[aggregate_mask] = [0, 255, 0] # Agrega: yeşil

# Görselleri karşılaştırmalı göster

plt.figure(figsize=(10, 5))

plt.subplot(1, 2, 1)

plt.imshow(image_rgb)

plt.title("Oriijinal Görsel")

```

```
plt.axis('off')  
plt.subplot(1, 2, 2)  
plt.imshow(visual_mask)  
plt.title("Bitüm (kırmızı) & Agregat (yeşil)")  
plt.axis('off')  
plt.tight_layout()  
plt.show()
```

